

Mémoire

Auteur : Henriche, Jean-François

Promoteur(s) : Wellens, Joost

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/21496>

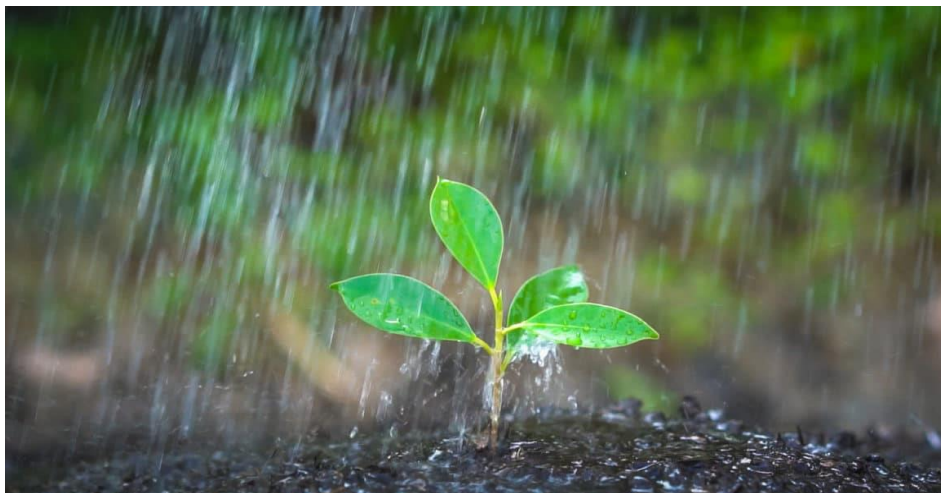
Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

LES PRATIQUES AGRICOLES PERMETTANT D'AMÉLIORER LE RESERVOIR EN EAU UTILISABLE MAXIMAL DU SOL : UNE REVUE DE LITTÉRATURE



HENRICHE JEAN-FRANCOIS

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT, A FINALITE SPECIALISEE**

ANNEE ACADEMIQUE 2023-2024

REDIGE SOUS LA DIRECTION DE JOOST WELLENS

**COMITE DE LECTURE :
CEDRIC MAGAIN
MOUSSA EL JARROUDI**

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège.

*L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : HENRICHE Jean-François
(jf.henriche@gmail.com)

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Joost Wellens pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur ce sujet enrichissant, ainsi que pour ses précieux conseils.

Je remercie également ma famille, dont le soutien inconditionnel, l'encouragement constant et la patience ont été des piliers essentiels tout au long de cette aventure académique.

Table des matières

1	Introduction	6
2	Le stockage d'eau par le sol	9
2.1	Qu'est-ce que le réservoir en eau utilisable maximal du sol ?	9
2.2	Les autres paramètres qui peuvent influencer la taille du RUM	11
3	Quelle est l'influence de la matière organique sur le RUM ?	13
3.1	La relation entre l'ajout de matière organique et la taille du RUM	13
3.2	Impacts du taux de matière organique sur le RUM	14
3.2.1	Les effets de l'apport de matière organique sur la teneur en eau à saturation, à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent	19
3.3	Les caractéristiques influençant la réaction du RUM à l'ajout de matière organique 20	
3.3.1	Le rôle de la texture du sol	21
3.4	Les autres effets bénéfiques de l'ajout de matière organique	23
3.5	Conclusion	23
4	Influence des arbres	25
4.1	Les besoins en eau des arbres	25
4.2	Les effets des racines des arbres	26
4.2.1	Décalage des cycles	26
4.2.2	Agencement des systèmes racinaires	27
4.2.3	Les avantages des racines profondes des arbres	28
4.3	Le microclimat produit par les arbres	32
4.4	Conclusion	33
5	Rôles des couverts végétaux	34
5.1	Impact sur la taille du RUM et la capacité de rétention	35
5.2	La problématique liée au climat, à la consommation d'eau par les couverts et au sol 37	
5.2.1	Le niveau des précipitations annuelles	39
5.2.2	La consommation d'eau par les couverts	41
5.2.3	Le type de sol	43
5.3	L'apport de matière organique par les couverts	43
5.4	Impact sur le potentiel hydrique	45
5.5	Impact sur le taux d'infiltration	46
5.6	Impacts sur la porosité	51
5.7	Impact sur la compaction	53
5.8	Impact sur l'agrégation	54

5.9	Impact des résidus de cultures	57
5.9.1	Teneur en carbone organique et résistance à la pénétration	57
5.9.2	Densité apparente	58
5.9.3	Capacité de rétention d'eau par le sol.....	59
5.9.4	Impact sur la capacité d'infiltration	60
5.9.5	Impact sur la teneur et le stockage en eau du sol.....	60
5.10	Conclusion	61
6	Le travail du sol	63
6.1	Les effets négatifs du labour	63
6.1.1	Impact sur la structure du sol.....	63
6.1.2	Impact sur la teneur en carbone organique	64
6.2	Les avantages et inconvénients d'un travail réduit ou nul du sol	65
6.2.1	Amélioration de la structure.....	66
6.2.2	Augmentation de la teneur en carbone organique.....	69
6.2.3	Augmentation de la taille du RUM	72
6.2.4	Inconvénients du semis direct.....	74
6.2.5	La combinaison du semis direct et d'autres pratiques	77
6.2.6	Conclusion	78
7	Conclusion	80
8	Bibliographie	82

Les pratiques agricoles permettant d'améliorer le réservoir en eau utilisable maximal du sol : une revue de littérature

1 Introduction

Les abus et les diverses erreurs de gestion des ressources en sols et en eaux sont souvent considérés comme des causes bien plus importantes du déclin de grandes civilisations en Afrique, en Orient et en Amérique que les évolutions climatiques. (Calvet, 2013)

Dans les pays développés, l'agriculture conventionnelle se caractérise généralement par des cultures annuelles peu diversifiées, un sol à nu durant plusieurs mois de l'année et la pratique régulière d'un travail de la terre sous la forme de labour. Ces techniques, qui se sont principalement développées au 19^{ème} siècle lors de la révolution agricole, avaient pour but d'augmenter les rendements afin de nourrir une population mondiale en constante croissance (Calvet, 2013). Ces méthodes semblent aujourd'hui avoir atteint leurs limites et produisent des effets néfastes sur l'ensemble de l'environnement et notamment la qualité et la santé des sols. Cette agriculture altère, entre autre, la capacité qu'ont les terres cultivées à retenir de l'eau (A. D. Basche & DeLonge, 2019). Les sols peuvent prendre des milliers d'années à se former et ne sont donc pas des ressources renouvelables (Calvet et al., 2021). Cela appuie d'autant plus sur l'importance de conserver les sols et leur santé. Aujourd'hui, nous souhaitons que l'agriculture puisse répondre à une demande alimentaire en augmentation à cause d'une population toujours plus grande (Abdollahi & Munkholm, 2014), mais que cette production se fasse avec des pratiques qui respectent l'environnement dans son ensemble, et le tout en vendant à un coût raisonnable des produits de qualité (Calvet, 2013).

Dans un climat en mutation dû aux activités des Hommes, les modèles prévoient, en plus d'une augmentation globale de la température, un risque grandissant de sécheresse en Europe occidentale et centrale (Thibaut & Ozer, 2021). Les températures plus élevées et les sécheresses plus fréquentes causeront une élévation du taux d'évapotranspiration qui causera une déplétion plus rapide de nos réserves en eau. Il a aussi été simulé qu'en Europe, le taux d'érosion hydrique des terres agricoles pourrait croître entre 13% et 22.5% d'ici à 2050 en comparaison avec les valeurs de 2016 (Panagos et al., 2021). Nous devons également nous attendre à une augmentation de l'aléa des événements météorologiques et ce y compris les pluies (Abdallah et al., 2021; Chakraborty et al., 2022). Cela signifie que les périodes de pluies ne correspondront

plus à ce que les gestionnaires connaissent et que des périodes de sécheresse pourraient prendre place à des moments critiques des cycles de croissances des cultures. Dans les prochaines années, il est prévu que les régions qui ont déjà des climats secs soient encore plus secs et que les régions humides le deviennent, elles aussi, encore plus (Lal, 2020). On estime aujourd'hui, qu'une personne sur deux pourrait être touchée par un manque d'eau à cause des évolutions du changement climatique (Zhang et al., 2019). Outre les risques humains, ces modifications du climat auront pour conséquence de diminuer les quantités d'eau disponibles pour l'agriculture (Abdallah et al., 2021). Il est reconnu qu'un changement dans la disponibilité de l'eau est le facteur qui impacte le plus le développement et la productivité des végétaux et donc des cultures (Liste & White, 2008), et ce de façon encore plus prononcée dans les régions au climat aride où la ressource est déjà rare (Ankenbauer & Loheide II, 2017; Lal, 2020; Liste & White, 2008). Le manque d'eau et la perte de sol via l'érosion auront des effets négatifs importants sur la fertilité des terres et par conséquent sur le rendement des cultures.

Pour tenter de limiter ces impacts, certaines recherches font la promotion de pratiques agricoles alternatives comme l'agriculture de conservation ou l'agroforesterie. Ces pratiques s'orientent vers un travail du sol limité, voir nul, une protection continue de la surface du sol et une mixité d'espèces cultivées. Ces méthodes de culture ont pour but de favoriser la biodiversité du sol, de permettre une meilleure séquestration du carbone et une hausse du stockage de l'eau grâce à des améliorations de différentes propriétés physique et chimique des terres (Araya et al., 2022; A. D. Basche & DeLonge, 2019; FAO, s. d.). Ces pratiques se veulent meilleures pour la santé des sols et pour lutter contre les effets néfastes de l'agriculture conventionnelle (perte de fertilité, érosion, ...) (Araya et al., 2022). Ces techniques de culture pourraient notamment permettre de faire évoluer les sols vers de meilleurs bilans hydriques en augmentant les entrées d'eau via l'infiltration et en réduisant les pertes via une limitation de l'érosion, du ruissellement (Abdallah et al., 2021) et de l'évaporation qui peut représenter jusqu'à 80% de l'eau perdue par le sol sous certains climats (López-Bellido et al., 2007). Grâce à une approche de l'agriculture qui intègre une réflexion autour de l'eau à tous les niveaux, notamment en ce qui concerne les conséquences des pratiques sur des paramètres tels que le ruissellement et l'évaporation, il semble être possible d'obtenir des rendements comparables à ceux des cultures irriguées, mais sans irrigation, seulement en favorisant un meilleur taux d'humidité dans le sol (Abdallah et al., 2021; A. D. Basche & DeLonge, 2019). Toutes les pratiques qui peuvent apporter des changements dans les propriétés de la surface du sol vont avoir un impact sur le taux

d'évaporation de ce dernier et peuvent donc le réduire pour favoriser le stockage de la ressource dans les terres (López-Bellido et al., 2007).

Ces techniques pourraient limiter la perte de capacité de rétention d'eau par les sols dû au changement climatique (Lal, 2020) mais aussi de permettre aux cultures d'utiliser l'eau de manière plus efficace afin de mieux résister aux périodes de sécheresse (Abdallah et al., 2021). Dans ce cadre, il a pu être démontré, en Argentine, que ces pratiques agricoles pouvaient permettre au sol de conserver un taux d'humidité suffisant pour répondre aux besoins des cultures pendant 1 à 3 jours lors de la période de floraison (Abdallah et al., 2021). On comprend donc que, via ces modes de fonctionnements, il serait possible de retarder le besoin d'utiliser des techniques d'irrigation.

Ces stratégies visent à rendre les systèmes agricoles plus résilients face au changement climatique en se concentrant sur les principes d'adaptation et d'atténuation (Abdallah et al., 2021; García-Tejero et al., 2020). Mais les agriculteurs montrent souvent une certaine réticence quant à modifier leurs pratiques car cela représente un bouleversement dans leur façon de gagner de l'argent (Aldaz-Lusarreta et al., 2022).

Ce travail a pour but, via une revue de la littérature, de répondre à la question suivante : Quels sont les effets de certaines pratiques agricoles sur la taille du réservoir en eau utilisable maximal du sol (RUM) ? Cette question s'inscrit dans le projet IrriLux qui a pour objectif d'étudier les possibilités d'accès et d'utilisation de l'irrigation pour les surfaces agricoles luxembourgeoise. Dans le cadre de ce projet, ce document a pour but de fournir les notions qui serviront à réaliser des simulations, notamment via le logiciel Aquacrop, des impacts de ces pratiques sur des situations concrètes d'exploitations agricoles au Grand-Duché de Luxembourg et de formuler des conseils pratiques à ces agriculteurs. Pour répondre à la question de recherche, ce document fait le point sur comment un sol peut stocker cette ressource. Ce texte explore quatre pratiques agricoles que sont l'ajout de matière organique, l'agroforesterie, les couverts végétaux et le semis direct, dans l'objectif de voir comment ces pratiques influent directement ou indirectement sur la taille du réservoir en eau utilisable maximal du sol.

2 Le stockage d'eau par le sol

Dans cette partie, nous allons voir quels sont les paramètres et caractéristiques du sol qui influencent la capacité de stockage d'eau par ce dernier. Pour cela, une explication est tout d'abord donnée sur la façon dont l'eau est retenue et comment elle peut se mouvoir dans les terres. Ensuite, le réservoir en eau utilisable maximal du sol est défini. Enfin, les caractéristiques qui influencent la taille de ce réservoir du sol sont définies et leurs relations sont exposées.

2.1 Qu'est-ce que le réservoir en eau utilisable maximal du sol ?

Tout d'abord, le sol est le résultat de l'assemblage en agrégats de particules qui ont toutes des compositions, des tailles et des formes différentes. L'eau peut se situer à la fois entre les particules qui forment les agrégats ainsi que dans les pores inter-agrégats mais également à la surface des particules (Arvalis-Institut du végétal, 2022). Les pores sont de tailles très variables mais il est possible de les classer de la manière suivante selon leurs diamètres : microporosité pour les pores d'un diamètre inférieur à $5\mu\text{m}$, mésoporosité pour ceux compris entre 5 et $50\mu\text{m}$ et macroporosité pour les pores dont le diamètre est compris entre 50 et $500\mu\text{m}$ (Gabriel et al., 2019). En fonction de leurs tailles, les pores exercent des forces de rétention de l'eau différentes, qui vont influencer la capacité des cultures à puiser dans cette eau. Le potentiel hydrique représente la force avec laquelle les particules de sol retiennent l'eau dans le milieu (Arvalis-Institut du végétal, 2022). Ce potentiel s'exprime en Pascal et plus il est négatif, plus l'eau est fortement retenue par les particules du milieu. L'eau présente dans la macroporosité se nomme l'eau libre, elle est facilement disponible pour les végétaux et ce sont ces pores qui assurent la mobilité de cette ressource dans le sol (Gabriel et al., 2019). L'eau capillaire occupe la mésoporosité et la microporosité mais cette portion de l'eau n'est pas entièrement disponible pour les cultures car plus les pores qu'elle occupe sont petits plus elle est retenue vigoureusement par les forces de capillarité du sol. Ce sont principalement les pores appartenant à la classe de la mésoporosité qui sont responsables de la rétention d'eau par le sol (Gabriel et al., 2019). L'eau d'adsorption quant à elle est retenue à la surface des particules de sol et elle n'est que très peu, voire pas du tout, absorbable par les plantes. Enfin, l'eau de constitution est indisponible car elle se trouve à l'intérieur des particules du sol (Arvalis-Institut du végétal, 2022; Ridremont et al., 2012).

La quantité d'eau que le sol est capable de stocker afin de la restituer par la suite aux végétaux s'appelle le réservoir utilisable (Arvalis-Institut du végétal, 2022). La taille de ce réservoir

dépend de certaines caractéristiques du sol telles que sa texture, sa profondeur et sa structure, mais aussi de la capacité des cultures à aller capter cette eau via la structure des racines (Arvalis-Institut du végétal, 2022). En plus de ce réservoir utilisable, il existe une autre notion relative au réservoir d'eau du sol. En effet, le réservoir utilisable maximal se concentre lui uniquement sur la capacité maximale du sol à stocker de l'eau sans prendre en compte les caractéristiques des cultures, et notamment l'agencement des racines (Arvalis-Institut du végétal, 2022). Ce RUM est calculé en faisant la différence entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement permanent (Ankenbauer & Loheide II, 2017; Arvalis-Institut du végétal, 2022).

Quand, à cause des précipitations, le sol se sature d'eau, cela signifie que l'ensemble des espaces vides présents, les pores, sont occupés par ce liquide. Une partie de cette eau, que l'on appelle l'eau libre, va s'écouler par gravité à travers la macroporosité. La quantité d'eau qu'il reste dans le sol, principalement dans la mésoporosité et microporosité, se nomme l'humidité à la capacité au champ et correspond au moment où le réservoir utilisable maximal (RUM) d'un sol est plein (Arvalis-Institut du végétal, 2022). Ensuite, plus le sol s'assèche, plus l'eau restante se situe dans des espaces plus petits et plus elle est fortement retenue par les particules du milieu. Les plantes ne peuvent pas utiliser l'entièreté du RUM car une partie est trop fortement liée aux particules de sol. (Arvalis-Institut du végétal, 2022; Ridremont et al., 2012). Le réservoir facilement utilisable par les plantes qui est estimé entre 50% et 70% du RUM représente donc la partie du réservoir réellement exploitable par les plantes (Arvalis-Institut du végétal, 2022). La capacité de rétention en eau d'un terrain est définie comme étant la différence de quantité d'eau retenue entre la borne de la capacité au champ et celle du point de flétrissement permanent (Irmak et al., 2018). A la capacité au champ (-33kPa), les plantes ont besoin d'exercer une force de succion relativement faible pour pouvoir prélever l'eau du sol. Mais, plus la teneur en eau diminue dans le milieu poreux, plus les plantes doivent fournir une force de plus en plus importante, jusqu'à arriver au point de flétrissement permanent (-1500kPa) (Ankenbauer & Loheide II, 2017). Les forces de succion utilisées ici pour représenter ces limites ne sont pas des valeurs fixes pour tous les sols. Ces limites varient en fonction de la texture du sol étudié, le point de flétrissement permanent se trouvant généralement à un niveau de force de succion plus faible dans les sols sableux que dans les sols argileux (Aldaz-Lusarreta et al., 2022). Cette capacité représente donc la relation qui existe entre une certaine teneur en eau présente dans le sol et un niveau de potentiel hydrique (Haruna et al., 2020).

La capacité de stockage d'eau par le sol représente également l'effet tampon de ce dernier vis-à-vis des aléas climatiques. Un sol capable de bien stocker de l'eau pourra permettre aux plantes de couvrir leurs besoins durant les périodes sèches mais aussi d'atténuer les risques d'inondations en limitant le ruissellement à sa surface. En améliorant cette capacité du sol, il est possible de rendre l'agriculture plus résiliente face au changement climatique en permettant au sol de stocker plus d'eau, de limiter le lessivage des nutriments et d'obtenir des rendements plus stables malgré les aléas météorologiques (Abdallah et al., 2021; Arvalis-Institut du végétal, 2022).

2.2 Les autres paramètres qui peuvent influencer la taille du RUM

Le sol est un milieu complexe dans lequel de nombreux paramètres évoluent et s'influencent en fonction des pratiques de gestion. Pour étudier le stockage de l'eau dans le sol, la taille du RUM est un paramètre essentiel. Cependant, les techniques agricoles créent des modifications de certaines propriétés du sol qui peuvent avoir des effets indirects sur la taille de ce réservoir.

Tout d'abord, un sol ne peut accueillir de l'eau en son sein que s'il comporte des espaces vides que l'on appelle pores. La porosité représente, sur le volume total de sol, le volume occupé par les pores (Duchaufour et al., 2020). C'est grâce à cette qualité que l'eau, l'air et l'activité biologique vont pouvoir circuler dans le milieu (Ridremont et al., 2012). La densité apparente représente la masse d'éléments solides d'un sol sur son volume (Lal & Shukla, 2004). La densité apparente et la porosité sont deux caractéristiques très liées l'une à l'autre. Cela signifie que quand des pratiques favorisent l'augmentation de l'une, l'autre diminue. La porosité peut se diviser en deux constituants selon l'origine des pores. On distingue la porosité texturale, qui comprend l'ensemble des pores présents dans les agrégats, de la porosité structurale qui représente des pores généralement plus grands qui se trouvent entre les agrégats et dépendant donc de la structure du sol. Seule la porosité structurale peut se voir modifier par les pratiques agricoles en modifiant la teneur en matière organique du sol, la porosité texturale relevant uniquement de la texture du sol considéré (Calvet, 2013; García-Tejero et al., 2020). La porosité est donc un paramètre qui est fort dépendant de la texture et de la structure du sol (Ridremont et al., 2012). La distribution de la taille des pores et leurs proportions sont aussi des facteurs qui permettent de nous informer sur la capacité du sol à retenir l'eau (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

La taille du RUM dépend aussi de la stabilité des agrégats et de la teneur en carbone organique. L'amélioration de la stabilité des agrégats à saturation permet une hausse de la proportion de

macropores et donc à une meilleure infiltration (Blanco-Canqui & Ruis, 2018). La matière organique joue un rôle de ciment entre les agrégats et est donc très importante pour conserver une bonne structure (García-Tejero et al., 2020). Du fait de sa nature moins dense, son ajout dans le sol permet d'en réduire la densité apparente (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

La texture et la structure sont donc deux caractéristiques déterminantes pour comprendre le comportement de l'eau dans un sol (Duchaufour et al., 2020).

3 Quelle est l'influence de la matière organique sur le RUM ?

La matière organique du sol est « tout ce qui est vivant ou a été vivant » (Calvet et al., 2021) et se compose de deux catégories principales :

- Les organismes vivants du sol : faune, micro-organismes et racines ;
- La matière organique morte : résidus de végétaux en surface (litière) et en profondeur (racines mortes), des cadavres de la faune et des micro-organismes (Calvet et al., 2021).

La matière organique morte représente environ 85% de la matière organique présente dans le sol (Calvet et al., 2021).

Le taux de carbone organique présent dans le sol est égal à l'apport venant des résidus de végétaux moins la perte via la décomposition par les micro-organismes présents dans la terre (processus de respiration du sol) et l'érosion (Ankenbauer & Loheide II, 2017). Afin d'accroître le taux de carbone organique d'un sol, il est donc nécessaire de mettre en place des pratiques qui vont apporter une quantité suffisante de matière organique tout en limitant sa décomposition ainsi que sa perte (Abdallah et al., 2021). Le taux de matière organique est un facteur ayant une grande influence sur la qualité générale d'un sol et sa présence pourrait permettre de rendre les terres plus résilientes face au changement climatique, et notamment aux sécheresses (Lal, 2020). Dans les sols cultivés, la teneur moyenne en matière organique varie entre 2% et 5% (Calvet et al., 2021).

3.1 La relation entre l'ajout de matière organique et la taille du RUM

Quel est l'impact de l'ajout dans le sol de matière organique sur la taille du RUM ?

Les recherches faites au sujet de l'implication de la matière organique sur la taille du RUM n'arrivent pas toutes à la même conclusion. En effet, certaines études prêtent à cette matière un rôle majeur sur la capacité de stockage d'eau par les sols, quand d'autres pensent qu'elle n'a qu'un rôle minime (Ankenbauer & Loheide II, 2017).

Les premières recherches à ce sujet pensaient que l'ajout de matière organique ne permettait pas au sol de développer un RUM plus grand (Hudson, 1994). Cependant, selon Hudson (1994), il existe bien une relation positive entre la teneur en matière organique d'un sol et la taille de son réservoir utilisable maximal par les plantes. En effet, dans son étude de l'impact de la

présence de matière organique sur la taille du RUM, l'auteur a décidé, contrairement aux travaux qui l'ont précédé, de tester la relation entre cette matière et la taille du réservoir en eau en ne faisant varier que la teneur en matière organique des échantillons et très peu leurs textures. Cela signifie, par exemple, qu'il a examiné comment évoluait la taille du RUM dans des échantillons de sols argileux dont la teneur en argile ne variait que très peu par rapport à la teneur en matière organique. Au moment de l'expérience d'Hudson, la pensée courante voulait que l'ajout de matière organique dans le sol fasse effectivement augmenter la limite de rétention à la capacité au champ, mais également la limite de rétention au point de flétrissement ce qui résulterait en une opération nulle. Dans sa recherche, Hudson a pu constater qu'effectivement les deux limites augmentaient, mais la limite de rétention d'eau à la capacité au champ augmente trois à quatre fois plus, en fonction des textures de sols, que la limite de rétention au point de flétrissement (Hudson, 1994). De part cette méthodologie, le chercheur conclut que, pour deux sols de textures similaires, le sol disposant du plus haut taux de matière organique aura un RUM plus grand que le sol ayant un taux plus faible de matière organique. Le fait de connaître cette relation de réciprocité positive entre la taille du réservoir utilisable maximal par les plantes et la quantité de carbone organique présent dans le sol est utile, car la texture d'un sol ne varie que très peu sur le long terme alors que la teneur en carbone organique est directement influencé par les pratiques culturales et est donc variable à plus court terme (Ankenbauer & Loheide II, 2017). Ce qui peut faire penser que le fait d'ajouter davantage de matière organique dans un sol peut être une bonne solution pour augmenter son stockage en eau.

3.2 Impacts du taux de matière organique sur le RUM

À la suite de l'étude d'Hudson (1994), nous savons désormais que la présence de matière organique dans le sol peut jouer un rôle dans la taille du réservoir utilisable par les plantes. Est-ce que le fait d'ajouter plus de matière organique dans le sol permet d'y stocker une plus grande quantité d'eau afin de lutter contre les risques croissants de sécheresse ? Si oui, quelle quantité de matière organique faut-il ajouter à un sol et pour obtenir quelle augmentation du RUM ?

Des études récentes ont pu démontrer que la relation entre l'augmentation du taux de matière organique dans un sol et sa capacité de rétention d'eau n'est pas aussi significative que ce que l'on pourrait parfois nous laisser entendre (Abdallah et al., 2021).

Dans leur étude de la question de l'ajout de carbone organique dans le sol afin d'en améliorer son réservoir en eau utilisable par les plantes, Minasny et McBratney (2018) ont pu définir, qu'en moyenne, l'ajout de 10g de carbone organique par kilo de sol (1%) permettait l'accroissement suivant de la quantité d'eau stockée (par 100mm de sol) :

- 2.95 mm à saturation
- 1.61 mm à la capacité au champ
- 0.17 mm au point de flétrissement permanent
- 1.16 mm de RUM (Minasny & McBratney, 2018)

Cependant, il a été constaté que ces augmentations étaient plus importantes dans les sols ayant des textures plus grossières, donc contenant une plus grande proportion de sable et moins d'argile (Ankenbauer & Loheide II, 2017; Lal, 2020). Pour ces sols sableux, les augmentations moyennes sont les suivantes :

- 4.6 mm à saturation
- 2.3 mm à la capacité au champ
- 0.9 mm au point de flétrissement
- 1.94 mm de RUM (Minasny & McBratney, 2018)

Ces chiffres permettent donc de suggérer que la teneur en matière organique représente un facteur plus important dans la taille du RUM des sols sableux et sablo-limoneux que pour les sols à texture plus fine comme les terres argileuses (Lal, 2020). Les valeurs moyennes pour ces derniers sols sont les suivantes :

- 3.2 mm à saturation
- 1.3 mm à la capacité au champ
- 0.5 mm au point de flétrissement
- 1.41 mm de RUM (Minasny & McBratney, 2018)

Ces valeurs de variations de la taille du réservoir utilisable par les plantes obtenues par Minasny & McBratney sont en concordance avec les résultats obtenus par Hudson en 1994 (Minasny & McBratney, 2018) et les valeurs mises en avant dans la revue de littérature d'Abdallah et al (2021).

Les effets positifs de l'ajout de matière organique sont de moins en moins importants à mesure que l'on augmente le taux de matière organique dans le sol. Effectivement, les effets les plus importants se font ressentir quand le sol passe de 0 à 1% de matière organique et diminue par

la suite (Minasny & McBratney, 2018). Dans une étude de plusieurs sols sableux, il a également été démontré que les effets les plus importants sur la taille du RUM se font lorsque l'on augmente de 1% la teneur en matière organique alors qu'elle se situait entre 0.5 et 1%. Au-dessus de 3%, cet ajout s'en retrouvait 3 à 4 fois moins efficace (Lal, 2020). De son côté, Hudson (1994) affirme que peu importe la texture du sol étudié le fait de faire passer sa teneur en matière organique de 1 à 3% ferait doubler la taille de son réservoir utilisable. L'auteur ajoute que pour un sol comprenant 4% de matière organique, cette dernière serait responsable d'environ 60% de la taille du RUM (Hudson, 1994).

Plus les sols contiennent un taux important de matière organique, plus ils sont capables de conserver un certain niveau de teneur en eau, même tardivement dans la période de croissance des cultures (figure 1). Cette meilleure capacité de rétention permet aux plantes d'être moins sujettes aux impacts du stress hydrique comme la réduction de la transpiration représentée dans la figure ci-dessous (Ankenbauer & Loheide II, 2017) et donc de pouvoir limiter les pertes de rendements. Ankenbauer & Loheide ont observé une forte relation de corrélation entre la teneur en eau retenue à saturation et la présence de matière organique dans le sol étudié. Selon eux, cela signifie que l'ajout ou la perte de matière organique a un impact réel sur la taille du réservoir utilisable par les plantes.

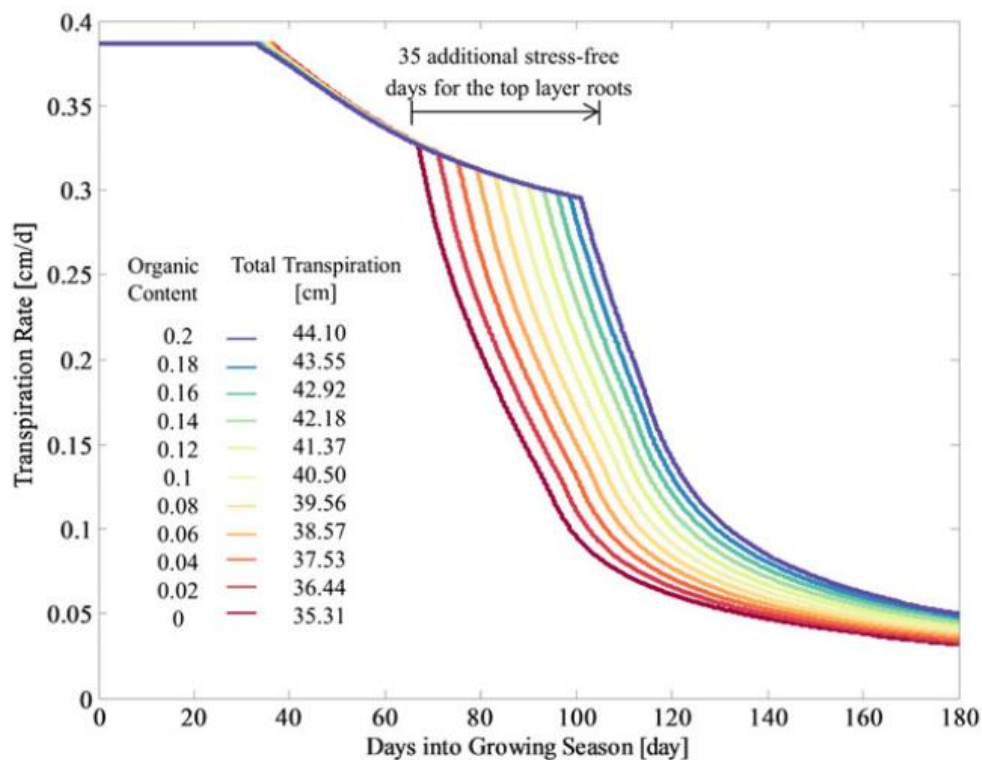


Figure 1 - Relation entre la quantité de matière organique présente dans le sol et la capacité de rétention d'eau - tiré de Ankenbauer et Loheide II (2017)

Dans leur étude de la relation entre la quantité de matière organique présente dans le sol et la taille du RUM, Irmak et al (2018), ont réalisé, afin de mieux comprendre cette relation, une simulation sur le logiciel « Soil-Water Characteristics Software » en renseignant les caractéristiques du sol de leur étude afin de voir comment la taille du RUM de ce dernier évoluerait en fonction de différentes teneurs en matière organique. Ils ont pu montrer qu'une augmentation de 0.2% de matière organique ne représentait qu'une augmentation de 0.30mm de la taille du RU sur les 30 premiers centimètres de sol. En simulant une augmentation de la teneur en matière organique de 0 à 8%, ils n'ont pu constater qu'une augmentation de 12mm du RUM (Irmak et al., 2018). Outre cette augmentation relativement légère, les auteurs rappellent qu'une augmentation de 8% de la teneur en matière organique peut prendre plusieurs décennies dans la réalité et que cela ne pourrait pas forcément être possible dans toutes les situations. Comme le montre la figure 2, après avoir atteint la teneur de 8%, les augmentations suivantes permettent un accroissement du RUM de moins en moins important et qui peut atteindre un plafond (Abdallah et al., 2021; Irmak et al., 2018). Cela signifie que l'ajout de matière organique dans des sols qui en sont déjà correctement pourvu ne permet pas de retenir encore plus d'eau (Abdallah et al., 2021).

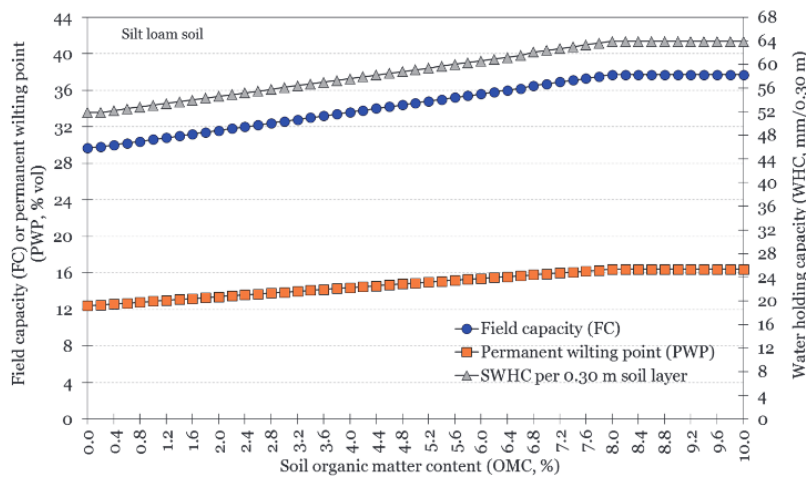


Figure 2 - Relation entre l'ajout de matière organique et l'influence sur la capacité de rétention du sol - tiré de Irmak et al (2018)

Une augmentation de cette teneur en matière organique peut donc avoir un impact sur la taille du RUM, même si cet impact tend à être assez faible. Les études sur le sujet ne prennent, souvent, en considération que les premiers centimètres de sol, comme c'est le cas avec la simulation citée précédemment qui se concentre sur les 30 premiers centimètres de sol, pour définir cette relation (Irmak et al., 2018). Les évolutions constatées se situent souvent dans les 5 ou 10 premiers centimètres, ce qui ne permet pas un accroissement du RUM sur l'ensemble du profil de sol (Abdallah et al., 2021). La plupart des plantes cultivées sur les surfaces agricoles ont des racines pouvant, généralement, aller jusqu'à 90cm de profondeur (Irmak et al., 2018). A cette profondeur, la matière organique prendra encore plus de temps à avoir un impact sur la taille du RUM et les plantes ne pourront pas nécessairement bénéficier de plus d'eau (Irmak et al., 2018). Dans certaines études, en plus de l'augmentation du taux de carbone organique présent dans les premiers centimètres de sol, il a pu être observé une diminution de cette teneur plus en profondeur. En ce qui concerne les effets de la matière organique sur les sols, il est donc essentiel de ne pas se contenter d'étudier les premières couches de sol mais bien de prendre en considération l'ensemble de la profondeur afin de constater les effets (Abdallah et al., 2021)

A la suite de l'exposition de ces chiffres, il est possible de constater que l'ajout de matière organique dans le sol a souvent pour effet d'augmenter sa capacité de stockage en eau. Cependant, les effets de cet apport semblent varier fortement entre les différentes bornes du RUM.

3.2.1 Les effets de l'apport de matière organique sur la teneur en eau à saturation, à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent

Comme le montre les chiffres précédemment exposés, nous pouvons remarquer que le paramètre qui subit la variation positive la plus importante est la limite de rétention à saturation (Hudson, 1994; Minasny & McBratney, 2018). C'est également le résultat trouvé par Ankenbauer & Loheide (2017), qui ont remarqué que dans les sols analysés, plus le taux de matière organique était élevé, plus ces sols pouvaient stocker une grande quantité d'eau à saturation. Cette rétention à saturation étant dépendante du niveau de porosité totale du sol, l'augmentation de la capacité de stockage à ce niveau permet de confirmer que la matière organique augmente la porosité du sol (Calvet, 2013). En outre, permettant une augmentation des espaces vides dans le sol, la matière organique permet de faire diminuer la valeur de densité apparente des terres (Hudson, 1994; Minasny & McBratney, 2018).

Il est également possible de constater une augmentation de la quantité d'eau stockée à la capacité au champ ainsi qu'au point de flétrissement permanent (Ankenbauer & Loheide II, 2017; Hudson, 1994; Minasny & McBratney, 2018). Cependant, l'augmentation de la teneur en eau au point de flétrissement signifie que les plantes ont accès à moins d'eau parce que pour un niveau de force de succion similaire l'humidité du sol est plus élevée (Ankenbauer & Loheide II, 2017). Néanmoins, il a été montré, qu'en moyenne, l'ajout de matière organique permet une hausse de la teneur en eau à la capacité au champ plus de 3 fois supérieure à l'augmentation de la teneur en eau au point de flétrissement (Hudson, 1994). Il semblerait donc que les sols contenant plus de matière organique ont un plus grand RUM car ils sont capables de stocker une plus grande quantité d'eau à la capacité au champ (Ankenbauer & Loheide II, 2017; Hudson, 1994). Cette différence d'accroissement permet donc bien d'agrandir la taille totale du RUM (Ankenbauer & Loheide II, 2017; Minasny & McBratney, 2018).

Si la taille du RUM augmente cela signifie que la quantité d'eau retenue à la capacité au champ a plus augmenté que la quantité d'eau retenue au point de flétrissement permanent (cas de figure du graphique (a) sur la figure 3). Cependant, dans certains sols, à la suite de l'ajout de matière organique, il est possible de constater une amélioration de la teneur à la capacité au champ et une amélioration similaire au point de flétrissement permanent. Dans ce cas, il n'y a pas d'amélioration de la taille du RU, même si on n'a pu constater un effet de l'ajout de matière organique (cas du graphique (b) sur la figure 3) (Lal, 2020).

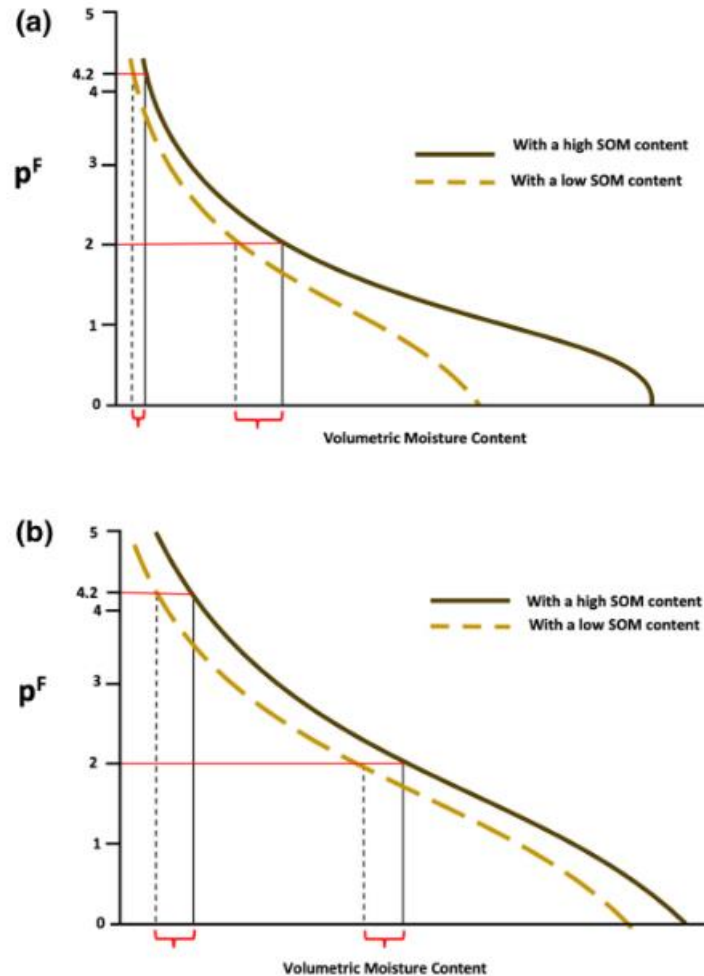


Figure 3 - Evolution des courbes p^F en fonction des effets de l'ajout de matière organique - tiré de Lal (2020)

3.3 Les caractéristiques influençant la réaction du RUM à l'ajout de matière organique

Comme il est désormais possible de le comprendre, les impacts que vont avoir l'ajout de matière organique dans le sol dans le but d'en augmenter la taille du RUM ne sont pas prédéfinis et dépendent principalement de 4 éléments (figure 4) (Lal, 2020) :

- 1) Les propriétés du sol : ici, nous nous intéressons particulièrement à la texture et la composition du sol, sa structure, son type d'argile, son pouvoir drainant et sa teneur initiale en matière organique.
- 2) Les caractéristiques de la parcelle : principalement la topographie du lieu.
- 3) Le climat : le bilan hydrique est l'élément principal à connaître dans ce cas.
- 4) Les pratiques : il est important de savoir dans quel but est utilisé la parcelle et donc de savoir comment celle-ci est gérée pour identifier les impacts de ces pratiques sur la relation entre la teneur en matière organique et l'évolution de la taille du RU (Lal, 2020)

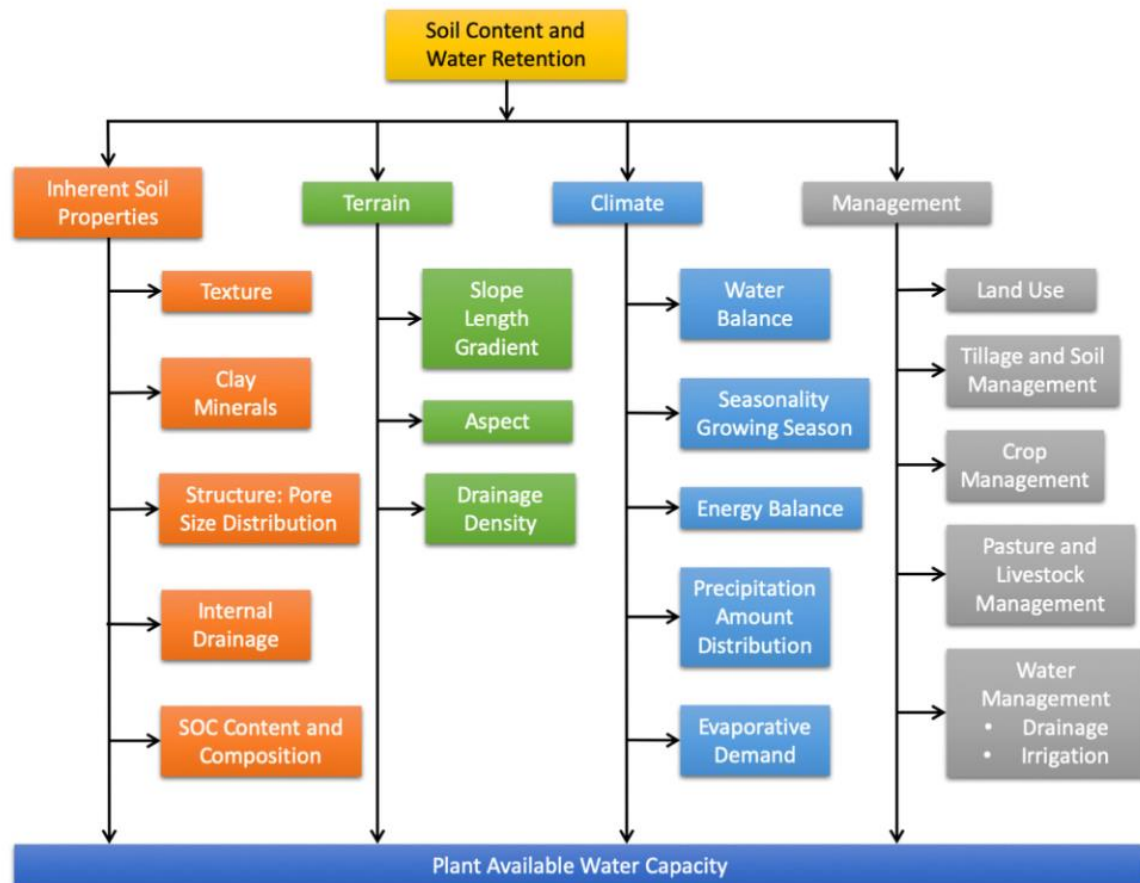


Figure 4 - Les facteurs qui influencent l'évolution du RUM lors de l'ajout de matière organique - tiré de Lal (2020)

3.3.1 Le rôle de la texture du sol

Une remarque intéressante venant de la recherche de Minasny & McBratney (2018) est qu'environ 25% des résultats pris en considération montrent une variation négative de la teneur à la capacité au champ quand il y a un ajout de 10g de carbone organique par kilo de sol. De plus, 2.5% des résultats montrent un comportement similaire pour le point de flétrissement et la réserve utilisable. Ces variations négatives surviennent principalement dans des sols argileux (Minasny & McBratney, 2018). Plus le sol contient une part importante d'argile, moins l'ajout de matière organique produira un effet important (Ankenbauer & Loheide II, 2017; Minasny & McBratney, 2018). Dans les sols principalement sableux avec peu d'argile, la teneur en matière organique est le principale facteur déterminant la taille du RUM (Ankenbauer & Loheide II, 2017). Au contraire, les sols comprenant plus de 40% d'argile ne présentent presque pas de variation de la teneur en eau suite à un ajout de 10g de carbone organique par kilo de sol (Minasny & McBratney, 2018). Il a été constaté que pour les sols ayant un taux de matière organique inférieur à 8%, la texture, à savoir la proportion de sable, de limons et d'argile qu'ils

contiennent, est le principal facteur qui influence la taille du RUM (Ankenbauer & Loheide II, 2017).

Par conséquent, l'ajout de matière organique a raison de 10g par kilo de sol ne permet pas une nette amélioration du réservoir utilisable par les plantes. Certaines études montrant des améliorations importantes de ce réservoir ont appliqué des charges de matière organique trop importante que pour être répliquées pour de grandes surfaces agricoles (Minasny & McBratney, 2018).

Comme spécifié précédemment, la texture du sol est un facteur important dans la relation entre matière organique et RUM. La texture va déterminer des caractéristiques telles que la porosité et l'agrégation mais influence aussi les composants de sa matière organique (Capriel et al., 1995; Lal, 2020). Il a pu être démontré qu'un sol sableux avait tendance à rendre sa matière organique plus hydrophobe alors qu'un sol plus argileux aura d'avantage de composants hydrophiles (Capriel et al., 1995; Lal, 2020). La matière organique des sols sableux a tendance à être hydrophobe car elle contient davantage de carbones alkylés qui sont des éléments qui n'interagissent pas bien avec l'eau (Capriel et al., 1995). Au contraire, les glucides et les protéines sont des composants hydrophiles mais ils sont rares dans les sols sableux car leurs présences nécessitent d'être retenues par adsorption sur des particules d'argile. En l'absence de cette adsorption, les composants hydrophiles sont plus vulnérables à la dégradation microbienne, ce qui explique leur rareté dans les sols sableux (Capriel et al., 1995).

Daynes et al (2013), ont pu trouver une relation linéaire entre le volume de pores d'un sol et l'ajout de compost, donc de la matière organique décomposée par des micro-organismes. Dans cette étude, une relation similaire a été établie pour la densité apparente. Pour maintenir une bonne structure du sol, il est nécessaire de fournir au sol suffisamment de matière organique et que la décomposition de cette matière puisse être stabilisée en la protégeant à l'intérieur des agrégats. Toujours dans cette recherche, afin que des agrégats stables à saturation puisse être formés par le sol, il a été nécessaire que ce dernier ait une teneur en matière organique d'au moins 6% (Daynes et al., 2013) :

De plus, les pratiques d'agriculture de conservation ne montrent pas des résultats constants quant à une augmentation de la séquestration de carbone dans le sol. Les effets de ces pratiques agricoles varient énormément en fonction de nombreux paramètres comme le climat, la durée depuis laquelle la pratique est utilisée, le type de sol, la stabilité des agrégats, la quantité de matière organique produite, etc. Certaines études ont pu indiquer que la période nécessaire pour

que ces pratiques agricoles produisent des effets notables sur le sol pouvait varier entre 20 et 28 ans (Abdallah et al., 2021).

Les hausses du taux de carbone organique observées se produisent le plus souvent dans les climats plus secs et chauds et moins dans des climats frais et humides (Abdallah et al., 2021).

Il n'y a donc pas encore de consensus sur la relation entre la teneur en carbone organique du sol et la taille du RUM (Abdallah et al., 2021).

3.4 Les autres effets bénéfiques de l'ajout de matière organique

Minasny & McBratney (2018) rappellent que, même si l'ajout de matière organique ne permet donc pas de nettement améliorer la capacité de rétention du sol, cette matière organique peut permettre d'autres avantages, notamment sur la structure du sol, importants pour la résilience face au changement climatique (Minasny & McBratney, 2018).

La présence de matière organique peut également permettre une meilleure capacité d'agrégation (Minasny & McBratney, 2018). Calvet et al (2021), ont pu mettre en avant une relation positive entre la croissance du taux de carbone organique et la taille et la stabilité des agrégats d'un sol. Cela est dû au fait que cette matière est un des principaux facteurs de création de la structure des sols car elle agit comme un agent liant pour les particules de ces derniers. En plus d'être elle-même un agent liant, la matière organique favorise l'activité des micro-organismes qui vont produire d'autres substances liantes, dont les principales sont les polysaccharides. Ces dernières tendent à s'associer avec des particules minérales, ce qui se traduit en une meilleure stabilité des agrégats. La présence de matière organique est donc un paramètre très important pour fournir au sol une bonne stabilité structurale. Sachant que la teneur en matière organique n'est pas une valeur stable dans les terres et qu'elle subit des dégradations, sa diminution entraîne une fragilisation de la stabilité de la structure du sol (Calvet et al., 2021). Il est donc important de faire des apports fréquents en matière organique afin de limiter sa perte et de favoriser une bonne qualité et stabilité structurale du milieu poreux.

3.5 Conclusion

La matière organique est donc composée d'éléments vivants et morts. La question de l'ajout de cette matière au sol pour en augmenter la taille du RUM est intéressante car si elle montre des effets positifs, sa teneur est aisément modifiable par des pratiques agricoles, contrairement à la texture du sol.

Il est possible d'estimer que l'ajout d'1% de carbone organique peut résulter en une hausse de 1.16mm de la taille du RUM. Mais cette augmentation n'est pas une vérité absolue. En effet, la texture du sol va influencer sa réponse. Les effets les plus notables sont remarqués sur les sols sableux alors que les sols argileux semblent ne pas présenter de modifications. De plus, le taux initial du sol joue également un rôle majeur. Dans les sols dont le taux est faible, l'ajout de matière organique semble avoir un effet marqué sur la taille du RUM, alors qu'aucun effet ne semble apparaître au-dessus d'un certain taux, 8% dans le cas repris dans ce travail. Le climat est aussi un facteur qui semble influencer la réaction du sol, avec les sols situés en climat sec profitant plus de l'ajout de carbone organique

Dans les cas où l'ajout de carbone organique a permis une augmentation du RUM, la capacité au champ a été la borne qui a connu le surcroît le plus important. Les améliorations sont principalement constatées dans la couche superficielle du sol (5-10cm) et les effets sont de moins en moins marqués à mesure que l'on va en profondeur.

Il est important de retenir que les avis des recherches repris dans ce travail ne montrent pas un consensus sur une possible relation positive entre l'ajout de carbone organique et l'évolution de la taille du RUM

Cependant, même si l'ajout de matière organique ne permet pas toujours d'augmenter la taille du RUM, cette matière a d'autres impacts positifs sur le sol et sa santé qui ne sont pas à négliger (figure 5) afin de favoriser les rendements des cultures.

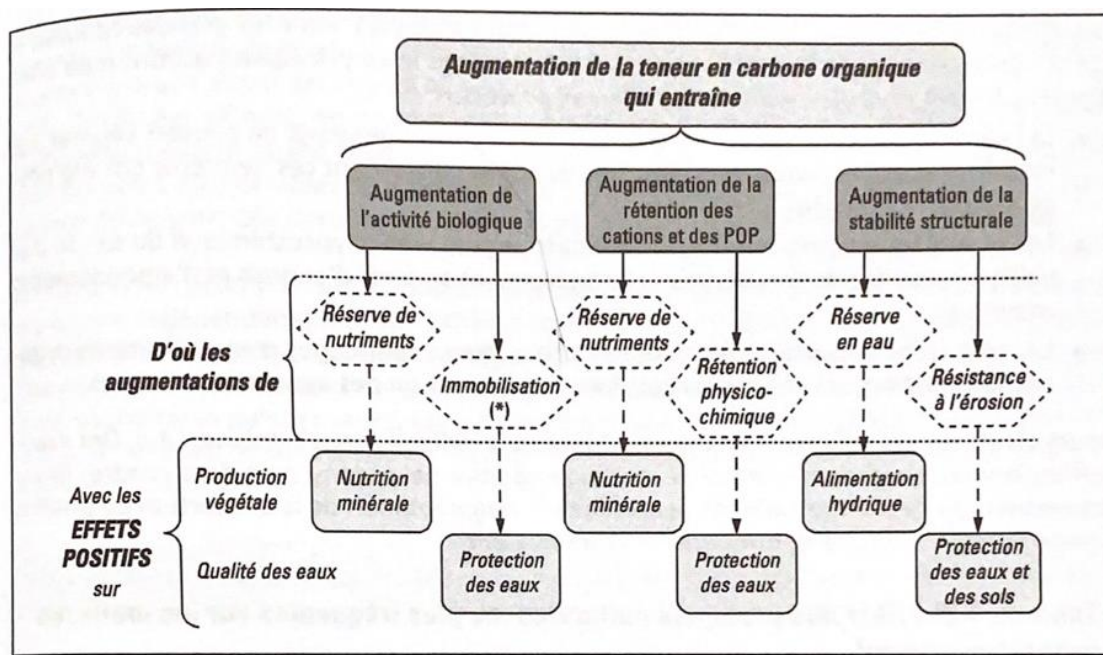


Figure 5 - Les effets bénéfiques de l'augmentation de la teneur en carbone organique du sol - tiré de Calvet et al (2021)

4 Influence des arbres

La combinaison d'arbres et de cultures est une pratique qui redevient de plus en plus populaire et qui semblerait apporter de nombreuses solutions à l'agriculture pour faire face aux effets du changement climatique. Cette combinaison qui porte le nom d'agroforesterie était déjà fort courante en Europe avant l'évolution vers la mécanisation des pratiques et peut simplement se définir comme étant « l'exploitation des terres avec une association d'arbres et de cultures ou animaux » (Dupraz & Liagre, 2019, p.35).

Quels sont les effets de l'implantation d'arbres sur la ressource en eau dans les parcelles de cultures ? Est-ce que la présence des arbres n'aura pas uniquement pour effet d'augmenter la compétition pour les ressources communes que sont l'eau, la lumière et les nutriments ?

Le système agroforestier peut produire des effets de compétition pour ces ressources mais également des processus de facilitation qui vont permettre à chacune des plantes de profiter de leur association. Ces effets de compétition ou de facilitation vont notamment dépendre des caractéristiques de la ressource. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à la ressource en eau que l'on sait stockable dans le sol, tout comme les nutriments, contrairement à la lumière qui n'est pas stockable de nature (Dupraz & Liagre, 2019).

L'agroforesterie qui est explorée ici se présente comme des rangées d'arbres entre lesquelles l'exploitant va semer des cultures annuelles. Un paramètre majeur qui va avoir une influence sur la façon dont la parcelle agroforestière sera gérée et sur les effets que l'association d'arbres et de cultures va produire sur les propriétés du sol est la densité de plantation des arbres (Dupraz & Liagre, 2019). Si le gestionnaire choisit de planter ces arbres à leur densité normale telle que dans des cultures forestières, alors il y aura moins de place pour les cultures intercalaires et les rendements obtenus seront négativement impactés. En avoisinant des densités allant de 20 à 50 arbres par hectare, cela permet d'obtenir un taux de rendement normal des cultures durant au moins la moitié de la vie des arbres en moyenne (Dupraz & Liagre, 2019)

4.1 Les besoins en eau des arbres

Afin de pouvoir étudier les interactions entre arbres et cultures relatives à la ressource en eau, il est tout d'abord important de comprendre les besoins hydriques des arbres.

De manière générale, ces besoins évoluent selon 3 phases différentes :

- Tout d'abord, dans le début de sa vie, l'arbre a de faible besoin en eau. C'est lors de cette phase que l'arbre est sujet à la taille de formation effectuée par les gestionnaires, ce qui réduit encore ses besoins (Dupraz & Liagre, 2019).
- Ensuite, quand l'arbre atteint un certain âge, il ne fera plus l'objet de taille et ses besoins en eau augmentent progressivement à mesure que son houppier se forme. Si l'arbre n'a pas accès à un réservoir suffisamment important, des signes de stress hydrique peuvent apparaître sur les cultures intercalaires (Dupraz & Liagre, 2019).
- Enfin, durant la phase adulte de sa vie, la consommation d'eau de l'arbre se stabilise car il a atteint les limites de son développement foliaire et racinaire (Dupraz & Liagre, 2019).

Ce bref aperçu de l'évolution d'un arbre permet de comprendre que la concurrence avec les cultures peut surtout se faire sentir lors de la deuxième phase de son évolution. Cela signifie également que pendant les premières années après la plantation des arbres, une parcelle agroforestière ne devrait pas être plus sujette aux risques de stress hydrique qu'une parcelle agricole conventionnelle.

Il est important de garder en tête qu'un arbre aura des besoins en eau très faible lorsque qu'il ne porte pas de feuilles (Dupraz & Liagre, 2019). La phénologie d'un arbre est donc un paramètre important à prendre en considération lors de la création d'une parcelle agroforestière.

4.2 Les effets des racines des arbres

Dans cette partie, nous allons spécifiquement essayer de comprendre comment les racines des arbres influencent le réservoir en eau du sol.

4.2.1 Décalage des cycles

Tout d'abord, il est possible de penser que la présence d'arbres sur des terres cultivées ne va qu'accroître la compétition pour la ressource en eau car leurs besoins vont s'additionner aux besoins des cultures, induisant une pression plus importante sur la ressource et donc augmenter la compétition (Coussement et al., 2018).

Mais cette compétition peut être limitée en associant des arbres et des cultures aux cycles décalés. Par exemple, en sachant que les racines des arbres ne prélèvent que peu de ressource en l'absence de feuilles, la mise en place d'une culture d'hiver avec une espèce d'arbre au débourrement estival, comme le noyer, peut permettre aux cultures associées de mieux user du stock d'eau dans le sol. Cela va également dépendre du cycle des pluies et donc du climat. Dans

un climat plus sec, si les pluies sont faibles au printemps alors la recharge du sol n'aura pas eu l'opportunité de se faire et les arbres vont manquer d'eau. Tandis que dans un climat où il pleut suffisamment au printemps, le stock d'eau dans le sol aura le temps de se régénérer et dans ce cas, le décalage des cycles permettra une optimisation de l'usage du réservoir en eau du sol (Coussement et al., 2018; Dupraz & Liagre, 2019). La dynamique des pluies a donc un effet important sur la pertinence de la mise en place de systèmes agroforestiers.

Créer un décalage de cycle permet de lisser la pression sur la ressource en étalant les besoins sur l'ensemble de l'année au lieu d'avoir un pic qui peut conduire à un stress hydrique suivi de toute une période où le réservoir du sol ne connaît pas de sollicitation. Ceci pourrait mener à des pertes par drainage.

4.2.2 Agencement des systèmes racinaires

Les arbres ont des systèmes racinaires très réactifs et pouvant faire preuve d'une grande capacité d'adaptation (Dupraz & Liagre, 2019).

Sous terre, les racines des arbres et des cultures peuvent rentrer en concurrence. En règle générale, une racine va avoir un rayon d'influence pour le captage de l'eau compris entre 5cm et 10cm (Arvalis-Institut du végétal, 2022). Une autre racine qui arriverait plus tardivement dans ce rayon d'influence ne serait plus en mesure de capter la ressource, il est donc important pour les racines d'être très réactives et capables de coloniser le sol avant ses concurrentes (Dupraz & Liagre, 2019).

Pour que les racines des arbres et celles des cultures ne soient pas sujettes à une concurrence trop intense qui nuiraient à leurs développements, il faut pouvoir faire en sorte que leurs zones d'influence soient séparées et donc qu'elles ne colonisent pas les mêmes horizons du sol. Pour cela, il est conseillé de mettre en place des cultures d'hiver entre les rangées d'arbres (Dupraz & Liagre, 2019). En effet, les racines des cultures d'hiver vont colonisées l'horizon superficiel du sol et commencer à l'assécher au tout début du printemps lorsque les arbres sont encore en dormance et donc que leurs racines ne sont pas en train de capter de l'eau. De plus, les racines des cultures annuelles sont souvent très denses et fines, ce qui leur permet une bonne colonisation de l'horizon superficiel du sol ainsi qu'une extraction efficace des ressources et notamment de l'eau (Dupraz & Liagre, 2019). Quand le développement foliaire des arbres va commencer, leurs besoins en eau vont s'accroître et, par conséquent, les racines vont devoir chercher à extraire cette ressource du sol. Cependant, l'horizon superficiel sera déjà colonisé et la ressource en eau y sera déjà exploitée. Les racines des arbres vont, de ce fait, devoir descendre

en profondeur pour aller extraire l'eau là où la concurrence est moindre (Dupraz & Liagre, 2019). Grâce à la présence des racines des cultures d'hiver, les arbres vont devoir développer un enracinement plus profond, ce qui représente un atout face aux sécheresses et permet une exploitation plus complète de l'ensemble du réservoir en eau du sol puisqu'un ensemble d'horizons sont utilisés. Dans les régions du monde où les étés sont forts secs, ce mécanisme permet aux arbres de subsister à leurs besoins. Sous certains climats présentant un été pluvieux, les racines des arbres auront tendance à remonter pendant la période estivale, ce qui permettra une moins bonne exploitation du réservoir en eau, une résistance à la sécheresse amoindrie et plus de concurrence entre les cultures associées (Dupraz & Liagre, 2019).

Nous avons vu comment s'associent les arbres avec des cultures d'hiver, mais en ce qui concerne les cultures d'été, l'évolution des différents systèmes racinaires mène à une concurrence accrue pour la ressource en eau. De fait, comme les racines des cultures n'auront pas eu le temps d'assécher l'horizon superficiel du sol avant que les racines des arbres ne recommencent à extraire de l'eau, ces dernières vont rester dans le même horizon que les racines des cultures (Dupraz & Liagre, 2019). Comme la ressource en eau est accessible proche de la surface, les racines des arbres n'auront pas de raison de descendre explorer des horizons plus profonds et cela engendrera une concurrence pour la ressource. En étant plus proche de la surface, les racines des arbres pourront bénéficier des pluies, même faibles, mais l'arbre sera plus sensible aux sécheresses (Dupraz & Liagre, 2019).

Il est donc conseillé d'associer les jeunes arbres à des cultures d'hiver afin de forcer l'installation des racines en profondeur. Une fois que l'arbre sera bien installé, il sera possible de commencer à l'associer à des cultures estivales. Selon les expériences de Christian Dupraz et Fabien Liagre, les racines des arbres sont très opportunistes et sont capables, parfois en une saison seulement, de remonter vers des horizons plus proches de la surface, ce qui les amène au conseil suivant : deux rotations de cultures d'hiver pour une culture d'été (Dupraz & Liagre, 2019).

4.2.3 Les avantages des racines profondes des arbres

4.2.3.1 L'ascenseur hydraulique

Précédemment, nous avons pu voir comment il est possible de diriger les racines des arbres vers des horizons de sol plus profonds. En plus de bénéficier d'une meilleure résistance à la sécheresse ainsi que d'une meilleure exploitation de l'ensemble de la ressource en eau, les racines profondes des arbres permettent au sol d'avoir une meilleure fertilité en allant récupérer

les nutriments entraînés vers des horizons plus profonds et de les remonter vers l'horizon superficiel dans lequel sont implantées les cultures (Dupraz & Liagre, 2019).

Outre ces effets sur la fertilité du sol, les racines des plantes, de manière générale, jouent un rôle important dans les déplacements de l'eau dans le sol (Liste & White, 2008). L'eau qui est captée par les racines d'une plante peut suivre le chemin habituel, dicté par un gradient décroissant du potentiel hydrique dans le continuum sol-plante-atmosphère, qui est d'être absorbé par les racines pour remonter par le xylème vers les parties aériennes de la plante pour enfin être diffusée, via le mécanisme de transpiration et à travers les stomates, sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère (Alagele et al., 2021; Guyot & Mamy, 2013). Cependant durant la nuit les stomates des feuilles sont fermés, la transpiration est donc réduite, mais l'eau qui a été stockée dans la plante et qui continue d'être absorbée par les racines fait monter la teneur en eau du végétal et donc son potentiel hydrique (Alagele et al., 2021; Liste & White, 2008). Si le potentiel des racines vient à devenir plus grand que celui du sol qui les entoure, ce qui arrive le plus souvent dans les couches proches de la surface, de l'eau peut être relâchée par les racines et venir augmenter la teneur en humidité de la terre (Liste & White, 2008). Ce phénomène porte le nom de redistribution hydraulique (Liste & White, 2008). Via cette redistribution, de l'eau est transférée depuis des racines qui ont accès à la ressource en eau plus en profondeur vers des horizons plus proches de la surface qui sont plus secs, c'est ce qu'on appelle le mécanisme de l'ascenseur hydraulique (Alagele et al., 2021; Coussement et al., 2018). Même si ce mécanisme n'est pas encore totalement compris (Alagele et al., 2021), il peut permettre de stocker de l'eau proche des racines qui sera réabsorbée en journée quand l'arbre en aura besoin (Dupraz & Liagre, 2019). L'eau peut donc être remontée par les racines mais aussi redescendue dans le cas où l'horizon de surface serait plus humide que les horizons plus en profonds (Burgess et al., 1998) ou distribuée latéralement, en fonction des besoins (Liste & White, 2008). Les racines des arbres sont donc capables de libérer de l'eau dès que leur potentiel devient supérieur à celui du sol (Burgess et al., 1998). La quantité d'eau qui peut être libérée dans le sol via l'ascenseur hydraulique peut représenter entre 17% et 81% des besoins journaliers de l'arbre (les grands arbres pouvant transpirer entre 350 et 600 litres d'eau par jour (Alagele et al., 2021)) (Liste & White, 2008). Les arbres ne sont pas les seuls végétaux chez qui ce mécanisme a été détecté. L'ascenseur hydraulique a notamment pu être constaté pour certaines variétés de graminées et de légumineuses (Liste & White, 2008). Les arbres restent tout de même les végétaux qui ont le potentiel le plus important dans ce processus car ils peuvent faire remonter une grande quantité d'eau de par leur consommation journalière mais aussi grâce à leurs racines qui peuvent

être suffisamment profondes que pour avoir accès à des nappes d'eau souterraines (figure 6) (Alagele et al., 2021).

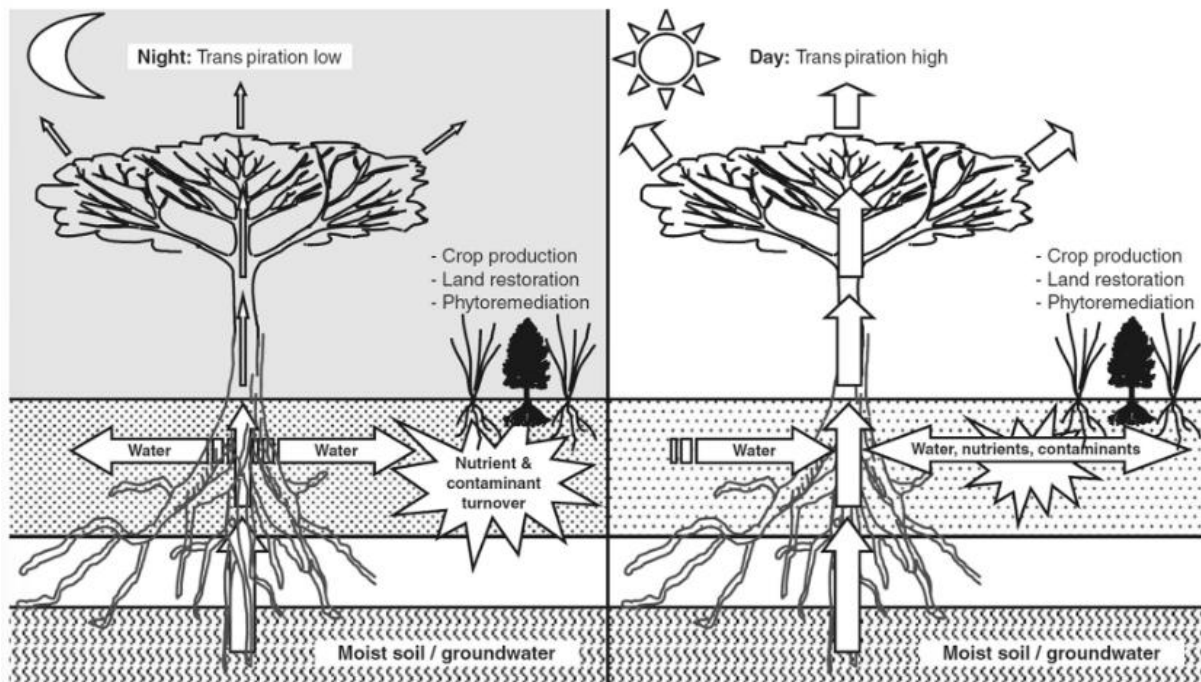


Figure 6 - Le processus d'ascenseur hydraulique et ces effets sur les plantes aux alentours - tiré de Liste & White (2008)

Selon Dupraz et Liagre, ce mécanisme ne profite que très peu aux cultures alentours (Dupraz & Liagre, 2019). Mais selon Coussement et al (2018), cette humidité qui est remontée et sécrétée par les racines peut devenir une source d'eau pour les cultures. Alagele et al (2021) et Liste et White (2008) sont également de cet avis. Il a pu être montré dans différentes études que des cultures, ayant des racines moins profondes, présentes autour d'arbres ont pu utiliser entre 3% et 60% de l'eau remontée par ces derniers (Liste & White, 2008).

Selon plusieurs études, l'association d'arbres et de cultures ne fonctionne pas car les rendements des cultures se voient trop affectés mais selon Liste et White (2008), ce problème viendrait principalement du fait que les arbres n'ont pas accès à une quantité d'eau souterraine suffisante. Pour que cette association fonctionne et que le mécanisme d'ascenseur hydraulique puisse avoir un impact sur les cultures à proximité, il est essentiel que l'arbre puisse utiliser l'eau présente plus en profondeur plutôt que l'eau qui est dans la zone des racines des cultures (Liste & White, 2008).

Le phénomène d'ascenseur hydraulique pourrait donc permettre, grâce aux racines profondes des arbres, d'apporter plus d'eau aux cultures voisines afin de les aider à lutter contre les sécheresses et de limiter les pertes de rendements (Alagele et al., 2021; Liste & White, 2008).

C'est un mécanisme intéressant dans la question de l'utilisation de l'eau en agriculture, et notamment en ce qui concerne l'irrigation. Cependant, l'intérêt autour du sujet de l'ascenseur hydraulique est encore faible (Alagele et al., 2021).

4.2.3.2 Amélioration du taux d'infiltration et diminution des risques d'érosion

La culture de plantes vivaces permet l'augmentation du taux d'infiltration du sol (plus grande amélioration constatée dans l'étude). En effet, les pratiques qui permettent au sol de conserver la présence de racines résultent en une meilleure structure (meilleure porosité et agrégation) de ce dernier et par conséquent une meilleure infiltration de l'eau (A. D. Basche & DeLonge, 2019). Ces effets seront davantage développés dans la partie de ce travail concernant les couverts végétaux. La pratique de l'agroforesterie peut aussi permettre un meilleur taux d'infiltration mais cela n'est pas dû à la présence d'arbres mais plutôt à celle de bande enherbée au pied de ces derniers. Ces bandes, en complément des racines des arbres vont favoriser l'infiltration de l'eau (Dupraz & Liagre, 2019).

La présence d'arbres va également permettre de réduire les risques d'érosion éolienne puisque ces derniers vont représenter des obstacles qui réduisent la vitesse du vent. En ce qui concerne l'érosion hydrique, les arbres ayant de petites feuilles peuvent réduire l'énergie des gouttes d'eau qui tombent sur le sol et donc limiter l'effet splash (détaillé dans la partie concernant les couverts végétaux) (Dupraz & Liagre, 2019). De plus, la présence des arbres, notamment sur des terrains en pente, permet de limiter le ruissellement à condition que les rangées d'arbres soient placées dans le sens opposé de la pente. Il a été remarqué que le terrain au pied des arbres avaient tendance à être plus élevé que dans le reste du champ à cause du travail du sol et de l'accumulation de matière organique (Dupraz & Liagre, 2019). Cette modification du terrain permet de réduire le ruissellement des eaux et de favoriser l'infiltration comme cela est illustré par la figure ci-dessous.

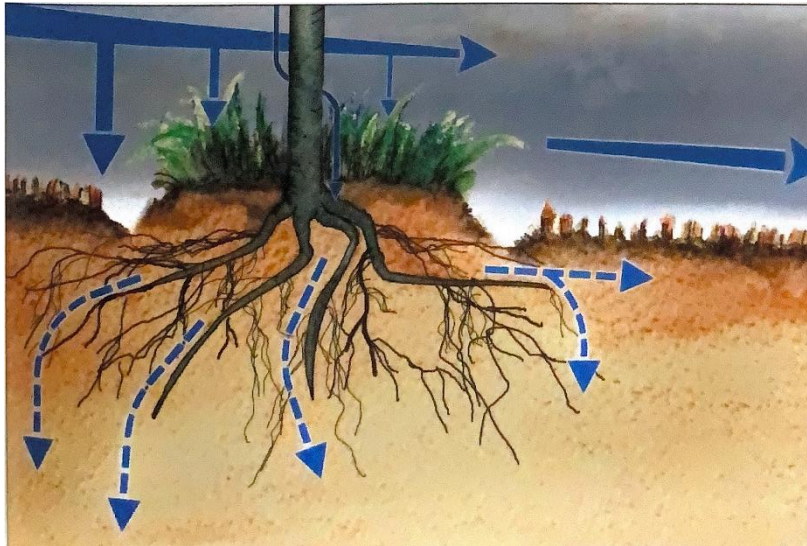


Figure 7 - Affaiblissement du ruissellement et augmentation de l'infiltration grâce à la présence d'arbres et de bandes enherbées à leurs pieds - tiré de Dupraz & Liagre (2019).

4.2.3.3 Apport de matière organique

Les arbres représentent également une source de matière organique pour le sol. Tout d'abord, sur les lignes d'arbres, de la végétation spontanée va se développer et permettre d'apporter un peu de résidus de culture au sol localement. Ensuite, en étant emportées par le vent en automne, les feuilles des arbres vont amener de la matière organique sur une surface plus étendue et qui profitera plus aux cultures (Dupraz & Liagre, 2019). Plus en profondeur, une partie des racines fines des arbres vont mourir chaque année et vont participer à l'accumulation du taux de carbone organique en se décomposant. Enfin, de par les opérations de taille des arbres, le branchage récupéré peut être transformé en broyats qui peut ensuite être épandus sur le sol afin d'en augmenter la teneur en carbone organique (Dupraz & Liagre, 2019).

4.3 Le microclimat produit par les arbres

L'autre impact majeur des arbres dans les systèmes cultivés est la création d'ombrage qui peut permettre au sol de conserver un meilleur taux d'humidité en réduisant l'évapotranspiration des cultures ainsi que de la surface du sol directement (Coussement et al., 2018; Czigány et al., 2023; Dupraz & Liagre, 2019). A l'ombre des arbres, la température peut être jusqu'à 10°C inférieure à celle en plein soleil. De plus, sur une parcelle agroforestière, du fait de la densité des arbres qui est plus faible que dans une forêt, ces arbres ont accès à plus de lumière ce qui a pour conséquence d'augmenter leur transpiration (Devilleers, 2024). Cette augmentation de transpiration permet, dans des conditions peu venteuses, de faire augmenter le taux d'humidité de l'air ambiant et donc de diminuer la transpiration des cultures. Cette transpiration foliaire des arbres permet aussi de réduire la température ambiante d'environ 1 ou 2°C (Devilleers,

2024). Globalement, la présence des arbres permet aussi de limiter les variations de températures (Dupraz & Liagre, 2019)

L'influence des arbres sur les conditions climatiques de la parcelle permet donc aux cultures de réduire leurs extractions d'eau du sol et d'être mieux protégées des intempéries (Dupraz & Liagre, 2019).

4.4 Conclusion

L'agroforesterie est un système qui a déjà fait ses preuves par le passé. Avant la mécanisation des pratiques agricoles, c'était une pratique très courante en Europe et qui semblait donc fournir de bons résultats.

Pour que cette association fonctionne, il est préférable d'associer des cultures d'hiver aux arbres, surtout pendant quelques années après leur plantation afin de forcer leurs racines à s'établir plus en profondeur. Des racines plus profondes permettront donc de limiter les risques de concurrence pour la ressource mais aussi de favoriser l'efficacité du processus d'ascenseur hydraulique dont les cultures peuvent bénéficier. La présence des arbres permettra également un meilleur taux d'infiltration, une réduction de l'érosion et une hausse de l'apport en matière organique. Ces arbres permettront aussi de limiter les besoins en eau des cultures en abaissant le taux d'évapotranspiration et de diminuer l'amplitude des variations de températures grâce à l'ombre et l'humidité ambiante produite.

Pour que cette association d'arbres et de cultures permette de mieux utiliser les ressources en eau, il faut que tout soit réfléchi en termes de complémentarité entre les espèces végétales cultivées.

Il faudra aussi prêter une grande attention à la dynamique des pluies de la zone de culture afin que le sol puisse effectuer sa recharge et ne pas créer de manque d'eau. Mais aussi à la disponibilité d'eau souterraine afin que les arbres puissent en faire usage.

5 Rôles des couverts végétaux

Les pratiques d'agriculture conventionnelle ont pour habitude de laisser la terre à nue pendant plusieurs mois de l'année (A. Basche & DeLonge, 2017). Après la récolte de la culture principale, rien n'est directement ressemé à la place, le sol est laissé en jachère et reste exposé jusqu'à ce que la végétation spontanée reprenne vie et le recouvre. Cette technique de la jachère est souvent utilisée dans les régions où l'eau est un facteur limitant de la production afin de favoriser son stockage pour la prochaine culture de rente (Garba, Bell, et al., 2022).

Cependant, nous savons aujourd'hui qu'un sol nu présente un risque d'érosion par l'eau (précipitations) ainsi que le vent, cela pouvant mener à une perte de productivité et de fertilité des parcelles agricoles (A. Basche & DeLonge, 2017). De plus, la mise en jachère n'est pas une pratique efficace pour conserver l'eau puisqu'environ 35% seulement de l'eau reçue via les précipitations sont stockées dans le sol (Garba, Bell, et al., 2022). Actuellement, nous savons aussi que cette pratique peut causer une diminution de la teneur en carbone organique (Garba, Bell, et al., 2022).

L'utilisation de couverts végétaux est une technique où des plantes sont semées pour occuper le sol durant l'automne et l'hiver et être détruites au printemps avant le semis de la culture de rente (García-González et al., 2018). Ces plantes ne sont pas destinées à la commercialisation mais plutôt à fournir des avantages écosystémiques afin de favoriser la culture suivante (Haruna et al., 2020). Cette pratique attire un intérêt grandissant car elle permettrait notamment :

- une amélioration globale de la fertilité des sols (Araya et al., 2022; Irmak et al., 2018) ;
- un apport naturel en azote (via l'utilisation de légumineuses pour fixer dans le sol l'azote atmosphérique) et d'éviter le lessivage de ce dernier durant la période hivernale (Gabriel et al., 2019; García-González et al., 2018; Irmak et al., 2018) ;
- un apport en matière organique afin d'augmenter la teneur en carbone organique des sols (A. D. Basche et al., 2016; Chakraborty et al., 2022; Garba, Bell, et al., 2022) ;
- une séquestration plus importante du carbone atmosphérique (Blanco-Canqui & Ruis, 2020) ;
- une réduction de l'érosion hydrique et éolienne en fournissant une protection aux sols (Aldaz-Lusarreta et al., 2022; Araya et al., 2022; A. Basche & DeLonge, 2017; Gabriel et al., 2019) ;
- une meilleure gestion des ressources en eau, notamment via une amélioration de la capacité de rétention et d'infiltration (A. D. Basche et al., 2016; Irmak et al., 2018) ;

- l'amélioration des propriétés physiques du sol (structure, porosité, ...) (A. D. Basche et al., 2016; Irmak et al., 2018) ;
- une réduction des risques de maladies pour les cultures (Araya et al., 2022; Gabriel et al., 2019) ;
- et une vie microbienne du sol plus riche, plus diversifiée et plus active (Araya et al., 2022).

Outre ces avantages, il semble que cette pratique soit aussi la cible de critiques. Certaines personnes s'inquiètent du fait que l'utilisation de couverts végétaux puissent réduire la quantité d'eau disponible au moment du semis de la culture de rente à cause d'une quantité d'évapotranspiration plus importante pour les cultures de couvertures que pour les jachères (Chakraborty et al., 2022). De plus, pour protéger les terres contre l'érosion, les cultures doivent avoir un développement foliaire suffisant (Araya et al., 2022). Mais les couverts qui produisent de grande quantité de biomasse sont assimilées à une réduction de la teneur en eau, c'est notamment le cas des cultures appartenant à la famille des poaceae et des brassicaceae (Garba, Bell, et al., 2022). Comme toute chose, cette pratique présenterait donc également des inconvénients comme la problématique décrite précédemment sur la quantité d'eau disponible mais aussi une réduction des nutriments, une perte de rendement et une augmentation des coûts de gestion (Garba, Bell, et al., 2022).

Dans cette partie, nous allons explorer les différents impacts que peut avoir l'utilisation de culture de couverture sur les différentes caractéristiques qui peuvent influencer le RUM.

5.1 Impact sur la taille du RUM et la capacité de rétention

Dans la revue de littérature de Basche & DeLonge (2017), les auteurs ont pu mettre en avant une augmentation de la taille du RUM grâce à une croissance de 9% de la teneur maximale en eau à la capacité au champ dont les couverts végétaux sont à l'origine. Cette amélioration montait jusqu'à 12% pour les sols des régions où les précipitations sont inférieures à 900mm par an (A. Basche & DeLonge, 2017). Dans une autre étude, ils ont pu constater que la quantité d'eau stockée dans le sol (dans les 30 premiers centimètres), durant la période de croissance de la culture de rente qui suivait les cultures de couvertures, était plus élevée que sans culture de couverture au préalable (A. D. Basche et al., 2016). L'étude de Basche et al (2016) a permis de mettre en évidence une amélioration de la teneur en eau maximale à la capacité au champ de 10% sur les 30 premiers centimètres de sol mais pas d'amélioration en ce qui concerne le point de flétrissement permanent. Cette amélioration de la borne supérieur a permis une augmentation

de la taille du RUM de plus de 20%, en comparaison au traitement sans plantes de couvertures (A. D. Basche et al., 2016). Dans l'étude de Gabriel et al (2019), une amélioration significative de la teneur en eau à saturation a permis d'augmenter la taille du RUM de 20% à une profondeur de 40cm. Dans ce cas, l'augmentation de la RUM a permis de limiter la compétition pour l'eau entre les cultures de couvertures et la culture de rente (Gabriel et al., 2019). Haruna et al (2023) ont également remarqué une plus grande capacité de rétention d'eau par le sol à des niveaux de potentiel hydrique élevé dans le cas de l'utilisation de couverts.

Selon la revue de littérature élaborée par Blanco-Canqui & Ruis (2020), la pratique des couverts végétaux n'a que peu d'effets sur la taille du RUM des sols. En effet, dans les 10 études prises en considération par ces auteurs, seulement 3 présentaient une augmentation de la taille du RUM à la suite de l'utilisation de couverts végétaux. Dans ces 3 études, les améliorations constatées pour la teneur en eau à la capacité au champ sont de l'ordre de 2 à 4% et de 0.8 à 3% pour la taille totale du RUM. En ce qui concerne la borne du point de flétrissement permanent, les chercheurs n'ont pas constaté d'amélioration (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Les améliorations constatées grâce à l'utilisation de couverts végétaux sont donc relativement faibles et ne surviennent que dans 30% des cas.

Si dans les études citées précédemment l'utilisation de plantes de couvertures a pu être à l'origine d'amélioration du RUM de certains sols, d'autres recherches nous font part du fait que l'utilisation de couverts végétaux n'ont pas eu d'effets notables sur la capacité de rétention d'eau du sol et ce même après de longues périodes de pratique. Dans l'étude menée par Chalise et al (2019), l'utilisation de couverts végétaux n'a pas permis au sol d'avoir une meilleure capacité de rétention, sauf à saturation (0 hPa) (Chalise et al., 2019). Cette pratique, utilisée depuis 10 ans sur le site expérimental de l'étude, n'a donc pas permis au sol de retenir plus d'eau dans les niveaux de forces de succion utiles pour les plantes cultivées. De plus, dans l'étude menée par Irmak et al (2018), après 14 années d'utilisation de culture de couverture, il a été montré que la capacité de stockage d'eau dans le sol n'avait globalement pas évoluée. Pourtant, des améliorations de la teneur à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent ont bien été constatées. Mais ces dernières étant plus grandes pour le point de flétrissement (20%) que pour la capacité au champ (5%), la quantité d'eau disponible pour les plantes n'a pas pu se voir augmenter (Irmak et al., 2018).

Suite à ces études, il est possible de mettre en avant le fait suivant : quand les couverts impactent la capacité de stockage d'eau par le sol, cela se fait le plus souvent par une augmentation de la

capacité de rétention à des niveaux de potentiels hydriques proches de la saturation ou de la capacité au champ.

Il semble important de signaler que la teneur en eau à la capacité au champ est une caractéristique fortement dépendante de la texture et de la structure du sol (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). En outre, les sols contenant plus de 65% de sable montrent une augmentation plus importante de la limite de la capacité au champ (environ 10%), alors que les sols majoritairement argileux ne montrent pas d'amélioration de cette borne (A. Basche & DeLonge, 2017). La proportion d'argile présente dans la composition du sol joue un rôle majeur sur la taille du RU jusqu'à une teneur de 15%. Une fois le taux d'argile supérieur à ce chiffre, les variations de la taille du RU dépendent principalement d'autres facteurs (Irmak et al., 2018). Les sols avec des textures plus grossières, donc plus riche en sable, présentent donc une plus forte tendance à l'amélioration de leur RUM à la suite de l'adoption de la pratique des couverts végétaux (A. Basche & DeLonge, 2017).

L'utilisation de culture de couverture ne peut pas toujours permettre d'augmenter la taille du RUM mais cette pratique pourrait réduire la quantité d'eau qui est perdue par l'évaporation du sol grâce à l'effet de couverture. Il a été observé que les sols qui avait été recouvert par des cultures de couvertures gardaient un meilleur taux d'humidité à 15 et 30cm de profondeur durant la saison estivale (A. D. Basche et al., 2016). Les résultats liés à l'augmentation de la teneur en eau du sol via l'utilisation de cultures de couvertures ne sont donc pas unanimes. Ces résultats montrent que cette pratique nécessite une gestion précise et qu'elle ne produit pas des effets positifs sous tous les climats et types de sol (Garba, Bell, et al., 2022).

5.2 La problématique liée au climat, à la consommation d'eau par les couverts et au sol

Dans des climats semi-arides, l'utilisation de culture de couverture peut être la cause d'un épuisement plus rapide de l'humidité disponible pour la culture principale et donc d'une perte de rendement (Chalise et al., 2019; Garba, Bell, et al., 2022). Il a pu être montré que les cultures de couvertures pouvaient être à l'origine d'une réduction de la quantité d'eau disponible pour la culture suivante, soit à cause de leurs besoins ou d'une trop faible recharge via les précipitations entre la fin du couvert végétal et le semis de la culture de rente (Garba, Bell, et al., 2022). Ces impacts sur la quantité d'eau disponible et le rendement dépendent du climat et du type de sol mais aussi d'autres paramètres comme la durée de vie du couvert végétal, le type de couvert choisi, le travail du sol et la gestion de la culture de rente (Garba, Bell, et al., 2022).

Par exemple, dans l'étude de Chakraborty et al (2022), où les précipitations moyennes du site de l'étude sont de 620mm par an, il a été observé que le niveau d'eau des sols ayant accueilli des cultures de couvertures étaient plus faibles que ceux qui n'en avaient pas eu au moment du semis de la culture de rente. Après la culture de couverture, les niveaux d'eau stockés dans le sol étaient inférieurs pour l'ensemble des années étudiées. Ces niveaux étant entre 7 et 17% inférieurs à ceux sans culture de couverture le jour du semis de la culture de rente (Chakraborty et al., 2022). Gabra et al (2022) ont trouvé un résultat similaire de 18%. Dans l'étude citée précédemment, les cultures de couvertures ont permis d'avoir une teneur en eau du sol seulement supérieure dans 34% des cas étudiés (Garba, Bell, et al., 2022). Dans le cas de Chakraborty et al (2022), cette diminution de la teneur en eau au moment du semis n'a pas posé de réel problème puisque les précipitations ont pu combler cette différence et que les cultures de couvertures ont permis au sol de stocker plus d'eau par la suite.

Ce risque de réduction du stock d'eau est plus faible dans les régions du monde qui bénéficient de précipitations plus fréquentes et peut permettre au sol de réduire son temps à saturation mais aussi de semer plus facilement et plus précocement dans la saison (A. D. Basche et al., 2016; Blanco-Canqui & Ruis, 2020), cela peut notamment être utile dans les sols européens qui ont tendance à être hydromorphe (Calvet et al., 2021). Dans le cas étudié par Gabriel et al (2019), les cultures de couvertures utilisées depuis 10 années sur ce site n'étaient pas à l'origine d'une perte d'eau en comparaison à une jachère. Cependant, il a bien été constaté que les cultures de couvertures provoquaient un taux d'évapotranspiration plus élevé que dans le cas de la jachère. Mais, dans ce dernier cas, c'était le taux de drainage qui était plus important. Même si les cultures de couvertures avaient un taux d'évapotranspiration plus important, cela était contrebalancé par un taux de drainage plus faible et ne résultait donc pas en une plus faible disponibilité en eau pour la culture de rente suivante (Gabriel et al., 2019). Dans les champs où des couverts végétaux ont été semés, il peut être constaté que les quantités d'eau perdues par drainage sont plus faibles que dans une jachère. Il a également été rapporté que les cultures de couvertures pouvaient repousser le début du drainage à plus tard et permettaient de stopper ce phénomène plus tôt dans la saison (Daryanto et al., 2018). Cette réduction du drainage peut donc permettre de limiter les risques de pollution des eaux souterraines (via différents polluants dont les nitrates) (Gabriel et al., 2019). Les couverts permettent également au sol de se dégeler plus tôt dans la saison et donc de permettre une meilleure infiltration des précipitations ou de l'eau venant de la fonte des neiges (Daryanto et al., 2018). La bonne gestion de cette pratique devrait permettre de ne pas limiter la quantité d'eau disponible pour la culture de rente suivante,

et ce même dans les régions aux périodes plus sèches. Le réel problème peut apparaître quand il y a un manque de précipitations entre la fin de la culture de couverture et le semis de la culture de rente (Gabriel et al., 2019).

5.2.1 Le niveau des précipitations annuelles

La quantité de précipitations annuelles est un facteur important qui va grandement influencer les impacts de l'utilisation des couverts végétaux sur le sol. Il a été observé que dans des climats où les précipitations sont inférieures à 300mm par an, les couvertures végétales impactent négativement la teneur en eau du sol (-24%) ainsi que les rendements (-29%). Dans les zones où les précipitations sont d'environ 700mm, le rendement devient neutre et il a tendance à être en moyenne de 14,5% supérieur dans les zones à plus de 900mm par an (figure 8) (Garba, Bell, et al., 2022). Un point de bascule de 623mm de précipitations a pu être identifié par Garba, Bell et al (2022) comme étant la quantité de précipitation au-dessus de laquelle l'utilisation de culture de couverture a des effets neutres ou bénéfiques sur le rendement des cultures de rente et des effets négatifs en dessous de cette valeur. Dans les endroits du monde où les précipitations dépassent ce point de bascule, l'eau utilisée par les cultures de couverture est plus susceptible d'être compensée par une meilleure infiltration de l'eau, une diminution de l'évaporation et du ruissellement, et une augmentation du stockage de l'eau dans le sol due à une hausse de la teneur en matière organique. Au contraire, dans les régions où les précipitations sont inférieures à 623mm, la quantité moyenne de précipitation prévue durant la période de culture de couvertures doit être le critère principal qui va influencer le choix du type de couvert ainsi que la date de destruction de ce dernier (Garba, Bell, et al., 2022)

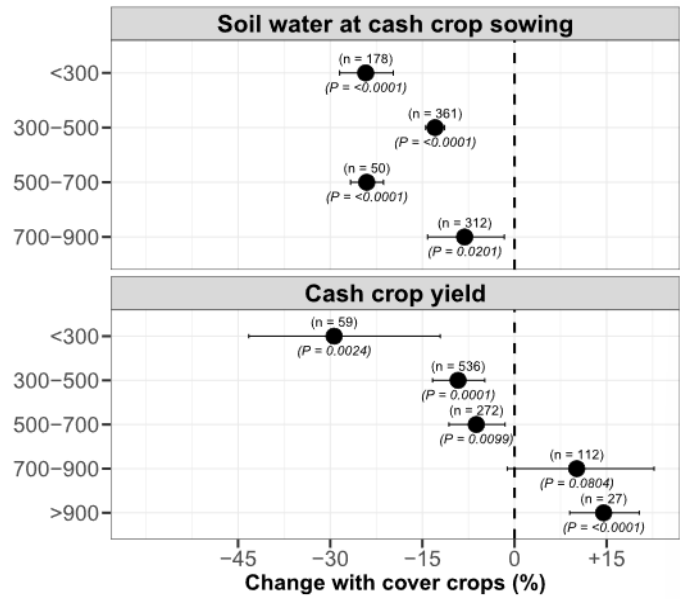


Figure 8 - Modifications provoquées par les cultures de couvertures sur la teneur en eau au moment du semis et le rendement de la culture de rente en fonction des moyennes de précipitations annuelles - tiré de Garba, Bell et al (2022)

Cependant, ce sont dans les régions du monde plus sèches (moins de 900mm de pluies par an) que les cultures de couvertures ont pu montrer des effets positifs plus importants sur les propriétés du sol (A. Basche & DeLonge, 2017). En fonction du type de climat, l'utilisation des couverts végétaux peut aussi exercer des influences différentes sur les taux de rendement (figure 9). En effet, il a pu être montré que les effets positifs de cette pratique sur les rendements prennent principalement place dans les régions où le climat est tropical ou continental (+14.5% et +4.4%). Mais dans les régions au climat sec ou tempéré, cette pratique peut causer une perte de rendement (-11.1% et -12.4%) (Garba, Bell, et al., 2022).

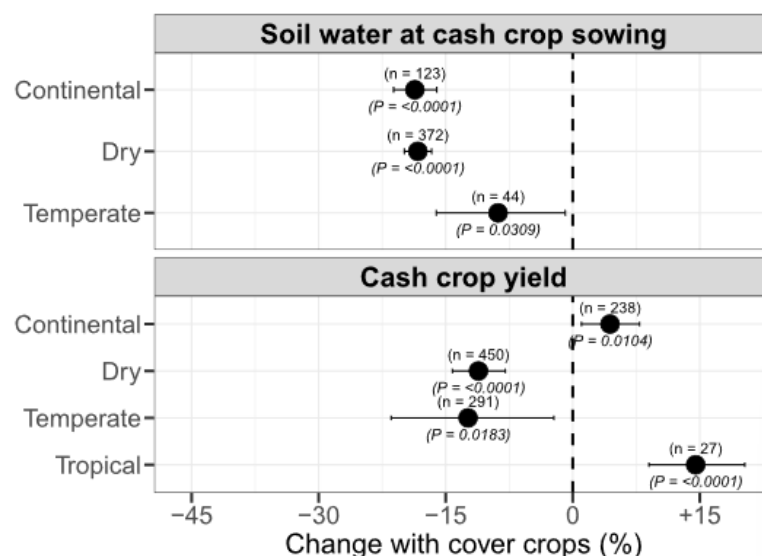


Figure 9 - Modifications provoquées par les cultures de couvertures sur la teneur en eau au moment du semis et le rendement de la culture de rente en fonction du type de climat - tiré de Garba, Bell et al (2022)

Nous pouvons facilement comprendre que dans un climat sec où les précipitations sont moindres, la diminution de la quantité d'eau disponible au moment du semis de la culture de rente due à la couverture végétale se caractérise par un manque d'eau. Cependant, dans un climat continental, cette diminution de la quantité d'eau disponible, comme montré par le schéma ci-dessus, peut justement représenter un avantage. En effet, dans ce type de climat, cette diminution est souhaitable car le sol a tendance à être à saturation. Cet effet permettra alors une meilleure infiltration (Haruna et al., 2020), un meilleur drainage, une date de plantation plus précoce et un meilleur développement des cultures (Garba, Bell, et al., 2022). Comme l'indique la figure ci-dessus, cette diminution de l'eau disponible est associée à une augmentation du rendement. On peut donc comprendre que la réduction de la disponibilité en eau a un effet positif direct sur les cultures ou que d'autres effets positifs des cultures de couvertures permettent de compenser le potentiel impact négatif de cette moindre disponibilité (Garba, Bell, et al., 2022).

Les précipitations sont donc un élément essentiel à prendre en considération quand la pratique des couverts végétaux est utilisée. Dans une année où les précipitations sont inférieures aux moyennes, il devient possible que cette pratique ait des effets négatifs sur la quantité d'eau disponible pour la culture de rente, comme cela a pu être montré par Garba, Fay et al (2022). S'il ne pleut pas suffisamment que pour recharger la RU du sol entre la destruction de la culture de couverture et le semis de la culture de rente, il faudra que les agriculteurs soient capables de s'adapter soit en décalant la date du semis ou en se tournant vers des espèces végétales moins consommatrices d'eau pour la culture de rente (Garba, Fay, et al., 2022).

5.2.2 La consommation d'eau par les couverts

Le temps que les agriculteurs laissent entre la date de destruction du couvert végétal et la date de semis de la culture de rente est aussi un élément important pour déterminer l'impact de la couverture végétal sur la teneur en eau du sol. La date de destruction doit donc être déterminée en fonction des besoins de la culture suivante afin de maximiser les bénéfices du couvert (Daryanto et al., 2018). Une destruction plus anticipée permet d'obtenir une meilleure teneur en eau au moment du semis car cela limite la quantité d'eau évapotranspirée (Daryanto et al., 2018; Garba, Bell, et al., 2022). Alors qu'une destruction tardive peut avoir un effet négatif allant jusqu'à moins 24% quand le couvert est détruit 120 jours après sa plantation. Il ne faut pas non plus négliger qu'une destruction plus anticipée du couvert va limiter sa production de biomasse et donc son effet de canopée sur le sol (Garba, Bell, et al., 2022). De plus, la méthode de destruction du couvert joue un rôle dans la teneur en eau disponible pour le semis. Trois

méthodes de destruction différentes du couvert végétal ont été analysées ; chimique (utilisation d'herbicide), l'intégration (utilisation d'herbicide puis incorporation mécanique au sol) et mécanique (enfouissement ou incorporation par disquage). En comparant ces 3 méthodes, seule l'intégration a permis de ne pas avoir d'impact négatif sur la teneur en eau au moment du semis et sur le rendement de la culture suivante (Garba, Bell, et al., 2022). La destruction tardive des couverts végétaux est une pratique qui favorise une plus grande accumulation d'azote dans les résidus et une libération de cet azote de manière coordonnée avec la croissance de la culture de rente (Daryanto et al., 2018). Mais cela induit une plus grande consommation d'eau. C'est pour cela que dans les régions où la ressource est limitante, il est intéressant de détruire les couverts de façon plus prématurée afin d'en limiter leur consommation (Daryanto et al., 2018).

Il n'y a pas de différences notables quant à la consommation d'eau par une monoculture d'un couvert végétal que par un mélange de plusieurs variétés végétales. Les couverts dont la majeure partie est constituée de colza fourrager, en plus d'avoir des résidus peu persistants, ont montré une forte consommation d'eau par rapport à une jachère (Garba, Fay, et al., 2022). Cette culture n'est donc pas à faire dans des régions où l'eau est déjà une ressource limitée comme c'est le cas sous les climats arides ou semi-arides. Il est important, surtout dans les régions dont les précipitations sont inférieures à ce point de bascule de 623mm, de se tourner vers des couverts végétaux qui puissent fournir un bon effet de canopée sans pour autant produire trop de biomasse qui augmenterait les besoins en eau et provoquerait donc un épuisement trop important du RU avant le semis (Garba, Fay, et al., 2022). La densité du semis du couvert végétal est également à prendre en considération en fonction des besoins en eau (Garba, Fay, et al., 2022)

5.2.3 Le type de sol

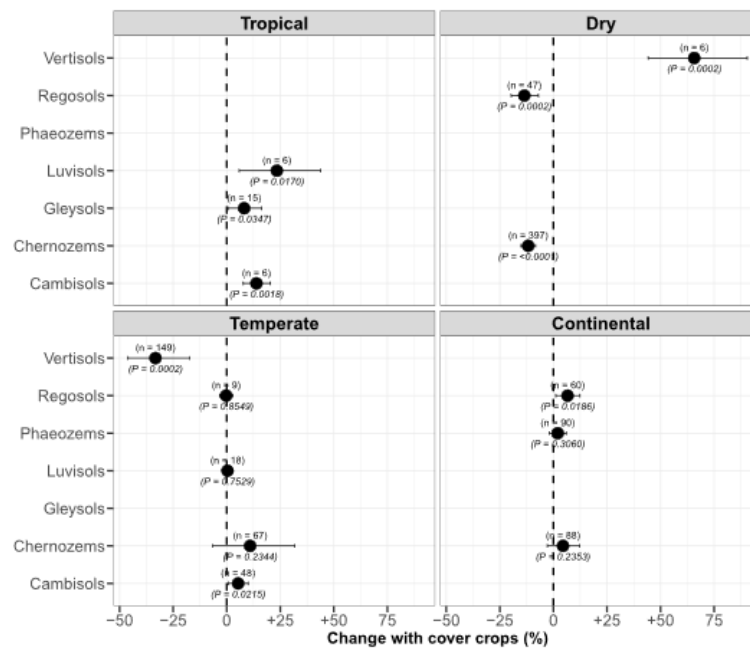


Figure 10 - Relation entre le climat, le type de sol et l'évolution des rendements des cultures suite à l'utilisation de couverts végétaux - tiré de Garba, Bell et al (2022)

La figure ci-dessus met en avant le fait que le type de sol aura un rôle à jouer sur la réponse des rendements à l'utilisation de couverts végétaux. Cela appuie davantage le fait que le type de sol influence la manière dont ce dernier répond aux pratiques agricoles. Selon la figure 11 de Garba, Bell et al (2022), il est possible de constater que dans un climat sec ou tropical, les sols dont la texture a tendance à être plus argileuse (vertisols, luvisols et gleysols) ont tendance à obtenir de meilleurs rendements à la suite de l'implémentation de couverts. Sous un climat tempéré comme dans une grande partie de l'Europe, on voit que les couverts n'affectent que très peu les rendements sur les différents sols, sauf dans le cas des vertisols qui sont très argileux. En climat continental, les rendements ne montrent pas non plus de changements significatifs.

Il semble donc essentiel de bien prendre en compte le type de sol ainsi que le climat de notre région quand nous souhaitons travailler avec des cultures de couverts.

5.3 L'apport de matière organique par les couverts

Afin d'espérer pouvoir augmenter la taille du RUM, les cultures de couverts doivent, entre autres, être à l'origine d'apport en matière organique pour le sol (Irmak et al., 2018). Les couverts apportent de la matière organique via la biomasse aérienne mais aussi leurs racines (Calvet et al., 2021). Si certaines études montrent un effet positif des couverts sur le taux de carbone organique présent dans le sol, comme c'est le cas de la revue de littérature de Daryanto

et al (2018) qui met en avant une augmentation moyenne de 9% de la concentration en carbone organique après la destruction de la couverture végétal, cette pratique ne permet pas toujours d'augmenter la teneur en carbone organique des sols (Irmak et al., 2018). Et même si cela est le cas, nous avons pu comprendre, dans la première partie de ce travail, qu'une augmentation de cette teneur ne permet pas toujours d'augmenter la taille du RUM. Dans les cas où il n'y a pas eu d'améliorations du taux de carbone organique suite à l'utilisation de couverts végétaux, il est possible que cela soit dû à la pratique de travail du sol. En effet, la pratique du labour va favoriser la minéralisation du carbone en exposant la matière organique du sol à l'activité microbienne, ce qui provoque une diminution du taux de carbone organique qui ne peut pas toujours être compensée par l'apport des couverts (Daryanto et al., 2018). Une autre explication de l'absence de changement ou de la diminution de ce taux suite à l'introduction de culture de couvertures est le fait que cette pratique, en apportant une plus grande quantité de biomasse que dans le cas d'une jachère, va stimuler l'activité microbienne du sol. Cette stimulation va causer une plus grande minéralisation de la matière organique, ce qui peut résulter en une diminution ou une stagnation du taux de carbone organique présent dans le sol. Cependant, après un certain temps d'adaptation, l'activité microbienne va se stabiliser sa consommation de matière organique via le processus d'immobilisation (processus par lequel un élément qui a été minéralisé par un microorganisme va être absorbé par un autre microorganisme pour se nourrir) et le taux de matière organique pourra à nouveau augmenter (Haruna et al., 2020).

De plus, dans les cas où une augmentation de la teneur en matière organique du sol est constatée, cela se limite aux premiers centimètres du sol. C'est notamment ce qui est rapporté par García-González et al (2018), les auteurs ayant pu constater une augmentation de la teneur en carbone organique durant les 10 années de leur étude (figure 11) Mais nous pouvons constater que l'évolution de ce taux se fait principalement dans les 5 premiers centimètres de sol alors que la couche inférieure voit son taux rester stable (García-González et al., 2018).

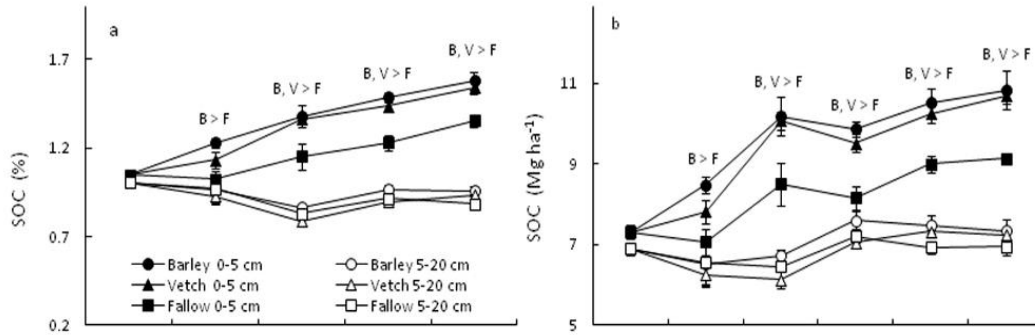


Figure 11 - Evolution temporelle de la teneur en carbone organique (SOC), exprimée en % et en Mg.ha(-1) tiré de García-González et al (2018)

Dans des sols déjà riches en matières organiques (plus de 19%), les apports permis par les cultures de couvertures n'auront que très peu d'impacts sur le RUM (Irmak et al., 2018).

Les changements de propriétés dans les sols sont des choses qui prennent du temps. L'adoption de pratiques qui favorisent la santé et la qualité des sols est une bonne chose mais ne se traduit pas toujours par des changements mesurables et ce même après de nombreuses années de pratiques. La capacité de rétention et la teneur en matière organique d'un sol font partie de ces propriétés qui prennent du temps pour se voir modifier (Irmak et al., 2018). Par exemple, dans le cas de la revue de littérature effectuée par Basche et DeLonge (2017), il est possible de constater que la majorité des études prises en considération qui apporte une amélioration de la teneur à la capacité au champ ont mis en place l'utilisation de culture de couverture depuis plus de 10 ans. Le temps est donc un facteur qui a une grande influence sur l'évolution de la teneur en carbone organique via l'utilisation de couverts (Daryanto et al., 2018; Haruna et al., 2020).

5.4 Impact sur le potentiel hydrique

Cette pratique semble avoir un impact sur le potentiel hydrique de l'eau dans le sol. Selon l'étude de Chakraborty et al (2022), il a pu être constaté que le sol cultivé avec des couverts végétaux présentait un potentiel hydrique plus élevé que celui sans cette pratique (figure 12). Cela signifie que les plantes doivent dépenser moins d'énergie pour extraire de l'eau depuis une même teneur. Selon les auteurs cités précédemment, il a été observé que même dans un des jours les plus secs de la période de l'étude, le potentiel hydrique du sol avec les couverts végétaux était supérieur. La hausse de ce paramètre permet donc à la culture de rente suivante d'absorber plus facilement l'humidité du sol. Cet effet serait la résultante de l'amélioration de la structure du sol grâce aux cultures de couvertures (Chakraborty et al., 2022)

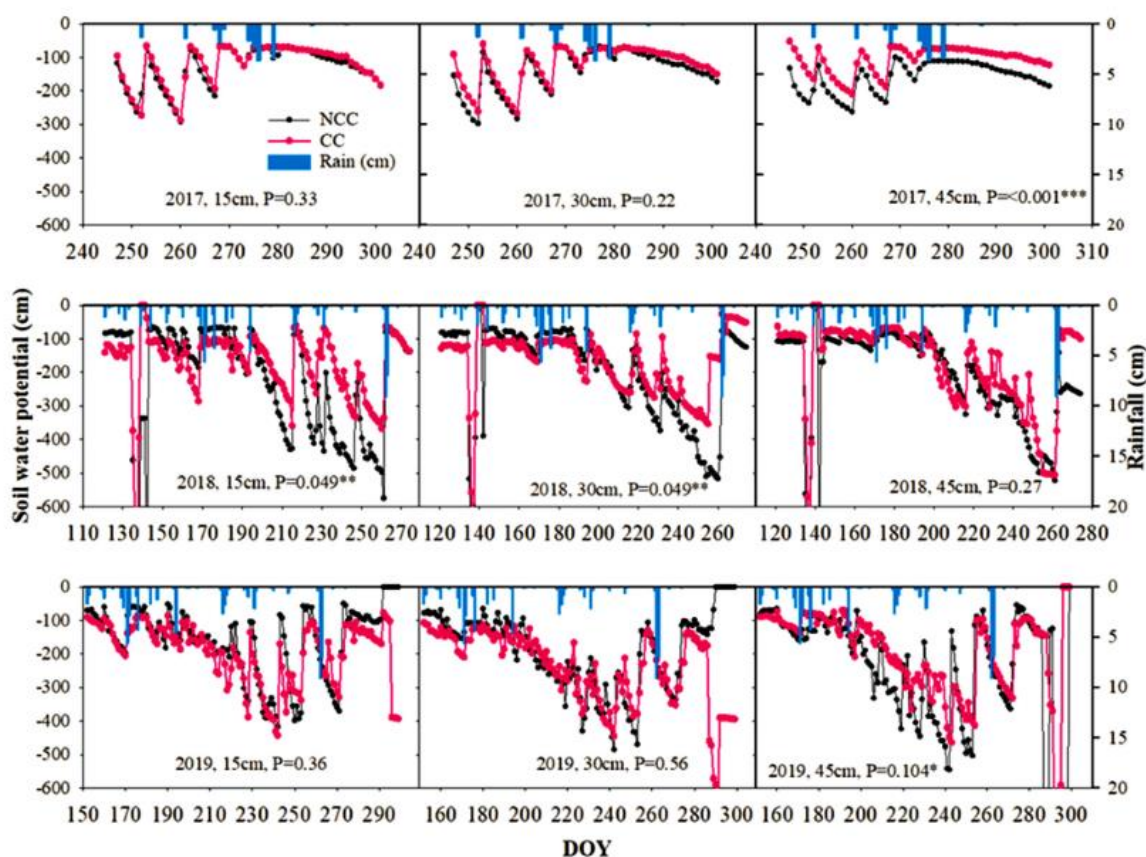


Figure 12 - Potentiel hydrique moyen (-cm) pour des sols en jachère (NCC) et des sols ayant eu des couverts (CC) pour les profondeurs de 15, 30 et 45 cm et pour les années 2017, 2018 et 2019 - tiré de Chakraborty et al (2022)

5.5 Impact sur le taux d'infiltration

Il est primordial pour un sol d'avoir une bonne capacité d'infiltration car c'est une des caractéristiques essentielles pour qu'il puisse correctement capter l'eau (via les précipitations ou l'irrigation) pour en faire profiter les racines des cultures (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Le taux d'infiltration d'eau par le sol est un paramètre important quand on cherche à stocker plus d'eau dans le sol car il représente la porte d'entrée de cette ressource dans le milieu poreux. C'est cette caractéristique du sol qui déterminera la partie de l'eau qui pourra pénétrer le sol, pour potentiellement devenir de l'eau utile pour les plantes, et celle qui ruissellera (García-González et al., 2018). C'est un paramètre modifiable par des changements de pratiques et qui est en lien avec d'autres caractéristiques du sol comme la taille du réservoir en eau utilisable, le taux de carbone organique, la densité apparente, la stabilité des agrégats, ... Un fort taux d'infiltration permet de limiter le ruissellement et, dans le cas d'évènements extrêmes, d'atténuer les risques d'inondations (A. D. Basche & DeLonge, 2019). Selon Alleto, les sols qui sont en agriculture de conservation ont une conductivité hydraulique 1.5 à 3 fois plus élevée,

ce qui traduit d'une meilleure perméabilité du milieu donc un meilleur taux d'infiltration (Alleto, s. d.).

Blanco-Canqui & Ruis (2020), ont pu déterminer que l'utilisation de culture de couverture permet une amélioration du taux d'infiltration du sol dans 82% des cas (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Dans les études prises en compte par les auteurs, les améliorations de la capacité d'infiltration des sols étaient de 78% en moyenne (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Dans l'étude de Chalise et al (2019), le taux d'infiltration était de 1.3 à 1.8 fois supérieur pour le sol où des cultures de couvertures avaient été semées (Chalise et al., 2019). Plus cette pratique est utilisée depuis longtemps, plus elle permet d'obtenir une augmentation du taux d'infiltration et également si la texture du sol est plus grossière (plus de sable pour moins d'argile). La combinaison de l'utilisation de culture de couverture associée à l'absence de travail du sol a pu permettre une nette amélioration de la capacité d'infiltration du sol (A. D. Basche & DeLonge, 2019).

Cette amélioration est permise par plusieurs mécanismes.

Tout d'abord, la mise en place de culture de couverture peut avoir un impact positif sur la capacité d'infiltration du sol grâce à son effet de canopée (Irmak et al., 2018). En fonction de la quantité de biomasse des cultures de couvertures, la présence de végétation à la surface du sol permet de réduire les pertes d'eau par évaporation (Chalise et al., 2019) mais aussi de protéger le sol des impacts des précipitations et/ou de l'irrigation en créant une zone tampon (Abdallah et al., 2021). L'impact des gouttes de pluies sur le sol (effet splash) et les forces de cisaillement lors de l'écoulement de l'eau peuvent causer un détachement et un déplacement des particules à la surface de sol (Tychon, 2019). Cela peut causer une déstructuration du sol car la force des gouttes de pluie est suffisante pour briser des agrégats en surface (Daryanto et al., 2018) et les particules mises en suspension peuvent boucher les pores en surface et donc limiter l'infiltration (Abdallah et al., 2021). La déstructuration peut prendre, principalement dans les sols limoneux (limons et limons fins ; des sols avec une majorité de limon et entre 10 et 15% d'argile), la forme d'encrouement (Tychon, 2019). Ces effets néfastes des gouttes d'eau sont aussi à l'origine d'une perte en matière organique et en éléments nutritifs, et donc une baisse de rendement. L'érosion représente donc un risque bien réel pour l'approvisionnement alimentaire mondial (Gongora et al., 2022). Un sol sur lequel sont plantés des couverts végétaux sera moins à risque d'encrouement (Haruna et al., 2020) et perdra en moyenne 18% d'eau en moins via le drainage et le ruissellement (Daryanto et al., 2018). Cette réduction des pertes en

eau est principalement due à la protection de la surface par les cultures en permettant de réduire l'énergie cinétique des gouttes de pluies (Haruna et al., 2020) et d'améliorer de la rugosité (Daryanto et al., 2018). La réduction du drainage est permise par une augmentation de l'évapotranspiration et d'une meilleure capacité de rétention grâce aux couverts (Daryanto et al., 2018). Cette réduction du drainage peut se faire ressentir jusqu'à 2 mois après la destruction du couvert (Haruna et al., 2023). De plus, grâce aux couverts, le sol est protégé de l'effet splash des gouttes de pluies, ce qui permet d'éviter la destruction des agrégats en surface ainsi que la formation d'une croûte de battance qui peut limiter la capacité d'infiltration par la surface du sol (Alleto, s. d.; Daryanto et al., 2018).

Ensuite, le taux d'infiltration dépend principalement de la conductivité hydraulique saturée du sol (Tychon, 2019). Cette conductivité hydraulique représente la capacité d'un sol à transporter de l'eau en son sein lorsqu'il est à saturation (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Cette caractéristique est fortement influencée par la texture, la structure, la proportion et l'interconnexion des macropores ainsi que la quantité de pores verticaux (Gongora et al., 2022; Haruna et al., 2023; Tychon, 2019). Dans leur étude, Blanco & Ruis (2020) ont déterminé que l'utilisation de culture de couverture pouvait améliorer la conductivité hydraulique à saturation dans 40% des cas, avec un taux d'amélioration moyen de 70%. Les auteurs mettent en avant que les couverts végétaux ont un impact positif sur la proportion d'agrégats stables dans l'eau ainsi que sur les macropores (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Une augmentation de la conductivité hydraulique à saturation a également été relevée par García-González et al (2018) où les auteurs ont constaté que le couvert d'orge y produisait une plus grande amélioration que par le fait de laisser le sol en jachère ou l'utilisation de vesce. Dans l'étude d'Haruna et al (2023), les auteurs ont également pu constater une augmentation de la conductivité hydraulique à saturation sur un sol cultivé avec des couverts depuis 5 années. La figure 13 montre effectivement que la conductivité est supérieure dans le sol où des couverts ont été semés durant la période hivernal. La conductivité reste supérieure pour l'ensemble de la saison de croissance qui suit la culture des couverts. Cette amélioration peut donc effectivement bénéficier à la culture de rente semée après un couvert.

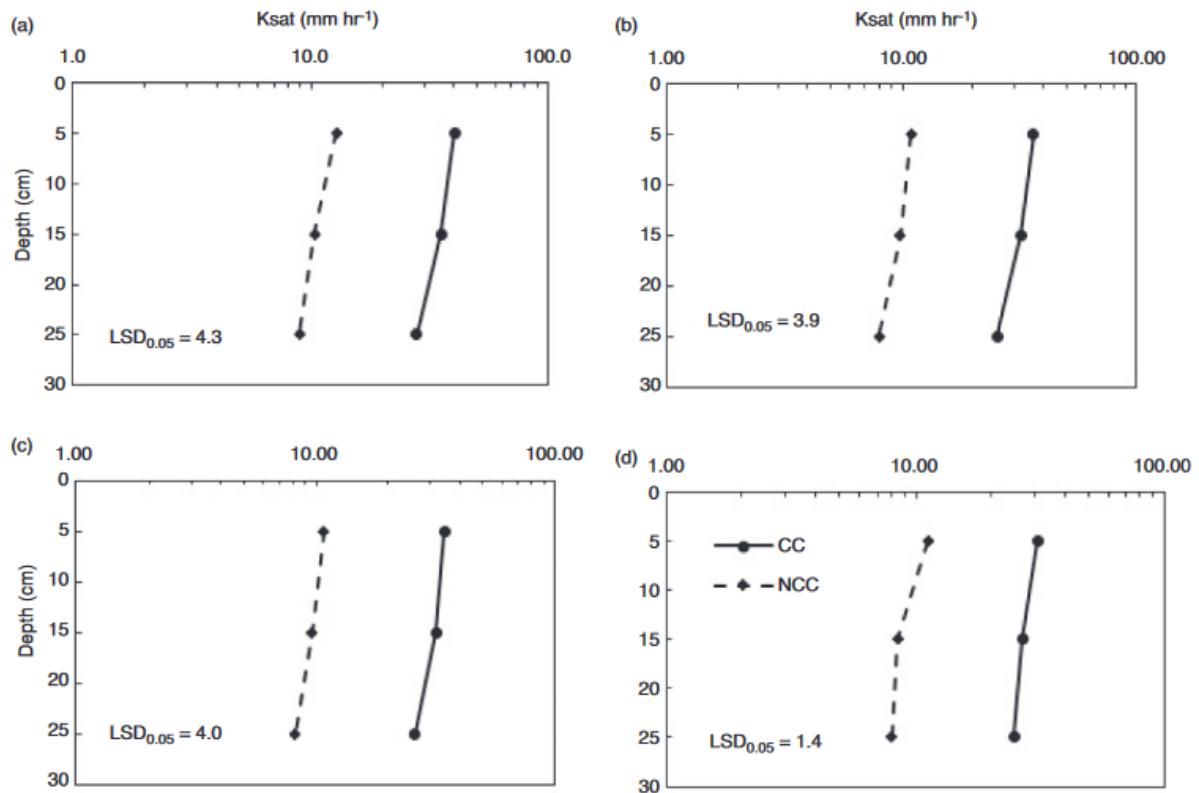


Figure 13 - Evolution de la conductivité hydraulique à saturation en fonction de l'utilisation de cultures de couvertures (CC) ou non (NCC) pour les mois d'avril (a), mai (b), juin (c) et juillet(d) - tiré de Haruna et al (2023)

Les améliorations de la conductivité hydraulique à saturation dans cette étude sont, selon les auteurs, le résultat d'une augmentation de la proportion de macropores (principalement les pores dont le diamètre est supérieur à $60\mu\text{m}$) comme nous pouvons le constater sur la figure 14 (Haruna et al., 2023). Cette figure montre bien que pour différentes profondeurs et durant les 4 mois suivants la destruction des couverts, la macroporosité reste meilleure. Il est également possible de remarquer que la macroporosité tend à redevenir égale dans la couche de surface (5cm de profondeur) après une certaine période. Mais aussi qu'il y a une forte baisse de la proportion de macropores entre avril et mai. Ce dernier phénomène pourrait être dû à une re-compaction naturelle, notamment à cause de l'impact des gouttes de pluies du sol à la suite de la décomposition des racines et de la biomasse de surface du couvert. L'amélioration de la conductivité hydraulique est aussi expliquée par une amélioration de la structure du milieu poreux et d'une diminution de sa densité apparente, l'ensemble étant possible grâce à la présence d'un couvert végétal (Haruna et al., 2023).

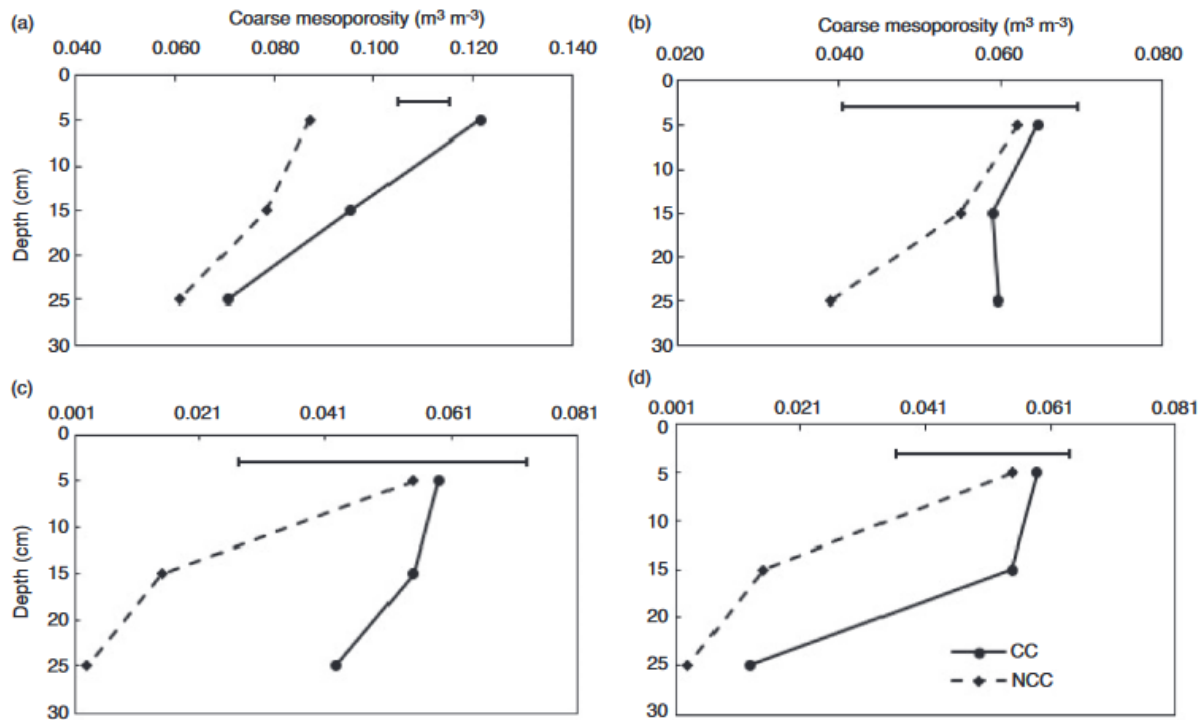


FIGURE 6 Coarse mesoporosity (1000–60 μm effective diameter) as a function of depth during (a) April, (b) May, (c) June, and (d) July between cover crop (CC) and no cover crop (NCC) management. Horizontal bars represent least significant difference at .05 probability level

Figure 14 - Evolution de la macroporosité (les pores allant de $60\mu\text{m}$ à $1000\mu\text{m}$ étant considérés comme de la mésoporosité grossière dans le cadre de l'étude dont la figure est tirée) en fonction de l'utilisation de couverts (CC) ou non (NCC) pour les mois d'avril (a), mai (b), juin (c) et juillet (d) – tiré de Haruna et al (2023)

Si l'utilisation de cultures de couvertures peuvent avoir un effet sur la capacité du sol à transporter l'eau quand il est saturé, il semble que cette pratique n'a pas d'effet sur cette capacité lorsque le sol n'est pas saturé, à savoir la conductivité hydraulique non-saturée (Blanco-Canqui & Ruis, 2020).

La présence d'une couverture sur le sol (culture ou résidus) permet d'améliorer la structure du sol. La macroporosité se voit augmentée grâce à plus de macroagrégats (Daryanto et al., 2018). On retrouve également une plus grande proportion de micropores, mais aussi plus de biopores dus à la présence des racines de ces cultures (Chalise et al., 2019). La présence d'un couvert au-dessus du sol lui permet aussi de bénéficier d'une meilleure rugosité ainsi que d'une plus grande sinuosité, et ainsi de réduire les pertes par évaporation et le ruissellement et donc d'en augmenter le taux d'infiltration des précipitations (Alleto, s. d.; A. D. Basche & DeLonge, 2019; A. Basche & DeLonge, 2017). La présence d'un couvert permet de réduire de 75% les pertes de particules de sol lors des pluies et de la fonte des neiges (Daryanto et al., 2018).

Il semble donc possible d'assurer que la mise en place de culture de couverture permet une amélioration de l'infiltration d'eau dans les sols.

5.6 Impacts sur la porosité

La porosité d'un sol est la propriété physique qui a la plus grande influence sur la capacité d'infiltration de la terre (Haruna et al., 2020).

La porosité représente la quantité d'espaces vides présente dans le sol qui sont susceptibles de se remplir d'eau (A. Basche & DeLonge, 2017). Ces pores vont, à leurs tours, être influencés par des facteurs biotiques, tels que la présence de racines et l'activité des organismes du sol, et abiotique, tels que le travail du sol et les cycles d'humidification et de séchage du sol (Gabriel et al., 2019). Comme expliqué au début de ce travail, le diamètre d'un pore va exercer une influence sur le rôle de ce pore dans la rétention d'eau par le sol. Un sol qui contiendra une plus grande proportion de macropores aurait un très bon taux d'infiltration mais un stockage plus faible car l'eau n'est que peu retenue par ces pores (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Il paraît donc essentiel, pour que la ressource en eau soit valorisée de la meilleure manière, qu'un sol possède une porosité variée. Les paramètres tels que la taille, la forme et l'interconnexion de ces espaces vides entre eux ont des impacts sur la façon dont l'eau va se mouvoir dans le sol et donc sur le bilan d'eau à la parcelle (Gabriel et al., 2019).

L'utilisation de culture de couverture permet de créer davantage de macropores et de biopores dans le sol (Abdallah et al., 2021; Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Outre le fait d'augmenter le nombre de macropores, cette pratique semble également permettre d'élargir les pores déjà présents de 50 à 80% de leur taille (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Cela signifie que certains pores peuvent passer à la classe supérieure et modifier le ratio des différentes classes de pores. Cet effet sur la proportion de la macroporosité peut être dû au fait que les racines des cultures vont créer puis laisser, après décomposition, des galeries assez larges dans le sol (Blanco-Canqui & Ruis, 2020; Gongora et al., 2022). Ces biopores sont dotés d'une très bonne interconnexion, et ainsi un meilleur transport de l'eau à travers le milieu (Gabriel et al., 2019). La présence de couverts végétaux permet d'améliorer la macroporosité du sol, et en retour, d'améliorer l'infiltration grâce à la largeur des pores et leurs interconnexions et de faciliter les déplacements de l'eau dans le milieu poreux (Gongora et al., 2022).

Malgré cet effet sur la macroporosité, il ne semble pas que les cultures de couvertures puissent augmenter la proportion de mésopores et micropores (Abdallah et al., 2021; Blanco-Canqui & Ruis, 2020). La microporosité n'est que peu influencée par la présence de couverts car c'est une caractéristique qui dépend principalement de la texture du sol (Gongora et al., 2022). Cette catégorie de porosité est plus importante dans les sols contenant une plus grande proportion de

limons et d'argile (Gongora et al., 2022). Néanmoins, dans l'étude d'Haruna et al (2023), il a pu être constaté que la microporosité était supérieure suite à l'utilisation de couverts.

Selon la revue de littérature effectuée par Basche et DeLonge (2017), la présence continue d'un couvert végétal sur le sol permet d'en améliorer la porosité globale d'environ 8%. Il a également été constaté que ce résultat était plus élevé, environ 11%, dans les régions du monde où la pluviométrie ne dépasse pas 900mm/an. Cette étude n'a pu déterminer de relation entre la texture du sol et son amélioration de la porosité en présence de couverture végétale.

Les effets de cette pratique de couverture sur les deux caractéristiques précédentes que sont la porosité et la capacité au champ n'ont pas de réels liens avec la durée depuis laquelle cette pratique est implémentée sur la parcelle (A. Basche & DeLonge, 2017). Il est cependant possible de constater que plus la pratique est mise en place depuis longtemps, plus les effets sont marqués et que selon les analyses faites par les auteurs, après 10 ans de mise en place, il est généralement possible de constater une amélioration de la porosité ainsi que de la limite de rétention de la capacité au champ. Les améliorations constatées après plusieurs années seraient notamment dues à l'augmentation de la teneur en carbone du sol (A. Basche & DeLonge, 2017).

Dans l'étude menée par Gabriel et al (2019), il a été constaté que dans un sol laissé en jachère, les pores sont de tailles moins variables et certaines catégories de pores peuvent devenir dominantes.

La porosité et la capacité au champ sont des paramètres qui évoluent selon le niveau d'agrégation du sol. La présence continue de racines (vivante ou en décomposition) dans le sol est un facteur ayant justement une grande influence sur cette agrégation et donc cette présence des racines influencera les paramètres que sont la porosité ainsi que le niveau de rétention à la capacité au champ (A. Basche & DeLonge, 2017). Dans le cas de Gabriel et al (2019), l'utilisation de l'orge comme culture de couverture n'a permis qu'une amélioration de la microporosité, et donc du stockage d'eau résiduel, que dans les 20 premiers centimètres du sol. Cela est principalement dû au fait que l'orge est une culture ayant des racines fines et dont la densité proche de la surface est plus importante et donc peu encline à aller modifier le sol en profondeur (Gabriel et al., 2019). D'autres cultures comme le colza ou le radis fourrager ont, quant à elles, des racines pivots qui sont plus puissantes et sont donc capables de descendre plus en profondeur pour aller y modifier la structure du sol (Chen & Weil, 2010). Dans la même étude de Gabriel et al (2019), les chercheurs ont pu mettre en avant une plus nette amélioration de la teneur en eau à saturation grâce à une amélioration de la macroporosité, notamment via

les biopores creusés par les racines (Gabriel et al., 2019). Cette amélioration se remarque principalement en étudiant les couches plus profondes du sol (après 40cm) où l'influence des racines de la culture de rente, le maïs dans ce cas, se fait moindre.

5.7 Impact sur la compaction

La compaction est un phénomène du sol qui va limiter la capacité de la plante à aller chercher les ressources dont elle a besoin pour sa croissance (Chen & Weil, 2010).

Pour savoir si l'utilisation de couverts végétaux pourrait permettre de décompacter les sols afin d'en réduire le travail (Abdollahi & Munkholm, 2014), il est possible d'étudier les effets de cette pratique sur la densité apparente ainsi que le taux de pénétration du sol.

Les couverts végétaux peuvent affecter la densité apparente de deux façons ; la biomasse a un ratio masse/volume plus faible que la matière minérale et donc plus il y a de biomasse dans un sol moins il sera dense ; et la pénétration des racines permet de créer des biopores qui vont augmenter la densité d'espaces vides dans le sol, réduisant son ratio masse/volume et donc le rendre moins dense (Haruna et al., 2020). Les effets constatés sur la densité apparente ne sont positifs que dans 31% des cas, avec des améliorations variant entre 3 et 24% (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Ce paramètre joue un rôle important dans la capacité du sol à retenir de l'eau parce qu'il a été constaté qu'une augmentation de la densité apparente réduit la quantité d'eau retenue par le sol pour l'ensemble du potentiel hydrique (Haruna et al., 2023) Dans la revue de littérature de Haruna et al (2020), les auteurs n'ont pas pu constater d'effets positifs de la pratique sur la densité apparente. L'effet des couverts est donc très variable mais semble pouvoir permettre, dans certains cas de réduire la densité du sol et donc d'en augmenter la porosité (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Cette réduction de la densité apparente dépend de la capacité des cultures à augmenter le taux de carbone organique dans le sol (Chakraborty et al., 2022) mais aussi du type de système racinaire des cultures (Gongora et al., 2022). En effet, en fonction de la variété des couverts utilisés, les racines n'ont pas le même effet sur la structure du sol. Les légumineuses sont des cultures ayant des racines pivots puissantes et plus larges qui sont capables de pénétrer le sol plus en profondeur et de créer des biopores aux diamètres importants (Gongora et al., 2022). Mais d'autres cultures, comme le seigle par exemple, ont des systèmes racinaires plus fins et fibreux qui vont plutôt avoir tendance à se développer de manière latérale, contrairement aux racines pivots (Chen & Weil, 2010; Gongora et al., 2022). Ces racines sont très utiles pour améliorer la structure du sol, augmenter la macroporosité et réduire le taux de ruissellement (Gongora et al., 2022). En ce qui concerne la macroporosité, il

est intéressant d'utiliser un mélange de couverts dont les systèmes racinaires diffèrent afin de maximiser leurs effets sur l'agrégation du sol et d'augmenter le taux de biopores présents dans le sol après la décomposition des racines (Chen & Weil, 2010; Gongora et al., 2022). La matière organique des résidus en surface et des racines dans le sol ont une densité plus faible que les particules minérales du sol. Cet apport par les cultures de couverts permet donc également de réduire la densité apparente du sol (Gongora et al., 2022).

Concernant le taux de pénétration, il a été démontré que les couverts végétaux pouvaient améliorer cette caractéristique du sol et donc le rendre plus perméable à l'eau (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Le radis fourrager et le colza sont deux cultures qui présentent une bonne capacité de pénétration et qui peuvent être utilisées pour solutionner des problèmes de compaction. Plus les racines d'une plante présentent un diamètre important, plus cette plante sera capable de se développer dans un sol compacté (Chen & Weil, 2010).

Cependant, le problème de compaction du sol pour les cultures ayant des racines de faibles diamètres ne se présente que pour les sols principalement argileux donc à texture fine. Les sols plus grossiers, donc plus sableux, ne posent pas de problème au développement des racines, même dans des situations de compaction, car le diamètre de pores de ces sols restera plus important que celui des cultures (Chen & Weil, 2010). Les sols argileux sont donc plus à risque de compaction mais il semblerait aussi que ce sont sur ces sols que les cultures de couvertures permettent le plus de diminuer la densité apparente (Haruna et al., 2020)

Pour réduire le niveau de compaction d'un sol, il semble plus pertinent d'essayer d'augmenter la porosité totale en favorisant le développement de la macroporosité plutôt que d'essayer d'influencer la microporosité (Gongora et al., 2022).

5.8 Impact sur l'agrégation

Les agrégats du sol permettent de protéger la matière organique des décomposeurs en la recouvrant (García-González et al., 2018). Plus les agrégats d'un sol sont stables, plus ce dernier aura un meilleur taux d'infiltration et une meilleure capacité de stockage et cela lui permettra de mieux résister aux sécheresses et à l'érosion (Van Es et al., 2017). Dans un sol, les particules minérales et organiques peuvent s'assembler pour former des agrégats de moins de 20 μ m. Ces agrégats peuvent ensuite s'assembler pour former des microagrégats de plus en plus stables allant jusqu'à 250 μ m (Daynes et al., 2013). Ces assemblages peuvent se faire grâce à différents agents tels que les enzymes libérées par les saprotrophes et les champignons mycorhiziens, mais aussi les exsudats des bactéries. Ces micro-agrégats peuvent ensuite s'assembler avec de la

matière organique pour former des particules plus grandes (de taille supérieure à 250 μ m), que l'on appelle des macro-agrégats. Ces macro-agrégats, formés grâce à la présence des hyphes des champignons et/ou des très fines racines des plantes, ne sont pas aussi stables que les micro-agrégats (Daynes et al., 2013).

Les racines des cultures permettent d'améliorer l'agrégation du sol grâce à plusieurs méthodes. Tout d'abord, leur pénétration dans le sol permet d'augmenter la quantité de micro-agrégats. Ensuite, les radicelles (racine au diamètre très fin) vont entourer les agrégats et les maintenir ensemble (Calvet et al., 2021). Enfin, ces racines produisent aussi des exsudats (Daynes et al., 2013), dont des polysaccharides, qui servent d'agent liant pour l'agrégation des particules de sol en micro-agrégats (Calvet et al., 2021).

Cette pratique permet également d'augmenter la biomasse du sol, notamment la population de vers de terre ainsi que le développement des champignons mycorhizes. Les pratiques qui permettent une diversité de plantes, une couverture du sol et la présence continue de racines (culture de vivace et rotation des cultures) donnent également ces avantages biologiques (A. D. Basche & DeLonge, 2019).

Les agrégats stables à saturation sont des particules qui jouent un rôle important dans la capacité d'infiltration d'eau par le sol (García-González et al., 2018). La stabilité des agrégats à saturation représente leur résistance à l'impact des gouttes de pluies (Van Es et al., 2017).

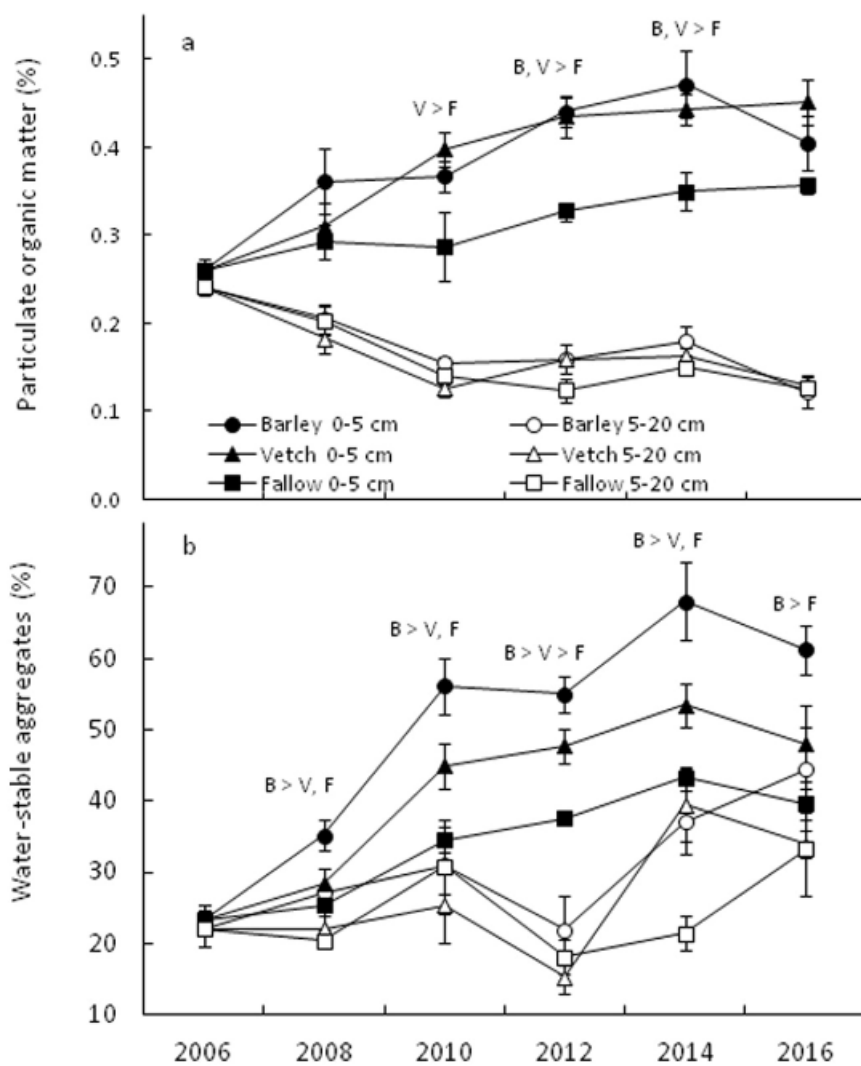


Figure 15 - Evolution temporelle de la proportion d'agrégats stables à saturation et des particules de matières organiques en fonction de différents couverts et de deux profondeurs - tiré de García-González et al (2018)

La figure 15 permet de montrer que les cultures de couvertures ont eu un impact sur la proportion d'agrégats stables à saturation pour l'ensemble des couches de sol étudiées (García-González et al., 2018).

Cet effet sur l'agrégation est rendu possible car les cultures de couvertures favorisent une augmentation de la teneur en carbone organique et en résidus et de l'activité microbienne du sol. Selon ces auteurs, l'amélioration de l'agrégation provoquée par les cultures de couvertures auraient eu un impact plus important sur l'évolution des propriétés hydraulique du sol que l'apport en matière organique (García-González et al., 2018).

Pour améliorer la stabilité des agrégats d'un sol, la présence et le bon développement des champignons mycorhiziens semble des paramètres essentiels. En effet, dans l'étude menée par Daynes et al (2013), les auteurs ont pu constater que la seule présence des racines des plantes

ne pouvait pas suffire pour former des macro-agrégats suffisamment stables. Les effets que peuvent avoir les racines des plantes sur l'agrégation du sol semblent majoritairement dû aux effets indirects de la combinaison avec des champignons mycorhiziens (Daynes et al., 2013). Il y a une relation entre la perte de ces champignons et une baisse de l'agrégation du sol. Ces champignons semblent jouer un rôle important sur cette caractéristique des sols, si bien que cette baisse ne peut pas être limitée par d'autres processus d'agrégation et donc que les racines des plantes ne jouent qu'un rôle secondaire dans la stabilisation du sol sous forme de macro-agrégats. Mais ces racines restent essentielles puisqu'elles fournissent les éléments utiles (habitat et nourriture) pour le bon développement des champignons mycorhiziens (Daynes et al., 2013)

5.9 Impact des résidus de cultures

Il devient de plus en plus fréquent, de nos jours, de récupérer les chaumes et autres résidus des cultures afin de les vendre à la filière biocarburant. Cependant, le fait de ne plus laisser ces résidus sur le sol aurait des impacts négatifs sur la capacité de production des champs. Ces impacts seraient principalement liés à une baisse de la teneur en carbone organique ainsi que de la conservation de l'eau (Chalise et al., 2019). Même si l'on pense plus généralement aux résidus qui sont laissés à la surface du sol, il ne faut pas oublier que ce terme comprend également la biomasse qui reste dans le sol, à savoir les racines (Haruna et al., 2020)

Dans cette partie, nous allons donc nous intéresser à comment ces résidus peuvent permettre au sol de stocker plus d'eau ou de mieux la conserver, et ce avec ou sans cultures de couverture.

5.9.1 Teneur en carbone organique et résistance à la pénétration

D'après l'étude réalisée par Chalise et al (2019), le fait de laisser les résidus de culture sur place après la récolte pourrait permettre une augmentation de 21.8% du taux de carbone organique présent dans le sol par rapport au fait de retirer ces résidus. Cela est indiqué par le tableau 1, qui montre bien un taux de carbone organique supérieur pour les deux profondeurs étudiées grâce à la présence des résidus de culture. Ce tableau montre également que, dans cette étude, l'utilisation de culture de couverture n'a pas eu d'impact significatif sur le taux précédemment cité.

Treatment	Depths (cm)							
	0-5		5-15		0-5		5-15	
	SOC		TN		SPR			
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹		MPa			
Residue								
RR†	26.2a‡	21.0a	2.14a	1.75a	2.23b	2.37b		
RNR	21.5b	19.8a	1.83b	1.68a	2.77a	3.01a		
Cover crop								
CC	24.0a	20.6a	2.00a	1.73a	2.24b	2.46b		
NCC	23.8a	20.2a	1.98a	1.71a	2.76a	2.92a		
	Analysis of variance (<i>P</i> > <i>F</i>)							
Residue (R)	<0.01	0.184	<0.01	0.18	0.009	0.001		
Crop (C)	0.84	0.689	0.82	0.68	0.01	0.01		
R × C	0.06	0.326	0.054	0.32	0.07	0.03		

† RR, residue returned; RNR, residue not returned; CC, cover crop; NCC, no cover crop.

‡ Means values followed by different letters within a column for different treatments are significantly different at *P* < 0.05.

Tableau 1 - Influence des résidus de cultures et des couverts sur les taux de carbone organique (SOC), d'azote (TN) et la résistance à la pénétration du sol (SPR) en fonction de différentes profondeurs - tiré de Chalise et al (2019)

Cette étude a également constaté que la présence des résidus permettait de réduire la résistance à la pénétration du sol (indiquée par SPR dans le tableau 1) et ce pour les deux profondeurs étudiées. Cette résistance exprime la force nécessaire pour que toute chose puisse pénétrer le sol, et ce en fonction de la profondeur. Cependant, cette tendance n'est, encore une fois, par vraie partout et certaines études ont pu mettre en lumière l'absence d'impact des résidus sur cette résistance à la pénétration (Chalise et al., 2019)

5.9.2 Densité apparente

La présence des résidus de culture a permis, dans le cas de l'étude menée par Chalise et al (2019), d'obtenir des valeurs de densité apparente toujours inférieure à celle observée dans le cas où les résidus étaient retirés. Le tableau 2 met effectivement en avant que la densité apparente du traitement qui conserve les résidus de culture diminue de façon plus importante au cours des années que celle du sol où ces résidus ne sont pas conservés. L'évolution des P-values montre que la présence des résidus n'a tout d'abord pas d'effet lors de la première année considérée. Pour l'année 2015, l'effet positif se fait sentir uniquement dans la couche de surface du sol. Et en 2016, les valeurs des deux profondeurs se voient diminuées grâce aux résidus. La

lecture des P-values permet donc de bien mettre en avant l'évolution progressive mais rapide de l'impact des résidus sur la baisse de la densité apparente.

Le tableau 2 nous indique également que l'association de couverts et des résidus ne semble pas produire d'effet cumulé bénéfique sur la densité apparente du sol étudié par Chalise et al (2019)

Treatment†	2014		2015		2016	
	Depth (cm)					
	0-5	5-15	0-5	5-15	0-5	5-15
	BD (Mg m ⁻³)					
Residue						
RR	1.41a‡	1.42a	1.30b	1.37a	1.29b	1.34b
RNR	1.42a	1.44a	1.40a	1.37a	1.38a	1.39a
Cover Crop						
CC	1.40a	1.43a	1.30b	1.36a	1.32a	1.33b
NCC	1.43a	1.43a	1.39a	1.38a	1.35a	1.40a
	Analysis of variance (<i>P</i> > <i>F</i>)					
Residue (R)	0.68	0.62	0.001	0.83	0.001	0.006
Crop (C)	0.30	0.92	0.005	0.13	0.11	0.002
R × C	0.04	0.40	0.08	0.25	0.08	0.23

† RR, residue returned; RNR, residue not returned; CC, cover crop; NCC, no cover crop.

‡ Means values followed by different letters within a column for different treatments are significantly different at *P* < 0.05.

Tableau 2 - Influence des résidus de cultures et des couverts sur la densité apparente (BD) du sol en fonction de différentes profondeurs - tiré de Chalise et al (2019)

5.9.3 Capacité de rétention d'eau par le sol

Il a pu être montré que la présence des résidus de culture pouvait permettre au sol de retenir plus d'eau qu'en leur absence (Chalise et al., 2019). Dans cette étude, la quantité d'eau retenue aux différentes forces de succions étudiées, notamment à la capacité au champ, était supérieure dans le cas où les résidus restaient sur le champ (figure 16). Cette constatation est d'autant plus significative pour les 5 premiers centimètres de sol. Cela serait principalement dû à l'apport de matière organique des résidus restants sur place ainsi qu'à la baisse de la densité apparente, comme cela a pu être expliqué précédemment (Chalise et al., 2019). Comme expliqué précédemment dans ce travail, la densité apparente et la porosité sont des paramètres liés. La diminution de la densité apparente provoque une augmentation de la porosité, ce qui peut également participer à une meilleure rétention de l'eau.

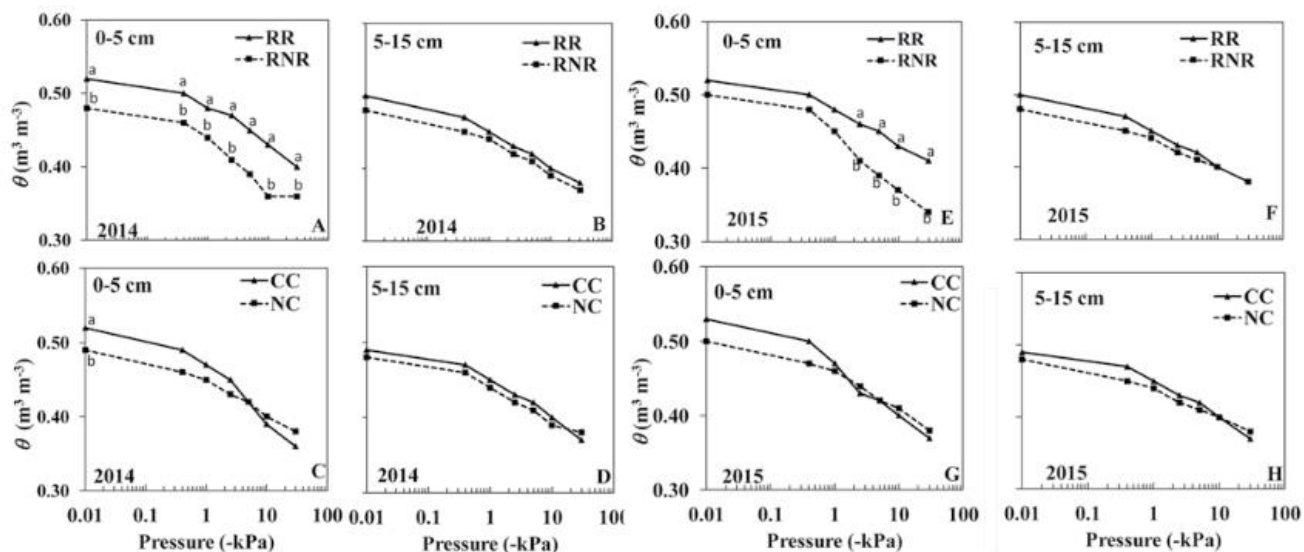


Figure 16 - Influence des résidus (RR) ou de leur absence (RNR) sur la capacité de rétention d'eau par le sol en fonction de différents potentiel hydrique et à différentes profondeurs - tiré de Chalise et al (2019)

5.9.4 Impact sur la capacité d'infiltration

La présence des résidus de culture peut permettre d'améliorer la capacité d'infiltration d'eau par le sol. Dans l'étude de Chalise et al (2019), le taux d'infiltration était de 67% (en 2014) et de 22.5% (2015) supérieur dans le cas de la présence de résidus plutôt que sans. Cette amélioration serait également rendue possible grâce à l'amélioration de la teneur en carbone organique et de la densité apparente, comme cela a pu affecter le taux de rétention. De plus, cette meilleure capacité d'infiltration semble être favorisée par une amélioration de la stabilité des agrégats ainsi que de la porosité globale du sol (Chalise et al., 2019). L'effet de protection fourni par les résidus contre les impacts des gouttes d'eau permet également de limiter l'encroûtement et donc le ruissellement (Haruna et al., 2020).

La présence des résidus est à l'origine de la mise en marche de l'ensemble de ces mécanismes qui permettent de favoriser un meilleur taux d'infiltration d'eau par le sol.

5.9.5 Impact sur la teneur et le stockage en eau du sol

La présence de résidus sur le sol permet à ce dernier de mieux conserver son taux d'humidité et donc d'avoir une plus grande teneur en eau. Cela est notamment rendu possible grâce à la diminution de l'évaporation du sol dû à la présence des résidus qui vont agir comme une canopée, tel que pour les cultures de couvertures. En plus de permettre au sol de retenir plus d'eau, les résidus de cultures peuvent permettre un meilleur stockage de cette ressource (Chalise et al., 2019). Chalise et al (2019) ont trouvé que le sol couvert de résidus pouvait stocker plus d'eau dans les 5 premiers centimètres que sans les résidus.

Les résidus de cultures venant de plantes de la famille des poaceae ont, grâce à un plus grand ratio C/N, une plus grande persistance au sol et peuvent donc permettre au sol de garder un taux d'humidité plus favorable aux cultures pendant une plus grande période (Garba, Bell, et al., 2022). Les résidus venant de la famille des Brassicaceae et des Fabaceae sont moins persistants mais peuvent être à l'origine d'un apport en azote (Garba, Bell, et al., 2022; Garba, Fay, et al., 2022).

Le fait de brûler les résidus des couverts n'a aucun effet positif pour le sol puisque cette pratique détruit les nutriments contenus dans les résidus et ne permet pas de fournir une protection à la surface du sol (Garba, Bell, et al., 2022).

En période de déficit hydrique important, la présence des chaumes de culture n'est pas suffisante que pour réduire le taux d'évaporation du sol. Les résidus de culture ne peuvent donc avoir un effet positif sur la quantité d'eau stockée dans le sol que dans les années où il pleut suffisamment durant la période de jachère (Garba, Fay, et al., 2022).

5.10 Conclusion

L'utilisation des couverts végétaux est réputée pour les bienfaits qu'elle apporte à la santé et à la fertilité du sol.

En ce qui concerne les effets sur la taille du RUM, il est possible de mettre en avant les faits suivants. Tout d'abord, il n'y a pas d'effets clairs des couverts sur la capacité de stockage d'eau par le sol. Certaines études montrent des améliorations et d'autres non. Quand une amélioration est constatée, cela se fait le plus souvent pour des potentiels hydriques proches de ceux de la saturation ou de la capacité au champ. L'impact sur le RUM n'est donc pas unanime car il va dépendre de nombreuses caractéristiques locales dont les principales sont le climat et le sol. En effet, le climat influence la réaction du sol à l'utilisation de couverts par la quantité de précipitations annuelles. Il semblerait qu'en-dessous de 623mm de précipitations, les couverts provoquent un épuisement de la ressource en eau qui n'est pas contrebalancé par les pluies avant le semis de la culture de rente suivante. En revanche, passé ce niveau de précipitations, les couverts vont majoritairement être à l'origine d'effets positifs sur les rendements car ils vont pouvoir désengorger le sol de son excédent d'eau. Ce dernier effet peut représenter un avantage non négligeable pour les sols hydromorphes que l'on retrouve dans une partie de l'Europe, dont le Luxembourg. Dans les climats secs et tropicaux, les effets positifs sur les rendements se font principalement pour les sols à tendance argileuse donc capable de retenir une plus grande quantité d'eau naturellement.

Les couverts ne permettent pas toujours d'augmenter la teneur en carbone organique présente dans le sol et cette évolution peut grandement dépendre du nombre d'années depuis lesquelles la pratique est utilisée. Cependant, laisser les résidus de cette culture sur le sol contribue à la hausse de ce taux.

Une hausse du potentiel hydrique et de la capacité d'infiltration sont généralement constatées à la suite de l'utilisation de couverts végétaux et de leurs résidus. Ainsi qu'une augmentation de la macroporosité. Les mésopores et micropores ne semblent pas être impactés par la présence de couverts. Ces cultures et leurs résidus permettent aussi de limiter la compaction du sol.

6 Le travail du sol

Déjà il y a 4000 à 6000 ans avant J.-C, la charrue était un outil utilisé par les populations qui vivaient en Mésopotamie (Calvet et al., 2021). Le travail du sol est donc une pratique qui a toujours été associée à l'agriculture. Mais est-ce que cette méthode est positive pour la capacité de stockage du sol ? Nous allons ci-dessous, essayer de comprendre comment le labour modifie les paramètres de sol en lien avec le RUM et comment ces dernières évoluent dans le cadre de l'absence de travail de sol.

Afin de ne pas travailler le sol, des exploitants vont pratiquer ce qu'on appelle le semis direct (Ogle et al., 2019). Cette pratique d'agriculture de conservation permet de ne pas retourner le sol, en créant seulement une tranchée ou un trou pour déposer les graines lors du semis et de laisser entre 30% et 100% du sol couvert par des résidus de culture (Blanco-Canqui & Ruis, 2018; Soane et al., 2012).

6.1 Les effets négatifs du labour

6.1.1 Impact sur la structure du sol

La pratique du labour impacte de nombreuses propriétés physiques du sol comme la porosité, la stabilité, la conductivité hydraulique, la sorptivité, la rugosité de surface ainsi que la densité apparente. Ces propriétés sont également liées à la présence de matière organique dans le sol et jouent un rôle important dans la capacité de rétention d'eau de ce dernier (Alleto, s. d.; García-Tejero et al., 2020).

Le labour est une pratique principalement utilisée pour lutter contre la problématique de compaction du sol (Chen & Weil, 2010), en retournant une couche de sol allant de 10 à 30cm de profondeur (Calvet et al., 2021). La compaction cause une perte de porosité, ce qui a pour conséquence de diminuer la capacité d'infiltration ainsi que la conductivité hydraulique. La diminution de ces deux caractéristiques cause une diminution de la capacité de rétention globale du sol (García-Tejero et al., 2020). A cause du phénomène de la compaction, le sol n'est plus capable de stocker autant d'eau qu'il le pourrait naturellement. La modification de la structure du sol, via un changement du taux de matière organique et/ou le maintien et développement des pores affecte donc la capacité de rétention de ce dernier. Un sol qui présente un problème de compaction peut voir son RUM décliner de 7mm à 10mm en fonction de sa nature (García-Tejero et al., 2020). Selon une étude menée par Arvalis sur une culture de maïs, les plantations faites sur un sol tassé et en conditions de stress hydrique voient leur rendement baissé de 25% en comparaison de conditions normales (Association générale des producteurs de maïs, 2023).

L'opération de labourage va participer à une baisse de la valeur de densité apparente du sol et à une hausse de la capacité d'infiltration, ce qui permet de solutionner la problématique énoncée précédemment (Alleto, s. d.). Mais cet impact positif sur la compaction ne dure qu'un certain laps de temps et le risque de compaction peut devenir plus important par la suite (Blanco-Canqui & Ruis, 2018). Avec le temps, le sol va se recomacter et les effets du labour seront perdus, demandant donc une opération régulière (Alleto, s. d.). De plus, cette pratique a tendance à avoir des effets négatifs sur la structure du sol, notamment en détruisant les agrégats de celui-ci (Chen & Weil, 2010). Le labour classique est une pratique qui va faire perdre de la stabilité au sol. En effet, la couche de sol travaillée va avoir une structure et une agrégation moins résistantes ce qui va engendrer plus de ruissellement et d'érosion lors des pluies ou des irrigations (Abdallah et al., 2021).

A long-terme, le travail du sol peut devenir une cause de compaction du sol, notamment via la formation d'une semelle de labour (García-Tejero et al., 2020).

Les racines des cultures vont principalement se développer dans la couche du sol qui a été labourée, et par conséquent, moins compactée. Le développement racinaire sera limité à la couche labourée et plus difficile dans la couche inférieure du sol qui n'a pas été travaillée (Chen & Weil, 2010). La surface d'exploration des racines sera donc réduite et cela va limiter la capacité des plantes à aller chercher les ressources nécessaires à leurs développements, dont l'eau, plus en profondeur. En cas de sécheresses, les cultures seront sans doute moins capables d'aller exploiter les ressources en eau se trouvant plus en profondeur dans le sol car leurs systèmes racines n'ont pas pu y avoir accès.

La pratique du labour, en modifiant de nombreuses caractéristiques physiques du sol et notamment sa structure et son agrégation, va conduire à une forte augmentation instantanée de la conductivité hydraulique. Localement, l'eau va pouvoir s'infiltrer en grande quantité et causer une condition d'anaérobie qui peut tuer les cultures. Cette hausse de la conductivité hydraulique va aussi être à l'origine d'un drainage des nutriments vers des horizons moins accessibles pour les racines (Alleto, s. d.)

6.1.2 Impact sur la teneur en carbone organique

En retournant le sol, le labour traditionnel va, en plus de modifier la structure et de détruire les agrégats, permettre à une grande quantité d'oxygène de rentrer dans le sol, ce qui aura pour conséquence de stimuler l'activité des organismes du sol qui vont consommer plus de matière organique. Les résidus de cultures incorporés vont être plus rapidement dégradés par les

microbes du sol. De plus, la destruction des agrégats va libérer la matière organique qu'ils contenaient et l'exposer également à une dégradation plus rapide par les organismes du sol (Abdallah et al., 2021; Direction de la Protection des Sols du Service public de Wallonie, s. d.). Le labour traditionnel est donc une pratique qui fait diminuer le taux de carbone organique présent dans le sol (Ogle et al., 2019). En limitant le travail du sol, la teneur en matière organique est plus stable car elle reste contenue dans les macro-agrégats et à la surface du sol (Abdallah et al., 2021). L'incorporation des résidus de cultures va donc causer une dégradation plus rapide de la matière organique du fait de son exposition aux microbes présents dans le sol et aboutir à une diminution de la teneur en carbone organique (Abdallah et al., 2021; Chen & Weil, 2010).

Le labourage est aussi à l'origine d'une meilleure répartition de la matière organique sur l'ensemble de la couche de terre travaillée (Blanco-Canqui & Ruis, 2018). Cet effet est bien illustré par la figure 17 qui montre que le sol labouré présente une répartition plus équilibrée de la teneur en matière organique entre les différentes profondeurs de sol.

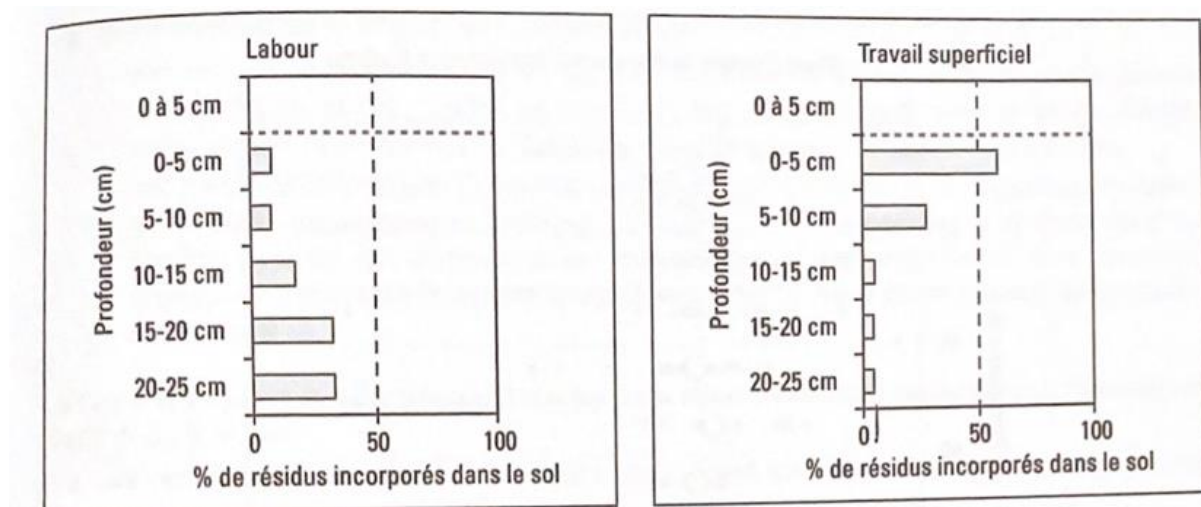


Figure 17 - "Influence du type de travail de sol sur l'incorporation dans le sol des résidus végétaux" - tiré de Calvet et al (2021)

6.2 Les avantages et inconvénients d'un travail réduit ou nul du sol

Dans les climats tempérés, les raisons qui poussent les exploitants à ne pas labourer sont principalement liées à une réduction de la pollution des cours d'eau et une baisse des coûts de gestion des terres. Alors que dans les régions où le climat est aride ou semi-aride, l'argument de la conservation d'une certaine quantité d'eau dans le sol est la raison principale (Soane et al., 2012).

De manière générale, les pratiques de travail réduit du sol, comme le semis direct, peuvent permettre de protéger les sols contre les problèmes d'érosion et la perte de structure (Abdollahi & Munkholm, 2014)

6.2.1 Amélioration de la structure

Dans la revue de littérature effectuée par Blanco-Canqui & Ruis (2018), le semis direct a permis d'améliorer la stabilité des agrégats à saturation jusqu'à 97% pour les 30 premiers centimètres de sol dans 74% des cas. Cette amélioration de la stabilité peut être due à plusieurs éléments :

- La présence des résidus en surface permet une plus grande concentration en carbone (Abdollahi & Munkholm, 2014) et une protection contre les variations de température et d'humidité qui peuvent endommager les agrégats (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).
- Une meilleure protection des agrégats car ils ne sont plus exposés à l'atmosphère suite au labour (Blanco-Canqui & Ruis, 2018) ;
- Ainsi qu'une meilleure densité apparente (Abdollahi & Munkholm, 2014).

Il a pu être montré que la stabilité des agrégats à saturation est un paramètre très sensible aux perturbations. Ainsi, même un travail réduit du sol montre des effets négatifs sur cette propriété. Cependant, l'effet sur la stabilité des agrégats secs n'est pas certains (Blanco-Canqui & Ruis, 2018). Mais il est possible de considérer que la stabilité globale d'un sol en semis direct est meilleure que pour un labour. Ce surcroît de stabilité permet une hausse de la capacité d'infiltration du sol (Abdallah et al., 2021).

6.2.1.1 Modifications induites à la porosité

Cette pratique est aussi à l'origine d'un changement dans la proportion des différentes classes de pores dans le sol (Gabriel et al., 2019). Il a été montré que dans la plupart des cas, l'absence ou la réduction de travail du sol permettait d'augmenter la quantité de micropores et mésopores par rapport à un sol labouré (Aldaz-Lusarreta et al., 2022). Le travail du sol a tendance à favoriser la formation de macropores. Cependant, ces macropores ne sont pas le résultat du processus d'agrégation du sol mais d'une fragmentation du milieu causée par le travail mécanique. Le labour traditionnel résulte en un sol très friable car les fragments ne sont pas stables et qu'il existe une relation de corrélation négative entre la proportion de macropores et la stabilité des agrégats à saturation (Abdollahi & Munkholm, 2014). Lorsque le sol va recevoir des précipitations, le manque de stabilité va causer une agglomération. La hausse de macroporosité produite par le labour va donc s'affaiblir par ce processus. Au contraire,

l'absence de travail de sol favorise la formation d'agrégats qui sont stables et vont permettre de conserver un bon niveau de porosité (Aldaz-Lusarreta et al., 2022).

Selon la revue de littérature effectuée par Blanco-Canqui & Ruis (2018) qui reprend 14 recherches sur la question de l'impact du semis direct sur la distribution de la taille des pores, les résultats sont mitigés puisque dans 6 cas sur 14 le semis direct a eu un impact négatif sur ce paramètre et un impact positif seulement dans 4 cas. La durée depuis laquelle le semis direct est utilisé semble jouer un rôle primordial dans les effets de cette pratique sur la taille des pores, et notamment sur l'augmentation de la proportion de macropores (Blanco-Canqui & Ruis, 2018). Les études à court terme (moins de 5 ans) ne permettent majoritairement pas de montrer une amélioration de la distribution des pores alors que cela est plus fréquent dans des études à plus long terme (Blanco-Canqui & Ruis, 2018). L'évolution de la proportion des mésopores n'a été mesurée que dans 8 cas sur 14 et n'a été que supérieur dans 2 études. Concernant la microporosité, elle n'a été augmentée par le semis direct que dans 4 cas sur 14 mais n'a montré d'évolution négative dans une seule recherche (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

Contrairement à la pratique du labour qui a tendance à tuer la macrofaune du sol, un travail réduit permet à ces organismes, notamment aux vers de terre (Lemtiri et al., 2014), de se développer en plus grand nombre et cela a donc pour effet d'améliorer la structure du sol en créant davantage de pores d'origine biologique. Ces derniers vont permettre à l'eau de s'infiltrer plus facilement dans le sols de façon verticale, ce qui participe à un meilleur taux d'infiltration et à un ruissellement réduit (Abdallah et al., 2021; Alleto, s. d.; A. D. Basche & DeLonge, 2019). Le semis direct permet aux populations de vers de terre de se développer avec moins de contraintes et donc de pouvoir apporter plus de bénéfices aux sols (Lemtiri et al., 2014).

Le développement des pores verticaux se fait aussi grâce aux espaces créés par les racines et à une meilleure agrégation globale (Soane et al., 2012). En l'absence de travail, la surface du sol est donc plus perméable qu'avec la pratique du labour (Soane et al., 2012).

6.2.1.2 Réduction de l'érosion

La perte de matière organique, le labour et la mécanisation des pratiques sont les causes principales de l'augmentation du risque d'érosion des sols agricoles situés sur le territoire européen (Soane et al., 2012). La pratique du semis direct permet de réduire les risques d'érosion via la présence des résidus de culture qui protègent la surface et apportent de la matière organique au sol (Ogle et al., 2019). En permettant aux résidus de la culture précédente de rester à la surface du sol, le semis direct offre une protection à cette première couche de terre

qui permet, dans les sols ayant déjà une bonne structure de base, de réduire l'érosion lors de fortes pluies (Soane et al., 2012). Grâce à cette protection, le semis direct permet de réduire les risques de formation de croûte à la surface du sol (Blanco-Canqui & Ruis, 2018; López-Bellido et al., 2007).

Il a pu être montré qu'un sol non-labouré, en comparaison à un sol labouré, pouvait présenter 60% d'érosion en moins ainsi que 40% de ruissellement en moins (Abdallah et al., 2021). Ces réductions sont possibles grâce à une amélioration du taux d'infiltration, qui peut varier entre 17 et 86% en fonction des sols, en l'absence de labour (Abdallah et al., 2021). Cette amélioration du taux d'infiltration est notamment due à une meilleure porosité de surface induit par une plus grande proportion de biopores et de macropores, mais aussi grâce à une meilleure stabilité des agrégats (Abdallah et al., 2021).

Afin de lutter contre cette problématique grandissante, le semis direct semble donc être une pratique favorable.

6.2.1.3 Réduction de la compaction

De nos jours, les problèmes de compaction peuvent notamment être le résultat d'une utilisation importante de machines agricoles lourdes. Afin de savoir si le semis direct peut permettre de réduire ce risque, il est possible d'en étudier l'évolution de la densité apparente, de la résistance à la pénétration et de la compactibilité (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

Le semis direct ne produit pas d'effets précis sur la densité apparente du sol et ce peu importe la durée depuis laquelle cette pratique est utilisée. Quand un effet est constaté, cela se produit principalement dans les dix premiers centimètres de sol (Blanco-Canqui & Ruis, 2018). Selon la revue de littérature effectuée par Blanco-Canqui & Ruis (2018), il n'y a pas de différence notable entre la valeur de densité apparente d'un sol en semis direct et d'un sol en labour conventionnel. Dans les cas où il a pu être constaté que la densité apparente diminuait suite à la mise en place du semis direct, cela s'explique par une augmentation du taux de matière organique contenu dans le sol grâce à la présence des résidus en surface. Cette dernière augmentation permet d'améliorer l'agrégation du sol et ainsi de réduire sa densité apparente (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

La résistance à la pénétration semble pouvoir être influencé positivement par la pratique du semis direct puisque Blanco-Canqui & Ruis (2018) ont mis en avant que ce paramètre connaît une diminution de 27 à 99% de sa valeur dans 50% des cas repris dans la revue de littérature. Dans le reste des cas étudiés, le semis direct n'a pas eu d'impact négatif sur cette valeur, elle

n'a juste pas évolué. Les évolutions positives de cette valeur ont également prises place dans les dix premiers centimètres des sols (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

La compactibilité d'un sol représente la tendance de ce dernier à se compacter. Plus un sol est travaillé de manière intensive et plus il présente un risque de compaction important qui résulte d'une potentielle perte de matière organique (Blanco-Canqui & Ruis, 2018). Sachant cela, il est normal de trouver que le semis direct permet de diminuer le risque de compaction d'un sol en le rendant plus résistant. Cette amélioration de la compactibilité permet de réduire le risque de compaction lors du passage d'engin agricole sur un sol mouillé (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

6.2.2 Augmentation de la teneur en carbone organique

Selon la revue de littérature de Abdallah et al (2021), l'effet de l'absence de travail du sol ne résulte pas forcément en une augmentation du taux de carbone organique présent dans le sol. Certaines études mettent en avant l'impact positif du semis direct sur cette teneur. C'est notamment le cas de la recherche réalisée par García-Tejero et al (2020) qui indique une hausse du taux de carbone organique 14% plus élevé entre 0 et 5cm de profondeur et 20% plus élevé entre 5 et 10cm de profondeur en semis direct en comparaison à un labour. Contrairement à cela, de nombreuses autres études ne rapportent pas d'effet de cette pratique sur le stockage de carbone dans le sol. Cette augmentation du taux de carbone organique dans le sol en l'absence de travail de ce dernier serait principalement fonction du climat, de la profondeur du sol et de la période depuis laquelle le sol n'est plus travaillé. L'influence du climat sur la réaction du sol avec cette pratique serait important puisque des recherches sous climat plus chaud et sec montrent une augmentation du taux de carbone organique alors que d'autres sous climat plus froid et humides montrent une tendance à la stabilité ou à la diminution de ce taux (Abdallah et al., 2021).

Selon une étude comprenant 67 recherches de long terme sur la question, il a pu être montré que les 30 premiers centimètres de sol montraient une augmentation moyenne de 570kg de carbone par hectare et par an en semis direct (Soane et al., 2012). Mais ce chiffre n'est valable que pour l'épaisseur de sol considérée. Si l'on considère l'évolution du taux de carbone organique sur une couche plus large, cette différence se réduit (Soane et al., 2012) et le taux peut devenir supérieur pour la pratique du labour (Angers & Eriksen-Hamel, 2008). Cela est dû au fait que cette dernière, en amenant la matière organique de surface plus en profondeur, permet d'y augmenter le taux de carbone organique alors que l'augmentation se fait principalement en surface dans le cas du semis direct via la présence des résidus (figure 18)

(Soane et al., 2012). Il a été montré que pour certains sols, la teneur en carbone organique pouvait devenir similaire entre le semis direct et le labour à partir de 10cm de profondeur et le sol en labour pouvait même contenir plus de carbone organique à partir de 21cm de profondeur. La pratique du labourage semble pouvoir également d'augmenter la teneur en carbone organique à une profondeur plus grande que la semelle de labour. La matière organique n'étant pas répartie de la même façon entre le semis direct et le labour, il peut s'avérer complexe de prévoir quelle pratique permettra d'accumuler le plus de carbone organique dans un sol donné (Angers & Eriksen-Hamel, 2008). Aujourd'hui, il est reconnu que dans les régions tempérées et tropicales, le semis direct permet d'augmenter la teneur en carbone organique présente dans les sols. Cependant, cette hausse n'est souvent que rapportée pour la couche de surface du sol mais pas pour une profondeur plus importante (Calvet et al., 2021).

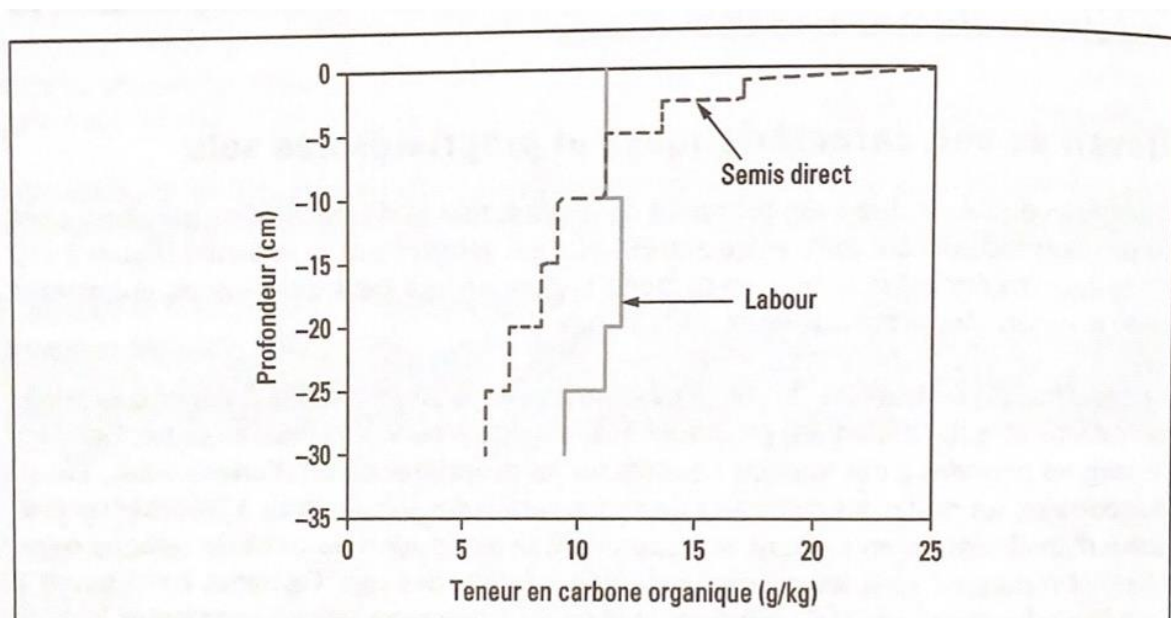


Figure 4.10 Profils de teneur en carbone organique en fonction de la profondeur; comparaison entre le labour et le semis direct.

Essai de Boigneville (Essonne) après 12 années de différenciation.

Source: Guérif, 1986, dans Labreuche et coll., 2007

Figure 18 - "Profil de teneur en carbone organique en fonction de la profondeur ; comparaison entre le labour et le semis direct" - tiré de Calvet et al (2021)

Examples of average annual change in soil organic carbon (SOC) after no-till compared to ploughing in Europe (in ascending order of SOC change).

Country	Number expts.	Depth (cm)	Duration (y)	SOC change (kg C ha ⁻¹ y ⁻¹)	Reference
Scotland ^a	1	0–60	6	0	Sun et al. (2010)
Switzerland ^b	1	0–40	19	0	Anken et al. (2009)
Spain ^c	1	0–40	13	158	Hernández et al. (2002)
France ^d	1	0–20	32	162	Oorts et al. (2007a)
Spain ^e	3	0–40	15–18	20–187	Álvaro-Fuentes et al. (2008)
England ^f	4	0–30	5–9	340	Bhogal et al. (2007)
Scotland ^g	1	0–20	23	510	Ball et al. (1994a)
Portugal ^c	1	0–30	4	750	Basch (2002)
Germany ^h	1	0–30	3	1000	Fleige and Baeumer (1974)
Spain ^e	1	0–30	11	1000	López-Fando and Pardo (2001)
Spain ⁱ	1	0–30	10	1300	Sombrero and De Benito (2009)

Soil types:

^a Dystric Fluvisol Cambisol.

^b Orthic Luvisol.

^c Luvisol.

^d Haplic Luvisol.

^e Inceptisol, Calcisol.

^f Orthic Acrisol, Gleyic Cambisol, Dystric Cambisol.

^g Eutric Cambisol, Gleysol.

^h Orthic Podsol.

ⁱ Typic Calcixerolls.

Tableau 3 - Evolution annuelle du taux de carbone organique de sols en semis direct en comparaison à la pratique du labour à travers l'Europe - tiré de Soane et al (2012)

La tableau 3 permet de mettre en avant le fait que les plus faibles évolutions du taux de carbone organique se font majoritairement dans des climats plus frais et humides (Soane et al., 2012). De plus, il semblerait qu'il faille laisser entre 5 à 10 ans à la pratique du semis direct pour qu'elle produise son augmentation maximum du taux de carbone organique (Soane et al., 2012).

Via une amélioration de la formation et de la stabilité des macro-agrégats, l'absence de travail du sol permet de mieux protéger le carbone organique présent à l'intérieur de ces agrégats et donc de limiter le processus de décomposition microbienne (Ogle et al., 2019).

Dans les sols sableux des climats tropicaux humides et secs, ainsi que des climats tempérés chauds et frais humides, la quantité de matière organique présente à la surface du sol grâce à l'absence de travail du sol permet d'en augmenter la teneur en carbone organique dans l'ensemble du sol. Cela est également le cas pour les sols limoneux et argileux des climats tropicaux humides, ainsi que tempérés chauds et frais humides (Ogle et al., 2019).

Dans les climats semi-arides, le semis direct permet de stocker plus de carbone dans le sol, ce qui permet d'augmenter la taille du RUM et d'obtenir de meilleurs rendements (Angers & Eriksen-Hamel, 2008).

Selon la revue de littérature réalisée par Ogle et al (2019), l'absence de travail peut permettre une augmentation du taux de carbone organique dans le milieu mais cela n'est pas sûr. Mais même si cet effet n'est pas encore confirmé, ce n'est pas une raison de délaissier cette pratique car elle peut offrir d'autres avantages comme une réduction des risques d'érosion et une meilleure adaptation au changement climatique (Ogle et al., 2019).

6.2.3 Augmentation de la taille du RUM

Il est reconnu que la pratique du semis direct peut être à l'origine de changements dans les caractéristiques hydrologiques d'un sol (Soane et al., 2012).

6.2.3.1 Infiltration et perméabilité

En comparant les résultats de l'impact de pratiques différentes de travail du sol sur le taux d'infiltration de ce dernier, Basche et DeLonge (2019), n'ont pas pu constater de différence entre les sols soumis à un labour classique, ceux soumis à un travail réduit et ceux sans labour. Selon ces auteurs, le non-travail du sol comme seule pratique ne permet pas d'améliorer le taux d'infiltration. Dans leur revue de littérature, Soane et al (2012), ont pu mettre en avant que l'impact du semis direct sur le taux d'infiltration était mitigé. C'est également ce qui ressort de l'étude de Blanco-Canqui & Ruis (2018) avec une amélioration du taux d'infiltration dans 15 des 24 cas étudiés.

Quand le semis direct permet d'améliorer la capacité d'infiltration d'eau par le sol, cela est principalement dû à une meilleure stabilité des agrégats en surface grâce à l'apport en matière organique, une réduction des risques d'érosion grâce à la protection offerte par les résidus de culture qui restent à la surface et une meilleure continuité des macropores formés par l'activité biologique situés à la vertical dans le sol (Blanco-Canqui & Ruis, 2018; Soane et al., 2012). Le taux d'infiltration d'un sol étant fortement lié à sa perméabilité, la présence de macropores verticaux à la surface qui s'étendent vers des couches plus profondes est un paramètre important pour permettre à l'eau de pénétrer dans ce milieu. L'absence de travail du sol fait que les galeries creusées par les vers de terre ainsi que par les racines ne sont pas détruites et peuvent servir de voies d'infiltration pour l'eau. Cette meilleure perméabilité se traduit par une plus grande conductivité hydraulique pour les sols en semis direct (Soane et al., 2012). Néanmoins, la mise en place de la pratique du semis direct ne permettrait d'améliorer la conductivité hydraulique à saturation dans les vingt premiers centimètres que dans un tiers des situations (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

Pour constater un impact positif dans des climats plus humides, Basche et DeLonge (2019) ont dû le combiner à la présence de résidus de culture sur le sol. Dans des climats plus chauds et secs, l'absence de travail du sol aurait possiblement pour effet d'affaiblir sa capacité d'infiltration (A. D. Basche & DeLonge, 2019).

Les effets de la pratique du semis direct ne sont pas encore certains. Selon l'étude de Basche et DeLonge (2019), ils n'ont pas été en mesure de montrer un effet suffisant de l'absence de travail

du sol sur sa capacité d'infiltration. Cependant, d'autres études semblent avoir trouvées une relation positive entre l'absence de travail du sol et l'amélioration de sa capacité d'infiltration, notamment dans des environnements plus humides (A. D. Basche & DeLonge, 2019).

6.2.3.2 Capacité de rétention

Certains chercheurs ont pu mettre en évidence que la pratique du semis direct ou de travail minimum du sol permet aux cultures de disposer de plus d'eau car, sous ces pratiques, la réserve utile du sol prendrait plus de temps à être utilisée par les cultures (García-Tejero et al., 2020).

Concernant la capacité de rétention d'eau du sol, la principale différence observée entre le semis direct et le labour conventionnel a été remarquée entre 60 et 90cm de profondeur. En effet, dans ces profondeurs, le sol était plus humide sous la pratique du semis direct. Cette pratique a aussi permis que les premiers centimètres de sol retiennent l'eau plus longtemps alors que la décharge s'est faite plus rapidement pour les sols en labour conventionnel et que les niveaux de rétention étaient similaires (García-Tejero et al., 2020). Cela peut être notamment le résultat d'une réduction du taux d'évaporation engendré par la présence des résidus de culture. En effet, ces résidus vont, d'une part, isoler le sol en limitant les déplacements de l'air à sa surface (López-Bellido et al., 2007) et d'autre part, grâce à une diminution de la température du milieu en le protégeant des radiations solaires (Horton et al., 1996). Les résidus de culture agissent comme un vêtement pour notre peau (Horton et al., 1996). En isolant le sol contre la hausse de température de l'atmosphère, les résidus permettent de limiter la baisse de la chaleur latente de vaporisation de l'eau et donc de limiter l'évaporation (Guyot & Mamy, 2013).

En outre, les sols en semis direct semblent pouvoir permettre de limiter la température du sol au printemps mais cet effet est moins certain durant la saison estivale (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

La pratique du semis direct serait à l'origine d'une augmentation de la taille du RUM dans 2/3 des cas étudiés par Blanco-Canqui & Ruis (2018). Cette augmentation de la quantité d'eau à disposition des cultures serait principalement le résultat de l'enrichissement en carbone organique (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

Location	Precipitation (mm)	Texture	Organic Matter (%)	Duration (yr)	Depth (cm)	Effect of NT on PAW	Reference
Spain	448	Silt loam	NT > CT	8	0 to 30	Increased by 33%	Fernandez-Ugalde et al., 2009
China	520	Clay loam	2.84	11	0 to 10	Increased by 28%	Chen et al., 2015
Australia	850	Silt loam	NT > CT	14	0 to 50	Increased by 19%	So et al., 2009
Spain	869	Sandy loam	NT > CT	8	0 to 5	Increased by 36%	Gomez-Paccard et al., 2015
Puerto Rico	1500	Clayey	3.4	1	0 to 10	Increased by 23 to 76%	Snyder et al., 2000
Bangladesh	1800	Clay loam	NT > CT	4	0 to 15	Increased by 11%	Alam et al., 2017
Austria	na	Loam	NT > CT	10	10 to 20	Increased by 33%	Himmelbauer et al., 2012
Canada	386	Clay loam	2.4	24	0 to 20	Reduced by 25%	Miller et al., 1999
Canada	455	Clay loam	9.8	10	0 to 2.5	Reduced by 51%	Singh et al., 1996
Oklahoma, USA	868 to 945	Three soils	1.69 to 2.75	2	0 to 190	No effect	Patrignani et al., 2012
Ohio, USA	1016	Silt loam	NT > CT	14	0 to 10	No effect	Abid and Lal, 2009
Illinois, USA	949	Silt loam	na	8	0 to 75	No effect	Hussain et al., 1999
Canada	831	Clay loam	NT = CT	14-17	0 to 10	No effect	Reynolds et al., 2007
Nebraska, USA	693	Silty clay loam	NT > CT	35	0 to 30	No effect	Blanco-Canqui et al., 2017

Tableau 4 - Evolution de la taille du RUM en fonction de la pratique de travail du sol pour différentes parties du monde - tiré de Blanco-Canqui & Ruis (2018)

Le tableau 4 montre que l'impact du semis direct sur l'eau disponible pour les plantes varie selon les conditions locales, notamment la texture du sol, la teneur en matière organique, et la durée depuis laquelle la pratique est utilisée. Dans de nombreux cas, cette pratique augmente la capacité du sol à retenir l'eau disponible pour les plantes, mais ce n'est pas universel. L'effet peut être nul ou même négatif dans certaines situations, suggérant que l'efficacité du semis direct dépend de nombreux facteurs. Il se dégage tout de même qu'une augmentation du taux de matière organique peut, dans une majorité des cas, coïncider avec une augmentation de la taille du RUM. Mais il ne semble pas y avoir de relation claire entre la durée depuis laquelle la pratique est utilisée et son impact.

6.2.4 Inconvénients du semis direct

Cependant, sous certaines conditions climatiques, notamment un climat froid et humide, l'absence de travail de sol a pu montrer des résultats indiquant une stagnation voire une diminution de la teneur en carbone organique (Abdallah et al., 2021). Il a notamment été indiqué qu'en Europe du Nord, le semis n'a pas d'impact sur la teneur en carbone organique à cause de la température qui est trop faible ainsi que de sols trop souvent saturés (Abdallah et al., 2021). Ces inconvénients sont dus à la présence de résidus à la surface au moment du semis qui causent un engorgement en eau trop important du sol ainsi qu'une plus faible quantité d'énergie solaire reçue, ce qui cause un décalage des dates de semis et retardement de la germination (Soane et al., 2012)

Il a été montré que, sous certaines conditions (type de sol, climat, choix de cultures, etc), l'absence de travail du sol peut causer une perte de rendement d'environ 10% (Aldaz-Lusarreta et al., 2022). La compaction du sol peut, en plus d'autres impacts, être à l'origine de cette perte de rendement (Araya et al., 2022).

De manière plus générale, l'absence de travail du sol est à l'origine d'une augmentation de la densité apparente dans les premiers centimètres du sol lors des premières années en semis direct, mais aussi d'un changement de pH qui devient plus acide en surface (Abdollahi & Munkholm, 2014). Même si cette augmentation de la densité apparente peut être une source d'inquiétude, elle ne semble pas être suffisamment importante que pour poser des problèmes de rendement. De plus, après cinq ans en moyenne, les valeurs de densité apparente reviennent à des niveaux comparables à ceux des sols labourés (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

Soil attribute	Depth	Tillage treatment†			Cover crop treatment‡	
		D	H	MP	+CC	-CC
	cm					
SOC, g kg ⁻¹	0-10	22.0 a§	22.5 a	21.1 a	21.4 a	22.3 a
	10-20	18.9 b	19.0 b	21.2 a	19.4 a	19.9 a
Total N, g kg ⁻¹	0-10	1.90 a	1.98 a	1.80 a	1.84 a	1.94 a
	10-20	1.60 b	1.65 b	1.78 a	1.64 a	1.71 a
MBC, g kg ⁻¹	0-10	0.351 a	0.586 a	0.336 a	0.434 a	0.415 a
	10-20	0.293 a	0.505 a	0.365 a	0.404 A	0.372 B
Available K, g kg ⁻¹	0-10	288 a	299 a	252 b	299 a	260 b
	10-20	178 a	167 a	160 a	174 A	163 B
Available P, g kg ⁻¹	0-10	47.2 a	41.3 b	32.8 c	39.9 a	41.0 a
	10-20	33.7 a	29.5 a	34.0 a	31.6 a	33.1 a
pH	0-10	5.80 b	5.83 b	6.13 a	5.87 a	5.97 a
	10-20	6.21 a	6.20 a	6.18 a	6.17 a	6.22 a

† D, direct drilling; H, harrowing to a depth of 8 to 10 cm; MP, moldboard plowing to a depth of 20 cm.

‡ +CC, plots with cover crop; -CC, plots without cover crop.

§ Numbers followed by identical lowercase letters (across the rows for each main effect) are not significantly different at the $p < 0.05$ level; numbers followed by identical uppercase letters are not significantly different at the $p < 0.10$ level.

Tableau 5 - Impacts de différentes techniques de travail du sol et des couverts végétaux sur la teneur en carbone organique du sol, sa masse microbienne, son pH, son taux d'azote, de potassium et de phosphore - tiré de Abdollahi & Munkholm (2014)

Un travail réduit du sol résulte en une stratification plus importante de certaines caractéristiques du milieu. Le tableau 5, tiré de l'étude réalisée par Abdollahi & Munkholm (2014), nous permet de constater que le sol labouré a des valeurs similaires de teneur en carbone organique dans les deux profondeurs étudiées. Cette équilibre, dû au fait que la matière organique présente en surface est intégrée mécaniquement au sol, permet une meilleure constance à travers les différentes couches du sol (Abdollahi & Munkholm, 2014). Dans le cas de pratiques visant à réduire le travail du sol, une stratification apparaît car la matière organique reste en surface et n'est intégrée que via l'activité des organismes vivant du sol. Nous pouvons donc observer une évolution significative de cette teneur, et des autres mesures présentes dans ce tableau, en fonction de la profondeur étudiée.

L'absence de travail du sol ne permet pas forcément de stocker plus de carbone organique (Ogle et al., 2019). Et quand cela est le cas, le carbone reste dans les premiers centimètres de sol (A. D. Basche & DeLonge, 2019) alors que la pratique du labour permet d'incorporer la matière plus en profondeur afin d'y augmenter la teneur en carbone organique (Ogle et al., 2019). L'absence de travail du sol pourrait donc être à l'origine d'une stratification du carbone organique. En effet, Ogle et al, ont pu établir que la teneur en carbone organique était plus élevée dans les 20 premiers centimètres de sol grâce à cette pratique mais que les sols labourés avaient une teneur plus élevée après ces 20 premiers centimètres.

Dans des climats tempérés secs, qu'ils soient froids ou chauds, l'absence de travail du sol ne semble pas pouvoir permettre d'augmenter la teneur en carbone organique pour l'ensemble des types de sols (Ogle et al., 2019).

Dans les climats secs et les climats froids, la pratique du semis direct peut avoir un impact négatif sur le stockage du carbone organique dans le sol. En effet, dans les climats froids, l'alternance des épisodes de gel-dégel peuvent abimer les agrégats et causer une plus grande minéralisation de la matière organique. Dans les climats chauds, les mêmes effets négatifs sont causés par l'alternance des cycles de dessèchement et d'hydratation du sol. En laissant la matière organique en surface dans ces climats, elle se retrouve plus exposée à ces aléas climatiques et cela peut impacter négativement le stock de carbone organique (Ogle et al., 2019).

Pour éviter les risques de compaction sous nos latitudes pour des terres en semis direct et dont la teneur en matière organique est faible, il est important de bien planifier l'utilisation de machines agricoles en fonction du taux d'humidité du sol. Il a pu être montré que, pour un sol humide et en semis direct, la compaction provoquée par une machine agricole lourde peut avoir un impact négatif sur la capacité du semis suivant à s'établir (Soane et al., 2012). Pour limiter ce risque, il est donc important pour les exploitants de planifier le passage d'engins en fonction du niveau d'humidité du sol pour éviter de travailler un sol saturé (Calvet, 2013).

Toutes les textures de sol ne sont pas adaptées à l'absence de labour. Il a pu être constaté que les terres ayant des textures plus grossières, comme les sols sableux et sablo-limoneux et avec des taux de carbone organique relativement bas, bénéficient de la pratique du labour car ils n'ont pas une structure suffisamment bonne sans intervention (Soane et al., 2012)

Sur certains sols présentant, au départ, une mauvaise structure et un drainage inefficace, la pratique du semis direct a été à l'origine d'une perte de rendement (Soane et al., 2012).

Les évolutions observées à la suite de la mise en place de la pratique du semis direct prennent principalement lieu dans les dix premiers centimètres du sol. Le fait de laisser les résidus en surface et de ne pas travailler la terre mène donc à une stratification des propriétés du milieu (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

Pour montrer une évolution positive des propriétés physiques, un sol en semis direct nécessite de lui laisser du temps. Des changements peuvent se faire après les premiers mois mais le résultat final ne se verra qu'après 3 à 5 ans, voire plus dans certains cas (Soane et al., 2012). Les effets positifs du semis direct peuvent augmenter avec le temps. C'est notamment le cas pour la densité apparente qui peut être supérieure en semis direct qu'en labour conventionnel dans les premières années après la conversion mais le temps permettra de ramener ce paramètre à des valeurs comparables au labour. La tendance est similaire pour le facteur de la résistance à la pénétration (Blanco-Canqui & Ruis, 2018). Cependant, le temps ne semble pas avoir d'effet sur l'évolution des propriétés hydraulique du sol (Blanco-Canqui & Ruis, 2018)

6.2.5 La combinaison du semis direct et d'autres pratiques

L'arrêt du travail du sol ne semble pas pouvoir à lui tout seul produire les meilleurs effets sur les propriétés physiques du sol et par conséquent sur la taille du RUM (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

L'addition de couverts végétaux à un sol en semis direct permet d'y stocker plus de carbone organique. Comme nous avons pu le voir, cet enrichissement est très positif pour certaines propriétés physiques du sol et peut permettre d'en améliorer d'avantage la taille du RUM. De plus, du fait de la présence de leurs racines, les cultures de couvertures peuvent permettre de limiter le risque de compaction qui apparait au début de la conversion d'un sol en semis direct et d'en améliorer le taux d'infiltration (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

Depth	ST-NO	ST-CC	NT-NO	NT-CC
0–5 cm	14	19	14	4 and 518
20–25 cm	33	25	47	30

Tableau 6 - Diamètre en μm le plus fréquent des pores en fonction des pratiques (ST = labour ; NT = semis direct ; NO = pas de culture de couverture ; CC = culture de couverture) - tiré d'Araya et al (2022)

Dans l'étude d'Araya et al (2022), le sol sous travail réduit et sans cultures de couvertures était celui présentant la densité apparente la plus importante, ce qui peut donc effectivement conduire à des problèmes de compaction. Cependant, en introduisant des cultures de couvertures, la

densité apparente redevenait normale (Araya et al., 2022). Les cultures de couvertures, via leurs systèmes racinaires, peuvent être utilisées dans des contextes de travail réduit du sol. Ces plantes vont créer des biopores, des pores qui vont permettre un meilleur passage des racines des cultures suivantes. Les cultures de couvertures les plus utilisées à cet effet sont celles qui ont un système racine présentant une racine pivot qui a un diamètre large afin d'être puissante pour se développer dans un sol compacté (Chen & Weil, 2010).

6.2.6 Conclusion

Le labour conventionnel est une pratique principalement utilisée pour son effet de réduction de la compaction du sol, bien que cet effet soit seulement momentané. Mais en voulant diminuer ce risque, cette opération fragilise également la stabilité de la structure et des agrégats du sol. Elle limite également la capacité des racines à accéder à la partie du sol plus en profondeur. De plus, même si le labourage permet de mieux répartir la matière organique dans les horizons du sol, cette pratique est à l'origine d'une réduction de la teneur en carbone organique à cause d'une exposition accrue de cette dernière aux éléments et d'une stimulation microbienne.

Pour pallier ces désavantages, la pratique du semis direct gagne en popularité. Cette méthode agricole permet d'améliorer la stabilité des agrégats à saturation du sol afin que ces derniers subissent moins l'effet destructeur de l'eau. Elle permet d'augmenter la porosité via une plus grande proportion de macropores, mais aussi de biopores en favorisant les populations de vers de terre. Cela réduit donc les risques d'érosion hydrique. La meilleure structure générale offre aussi une résistance accrue contre les risques de compaction. Le taux d'infiltration des sols n'est généralement pas modifié uniquement par le semis direct. Mais la combinaison de cette pratique avec des couverts végétaux permet d'augmenter ce dernier.

Le semis direct ne semble pas pouvoir toujours augmenter le taux de carbone organique du sol. Cela va notamment dépendre du climat et du nombre d'années depuis l'implémentation de cette pratique. Mais dans les situations où la teneur en carbone organique augmente, on peut également s'attendre à un accroissement de la taille du RUM.

Le non-travail du sol présente aussi des inconvénients. En effet, cette pratique résulte en une stratification des propriétés du sol, dont le taux de matière organique. Dans les climats froids et humides, l'absence de travail du sol a principalement réduit la teneur en matière organique du sol. Sous cette méthode de culture, les sols peuvent aussi connaître une augmentation de la densité apparente durant les premières années. Le semis direct demande aussi une attention

particulière pour l'utilisation des engins agricoles qui ne peuvent pas être utilisés quand le sol est saturé afin d'éviter les risques de compaction.

7 Conclusion

A cause du changement climatique, la production agricole est confrontée à des défis majeurs concernant la gestion durable des sols, l'amélioration des rendements et la préservation des ressources en eau. Dans ce travail, les quatre pratiques suivantes ont été explorées afin de définir leurs effets sur le réservoir en eau utilisable maximal (RUM) du sol : l'ajout de matière organique, l'agroforesterie, l'utilisation de couverts végétaux et les techniques de travail du sol, notamment le labour conventionnel et le semis direct.

L'ajout de matière organique peut influencer positivement la taille du RUM mais ses effets varient selon la texture du sol et les conditions climatiques. Les sols sableux bénéficient le plus de cette pratique, tandis que les sols argileux montrent peu de variation. Même si l'impact sur le RUM n'est pas certain et présente de grandes variations en fonction des contextes, la hausse du taux de matière organique améliore aussi la santé globale des sols et favorise de meilleurs rendements.

L'agroforesterie était une pratique fort utilisée autrefois et semble, encore aujourd'hui, être une méthode de culture efficace. L'intégration d'arbres dans les systèmes de culture peut demander des adaptations dans le choix des cultures de rente afin d'obtenir un bon agencement des différents systèmes racinaires. En plus de fournir un microclimat favorable aux cultures, les arbres peuvent aussi redistribuer aux plantes avoisinantes une partie de l'eau qu'ils ont extraite du sol. Cette pratique permettra d'améliorer l'infiltration du sol, de réduire les risques d'érosion et d'apporter du carbone organique. Toutefois, le succès de cette approche dépend d'une gestion attentive de la complémentarité entre les espèces cultivées et de la disponibilité en eau, notamment souterraine.

Les couverts végétaux sont largement reconnus pour leur contribution à la fertilité des sols, bien que leur effet sur la taille du RUM ne soit pas unanime. Ils peuvent épuiser les ressources en eau dans les régions à la pluviométrie faible, mais dans les zones plus humides, ils aident à réguler l'excès d'eau, caractéristique particulièrement utile dans les sols hydromorphes. Ils contribuent à l'augmentation de la capacité d'infiltration du sol et à une amélioration de la porosité, principalement via une hausse de la proportion de macropores. Les effets sur le taux de carbone organique varient en fonction du climat, du type de sol et de la durée depuis laquelle cette pratique est mise en place.

Enfin, le semis direct, en opposition au labour conventionnel, offre une méthode d'approche plus en accord avec les enjeux actuels. Il permet une amélioration de la structure du sol tout en

limitant les risques d'érosion et de compaction. Mais cette pratique entraîne une stratification des propriétés du sol et une augmentation de la densité apparente dans les premières années. Combiné aux couverts végétaux, il peut améliorer le taux d'infiltration et, dans certains cas, augmenter la teneur en carbone organique, contribuant ainsi à la taille du RUM.

Pour conclure ce travail, il apparaît que les pratiques étudiées, prises individuellement, ont un impact direct relativement limité sur l'évolution de la taille du réservoir en eau utilisable maximal du sol. Toutefois, ces méthodes agricoles influent sur d'autres paramètres essentiels du sol, modifiant ainsi la manière dont l'eau pénètre, circule et est absorbée par les plantes. Les effets de ces pratiques dépendent fortement de nombreux facteurs, principalement le climat et la nature du sol. Il est donc crucial de bien comprendre les spécificités locales pour déterminer les méthodes les plus adaptées. De plus, la durée depuis laquelle la pratique est mise en place joue un rôle déterminant sur ces effets, certaines améliorations ne se manifestant qu'après plusieurs saisons. Il est donc impératif d'agir dès maintenant car l'urgence climatique rend ces décisions d'autant plus urgentes.

8 Bibliographie

- Abdallah, A. M., Jat, H. S., Choudhary, M., Abdelaty, E. F., Sharma, P. C., & Jat, M. L. (2021). Conservation Agriculture Effects on Soil Water Holding Capacity and Water-Saving Varied with Management Practices and Agroecological Conditions : A Review. *Agronomy*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091681>
- Abdollahi, L., & Munkholm, L. J. (2014). Tillage System and Cover Crop Effects on Soil Quality : I. Chemical, Mechanical, and Biological Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 78(1), 262-270. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.07.0301>
- Alagele, S. M., Jose, S., Anderson, S. H., & Udawatta, R. P. (2021). Hydraulic lift : Processes, methods, and practical implications for society. *Agroforestry Systems*, 95(4), 641-657. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00614-w>
- Aldaz-Lusarreta, A., Giménez, R., Campo-Bescós, M. A., Arregui, L. M., & Virto, I. (2022). Effects of innovative long-term soil and crop management on topsoil properties of a Mediterranean soil based on detailed water retention curves. *SOIL*, 8(2), 655-671. <https://doi.org/10.5194/soil-8-655-2022>
- Alleto, L. (s. d.). *Fonctionnement hydrique des sols en agriculture de conservation*.
- Angers, D. A., & Eriksen-Hamel, N. S. (2008). Full-Inversion Tillage and Organic Carbon Distribution in Soil Profiles : A Meta-Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 72(5), 1370-1374. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0342>
- Ankenbauer, K. J., & Loheide II, S. P. (2017). The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA. *Hydrological Processes*, 31(4), 891-901. <https://doi.org/10.1002/hyp.11070>
- Araya, S. N., Mitchell, J. P., Hopmans, J. W., & Ghezzehei, T. A. (2022). Long-term impact of cover crop and reduced disturbance tillage on soil pore size distribution and soil water storage. *SOIL*, 8(1), 177-198. <https://doi.org/10.5194/soil-8-177-2022>
- Arvalis-Institut du végétal (Éd.). (2022). *Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures : Guide d'estimation*. Éditions Arvalis. 100 p.
- Association générale des producteurs de maïs. (2023, mai). *Modifier les pratiques pour préserver l'eau du sol, que peut-on en attendre ?*
- Basche, A. D., & DeLonge, M. S. (2019). Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods : A meta-analysis. *PLOS ONE*, 14(9), e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>
- Basche, A. D., Kaspar, T. C., Archontoulis, S. V., Jaynes, D. B., Sauer, T. J., Parkin, T. B., & Miguez, F. E. (2016). Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management*, 172, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.006>
- Basche, A., & DeLonge, M. (2017). The Impact of Continuous Living Cover on Soil Hydrologic Properties : A Meta-Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 81(5), 1179-1190. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.03.0077>
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164-200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>

Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2020). Cover crop impacts on soil physical properties : A review. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1527-1576. <https://doi.org/10.1002/saj2.20129>

Burgess, S. S. O., Adams, M. A., Turner, N. C., & Ong, C. K. (1998). The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*, 115(3), 306-311. <https://doi.org/10.1007/s004420050521>

Calvet, R. (2013). *Le sol* (2e éd). Editions France agricole. 678 p.

Calvet, R., Chenu, C., & Houot, S. (2021). *Les matières organiques des sols* (3e éd). Éditions France agricole. 372 p.

Capriel, P., Beck, T., Borchert, H., Gronholz, J., & Zachmann, G. (1995). Hydrophobicity of the organic matter in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(11), 1453-1458. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00068-P](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00068-P)

Chakraborty, P., Singh, J., Singh, N., & Kumar, S. (2022). Assessing the influence of cover crop on soil water dynamics using soil moisture measurements and hydrus-1D simulations. *Soil Science Society of America Journal*, 86(6), 1538-1552. <https://doi.org/10.1002/saj2.20477>

Chalise, K. S., Singh, S., Wegner, B. R., Kumar, S., Pérez-Gutiérrez, J. D., Osborne, S. L., Nleya, T., Guzman, J., & Rohila, J. S. (2019). Cover Crops and Returning Residue Impact on Soil Organic Carbon, Bulk Density, Penetration Resistance, Water Retention, Infiltration, and Soybean Yield. *Agronomy Journal*, 111(1), 99-108. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.03.0213>

Chen, G., & Weil, R. R. (2010). Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil*, 331(1-2), 31-43. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0223-7>

Coussement, T., Maloteau, S., Pardon, P., Artru, S., Ridley, S., Javaux, M., & Garré, S. (2018). A tree-bordered field as a surrogate for agroforestry in temperate regions : Where does the water go? *Agricultural Water Management*, 210, 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.033>

Czigány, S., Sarkadi, N., Lóczy, D., Cséplő, A., Balogh, R., Fábrián, S. Á., Ciglič, R., Ferk, M., Pirisi, G., Imre, M., Nagy, G., & Pirkhoffer, E. (2023). Impact of Agricultural Land Use Types on Soil Moisture Retention of Loamy Soils. *Sustainability*, 15(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/su15064925>

Daryanto, S., Fu, B., Wang, L., Jacinthe, P.-A., & Zhao, W. (2018). Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. *Earth-Science Reviews*, 185, 357-373. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.013>

Daynes, C. N., Field, D. J., Saleeba, J. A., Cole, M. A., & McGee, P. A. (2013). Development and stabilisation of soil structure via interactions between organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi and plant roots. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 683-694. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.09.020>

Devillers, S. (2024, août 9). Liège développe déjà une arme imparable pour ne pas suffoquer en 2050 : « Deux mécanismes font baisser la température en ville de 12°C ». *La Libre.be*. <https://www.lalibre.be/planete/sciences-espace/2024/08/09/liege-developpe-deja-une-arme-imparable-pour-ne-pas-suffoquer-en-2050-deux-mecanismes-font-baisser-la-temperature-en-ville-de-12c-QFOSDSAGTNFO5J6UAGTDPLV75M/>

Direction de la Protection des Sols du Service public de Wallonie. (s. d.). *La perte de matière organique*. Consulté 17 avril 2024, à l'adresse <https://sol.environnement.wallonie.be/home/sols/autres-menaces/perde-de-matiere-organique.html>

- Duchaufour, P., Faivre, P., Poulenard, J., & Gury, M. (2020). *Introduction à la science du sol : Sol, végétation, environnement* (7e éd). Dunod. 452 p.
- Dupraz, C., & Liagre, F. (2019). *Agroforesterie : Des arbres et des cultures* ([2e édition]). Groupe France agricole. 432 p.
- FAO. (s. d.). *Qu'est-ce que l'agriculture de conservation? | L'agriculture de conservation | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*. Consulté 8 avril 2024, à l'adresse <https://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/what-is-conservation-agriculture/fr/>
- Gabriel, J. L., Quemada, M., Martín-Lammerding, D., & Vanclouster, M. (2019). Assessing the cover crop effect on soil hydraulic properties by inverse modelling in a 10-year field trial. *Agricultural Water Management*, 222, 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.034>
- Garba, I. I., Bell, L. W., & Williams, A. (2022). Cover crop legacy impacts on soil water and nitrogen dynamics, and on subsequent crop yields in drylands : A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(3), 34. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00760-0>
- Garba, I. I., Fay, D., Apriani, R., Yusof, D. Y. P., Chu, D., & Williams, A. (2022). Fallow replacement cover crops impact soil water and nitrogen dynamics in a semi-arid sub-tropical environment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 338, 108052. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108052>
- García-González, I., Hontoria, C., Gabriel, J. L., Alonso-Ayuso, M., & Quemada, M. (2018). Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. *Geoderma*, 322, 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.024>
- García-Tejero, I. F., Carbonell, R., Ordoñez, R., Torres, F. P., & Durán Zuazo, V. H. (2020). Conservation Agriculture Practices to Improve the Soil Water Management and Soil Carbon Storage in Mediterranean Rainfed Agro-Ecosystems. In R. S. Meena (Éd.), *Soil Health Restoration and Management* (p. 203-230). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8570-4_6
- Gongora, V. R. M., Secco, D., Bassegio, D., De Marins, A. C., Chang, P., & Savioli, M. R. (2022). Impact of cover crops on soil physical properties, soil loss and runoff in compacted Oxisol of southern Brazil. *Geoderma Regional*, 31, e00577. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00577>
- Guyot, G., & Mamy, J. (2013). *Climatologie de l'environnement : Cours et exercices corrigés* (2e éd). Dunod.
- Haruna, S. I., Anderson, S. H., Udawatta, R. P., Gantzer, C. J., Phillips, N. C., Cui, S., & Gao, Y. (2020). Improving soil physical properties through the use of cover crops : A review. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3(1), e20105. <https://doi.org/10.1002/agg2.20105>
- Haruna, S. I., Ritchey, E., Mosley, C., & Ku, S. (2023). Effects of cover crops on soil hydraulic properties during commodity crop growing season. *Soil Use and Management*, 39(1), 218-231. <https://doi.org/10.1111/sum.12803>
- Horton, R., Bristow, K. L., Kluitenberg, G. J., & Sauer, T. J. (1996). Crop residue effects on surface radiation and energy balance—Review. *Theoretical and Applied Climatology*, 54(1-2), 27-37. <https://doi.org/10.1007/BF00863556>
- Hudson, B. D. (1994). *Soil organic matter and available water capacity*. 49(2), 189.
- Irmak, S., Sharma, V., Mohammed, A. T., & Djaman, K. (2018). Impacts of Cover Crops on Soil Physical Properties : Field Capacity, Permanent Wilting Point, Soil-Water Holding Capacity, Bulk Density,

- Hydraulic Conductivity, and Infiltration. *Transactions of the ASABE*, 61(4), 1307-1321. <https://doi.org/10.13031/trans.12700>
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>
- Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of Soil Physics* (CRC Press). 699 p.
- Lemtiri, A., Colinet, G., Alabi, T., Cluzeau, D., Zirbes, L., Haubruge, E., & Francis, F. (2014). Impacts of earthworms on soil components and dynamics. A review. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/163467>
- Liste, H.-H., & White, J. C. (2008). Plant hydraulic lift of soil water – implications for crop production and land restoration. *Plant and Soil*, 313(1-2), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9696-z>
- López-Bellido, R. J., López-Bellido, L., Benítez-Vega, J., & López-Bellido, F. J. (2007). Tillage System, Preceding Crop, and Nitrogen Fertilizer in Wheat Crop : I. Soil Water Content. *Agronomy Journal*, 99(1), 59-65. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0025>
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 39-47. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>
- Ogle, S. M., Alsaker, C., Baldock, J., Bernoux, M., Breidt, F. J., McConkey, B., Regina, K., & Vazquez-Amabile, G. G. (2019). Climate and Soil Characteristics Determine Where No-Till Management Can Store Carbon in Soils and Mitigate Greenhouse Gas Emissions. *Scientific Reports*, 9(1), 11665. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47861-7>
- Panagos, P., Ballabio, C., Himics, M., Scarpa, S., Matthews, F., Bogonos, M., Poesen, J., & Borrelli, P. (2021). Projections of soil loss by water erosion in Europe by 2050. *Environmental Science & Policy*, 124, 380-392. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.07.012>
- Ridremont, F., Degré, A., & Claessens, H. (2012). *MIEUX COMPRENDRE ET ÉVALUER LA RÉSERVE EN EAU DES SOLS FORESTIERS*.
- Soane, B. D., Ball, B. C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., & Roger-Estrade, J. (2012). No-till in northern, western and south-western Europe : A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66-87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>
- Thibaut, K., & Ozer, P. (2021). Les sécheresses en Wallonie, un nouveau défi du changement climatique ? Quelques pistes pour améliorer la gestion de ce phénomène. *Geo-Eco-Trop*, 45(3), 517-527.
- Tychon, B. (2019). *Conservation des sols—Erosion hydrique* [Cours]. Université de Liège Campus Environnement, Arlon, Belgique.
- Van Es, H., Schindelbeck, R., Ristow, A., Kurtz, K., & Fennell, L. (2017). *Wet Aggregate Stability*. Cornell University - Soil Health Laboratory.
- Zhang, X., Zhao, W., Wang, L., Liu, Y., Liu, Y., & Feng, Q. (2019). Relationship between soil water content and soil particle size on typical slopes of the Loess Plateau during a drought year. *Science of The Total Environment*, 648, 943-954. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.211>