

Faculté des bioingénieurs

Evaluation systémique de la transition d'un système agricole conventionnel à un système de conservation des sols

Auteur : Arnaud de Decker

Promoteur(s) : Charles Bielders

Lecteur(s) : Bruno Huygebaerts, Xavier Draye

Année académique 2023-2024

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

Remerciements

La réalisation de mémoire n'aurait jamais eu lieu sans l'aide de certaines personnes et je tiens à les en remercier.

Mon promoteur, Charles Bielders, pour avoir accepté de m'accompagner, de m'avoir corrigé et conseillé dans cette dernière ligne droite. Malgré un dernier quadrimestre compliqué, il a su me tenir en haleine. C'est entre autres grâce à lui, que j'ai découvert l'importance de l'agriculture et plus particulièrement les pratiques de conservation des sols, thématique dans laquelle je souhaite m'orienter dans les prochaines années.

Le CRA-W et leurs membres qui m'ont apporté de l'aide de près ou loin et répondu à mes questions : Morgan, Briec et Bruno.

Mes lecteurs, Xavier Draye et Bruno Huygebaerts qui ont accepté de lire ce document.

Mes parents et mon frère, qui m'ont toujours soutenu dans les moments de doutes, de relâchements et qui m'ont encouragé tout au long de mes études.

Finalement, toutes les personnes qui m'ont apporté de l'aide et du soutien, de près ou de loin, sans même parfois le percevoir, tels que des amis proches.

Arnaud de Decker

Table des matières

1	Origine de l'agriculture de conservation	17
2	Les pratiques agricoles de l'agriculture de conservation	19
2.1	Les piliers de l'agriculture de conservation	19
2.2	Perturbation mécanique minimale du sol	19
2.2.1	Le travail du sol.....	19
2.2.2	Techniques de travail du sol.....	20
2.2.3	Labour	22
2.2.4	Techniques culturales sans labour.....	23
2.2.5	Les effets bénéfiques et les contraintes des techniques sans labour	25
2.2.6	La gestion des adventices, ravageurs et maladies	27
2.2.7	Les impacts environnementaux.....	27
2.3	Couverture organique permanente du sol.....	28
2.3.1	Les types de couverts végétaux.....	29
2.3.2	Les effets bénéfiques et les contraintes des couverts végétaux.....	30
2.3.3	La gestion des adventices, des ravageurs et des maladies.....	31
2.3.4	Les impacts environnementaux.....	31
2.4	Diversification des espèces	32
2.4.1	La rotation culturale	32
2.4.2	La culture associée	33
2.4.3	Les mélanges variétaux	33
2.4.4	Les effets bénéfiques et les contraintes de la diversification des espèces.....	33
3	La transition de l'agriculture conventionnelle vers une agriculture de conservation des sols	34
4	Objectifs	37
5	Plan parcellaire.....	41
6	Description des systèmes	42
6.1	Rotations.....	42
6.2	Couverts végétaux et gestion des résidus	43
6.3	Travail du sol et semis.....	44
6.4	Fertilisation minérale.....	45
6.5	Traitements phytosanitaires.....	47
7	Acquisition des données.....	49

7.1	Rendements	49
7.2	Échantillons de sol	49
7.3	Pratiques agricoles de gestion	51
8	Analyse des résultats	53
8.1	Modèle statistique	53
8.2	Interprétation des composantes du modèle	54
8.3	Evaluation du modèle	54
9	Analyses des rendements	57
9.1	Froment d'hiver	57
9.2	Betteraves sucrières	60
9.3	Lin « fibres »	64
9.4	Pois de conserverie	65
10	Analyses des sols	67
10.1	Les propriétés physiques du sol	67
10.1.1	Densité apparente	67
10.2	Les propriétés chimiques du sol	69
10.2.1	pH _{eau} et pH _{KCl}	69
10.2.1	Carbone organique	71
10.2.2	Azote total	74
10.2.3	C/N	77
10.2.4	Phosphore	78
10.2.5	Cations échangeables	80
11	Analyses des traitements phytosanitaires	82
11.1	Protection des cultures	82
11.2	Fertilisation minérale	83
11.2.1	N	83
11.2.2	P ₂ O ₅	84
11.2.3	K ₂ O	84
11.2.4	MgO	85
11.2.5	SO ₃	86
12	Discussion	91
12.1	Evolution des rendements des cultures	91
12.2	Impact des pratiques agricoles sur les propriétés du sol	92

12.2.1	Le travail du sol.....	92
12.2.2	Les traitements phytosanitaires	92
12.2.3	Les couverts végétaux et gestion des résidus	93
12.2.4	Les propriétés du sol	94
13	Conclusion.....	99
14	Bibliographie	100
15	Annexes	Erreur ! Signet non défini.

Table des figures

Figure 1. Classification des techniques de travail du sol (Labreuche, 2014).....	21
Figure 2. Coupe transversale d'un sol après un labour réalisé avec une charrue à socs (Arvalis, 2017).....	22
Figure 3. Effet « splash » (Kazi-tani, 2016).....	28
Figure 4. Plan parcellaire de la plateforme SYCI (CRAW).....	41
Figure 5. Rotation culturale du système conventionnel	42
Figure 6. Rotation culturale du système de conservation des sols	43
Figure 7. Influence du labour sur la mesure du stock en carbone organique (Hauser, 2013) ..	51
Figure 8. Evolution des rendements moyens nets par hectare du froment d'hiver en fonction du système de culture entre 2020 et 2023	58
Figure 9. Evolution des rendements moyens nets par hectare du froment d'hiver en fonction du précédent cultural du système de culture entre 2021 et 2023.....	59
Figure 10. Evolution des rendements moyens nets par hectare de biomasse des betteraves sucrières par année et en fonction du système de culture.....	61
Figure 11. Evolution du taux de sucre des betteraves sucrières par année et en fonction du système de culture	63
Figure 12. Rendements moyens nets par hectare du lin « fibres » en fonction du système de culture des années 2021 et 2023.....	64
Figure 13. Evolution des rendements moyens nets par hectare des pois de conserverie en fonction du système de culture entre 2020 et 2023	66
Figure 14. Densité apparente du sol moyenne en fonction de la profondeur, de l'année et du système de culture	68
Figure 15. pH eau et pH KCl en fonction de la profondeur et du système de culture en 2022	70
Figure 16. Concentration moyenne en carbone organique en fonction de la profondeur et du système de culture par année.....	72
Figure 17. Stock total moyen de carbone organique dans les 50 premiers centimètres du sol en fonction du système de culture en 2020, 2021 et 2023	73
Figure 18. Concentration moyenne en azote total en fonction de la profondeur et du système de culture par année	75
Figure 19. Stock total moyen d'azote dans les 50 premiers centimètres de sol en fonction du système de culture en 2020, 2021 et 2023	76
Figure 20. Corrélation entre le stock de carbone organique et le stock d'azote total du sol en 2022 en fonction du système de culture	77
Figure 21. Concentration moyenne en phosphore disponible en fonction de la profondeur et du système de culture par année.....	79

Figure 22. Doses moyennes de N par unités appliquées en fonction de la culture et du système de culture entre 2020 et 2023	83
Figure 23. Doses moyennes de P ₂ O ₅ par unités appliquées en fonction de la culture et du système de culture en 2020	84
Figure 24. Doses moyennes de K ₂ O par unités appliquées en fonction de la culture et du système de culture entre 2020 et 2023	84
Figure 25. Doses moyennes de MgO par unités appliquées en fonction de la culture et du système de culture entre 2020 et 2021	85
Figure 26. Doses moyennes de SO ₃ par unités appliquées en fonction de la culture et du système de culture entre 2020 et 2023	86
Figure 27. Quantité totale des nutriments apportés par unités appliquées en fonction du système de culture et de la culture entre 2020 et 2023.....	87
Figure 28. Tableau Excel du travail du sol effectué sur les parcelles	Erreur ! Signet non défini.
Figure 29. Tableau Excel du type de semis des différentes cultures	Erreur ! Signet non défini.
Figure 30. Tableau Excel des dates de récolte des cultures	Erreur ! Signet non défini.
Figure 31. Tableau Excel des traitements phytosanitaires appliqués aux cultures	Erreur ! Signet non défini.
Figure 32. Tableau Excel des fertilisations minérales appliquées aux cultures	Erreur ! Signet non défini.
Figure 33. Tableau Excel de l'entretien des parcelles	Erreur ! Signet non défini.

Liste des tableaux

Tableau 1. Couverts végétaux précédents les cultures et le type de destruction en fonction du système de culture	43
Tableau 2. Nombre de passages par type de travail du sol et type de semis en fonction du système de culture	44
Tableau 3. Engrais de fond et annuels utilisés en fonction des cultures et du système	46
Tableau 4. Maladies/ravageurs/adventices traitées en fonction des cultures et du système de culture.....	47
Tableau 5. Nombre d'échantillons analysés par profondeur et par système de culture.....	50
Tableau 6. Résultats de l'ANOVA du modèle du rendement moyen net du froment d'hiver ..	57
Tableau 7. Écart des rendements moyens nets du froment d'hiver du système sol par rapport au système conventionnel	59
Tableau 8. Résultats de l'ANOVA du modèle du rendement de la biomasse des betteraves sucrières.....	60
Tableau 9. Écart des rendements moyens nets de biomasse des betteraves sucrières du système sol par rapport au système conventionnel	62
Tableau 10. Résultats de l'ANOVA du modèle du taux de sucre des betteraves sucrières	62
Tableau 11. Écart des taux moyens nets de sucre des betteraves sucrières du système sol par rapport au système conventionnel	63
Tableau 12. Résultats de l'ANOVA du modèle du rendement moyen net du lin	64
Tableau 13. Résultats de l'ANOVA du modèle du rendement du pois de conserverie	65
Tableau 14. Écart des rendements moyens nets des pois de conserverie du système sol en fonction du système conventionnel entre 2020 et 2023	66
Tableau 15. Résultats de l'ANOVA du modèle de la densité apparente	67
Tableau 16. Résultats de l'ANOVA des modèles de pH	69
Tableau 17. Résultats de l'ANOVA des modèles de la concentration en carbone organique..	71
Tableau 18. Résultats de l'ANOVA pour le modèle sur le stock de carbone organique.....	73
Tableau 19. Résultats de l'ANOVA du modèle sur la concentration d'azote total.....	74
Tableau 20. Résultats de l'ANOVA du modèle sur le stock d'azote total	75
Tableau 21. Résultats de l'ANOVA du modèle du P disponible.....	78
Tableau 22. Résultats des ANOVA des modèles des cations échangeables	80
Tableau 23. Teneurs moyennes des cations échangeables dans les 30 premiers centimètres de sol en 2022 en fonction du système de culture et du bloc expérimental	81
Tableau 24. IFT totaux moyens par culture en 2023.....	82
Tableau 25. Outils utilisés et leur gamme de profondeur de travail en fonction du type de travail du sol et du système de culture.....	Erreur ! Signet non défini.

Tableau 26. Unités appliquées des minéraux par culture, année et système de culture. **Erreur ! Signet non défini.**

Liste des abréviations

CRA-W	Centre de Recherches Agronomiques Wallon
SYCI	Système de culture Innovant
FAO	Organisation des Nations Unies pour l’Alimentation et l’Agriculture
Aconv	Agriculture conventionnelle
AC	Agriculture de conservation des sols
Conv	Conventionnel
Sol	Conservation des sols
SDC	Système de culture
SOC	Stock de carbone organique
MOP	Matière organique particulaire
CIPAN	Culture intermédiaire piège à nitrate
DA	Densité apparente
ANOVA	Analyse de variance

Introduction

L'agriculture en Belgique, comme dans de nombreux pays, se trouve à un tournant crucial face à des enjeux environnementaux, économiques et sociaux sans précédent. Les défis liés à la sécurité alimentaire, à la dégradation des sols et à la perte de biodiversité exigent une réévaluation des pratiques agricoles traditionnelles. Historiquement, le système agricole conventionnel a été dominé par une logique de maximisation de la production, souvent au détriment de la santé des sols et de l'environnement (Friedrich, Derpsch, & Kassam, 2012). Cette approche a conduit à une intensification des pratiques agricoles, à une utilisation accrue des intrants chimiques et à une dégradation progressive de la ressource sol, qui est pourtant essentielle pour la durabilité des systèmes de production (Friedrich, Derpsch, & Kassam, 2012).

Face à ces constats alarmants, la nécessité d'une transition vers de nouvelles pratiques agricoles devient évidente. L'Agriculture de Conservation (AC) émerge comme une alternative viable, axée sur la préservation et l'amélioration de la santé des sols (Friedrich, Derpsch, & Kassam, 2012). Cette approche repose sur trois principes fondamentaux : le minimum de travail du sol, la couverture permanente du sol et la rotation des cultures (FAO, s.d.). En mettant l'accent sur la vitalité du sol, l'AC vise non seulement à améliorer la productivité agricole, mais aussi à restaurer les écosystèmes dégradés et à renforcer la résilience des exploitations face aux aléas climatiques.

Cependant, la transition vers l'AC en Belgique rencontre plusieurs défis. Bien que cette approche ait démontré son efficacité dans d'autres pays, son adoption reste limitée en raison de divers facteurs, tels que les inerties institutionnelles, les préoccupations économiques des agriculteurs et le manque de formation et d'information sur ces nouvelles pratiques (Morelle & Braibant, 2018). Ainsi, il est essentiel de comprendre les dynamiques qui influencent cette transition, d'identifier les obstacles à l'adoption et de mettre en lumière les opportunités qui pourraient favoriser un changement de paradigme dans le secteur agricole.

Cette étude est réalisée en collaboration avec le CRA-W. Celui-ci a mis en place la plateforme SYCI qui vise à concevoir, installer et comparer des systèmes de culture innovants. Le travail réalisé se concentre sur la comparaison des pratiques agricoles d'un système en agriculture conventionnelle et d'un système en agriculture de conservation des sols. Par le biais d'une analyse systémique, cette recherche vise à identifier les leviers et barrières à la mise en place de ces pratiques et les avantages apportés aux agriculteurs dans leur transition vers une production plus durable. Pour ce faire, des analyses de rendements, de sols et des pratiques utilisées seront réalisées.

Le travail est divisé en trois parties. La première partie (« *Etat de l'art* ») a pour but d'avoir une vue d'ensemble sur ce que signifie le terme "Agriculture de Conservation". Cette partie est divisée en trois chapitres. Le premier chapitre intitulé « Origine de l'agriculture de conservation » est présenté de manière à comprendre l'origine de ces nouvelles pratiques agricoles et l'importance de leur développement. Le second chapitre intitulé « Les piliers de l'agriculture de conservation » a pour objectif de présenter les pratiques de l'AC et d'évaluer les bénéfices de leur mise en place. Enfin, le troisième chapitre intitulé « La transition d'une agriculture conventionnelle vers une agriculture de conservation des sols » a pour but d'identifier les leviers et les barrières auxquels peuvent faire face les agriculteurs pour adopter ce type d'agriculture.

La deuxième partie « *Matériel et méthodes* » présente dans un premier temps l'objet de l'étude menée par le CRA-W et ensuite la méthodologie employée pour l'acquisition des données et l'analyse statistique des résultats.

La troisième partie de ce travail « *Résultats* » est également divisée en trois chapitres : « Analyses des rendements », « Analyses des sols » et « Analyse des traitements phytosanitaires ». Ceux-ci présentent les résultats des différentes analyses effectuées.

La quatrième partie de ce travail « *Discussion* » met en lien tous les résultats obtenus avec la méthodologie et permet ensuite de les interpréter.

La cinquième partie de ce travail « *Conclusion* » rassemble les points les plus importants et met en avant les défis et les perspectives à venir.

Première partie :

État de l'art

1 Origine de l'agriculture de conservation

Le terme Agriculture de Conservation (AC) remonte à 1997. La FAO le mentionne lors d'une conférence sur les techniques culturales simplifiées (TCS) au Mexique, mais ne l'a défini officiellement qu'en 2008. L'agriculture de conservation repose sur 3 piliers fondamentaux : la réduction du travail du sol, la couverture permanente du sol par des végétaux ou résidus et la diversification des espèces dans la rotation des cultures (FAO, 2024).

Les premières formes d'agriculture de conservation sont apparues dans les années 1930 aux États-Unis en réaction à la dénudation des sols et à l'appauvrissement en matière organique de ceux-ci face aux différentes crises érosives, comme ce fut le cas avec le Dust Bowl (Laurent, 2015). Le Dust Bowl, littéralement « bol de poussière », est un phénomène d'érosion éolienne qui prit la forme d'une série de tempêtes et provoqua une catastrophe écologique et agricole dans la région des Grandes Plaines. Ces événements ont fait suite à une absence de couvert végétal et de techniques de prévention de l'érosion et d'une série de sécheresses et de périodes d'humidité anormale dans le Grand Désert américain (Futura, s.d.). Ce phénomène naturel, associé aux pratiques culturales intensives, a mis en avant la problématique de dégradation des sols et fut à l'origine de la création du Natural Resources Conservation Service (NCRS) (Université de Genève, 2014).

Les Dusty Thirties¹ ont conduit les agriculteurs américains à changer leurs pratiques agricoles de manière assez rapide. Des concepts visant à réduire le labour et à maintenir le sol couvert ont ainsi été développés. De nouvelles techniques, telles que le semis direct sous couvert, ont commencé à apparaître dans les années 1950 : les semences sont directement placées dans le sol à travers les couverts végétaux, sans travail du sol préalable (Mollier, 2013). Ces nouvelles techniques ont requis le développement de nouveaux semoirs adaptés à ces systèmes de cultures. Le terme « travail du sol de conservation » est apparu, une des prémices de l'agriculture de conservation (Hobbs, 2007). Le « travail du sol de conservation » désigne plus couramment le non-labour.

Ce n'est que dans les années 1960 que le non-labour est réellement entré dans les pratiques agricoles aux États-Unis. En 1970, il atteint le Brésil et est testé en Afrique de l'Ouest (Lahmar, Adoption de l'agriculture de conservation en Europe : Les enseignements du projet KASSA, 2008). Pendant ce temps, les pratiques et les équipements agricoles se développent et s'améliorent afin d'optimiser la productivité des cultures. La créativité des agriculteurs et la recherche continue des scientifiques vont susciter l'intérêt d'autres pays, y compris les pays industrialisés. En 1990, l'AC connaît une réelle expansion dans le monde. Des organisations de développement et de recherche internationales telles que la FAO, le CIRAD² et certains centres du CGIAR³ suscitent une attention à celle-ci (Friedrich, Derpsch, & Kassam, 2012).

¹ Période correspondante au Dust Bowl.

² Le CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) est l'organisme français de recherche agronomique et de coopération internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes.

³ Le CGIAR (Consultative Group on International Agricultural Research) se définit comme un partenariat global qui réunit des organisations internationales œuvrant dans la recherche sur la sécurité alimentaire.

En Europe, les premières formes de l'AC apparaissent dans les années 1980 et varient selon les pays (Lahmar, 2006). Le problème principal n'est pas l'érosion, même si elle existe, mais elle est moins marquée ; les pratiques de non-labour et de couverture du sol sont apparues pour faire face à une perte de fertilité du sol. Les agriculteurs essaient, de leurs propres initiatives, d'améliorer la qualité de leurs sols, car ils voient leur rentabilité diminuer à cause de l'intensification du travail du sol. En Wallonie, certains agriculteurs ont commencé à pratiquer l'agriculture sans labour également dans les années 1980 (Vankeerberghen & Stassart, 2016). Dans le milieu des années 1990, les herbicides et les nouvelles techniques de semis ont facilité la mise en place du non-labour (Holland, 2004). L'AC confère alors des avantages aux agriculteurs tels que la réduction des coûts (main d'œuvre et carburant) et des risques d'érosion des sols.

Les systèmes en AC sont désormais pratiqués sur environ 205,4 millions d'hectares dans le monde, en 2018/2019. Tandis qu'en 1973/74, ils ne couvraient que 2,8 millions d'hectares (Kassam, 2022). Depuis 2008, les systèmes AC se sont étendus à un rythme moyen de plus de 10,5 millions d'hectares par an (Kassam, Friedrich, & Derpsch, 2018). Cette méthode de production alternative est en pleine croissance et montre un réel intérêt pour les agriculteurs et les gouvernements nationaux dans l'optique d'une agriculture plus durable. L'adoption s'intensifie plus récemment en Asie et en Afrique, où la sensibilisation à des pratiques agroécologiques se renforce face à des pays en plein développement. Aujourd'hui, il n'y a que quelques pays où une quelconque forme d'AC n'est pas, ou presque, pratiquée et où il n'existe pas de résultats de recherches locales disponibles sur l'AC (Friedrich, Derpsch, & Kassam, 2012).

À l'origine, les agriculteurs ont mis en œuvre l'AC pour atténuer l'érosion et la dégradation des sols. Par la suite, elle est devenue une stratégie visant à réduire les coûts de production tout en maintenant et en améliorant la santé et la fertilité des sols. Les études sur les différentes pratiques de l'AC sont en perpétuelle évolution et continuent de montrer les bienfaits de ces nouvelles pratiques à l'égard d'une agriculture plus intensive.

2 Les pratiques agricoles de l'agriculture de conservation

2.1 Les piliers de l'agriculture de conservation

L'AC est un système agricole qui peut éviter les pertes de terres arables tout en régénérant les terres dégradées. Ce système améliore la biodiversité et les processus biologiques naturels au-dessus et en-dessous de la surface du sol. Ceci contribue à accroître l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles en maintenant un potentiel de production agricole performant sur les plans technique et économique (FAO, s.d.).

L'agriculture de conservation se base sur trois grands principes adaptés aux conditions et aux besoins locaux afin de préserver les sols (FAO, s.d.) :

1. Perturbation mécanique minimale du sol
2. Couverture organique permanente du sol
3. Diversification des espèces

2.2 Perturbation mécanique minimale du sol

Les intérêts de perturber au minimum le sol sont multiples et passent par la réduction du travail du sol. Dans cette partie, l'intérêt est porté sur l'impact du travail mécanique du sol. Les différents types de travail du sol y sont développés.

2.2.1 Le travail du sol

Le travail du sol englobe les opérations mécaniques visant à fragmenter le sol, influençant ainsi ses caractéristiques (Labreuche, 2014). Le travail du sol est effectué par différents outils. Le choix des outils dépend de plusieurs facteurs (nature et état structural du sol, climat, système de culture...). Les effets recherchés par ces outils sont multiples : la fragmentation des mottes, la fissuration des semelles de labour ou de non-labour, l'homogénéisation du relief par le déplacement de terres et le tassement afin d'assurer le contact sol-graine.

Ces actions mécaniques affectent divers processus tels que la circulation de l'eau et de l'air, les réactions biochimiques, et la croissance des adventices. Ces modifications entraînent des impacts directs et indirects sur la composition chimique, biologique et hydrique des sols cultivés. Le type de travail du sol, qu'il soit avec ou sans retournement, et sa profondeur déterminent la répartition des graines d'adventices, des éléments minéraux peu mobiles, et influencent la faune et la flore du sol (Labreuche, Importance du travail du sol : typologie des modes de mise en oeuvre et effets sur le rendements des cultures, 2014).

De plus, le type de travail du sol, notamment la pratique du labour, influence la présence ou l'absence d'un mulch, qui est une couche recouvrant le sol, composée de résidus de culture ou de végétation vivante. Ce mulch joue un rôle dans la protection contre l'érosion, la gestion des adventices, ainsi que dans la régulation des flux d'eau et de chaleur, et il est bénéfique pour la faune du sol.

Dans des systèmes de culture intensifs, le développement de l'usage des intrants chimiques a, peu à peu, remplacé le rôle du travail du sol par un moyen de corriger les états structuraux, pour améliorer l'efficacité d'utilisation des intrants (eau, éléments minéraux) et les conditions de germination et de levée des cultures (Labreuche, 2014). Tandis qu'en agriculture biologique ou dans les zones sujettes à l'érosion, il reste crucial pour la gestion des adventices et le contrôle du ruissellement (Labreuche, 2014).

Quel que soit le type d'agriculture pratiqué, le travail du sol a un impact significatif sur les performances économiques des exploitations. Les opérations, notamment celles de travail en profondeur, nécessitent une consommation importante d'énergie fossile et engendrent des coûts en charges de mécanisation (Labreuche, 2014).

Ainsi, les décisions relatives à la préparation des sols sont cruciales sur les plans économique, agronomique et environnemental pour une exploitation agricole. Il n'est donc pas surprenant que le travail du sol soit au centre des discussions sur l'évolution des systèmes de culture, afin de répondre aux nouveaux défis auxquels l'agriculture fait face.

2.2.2 Techniques de travail du sol

L'AC vise à réduire voire à supprimer le labour afin de limiter l'enfouissement des résidus et maintenir un taux de matière organique suffisant à la surface du sol (Vankeerberghen & Stassart, 2016). Les techniques de travail du sol utilisées en AC, rassemblées sous le nom de « Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) », permettent d'éviter le retournement des horizons, à la différence du labour (Labreuche, 2014).

La diversité des techniques de travail du sol peut être classée selon trois critères principaux (Figure 1) (Labreuche, Importance du travail du sol : typologie des modes de mise en oeuvre et effets sur le rendements des cultures, 2014) :

1. *Mode d'effet sur le sol et les résidus de culture* : la fragmentation du sol peut se faire sans retournement, comme avec des outils à dents ou à disques, dans les techniques sans labour. Certains outils ne fragmentent que le sol tout en conservant les résidus à la surface.
2. *Profondeur de travail* : la profondeur de travail varie généralement de 0 à 30 cm et peut exceptionnellement atteindre 80 cm dans le cas d'un labour très profond.
3. *Proportion de la surface travaillée* : l'utilisation d'équipements comme le strip-till et les semoirs spécialisés permet de concentrer le travail du sol près de la ligne de semis sur une bande étroite, intégrant une approche de précision dans le travail du sol.

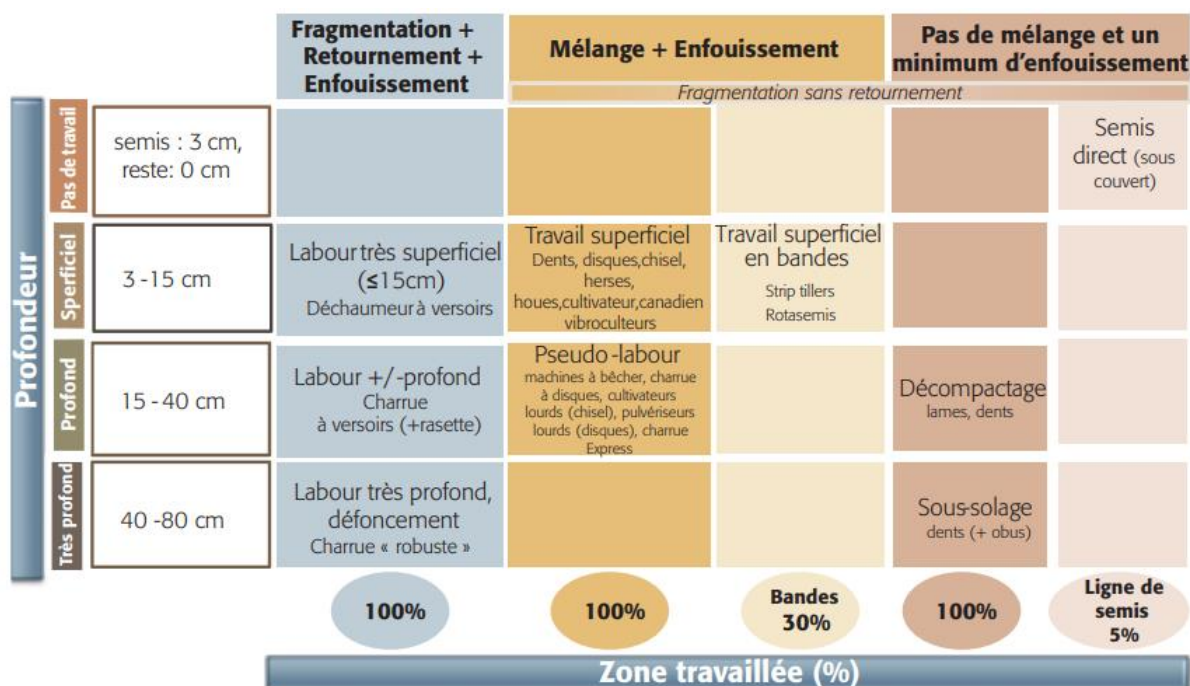


Figure 1. Classification des techniques de travail du sol (Labreuche, 2014)

L'USDA⁴ a développé l'indice d'intensité de travail du sol (STIR⁵) pour évaluer le niveau de perturbation du sol (USDA, 2008). En ajoutant un critère supplémentaire : les vitesses opérationnelles des équipements de travail du sol, l'intensité du travail du sol peut être évaluée. Les types d'outils utilisés (à dents, à disques, rotatifs) vont donc influencer ces vitesses.

Cette intensité est également évaluée par le nombre d'opérations culturales réalisées. Le calcul du STIR liste l'ensemble des machines utilisées, du travail du sol jusqu'à la récolte. Par définition, les opérations sans labour nécessitent une valeur de STIR de 30 ou moins, sachant que celles-ci varient entre 0 et 200 (USDA, 2008). Les valeurs de STIR sont ensuite utilisées dans le cadre de l'équation universelle révisée de perte de sol, version 2 (RUSLE 2) (USDA, 2008).

⁴ USDA : United States Department of Agriculture

⁵ STIR : Soil Tillage Intensity Rating

2.2.3 Labour

Le labour est un travail du sol profond effectué avec une charrue à socs, une charrue à disques ou une machine à bêcher. La profondeur de travail peut varier en fonction de l'état du sol et du type de culture à implanter.

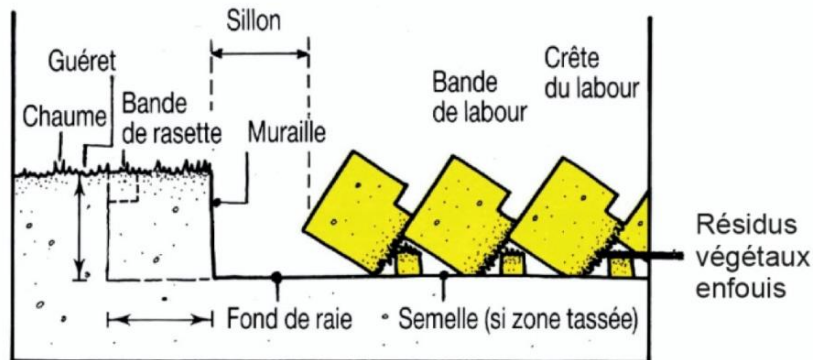


Figure 2. Coupe transversale d'un sol après un labour réalisé avec une charrue à socs (Arvalis, 2017)

La figure 2 illustre la coupe transversale d'un labour grâce à une charrue à socs. Un avantage de la charrue à socs est l'enfouissement total des résidus végétaux. Les socs permettent de couper une partie de la bande de labour, évitant ainsi de garder exposés les résidus à la surface et de faciliter le développement de nouvelles adventices.

Le labour sert à enfouir et mélanger les résidus végétaux et les amendements comme les engrais organiques ou inorganiques (Hobbs, 2007). Ce travail permet de détruire les cultures intermédiaires ainsi qu'à détruire les adventices. Il est réalisé afin d'ameublir le sol et de le soulager de la compaction, et le prépare à un travail plus superficiel.

Le passage à répétition du tracteur dans les raies de labour favorise la formation d'une semelle de labour (Jasinski, 2020). Dans certains cas, la semelle de labour peut créer une couche qui retient l'eau, ce qui peut être bénéfique dans les sols secs. Cependant, une rétention excessive peut également provoquer des problèmes de drainage, augmentant le risque de saturation et d'érosion (Purdue University, 2019).

Les racines des plantes peuvent rencontrer des difficultés à pénétrer à travers la semelle de labour. Cela limite la profondeur d'enracinement, ce qui peut affecter l'accès aux nutriments et à l'eau, surtout en période de sécheresse (Morris, 2010).

Le labour en retournant le sol entraîne une remontée des pierres à la surface du sol. En fragmentant les agrégats du sol, les pierres qui étaient auparavant enfouies dans les couches inférieures peuvent remonter vers la surface. À force de répétitions, de plus en plus de pierres se retrouvent en surface (Naseri, Iden, & al., 2019). Celles-ci impactent la structure du sol et sa capacité à retenir l'eau. Cette remontée de pierres nécessite une charge de travail supplémentaire pour l'agriculteur, pour être excavées ou bien broyées (Naseri, Iden, & al., 2019).

Le labour perturbe également certains organismes et l'activité biologique du sol (vers de terre, insectes, champignons, microorganismes). Des recherches ont montré qu'un labour intensif peut réduire la biomasse des vers de terre de 50 % en raison de la destruction de leurs habitats (Blouin, 2013). La destruction des habitats peut entraîner une diminution des populations d'espèces et une réduction de la diversité (Frederick, 2016). Les vers de terre et d'autres organismes jouent des rôles importants dans la décomposition de la matière organique et l'amélioration de la structure du sol. Une réduction de ces populations entraîne donc une baisse de fertilité des sols.

2.2.4 Techniques culturales sans labour

L'abandon de la charrue en agriculture de conservation permet de réduire la perturbation du sol. Les techniques sans labour connaissent un engouement sans précédent depuis quelques années, notamment en Belgique. En zone de grandes cultures (Hesbaye) ainsi qu'en région de culture-élevage (Condroz), les surfaces en non-labour représenteraient 15-20 % de l'assolement en céréales d'hiver et moins de 10 % pour les autres cultures (Vankeerberghen, Dannevoye, & al., 2014).

La pratique du non-labour existe sous différentes appellations : techniques sans labour (TSL), les techniques cultures sans labour (TCSL) et les techniques culturales simplifiées (TCS) (Vankeerberghen, Dannevoye, & al., 2014). Ces techniques rassemblent quatre opérations de travail du sol : le pseudo-labour, le décompactage, le travail superficiel et le travail en bandes.

2.2.4.1 Le pseudo-labour

Le pseudo-labour est une technique de travail du sol développée pour remplacer le labour classique à la charrue. Elle consiste à mélanger la terre avec les amendements et les résidus de culture. Ce travail est réalisé à l'aide d'instruments aratoires (décompacteurs ou cultivateurs) et ce, sans retournement. La profondeur de travail varie de 15 à 40 centimètres (Chenu & Butault, 2013).

L'objectif est d'ameublir le sol pour mieux préserver la biodiversité et diminuer le temps de travail. Il est également moins énergivore que le labour. Le nombre de galeries de vers de terre généré est deux à trois fois plus élevé qu'en labour (Agrocomposites, s.d.).

2.2.4.2 Le décompactage

Les interventions culturales en conditions humides peuvent dégrader la structure du sol. En cas de tassement, un décompactage peut être utile afin de ne pas pénaliser la prochaine culture. Il est utilisé en cas de nécessité à la place du labour en AC pour les cultures les plus sensibles telles que le maïs, le pois ou l'orge de printemps (Arvalis, 2014).

Le décompacteur travaille sur une profondeur variant de 15 à 40 centimètres et sert à faire éclater une couche de sol compacte, typiquement une semelle de labour (Chenu & Butault, 2013). Le décompactage n'entraîne pas de retournement et ne perturbe pas le nivellement de la surface travaillée. Si le labour peut se faire lorsque le sol est humide, le décompactage doit être fait quand le sol est friable (Arvalis, 2014).

Cette opération ne conduit pas à une dilution de la matière organique en profondeur (Chenu & Butault, 2013), elle permet de maintenir la matière organique à la surface. Le décompactage n'est pas systématiquement utilisé et n'est pratiqué qu'en cas de tassement de sol trop important. Il peut être également pratiqué de manière localisée si seulement une partie de la parcelle est compactée ou abimée (Agrocomposites, s.d.).

2.2.4.3 Le travail superficiel

Le travail superficiel sert à ameublir les 5 à 15 premiers centimètres sans retournement du sol, à enfouir les résidus de surface et à faciliter la décomposition des résidus de cultures (Heddadj & Le Roux, 2014). Ce travail peut être réalisé par différents outils tels que les déchaumeurs, les chisels, les cultivateurs lourds ou légers, les cultivateurs rotatifs, les herse rotatives, etc. Il est généralement réalisé après la récolte des céréales et avant l'implantation d'une nouvelle culture.

Le travail superficiel peut être utilisé lors d'un faux-semis (Chambre d'agriculture du Puy de Dôme, 2018). En travaillant le sol sur les 5 premiers centimètres de profondeur, cela favorise la germination des graines présentes dans la couche superficielle du sol et permet ainsi de réduire la pression des mauvaises herbes sur la culture à venir (Heddadj & Le Roux, 2014).

2.2.4.4 Le travail en bandes

Le travail en bandes ou strip-till⁶ désigne un travail du sol plus ou moins profond localisé sous la future ligne de semis. La profondeur de travail varie de 5 à 20 centimètres de profondeur et le travail est réalisé sur une bande de 10 à 15 centimètres de large (Heddadj & Le Roux, 2014). Le strip-till est une variante au semis direct où les inter-rangs non travaillés sont couverts de végétaux en surface.

L'objectif du travail en bandes est de favoriser l'écoulement de l'eau vers les racines des cultures. Les couverts en inter-rangs permettent de limiter la levée des adventices. Cette technique permet également de travailler sur une plus petite surface et de localiser de l'engrais dans la ligne de semis. Cependant, le travail en bandes nécessite des outils spécifiques tels qu'un semoir à disques combiné à d'autres outils animés (Heddadj & Le Roux, 2014).

2.2.4.5 Semis-direct

Le semis direct est une autre technique culturale simplifiée. Le semis direct est une méthode de plantation des cultures qui consiste à effectuer un travail du sol uniquement au niveau de la ligne de semis, sans perturber les couches plus profondes (< 5 cm) (Heddadj & Le Roux, 2014; Chenu & Butault, 2013).

Cette approche minimale préserve la quasi-totalité des résidus de culture et des matières organiques à la surface du sol. L'objectif principal est de limiter les perturbations verticales du sol tout en maximisant la couverture des résidus (Heddadj & Le Roux, 2014). De plus, elle permet de semer directement dans un couvert vivant.

⁶ Strip-till provient de l'anglais : Strip : bande ; Till : travail du sol.

Cette technique est souvent utilisée en céréales et nécessite un autre type de semoir avec une capacité à maintenir une profondeur de semis adéquate malgré les variations des conditions pédologiques.

2.2.5 Les effets bénéfiques et les contraintes des techniques sans labour

2.2.5.1 Les propriétés chimiques du sol

Le non-labour tend à avoir un stock en carbone organique (SOC) plus élevé dans les couches superficielles en raison de l'incorporation des résidus, tandis que le labour conventionnel peut entraîner une augmentation de celui-ci dans les couches plus profondes (Jantalia & Resck, 2007). La réduction du labour peut améliorer la croissance des racines, celles-ci contribuent également à l'augmentation du SOC (Baker & Ochsner, 2007).

Une étude a montré que 58 % de la différence de SOC entre labour et non-labour était due à une différence dans la matière organique particulaire (MOP) totale (fraction labile) (Oorts & Bossuyt, 2007). Trois fractions de carbone dans le sol : (i) la fraction facilement décomposable (labile), composée principalement de MOP et de carbone organique dissous, (ii) le matériau stabilisé par des mécanismes physico-chimiques (intermédiaire) et (iii) la fraction biochimiquement récalcitrante (stable) (Hermle & Anken, 2008). Ce fractionnement diffère par leur disponibilité et leur temps de renouvellement. La fraction labile joue un rôle crucial dans la formation des agrégats (Six & Guggenberger, 2001) et réagit rapidement aux changements de gestion du sol (Franzluebbers & Stuedemann, 2002).

Dans les systèmes de non-labour, la répartition des nutriments diffère de celle observée dans les sols labourés, se caractérisant par une stratification accrue des nutriments et une meilleure disponibilité en surface (Duiker & Beegle, 2006) (Franzluebbers & Hons, 1996). Cette situation pourrait être attribuée à la présence des résidus de culture à la surface du sol, plutôt qu'à leur incorporation lors du labour (Ismail, Blevins, & al., 1994).

En général, le non-labour est lié à une disponibilité réduite d'azote, en raison d'une immobilisation accrue par les résidus (Bradford & Peterson, 2000). Les effets de l'agriculture de conservation sur le contenu total d'azote sont comparables à ceux observés pour le carbone organique du sol, étant donné l'interconnexion entre le cycle de l'azote et celui du carbone (Bradford & Peterson, 2000).

De nombreuses recherches indiquent que les niveaux de phosphore extractible (P) sont généralement plus élevés dans les systèmes de non-labour que dans ceux de labour conventionnel (Duiker & Beegle, 2006) (Franzluebbers & Hons, 1996). Cette augmentation est due à une diminution du mélange du P avec le sol, ce qui entraîne une fixation plus faible du phosphore. Bien que cela soit avantageux lorsque le P constitue un nutriment limitant, cela peut également engendrer des problèmes environnementaux en raison des pertes de phosphore soluble dans les eaux de ruissellement (Ismail, Blevins, & al., 1994).

Le non-labour préserve et accroît la disponibilité de nutriments tels que le potassium (K) en surface du sol, à l'endroit où se développent les racines des cultures (Franzluebbers & Hons, 1996). En ce qui concerne le calcium (Ca) et le magnésium (Mg), la plupart des études indiquent que le labour n'influence pas de manière significative leurs niveaux extractibles (Govaerts, Sayre, & al., 2007).

2.2.5.2 Les propriétés physiques du sol

Les pratiques de non-labour, améliorent significativement la distribution et la stabilité des agrégats, contrairement au labour conventionnel, qui fragilise la structure du sol en perturbant physiquement les agrégats (Govaerts, et al., 2009) (Six, Elliott, & Paustian, 2000). Le labour conventionnel provoque une dégradation des agrégats et une redistribution de la matière organique, essentielle à la stabilité des agrégats (Carter, 1992). De plus, le labour peut réduire les populations de macrofaune, qui jouent un rôle clé dans l'agrégation du sol, limitant ainsi les bénéfices que l'on pourrait tirer des systèmes de conservation (Kladivko, 2001) (Six, Bossuyt, Degryze, & Denef, 2004).

La conductivité hydraulique du sol est généralement plus élevée dans les systèmes de non-labour, en raison d'un plus grand nombre de macropores. Cependant, les résultats varient selon les études, ce qui peut être attribué à des difficultés de mesure de la conductivité dans les sols couverts de résidus et à des différences dans les profondeurs d'échantillonnage, les types de sol et d'autres caractéristiques spécifiques au site (Blanco-Canqui, 2007).

Des recherches ont montré que le non-labour augmente la capacité de rétention d'eau, permettant une conservation de l'humidité du sol et une disponibilité accrue pour les cultures, même lors de périodes sèches (Govaerts, et al., 2009).

L'érosion dépend de l'érosivité, liée aux caractéristiques physiques de la pluie et à la vitesse d'écoulement, ainsi que de l'érodabilité, qui dépend des propriétés physiques du sol. Les pratiques d'agriculture de conservation, qui favorisent la stabilité des agrégats, réduisent ainsi le potentiel d'érosion en diminuant à la fois l'érosivité et l'érodabilité (Govaerts, Sayre, Lichter, Dendooven, & Deckers, 2007).

2.2.5.3 Les propriétés biologiques du sol

Le non-labour entraîne des modifications notables dans la composition et l'abondance de la faune et de la flore du sol, incluant tant des organismes nuisibles que bénéfiques (Bockus & Shroyer, 1998) (Andersen, 1999). Ces organismes s'adaptent aux changements physiques et chimiques du sol induits par le labour, ce qui influence à son tour des paramètres tels que la structure du sol, le cycle des nutriments et la décomposition de la matière organique. Les interactions entre ces divers organismes peuvent avoir des impacts à la fois positifs et négatifs sur les cultures (Kladivko, 2001).

Des études ont démontré que les pratiques de non-labour augmentent la biomasse microbienne du sol dans les couches de surface, créant des conditions propices à la croissance des microorganismes grâce à une meilleure rétention de l'eau et des substrats de carbone disponibles (Alvear, 2005).

Selon des études menées par Lupwayi et al. (1998, 1999), un système de non-labour favorise une diversité fonctionnelle accrue. Ils ont également observé que le labour réduisait significativement la diversité microbienne dans les sols acides et pauvres en carbone, mais n'avait pas d'effet significatif dans les sols proches du neutre et riches en carbone (Lupwayi, 2001).

La réduction du travail du sol influence les maladies des plantes et les populations de ravageurs de manière variable en fonction des stratégies de survie des espèces (Andersen, 1999)

(Bockus & Shroyer, 1998). Selon une étude, 28 % des espèces de ravageurs augmentent, 29 % ne changent pas et 43 % diminuent avec la réduction du travail du sol (Stinner, 1990). Les pathogènes du sol sont particulièrement affectés par la réduction du travail du sol, où l'humidité et la température de surface favorisent leur survie (Cook, 2006).

2.2.6 La gestion des adventices, ravageurs et maladies

En système conventionnel, le labour est crucial et très efficace pour la gestion des adventices. L'apparition des herbicides a facilité la gestion de ces dernières dans les systèmes de non-labour. Afin de limiter la quantité d'herbicides utilisée, d'autres pratiques sont utilisées pour lutter contre les mauvaises herbes (p. ex. le faux semis, le désherbage mécanique, les cultures de couvertures...) (Labreuche, Laurent, & Roger-Estrade, 2014).

Le labour est utilisé pour exposer le sol aux agents climatiques et réchauffer la terre pour le lit de semences. Le retournement du sol joue donc un rôle dans la gestion des pathogènes du sol (Bockus & Shroyer, 1998). En exposant les microorganismes, responsables de maladies, aux conditions environnementales telles que la chaleur et la lumière, les plus sensibles seront affaiblis ou détruits. Le labour permet donc de lutter contre des maladies telles que la septoriose, la fusariose ou l'helminthosporiose (Labreuche & Maumene, 2019). Tandis que les systèmes de non-labour, en laissant les résidus de cultures en surface, facilitent la contamination des autres cultures, car les résidus peuvent contenir des pathogènes, vecteurs de maladies ou d'autres ravageurs (Hobbs, 2007).

2.2.7 Les impacts environnementaux

Le non-labour et les pratiques de cultures de couvertures et de gestion des résidus permettent de limiter l'érosion des sols et de limiter les pertes de terres arables (FAO, s.d.). Après le labour, la surface est nue et sujette à l'érosion éolienne et hydrique. Selon une étude, le labour intensif peut augmenter l'érosion jusqu'à 20 fois par rapport à des systèmes de cultures sans labour, entraînant des pertes de 7,5 à 15 tonnes de sol par hectare et par an (Lal, 2001).

Une forme d'érosion hydrique est l'effet « splash⁷ » (Fig. 3) (Kazi-tani, 2016). L'effet « splash » se produit lorsque des gouttes de pluie tombent sur une surface de sol, générant une force d'impact qui soulève et déplace des particules de sol (Lal, 1998). Cet éclaboussement peut entraîner une érosion superficielle, car les particules soulevées par l'impact de la goutte peuvent être transportées sur de courtes distances.

⁷ L'énergie cinétique des gouttes de pluie vient « exploser » les agrégats de surface et les fragmente en plus petits agrégats.

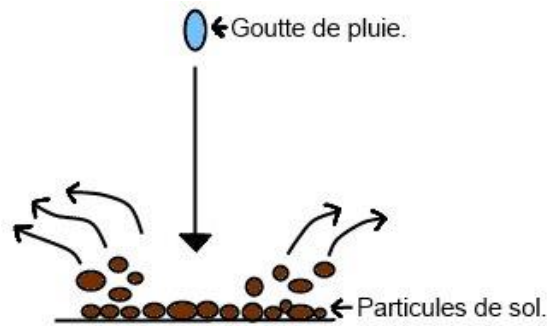


Figure 3. Effet « splash » (Kazi-tani, 2016)

Ce processus est souvent le premier stade de l'érosion, où des particules de sol sont détachées et déplacées (Morgan, 2005). Pour minimiser l'impact de l'effet « splash », des pratiques de gestion telles que le paillage, la couverture du sol, et l'utilisation de cultures de couverture peuvent être mises en œuvre (Baker, 2005). Ces techniques aident à protéger la surface du sol contre l'impact direct des gouttes de pluie et à maintenir l'intégrité de la structure du sol.

Enfin, le labour expose la matière organique du sol à l'air, favorisant l'oxydation des composés organiques. Les sols en Aconv peuvent perdre entre 20 % et 30 % de leur stock de carbone par rapport aux systèmes sans labour (Lal, 2004). Cette perte peut également entraîner des conséquences pour le changement climatique, car le carbone stocké dans le sol joue un rôle dans la régulation des gaz à effet de serre. L'intégration de pratiques sans labour telles que la couverture permanente et l'utilisation des résidus de culture contribuent à préserver ce stock grâce à une meilleure protection de la matière organique contre l'oxydation (Tejada, 2009) et à limiter la pollution atmosphérique.

2.3 Couverture organique permanente du sol

Un principe fondamental de l'agriculture de conservation est le maintien d'un sol couvert. La couverture organique permanente contribue à stabiliser le système tout en améliorant les propriétés physiques du sol (FAO, 2024). L'objectif est de conserver un taux de couverture d'au moins 30 % tout en minimisant le retournement (FAO, 2024).

Ces couverts ont des objectifs variés. Ils peuvent être récoltés pour le fourrage, destinés à la vente ou laissés sur le sol pour accroître la matière organique et améliorer la fertilité. Le choix des cultures de couverture dépend des besoins des cultures annuelles, de la rotation, du type de sol, du mode de destruction (physique ou chimique) et du coût des semences (Loubes, Brasiles, & al., 2016).

Les cultures de couverture sont semées après la récolte d'une culture principale (Salles, 2014). Elles sont soit détruites avant le semis de la culture suivante, soit maintenues « vivantes », comme cela se produit souvent avec le semis direct sous couvert végétal (Heddadj & Le Roux, 2014).

Il existe différents termes pour qualifier les couverts végétaux : résidus de cultures, les cultures intermédiaires et les cultures dérobées (PROTECT'EAU, 2024).

2.3.1 Les types de couverts végétaux

2.3.1.1 Les résidus culturels

Les résidus de cultures sont les restes de la récolte, incluant des feuilles, des branches, des tiges et des racines. En plus de former une barrière de protection à l'érosion, ils enrichissent le sol en matière organique et en nutriments lors de leur décomposition.

2.3.1.2 Les cultures intermédiaires et les CIPAN

Les cultures intermédiaires sont les cultures implantées entre deux cultures principales, non récoltées, mais détruites et enfouies sur place. Les engrais verts et les CIPAN sont considérés comme tels. La finalité des engrais verts est de fournir des éléments fertilisants à la culture suivante et principalement de l'azote (PROTECT'EAU, 2024).

Les cultures intermédiaires pièges à nitrate (CIPAN) sont cultivées en interculture également. Les CIPAN sont cultivées pour leur capacité à prélever de l'azote, qu'il soit présent dans le sol après la récolte ou produit par la minéralisation. Elles contribuent à préserver la structure du sol durant l'hiver et à maintenir le taux d'humus. De plus, elles réduisent les risques d'érosion, combattent le salissement des terres et peuvent servir de source de fourrage pour le bétail. Elles peuvent également offrir un refuge et un garde-manger pour la petite faune (PROTECT'EAU, 2024).

La moutarde, la phacélie, le ray-grass, l'avoine, la vesce sont toutes des CIPAN (PROTECT'EAU, 2024). Elles peuvent être cultivées seules ou en mélange. Une seule espèce ne peut généralement pas répondre à tous les objectifs. L'intérêt des mélanges est de tirer parti des avantages de chaque espèce (PROTECT'EAU, 2024).

La phacélie est une plante à croissance rapide, souvent semée après la récolte des cultures principales. Elle a un potentiel de piégeage azoté élevé (30 à 35 %), 5 à 20 unités d'azote sont restituées en fonction du développement de son couvert (Minette, 2011). Elle possède un système racinaire mixte, permettant une bonne restructuration du sol. La phacélie aère le sol et améliore son drainage. La phacélie est aussi une plante mellifère, ses fleurs sont bénéfiques pour attirer une série d'insectes, contribuant à la pollinisation des cultures voisines (Minette, 2011).

La moutarde blanche et le radis chinois ont également un potentiel de piégeage en azote élevé (30 à 35 %), 5 à 20 unités d'azote sont restituées en fonction du développement de son couvert (Minette, 2011). Les deux ont un système racinaire pivotant avec des racines profondes, aidant à décompacter le sol. Le radis chinois a également un apport en matière organique non négligeable, améliorant la fertilité du sol (Dabney, 2011).

Enfin, les conditions environnementales et climatiques n'étant pas les mêmes chaque année, une espèce de mélange peut compenser les carences d'une autre et il est essentiel d'associer les espèces ayant des exigences similaires en matière de semis et de vitesse de développement pour éviter la compétition entre elles (PROTECT'EAU, 2024).

2.3.1.3 Les cultures dérobées

Les cultures dérobées s'intercalent entre deux cultures principales et sont destinées à être récoltées pour être valorisées. Ces cultures ont pour objectif la production de grains (sarrasin...) ou la production de fourrage vert ou en ensilage (colza fourrager, sorgho, avoine...) (Chambre d'Agriculture de Bourgogne, 2015). Un des critères de choix pour la culture dérobée est sa capacité à produire une quantité importante de biomasse. Lors des années de sécheresses, la récolte des cultures dérobées contribue à sécuriser le stock fourrager (Brochier & Savourié, 2011).

Les cultures dérobées peuvent également être cultivées à destination de la biométhanisation pour la production de gaz, ce dernier est ensuite transformé en chaleur et en électricité (Brochier & Savourié, 2011).

2.3.2 Les effets bénéfiques et les contraintes des couverts végétaux

2.3.2.1 Les propriétés chimiques du sol

En système conventionnel, l'incorporation des résidus culturaux et des cultures de couverture est plus fréquente qu'en AC. L'enfouissement de ceux-ci entraîne une accumulation plus importante de carbone organique dans les couches plus profondes (Jantalia & Resck, 2007).

Les cultures de couverture augmentent le SOC en enrichissant le sol en résidus végétaux et en fournissant une couverture pendant les périodes critiques (Franzluebbers & Hons, 1994). Cependant, l'intégration de cultures de couverture n'est faisable que dans les régions sans saison sèche prolongée (Jantalia & Resck, 2007).

Le taux de décomposition des résidus dépend non seulement de la quantité, mais aussi des caractéristiques du sol et de la composition des couverts végétaux (fraction soluble, lignine, hémicellulose et polyphénols) (Vanlauwe, 1994). La décomposition plus lente des résidus laissés en surface empêche un lessivage rapide des nutriments, contrairement à l'incorporation qui favorise ce phénomène (Balota, 2004).

Le rapport C/N est un bon indicateur pour évaluer la dynamique de minéralisation des résidus du couvert après destruction. La minéralisation sera d'autant plus rapide si le rapport C/N est faible. La présence de légumineuses permet de convertir l'azote dans l'air en azote minéral. Les légumineuses favorisent donc la minéralisation des résidus et augmentent la capacité à restituer de l'azote à la culture suivante. (Cohan & Labreuche, 2015).

2.3.2.2 Les propriétés physiques du sol

La matière organique joue un rôle crucial dans l'agrégation du sol, ce qui rend la gestion des résidus des cultures antérieures essentielle à la stabilité de la structure du sol (Ladd, 1977). Le retour des résidus de culture à la surface du sol n'augmente pas seulement la formation d'agrégats, mais diminue également leur dégradation en réduisant l'érosion et en protégeant les agrégats contre l'effet « splash » (Govaerts, Sayre, Lichter, Dendooven, & Deckers, 2007).

La gestion du sol, en particulier à travers la conservation des résidus, peut également affecter la continuité et la répartition des pores, ce qui a un impact sur l'efficacité hydrique et la santé des sols (Lipiec, 2006).

2.3.2.3 Les propriétés biologiques du sol

La quantité et la qualité des résidus végétaux affectent les microorganismes du sol. La rétention des résidus conduit à des niveaux de biomasse microbienne, de carbone et d'azote plus élevés dans les couches superficielles du sol. Ces conditions sont propices à la croissance des microorganismes (Govaerts, et al., 2007).

Les racines des couverts végétaux exsudent également des composés organiques complexes qui alimentent les microorganismes du sol tels que les bactéries et les champignons contribuant à la stabilité des agrégats (Salles, 2014).

2.3.3 La gestion des adventices, des ravageurs et des maladies

Une culture intermédiaire concurrence et limite la germination des mauvaises herbes (FAO, 2024). Des effets allélopathiques, l'absence de lumière peuvent inhiber la croissance des adventices (Hobbs & Sayre, 2008). Il est crucial de semer sur un sol propre. Cependant, elle diminue les possibilités d'interventions mécaniques telles que le faux-semis pendant la période interculturelle (Métais, 2020). La réduction du stock de graines sera moins significative qu'avec un sol nu régulièrement travaillé. Il existe un risque de montée en graines des mauvaises herbes, surtout si elles sont déjà bien présentes lors du semis du couvert (Minette, 2011).

Certaines espèces de couverts végétaux sont plus sensibles aux ravageurs et aux maladies (p. ex. l'avoine d'hiver est une plante hôte pour les pucerons et est très sensible à la rouille couronnée) (Minette, 2011). En opposition, certaines espèces empêchent l'installation durable de maladies sur la parcelle (p. ex. la phacélie, appartenant à une famille très différente de celle des céréales et légumes classiques, peut être intéressante en interculture après une culture de blé) (Minette, 2011).

En cas de maladies, la destruction du couvert est souvent recommandée. La destruction des couverts en fin de cycle rencontre d'autres difficultés. Il en résulte un compromis entre deux objectifs : permettre au couvert de remplir pleinement ses fonctions et éviter un impact négatif sur la culture suivante, en préservant la disponibilité en eau et en azote sans entraver son implantation (Brun & Labreuche, 2022). En règle générale, il est plus aisé de détruire un couvert bien développé qu'un couvert de petite taille, bien que cela puisse entraîner des risques de bourrage pour certains outils (Brun & Labreuche, 2022).

2.3.4 Les impacts environnementaux

La couverture permanente des sols forme une barrière de protection face aux gouttes de pluies et permet de limiter l'effet « splash » (Govaerts, Sayre, Lichter, Dendooven, & Deckers, 2007). Elle améliore la structure du sol et la conductivité hydraulique facilitant le drainage de l'eau (Lipiec, 2006). Par conséquent, les couverts végétaux sont un bon moyen de lutter contre l'érosion et permettent de réduire les risques de ruissellement et de coulées boueuses.

Lorsque les sols ne sont pas couverts, la lixiviation de l'azote du sol se produit (Beillouin, et al., 2018). L'implantation des cultures intermédiaires telles que les CIPAN permet de minimiser le lessivage des nitrates vers les nappes souterraines et ainsi diminuer leur pollution (PROTECTEAU, 2024).

2.4 Diversification des espèces

La diversification des espèces cultivées repose sur l'adoption de différents systèmes de rotation, ainsi que sur la mise en œuvre de cultures associées et de mélanges de variétés (FAO, s.d.). Dans une perspective de transition vers des systèmes de conservation, ces pratiques sont essentielles pour une agriculture durable. Le choix des espèces constituant les rotations, les cultures associées et les mélanges variétaux doit répondre aux services écosystémiques recherchés et être adapté aux conditions locales.

2.4.1 La rotation culturale

La rotation culturale consiste à alterner différentes cultures sur une même parcelle au fil des saisons ou des années. Cette pratique permet de rompre les cycles de vie des nuisibles et des maladies, de diversifier les apports nutritifs au sol et d'améliorer la structure du sol (Gianquinto, 2018).

Les rotations sont des successions de cultures régulières qui durent plus ou moins longtemps. Lorsque la rotation est une culture de printemps suivie d'une jachère, on parle de rotation biennale, lorsque la rotation est une culture d'hiver, une culture de printemps puis une année de jachère, on parle d'une rotation triennale (Pousset, 2014). Les rotations peuvent être plus longues, allant parfois jusqu'à une dizaine d'années, avec notamment l'instauration de prairies temporaires ou de couverts végétaux (Pousset, 2014).

En Europe occidentale, des études ont examiné la composition et la qualité des rotations culturales, y compris par télédétection (Astrand & Baruth, 2002). La rotation multifonctionnelle est considérée essentielle pour maintenir la fertilité du sol avec peu d'intrants (Vereijken, 1997).

Cependant, la mise en œuvre de bonnes rotations reste complexe et dépend des conditions locales. La FAO souligne l'importance d'une sélection appropriée des cultures et d'une durée de rotation adéquate (Chevrier & Barbier, 2002). Bien que des modèles mathématiques aient été élaborés pour définir les séquences culturales (Klein Haneveld & Stegeman, 2005), leur utilisation reste limitée en raison de l'accès difficile aux données historiques.

En Wallonie, les successions culturales sont très variées, mais aucune ne prédomine réellement (Leteinturier & Tychon, 2006). Plutôt que d'inventorier ces successions, il est plus pertinent de les caractériser à l'aide de paramètres agro-environnementaux et agronomiques (Leteinturier & Tychon, 2006). Les paramètres agro-environnementaux incluent le nombre de cultures différentes et la durée de la période d'interculture, reflétant la diversité culturelle et l'impact sur la biodiversité. Les paramètres agronomiques évaluent la qualité du précédent cultural et le temps de retour moyen des cultures.

Les rotations en Wallonie sont principalement composées de quatre à cinq cultures différentes et les plus fréquentes sont : le froment d'hiver, la betterave sucrière, le maïs, l'orge d'hiver et la pomme de terre. L'étude menée par Leteinturier et al. (1997-2003) indique que le froment d'hiver est la culture la plus dominante, précédée principalement par la betterave sucrière.

2.4.2 La culture associée

Les cultures associées désignent la pratique consistant à cultiver simultanément deux ou plusieurs espèces sur une même parcelle. Cette méthode peut améliorer la productivité globale en maximisant l'utilisation des ressources, telles que la lumière et l'eau, et en favorisant les interactions bénéfiques entre les plantes (Zhang, 2018).

2.4.3 Les mélanges variétaux

Les mélanges variétaux impliquent la culture de plusieurs variétés d'une même espèce sur une même parcelle. Cette approche vise à accroître la résilience des cultures face aux aléas climatiques et aux attaques de ravageurs. En diversifiant les caractéristiques génétiques, les mélanges variétaux peuvent mieux résister aux maladies et s'adapter aux variations de conditions environnementales (Kruidhof, 2018).

2.4.4 Les effets bénéfiques et les contraintes de la diversification des espèces

La diversification des cultures favorise une augmentation de la biodiversité. En intégrant différentes espèces dans un même espace, on crée un habitat propice aux auxiliaires de culture, tels que les pollinisateurs et les prédateurs naturels des ravageurs (Garnier, 2006). Cette diversité biologique peut réduire la pression des maladies et des ravageurs, ce qui diminue la nécessité d'utiliser des intrants chimiques.

Les systèmes diversifiés permettent une meilleure utilisation des ressources, notamment en termes d'eau et de nutriments. La rotation des cultures favorise une meilleure gestion de l'eau, en réduisant le risque d'érosion et en améliorant la rétention d'humidité (López-Bellido, 2006). Des études montrent que des associations de cultures, comme le maïs et les légumineuses, peuvent améliorer la fixation de l'azote et réduire les besoins en engrais (Toomsan, et al., 2012).

La diversification des cultures contribue à la résilience des systèmes agricoles face aux aléas climatiques. Des cultures variées peuvent mieux s'adapter aux variations de température et de précipitations, ce qui réduit les risques de pertes de récoltes (Altieri, 2017).

La diversification peut également entraîner des risques économiques, notamment en termes de rentabilité. Les marchés peuvent ne pas être toujours prêts à accueillir des produits issus de systèmes diversifiés, ce qui peut rendre la commercialisation plus difficile (López-Bellido, 2006). De plus, les coûts initiaux liés à la mise en place de systèmes diversifiés peuvent dissuader certains agriculteurs.

Les objectifs de diversification peuvent parfois entrer en conflit avec d'autres objectifs agricoles, comme la maximisation des rendements. Les agriculteurs qui cherchent à produire des rendements élevés peuvent être réticents à adopter des pratiques diversifiées, craignant que cela n'affecte leur productivité (Evers, 2018).

3 La transition de l'agriculture conventionnelle vers une agriculture de conservation des sols

L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) définit l'agriculture de conservation comme une méthode de gestion des agroécosystèmes visant à assurer la sécurité alimentaire et à augmenter les bénéfices tout en préservant les ressources naturelles.

La sécurité alimentaire, selon le Comité des Nations Unies sur la sécurité alimentaire mondiale, implique que chaque individu ait un accès suffisant, sûr et nutritif à une alimentation adéquate, répondant à ses besoins diététiques. Actuellement, environ 800 millions de personnes manquent d'un accès suffisant à la nourriture, plus de 2 milliards souffrent de carences en micronutriments essentiels, et près de 60 % des habitants des pays en développement vivent une insécurité alimentaire (Pérez-Escamilla, 2017). La croissance de la population mondiale, le changement climatique et les impacts environnementaux risquent d'aggraver cette situation dans les décennies à venir, soulignant le lien entre sécurité alimentaire et les objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies.

L'AC se fonde sur trois principes interconnectés : un travail minimal du sol, une couverture permanente et une diversité des cultures. Elle doit être mise en œuvre avec des pratiques adaptées aux contextes locaux, en complément d'autres méthodes agricoles. Toutefois, de nombreux petits exploitants ne parviennent pas à appliquer simultanément ces trois principes, et le modèle d'AC tel qu'il est défini peut ne pas convenir à leurs réalités (Yigezu, et al., 2021). L'application isolée ou combinée de ces principes a montré des bénéfices, mais certains chercheurs estiment qu'il est essentiel de réviser la définition de l'AC pour englober une variété de pratiques de conservation favorisant une intensification agricole durable (Rodenburg, Büchi, & Hagggar, 2020).

L'AC est au cœur de la Stratégie d'intensification agricole durable de la FAO, qui la considère applicable à tous les paysages agricoles et types d'utilisation des terres, avec des avantages économiques, agronomiques et environnementaux notables (FAO, 2011). Ainsi, l'AC représente une option prometteuse pour augmenter la durabilité des terres cultivées tout en assurant une production rentable (Das, et al., 2020).

Cependant, l'adoption de l'AC varie considérablement entre régions et types d'exploitations. Elle est courante dans les grandes exploitations en Amérique du Nord, en Australie et au Brésil, mais ne concerne que 0,3 % des terres agricoles mondiales dans le cas des petits exploitants (Derpsch, Friedrich, Kassam, & Li, 2010). À l'échelle globale, la superficie consacrée à l'AC reste faible par rapport aux terres cultivées traditionnellement. La lente adoption dans les pays en développement est partiellement due à la complexité du système et à un manque de compétences techniques. Il est donc crucial d'offrir un soutien politique et

institutionnel, ainsi que des incitations pour encourager les agriculteurs à adopter l'AC et à bénéficier d'une assistance technique (Yigezu, et al., 2021).

Pour favoriser l'adoption des techniques d'AC, il est nécessaire de concevoir des pratiques spécifiques au contexte local (Derpsch, Friedrich, Kassam, & Li, 2010). Un obstacle majeur est le manque d'équipements abordables et adaptés pour le semis direct, en particulier pour les petits et moyens agriculteurs (Bhan & Behera, 2014). L'amélioration de la disponibilité de machines permettant une bonne germination des cultures dans des systèmes sans labour, même avec du paillis, est essentielle (Hobbs, 2007). Par conséquent, l'AC constitue une alternative prometteuse pour augmenter la productivité et renforcer la sécurité alimentaire tout en protégeant les ressources naturelles et en réduisant les impacts négatifs des méthodes agricoles conventionnelles (Sahu, Mohanty, & Das, 2020).

Les effets bénéfiques des pratiques d'AC se manifestent progressivement, et il peut falloir de trois à sept ans pour qu'ils deviennent pleinement visibles (Stagnari, Galieni, Specca, Cafiero, & Pisante, 2014). Ainsi, des recherches et des essais à long terme sont nécessaires pour évaluer l'efficacité de l'AC. La période de transition est déterminante pour le succès de son adoption. Pendant les premières années, des difficultés peuvent apparaître, telles qu'une gestion des mauvaises herbes plus complexe (Bhullar, Pandey, Kumar, & Gill, 2016) ou une baisse temporaire de la productivité (Farooq, Flower, Jabran, Wahid, & Siddique, 2011), ce qui pourrait décourager les agriculteurs et les pousser à abandonner ces pratiques.

L'agriculture de conservation continue d'évoluer avec les avancées technologiques et les nouvelles recherches. Des approches telles que l'agroforesterie, l'agriculture de précision et l'utilisation de pratiques agroécologiques sont de plus en plus intégrées dans les systèmes agricoles durables. Des recherches sont menées pour améliorer ces pratiques continuellement et développer de nouvelles technologies pour une utilisation plus efficace des ressources.

En résumé, bien que l'AC présente bien des avantages, elle est face à plusieurs défis pour son adoption totale. Ci-dessous une liste non-exhaustive des principaux défis à l'adoption de l'agriculture de conservation sont retenus.

Ces défis sont de nature agronomique, environnementale, économique et sociale :

1. Défis agronomiques

- *Contrôle des mauvaises herbes et des ravageurs* : les mauvaises herbes sont difficiles à gérer sans labour, et de nombreuses espèces ont développé une résistance aux herbicides comme le glyphosate (Kettler, Lyon, Doran, Powers, & Stroup, 2000).
- *Maladies du sol* : l'accumulation des résidus favorise la survie de certains pathogènes entre les récoltes (Roper & Gupta, 1995).
- *Stratification des nutriments* : les nutriments immobiles comme le phosphore peuvent s'accumuler à la surface, rendant leur disponibilité limitée lors de périodes sèches (Pierce, Fortin, & Staton, 1994).
- *Problèmes de structure du sol* : la compaction est une préoccupation majeure dans les systèmes sans labour (Brouder & Gomez-Macpherson, 2014).

2. Défis environnementaux

- *Augmentation du lessivage* : bien que le non-labour augmente le stockage d'eau dans le sol, cela peut également accroître le lessivage de nutriments et de pesticides (Turpin, Thompson, Waring, & MacKenzie, 1998).
- *Utilisation de produits chimiques* : il existe une perception que l'usage de produits chimiques est plus élevé sous non-labour, bien que des études montrent des variations dans leur utilisation selon les pratiques de gestion intégrées (Friedrich & Kassam, 2012).
- *Émissions de gaz à effet de serre* : bien que le non-labour puisse réduire ces émissions grâce à une moindre consommation de carburant, des augmentations de N₂O peuvent survenir dans certains sols, annulant ainsi les bénéfices liés au stockage de carbone (Gregorich, Rochette, VandenBygaart, & Angers, 2005).

3. Défis économiques et sociaux

- *Coûts d'opportunité* : dans les systèmes agro-pastoraux, l'introduction du NT peut réduire la capacité à utiliser les résidus comme fourrage (Andersson & D'Souza, 2014).
- *Coûts d'entrée élevés* : l'adoption du non-labour nécessite souvent de nouveaux équipements et intrants, ce qui peut être prohibitif pour les agriculteurs à faible liquidité (Beuchelt, et al., 2015).
- *Accès aux intrants* : l'accès limité aux semences, aux marchés et à l'infrastructure peut restreindre l'utilisation des rotations de cultures essentielles pour le succès du non-labour (Ares, Thierfelder, Reyes, Eash, & Himmelstein, 2015).

4 Objectifs

L'Etat de l'art souligne la nécessité d'un changement dans le monde agricole et la volonté d'évoluer vers une agriculture plus durable. Il met en avant la diversité des pratiques de l'AC et s'interroge sur l'impact des pratiques sur les plans sociaux, économiques et environnementaux.

Le projet d'expérimentation (« SYCI ») a pour objectif de comparer trois systèmes de culture innovants à un système de culture conventionnel : un système de conservation des sols, un système réduisant les gaz à effets de serre et un système réduisant voire supprimant les traitements phytosanitaires. La valorisation des productions à des fins alimentaires sera prioritaire, et l'enjeu sera d'offrir une rentabilité économique à l'exploitation, sur le long terme.

L'étude menée dans ce mémoire se concentre uniquement sur la comparaison du système de conservation des sols avec le système conventionnel.

L'objectif principal de cette recherche vise à comparer les impacts des différentes pratiques d'agriculture de conservation, mises en place dans le système en AC, sur les rendements et la qualité des sols. Cet objectif principal mène à deux questions de recherche principales :

1. Quelles sont les cultures qui sont les plus impactées par la transition d'un système en Aconv vers un système en AC ?

Le but est de comparer l'évolution des rendements des différentes cultures au fil du temps au sein des deux systèmes de culture.

2. Quel est l'impact des pratiques agricoles sur les propriétés biologiques, physiques et chimiques du sol ?

Le but est d'analyser les propriétés du sol et d'identifier les pratiques agricoles modifiant celles-ci. La comparaison entre les deux systèmes de culture permettra d'évaluer les impacts environnementaux et économiques que les pratiques de l'AC peuvent avoir.

Deuxième partie :

Matériels et méthodes

5 Plan parcellaire

Le site d'étude est situé à Gembloux, en région limoneuse. La plateforme SYCI comprend quatre systèmes de grandes cultures où chaque système contient six sous-parcelles de mêmes dimensions (15 x 60 m). Il y a trois répétitions de ces systèmes, répartis en blocs selon le modèle suivant (Fig. 4), afin d'éviter les effets de zones.

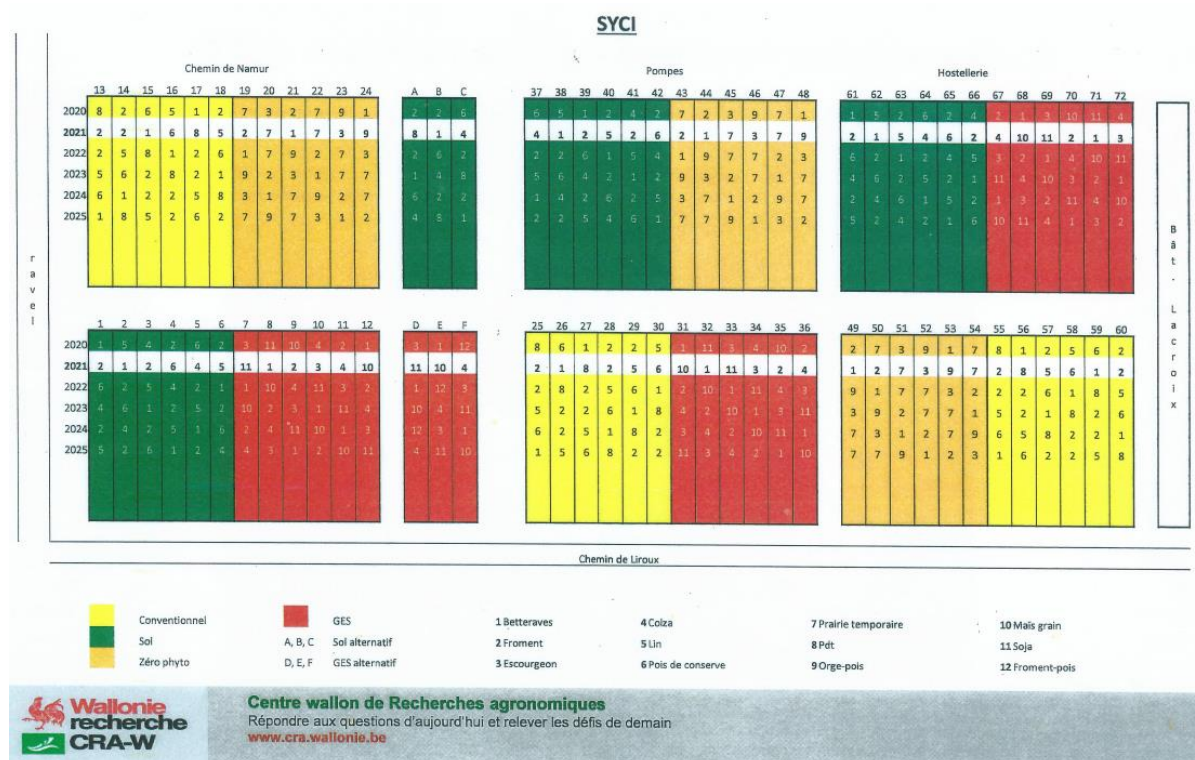


Figure 4. Plan parcellaire de la plateforme SYCI (CRAW)

La figure 4 représente le plan de l'essai, avec les différentes rotations au sein de chaque système. Chaque rotation dure six ans et toutes les cultures d'un même système se retrouvent dans les trois blocs chaque année. Les parcelles sont situées sur un sol limoneux à drainage naturel favorable (SPW, 2015). La composition moyenne de la texture du sol est de 19,5 % d'argile, 77 % de limons et 3,5 % de sable. La pente moyenne des parcelles est de 3,2 % (SPW, 2022). Cependant, le premier bloc (parcelles 1 à 24) est un peu plus pentu que les autres et possède un risque de ruissellement plus élevé. Néanmoins, les parcelles sont identifiées comme étant faiblement à très faiblement sensibles à l'érosion (SPW, 2022).

Les premières opérations culturales ont eu lieu en 2019 et les premières récoltes en 2020. Dans le cadre de ce mémoire, seuls les systèmes conventionnels et les systèmes de conservation des sols sont analysés. Le système Sol alternatif du quatrième bloc (parcelles A à F) n'est pas pris en compte.

Ce modèle expérimental est un modèle split-plot (ou parcelle divisée en français) et est utilisé en statistiques pour étudier les effets de différents facteurs sur une variable. Il est souvent utilisé dans les expériences agricoles où les conditions expérimentales ne peuvent pas être totalement aléatoires en raison de contraintes pratiques ou logistiques. Dans ce design, les unités

expérimentales principales (ou systèmes) sont divisées en sous-unités (ou sous-parcelles). Chaque sous-parcelle est soumise à des conditions expérimentales différentes (culture, traitement phytosanitaire...), tandis que les conditions appliquées aux systèmes sont les mêmes pour toutes les parcelles (type de travail du sol, type de semis...).

6 Description des systèmes

6.1 Rotations

Le système conventionnel (Conv), représenté en jaune (Fig. 4), est le système de référence dont l'objectif est la maximisation de la productivité, où tous les leviers agronomiques sont autorisés, mais toujours dans le respect de la législation.

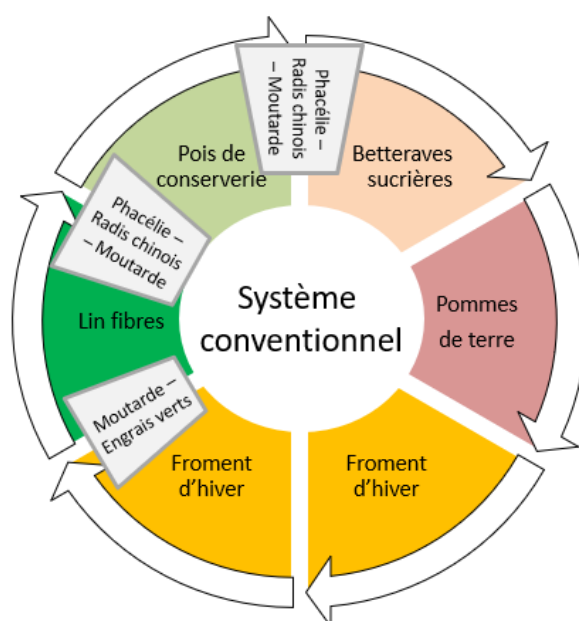


Figure 5. Rotation culturale du système conventionnel

La rotation (Fig. 5) est composée d'une culture de pois de conserverie, d'une culture de betteraves sucrières, d'une culture de pommes de terre, de deux cultures de froment d'hiver et d'une culture de lin. Différents couverts végétaux sont mis en place avant les cultures de betteraves, de pois et de lin.

Le système de conservation des sols (Sol), représenté en vert foncé (Fig. 4), a pour objectif la conservation voire l'amélioration du capital sol. Les Produits de Protection des Plantes (PPP) et le travail du sol y sont très réduits et le sol est couvert la majeure partie du temps.

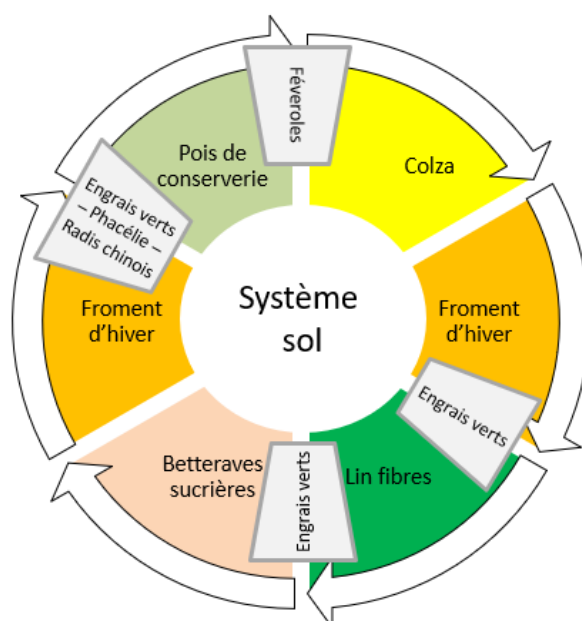


Figure 6. Rotation culturale du système de conservation des sols

La rotation (Fig. 6) est composée d'une culture de pois de conserve, d'une culture associée de colza et de trèfle, d'une culture de lin, d'une culture de betteraves et de deux cultures de froment d'hiver. La culture de pommes de terre du système Conv est remplacée par une culture de colza. La rotation du système Sol diffère également par le positionnement des cultures au sein de la rotation et les types de couverts végétaux.

6.2 Couverts végétaux et gestion des résidus

Tableau 1. Couverts végétaux précédents les cultures et le type de destruction en fonction du système de culture

Système	Culture	IC précédent la culture	Type de destruction
Conv	Pomme de terre	Engrais verts (2020)	Mécanique
	Lin Fibres	Engrais verts	Mécanique
		Moutarde blanche	Mécanique
	Pois de conserverie	Engrais verts	Mécanique
		Phacélie – Radis chinois	Mécanique
	Betteraves sucrières	Engrais verts	Mécanique
		Phacélie – Moutarde blanche	Mécanique
		Phacélie – Radis chinois	Mécanique
Sol	Lin fibres	Engrais verts	Mécanique/Chimique
	Pois de conserverie	Engrais verts	Mécanique/Chimique
		Phacélie – Radis chinois	Chimique
	Betteraves sucrières	Engrais verts	Chimique
	Colza	Féverole	Mécanique

Le tableau 1 regroupe les différents couverts végétaux ainsi que leur mode de destruction au sein de chaque système. La destruction mécanique est généralement réalisée par un décompactage et/ou par un labour dans le cas du système Conv, et la destruction chimique à l'aide d'herbicides.

Concernant la gestion des résidus des cultures, ils sont principalement broyés et ensuite enfouis dans le sol. Le broyage et l'enfouissement des couverts végétaux sont souvent réalisés en même temps ou la veille du semis des prochaines cultures. En système Conv, plusieurs passages au déchaumeur sont parfois nécessaires entre les deux cultures de froment d'hiver.

6.3 Travail du sol et semis

Le travail du sol en Aconv est caractérisé par un travail du sol intensif. Toutes les opérations culturales sont référencées dans des tableurs Excel, donnés en exemple en annexe.

Le tableau 2 présente le nombre de passages pour chaque type de travail du sol et le type de semis appliqué à chaque culture dans chaque système de culture. Ces résultats sont le reflet du travail du sol entre 2021 et 2023. Les outils utilisés et les profondeurs de travail pour chaque travail du sol en fonction du système de culture sont référencés dans le tableau 25, en annexe.

Tableau 2. Nombre de passages par type de travail du sol et type de semis en fonction du système de culture

Système Sol	Colza	Froment d'hiver	Lin fibres	Betterave sucrière	Froment d'hiver	Pois de conserverie
<i>Labour</i>						
<i>Travail superficiel</i>			1	Strip-till (1)		1
<i>Semis (classique/précision/direct)</i>	Direct	Direct	Classique	Précision	Direct	Classique
Système Conv	Betterave sucrière	Pomme de terre	Froment d'hiver	Froment d'hiver	Lin fibres	Pois de conserverie
<i>Labour</i>	1	1	1	1		(1)
<i>Décompactage</i>		1	1	1 ou 2		(1)
<i>Travail superficiel</i>	1	1 ou 2	1	1	1	1
<i>Semis (classique/précision/direct)</i>	Précision	Planteuse	Classique	Classique	Classique	Classique

Travail du sol

Un labour est réalisé chaque année avant la majorité des cultures. Les labours sont réalisés avant ou à la sortie de l'hiver quand les conditions environnementales le permettent. Dans le cas du pois de conserverie, soit un labour, soit un décompactage a été réalisé.

La caractéristique principale du système Sol est l'absence de labour et le travail du sol est minimal. Cependant, la rotation n'est pas la même et ne comporte pas les mêmes cultures. Pour la culture de lin et la culture de pois, seul un travail superficiel à l'aide d'une herse rotative, accompagné d'un rouleau, est réalisé lors du semis.

Dans le système Conv, le décompactage est réalisé la veille ou lors de la préparation du lit de semences des cultures. Dans le cas de la succession des deux cultures de froment, l'intervalle de temps ne permet pas la mise en place d'une culture de couverture, deux décompactages et un labour sont réalisés avant la prochaine culture de froment.

Le travail superficiel du sol est effectué à l'aide de divers outils, tels que la herse canadienne, la herse rotative, un outil frontal et un rouleau, et la composition de l'attelage varie en fonction de la culture et de l'état structural du sol. Pour les pommes de terre, ce travail est particulièrement crucial et peut nécessiter jusqu'à deux passages pour garantir une bonne structure du sol et une aération adéquate. Cela favorise la croissance des tubercules tout en réduisant les risques de maladies dues à une humidité excessive. Le travail superficiel du sol est généralement suivi d'un roulage, qui peut être effectué avec le rouleau attelé aux différents outils utilisés pour la préparation du lit de semences. De plus, dans le système Sol, la technique du strip-till est utilisée pour la culture de la betterave. Elle permet de travailler uniquement sur les bandes où les cultures sont semées.

Semis

Les semis en système Conv s'effectuent principalement à l'aide de semoirs classiques qui permettent de semer en bandes ou en lignes. Cependant, les cultures de froment d'hiver sont cultivées en semis direct sans travail du sol dans le système Sol. À noter que le colza est également cultivé en semis direct.

Enfin, la betterave sucrière, qui exige un espacement régulier entre et au sein des lignes, est semée avec un semoir de précision. Pour la pomme de terre, une planteuse est nécessaire.

6.4 Fertilisation minérale

Le tableau 3 référence tous les types d'engrais annuels et de fonds utilisés pour chaque culture dans les deux systèmes. Aucun apport d'engrais organiques issus de l'élevage n'est utilisé.

Tableau 3. Engrais de fond et annuels utilisés en fonction des cultures et du système

	Système	Froment d'hiver	Colza	Betteraves sucrières	Lin Fibres	Pois de conserverie	Pomme de terre
Engrais de fond	Conv			0-10-18 BB (2020) Chlorure de potassium (60 %)	Sulfate de potassium		0-10-18 BB (2020) Chlorure de potassium (60 %)
	Sol	Sulfate de potassium	Sulfate de potassium	Sulfate de potassium	Sulfate de potassium	Sulfate de potassium	
Engrais annuels	Conv	Ammonitrate (27 %) Azote liquide (N39) Sulfazote		Azote liquide (N39) UniBore (2022)			Ammonitrate (27 %)
	Sol	Ammonitrate (27 %) Azote solide (21 %) (2020)	Ammonitrate (27 %)	Ammonitrate (27 %) UniBore (2022)			

En système Sol, toutes les cultures reçoivent du potassium sous forme de sulfate de potassium en engrais de fond. Concernant les engrais annuels, de l'azote minéral est appliqué sous différentes formes et en différentes quantités (Tab. 26 en annexe) sur les cultures de froment, de colza et de betteraves.

En système Conv, du chlorure de potassium ou du sulfate de potassium sont utilisés comme engrais de fond sur les cultures de pommes de terre, de betteraves sucrières et de lin. Concernant les engrais minéraux annuels, de l'ammonitrate et/ou de l'azote liquide et du sulfazote sont appliqués sur les cultures de pomme de terre, de betterave sucrière et de froment.

La fertilisation azotée des betteraves est réalisée avant le semis, car le risque des brûlures des feuilles, et donc une baisse de rendements en sucre, est de plus en plus grand lorsque l'application est tardive (Tauvel, 2019). Un apport en bore est également nécessaire pour les betteraves sucrières. Une carence en bore peut entraîner des symptômes tels que la nécrose des jeunes feuilles, le cœur creux et la pourriture des racines, ce qui affecte directement le rendement et la qualité des betteraves (Tauvel, 2022).

Pour le froment, la fertilisation azotée est fractionnée en trois apports aux stades de croissance : tallage, redressement et dernière feuille. Ce fractionnement a pour objectifs de développer le maître brin et les talles, et d'augmenter les talles développées (PROTECTEAU, 2018).

6.5 Traitements phytosanitaires

Le tableau 4 répertorie l'ensemble des maladies, des adventices et des ravageurs traités dans les deux systèmes de culture.

Tableau 4. Maladies/ravageurs/adventices traitées en fonction des cultures et du système de culture

	Syst- ème	Froment d'hiver	Colza	Betteraves sucrières	Lin fibres	Pois de conserverie	Pomme de terre
Herbicides	Conv	Dicotylées		Dicotylées	Dicotylées	Dicotylées	Dicotylées
		Gaillet Gratteron		Graminées	Graminées	Mauvaises herbes	Graminées
		Vulpin des champs		Chénopodes blancs	Mauvaises herbes		Mauvaises herbes
				Chardons			
				Mauvaises herbes			
	Sol	Dicotylées	Dicotylées	Dicotylées	Dicotylées	Dicotylées	
		Gaillet Gratteron	Mauvaises herbes	Graminées	Graminées	Mauvaises herbes	
				Chénopodes blancs	Mauvaises herbes		
				Chardons			
				Mauvaises herbes			
Fongicides	Conv	Helminthos poriose		Ramulariose		Mildiou	Mildiou
		Septoriose		Rouille		Anthracnos e	Alternarios e
		Rouille brune		Cercosporio se			
	Sol	Helminthos poriose		Ramulariose		Mildiou	
		Rouille brune		Rouille		Anthracnos e	
				Cercosporio se			
Insecticides	Conv	Pucerons		Pucerons	Altises	Pucerons	Pucerons
				Altises		Sitones du pois	Doryphore s
						Tordeuses des pois	
	Sol		Méligèthes		Altises	Pucerons	
						Sitones des pois	
						Tordeuses des pois	
Molluscicides/ Helliscides	Sol		Limaces				

Régulateurs	Conv	Verse par réduction de la croissance des tiges					Formation des germes
-------------	------	--	--	--	--	--	----------------------

En ce qui concerne les traitements phytosanitaires, toutes les cultures des deux systèmes utilisent des herbicides pour lutter contre la prolifération des adventices. Ces produits phytosanitaires sont utilisés pour contrôler les dicotylées, les graminées, ainsi que d'autres types de végétaux indésirables qui peuvent nuire au développement des cultures.

Les fongicides appliqués sont adaptés à chaque culture en raison des maladies spécifiques auxquelles chaque espèce est vulnérable. Cependant, les cultures de lin et de colza n'ont pas reçu de traitements fongiques.

Concernant la gestion des ravageurs, tels que les pucerons, les cultures sont régulièrement traitées avec des insecticides pour prévenir les infestations. Il est intéressant de noter que, ces dernières années, les cultures de froment n'ont pas été touchées par des attaques de ravageurs, à l'exception de l'année 2020, où une infestation de pucerons a nécessité un traitement. Par ailleurs, en 2022, les cultures de colza ont été confrontées à des limaces, ce qui a conduit à l'application de molluscicides.

Enfin, en système Conv, des régulateurs de croissance sont utilisés. Pour le froment, ces régulateurs préviennent la verse, où les tiges s'affaissent sous le poids des épis, pouvant affecter les rendements (Lee, 2023). Pour les pommes de terre, un régulateur spécifique limite la formation prématurée des germes, favorisant ainsi un meilleur développement des tubercules, réduisant les pertes dues aux maladies et améliorant le stockage après la récolte (Gwóźdź, 2022).

7 Acquisition des données

Concernant la récolte des données, celle-ci a été réalisée par le CRA-W et les laboratoires partenaires de l'expérimentation. Les laboratoires permettent de déterminer les paramètres que le CRA-W n'est pas en mesure de calculer. Toutes les données sont ensuite référencées et datées dans des tableurs Excel.

7.1 Rendements

Les données de rendements sont collectées sur toutes les parcelles chaque année. Le rendement est calculé sur base d'une seule bande, d'une largeur déterminée, de la sous-parcelle. Concernant les betteraves, les rendements seront analysés en fonction du taux de sucres contenu dans la racine. Quant aux pois de conserve, les rendements ont été calculés sur base de six placeaux au sein de chaque parcelle mesurant 1 mètre carré. Au total, six données de rendement sont analysées par type de culture, système de culture et année.

7.2 Échantillons de sol

Les échantillons de sol sont récoltés à l'aide d'une sonde à des profondeurs différentes. Pour éviter les effets de zones, la récolte des échantillons a été répétée six fois sur chaque parcelle à divers endroits de celle-ci. Ensuite, une moyenne a été réalisée pour chaque donnée récoltée.

Les deux premières années, un composite de l'ensemble des parcelles d'un même système a été récolté pour chaque bloc expérimental sur les profondeurs 0-25 et 25-50 centimètres.

En 2022, les données ont été récoltées sur les profondeurs 0-9, 9-15 et 15-30 centimètres. Pour chaque système Sol, trois échantillonnages ont été réalisés, dont deux sur les parcelles de froment et un sur la parcelle de lin. Pour chaque système Conv, deux échantillonnages ont été réalisés, un sur une parcelle de froment et un sur une parcelle de lin.

En 2023, les échantillons sont récoltés sur les parcelles de lin des deux systèmes de culture sur les profondeurs 0-10, 10-25, 25-50, 50-75 et 75-100. Cependant, les données des profondeurs supérieures à 50 centimètres n'ont pas été prises en compte pour l'analyse statistique des propriétés du sol. Afin de pouvoir comparer plus facilement l'évolution des propriétés du sol analysées, un calcul a été réalisé afin d'analyser la profondeur 0-25 centimètres.

$$P_{0-25} = \frac{(P_{0-10} * h_{0-10}) + (P_{10-25} * h_{10-25})}{h_{0-10} + h_{10-25}} \quad (1)$$

Où,

- P : Propriété du sol analysée
- h : Profondeur

L'échantillonnage étant différent chaque année, le tableau 5 répertorie le nombre total d'échantillons analysés par profondeur et par année, en fonction du système de culture.

Tableau 5. Nombre d'échantillons analysés par profondeur et par système de culture

	<i>Système</i>	<i>2020</i>	<i>2021</i>	<i>2022</i>	<i>2023</i>
<i>Nombre d'échantillons de sol</i>	<i>Conv</i>	18	18	36	18
	<i>Sol</i>	18	18	54	18

Les échantillons sont prélevés en février pour minimiser l'influence des fertilisants chimiques appliqués sur les parcelles à partir de la fin février ou du début mars. Afin de minimiser les effets de variations locales, les échantillons sont récoltés en six endroits différents de la parcelle.

Une fois les échantillons récoltés, ceux-ci sont placés dans une étuve pour sécher à 40 °C pendant 48 heures. Après séchage, ils sont broyés et tamisés pour obtenir des agrégats de diamètre inférieur à 2 millimètres avant d'être envoyés au laboratoire pour les analyses chimiques. Les analyses comprennent les stocks et les concentrations en carbone organique, azote, et phosphore, le pH et les concentrations des cations échangeables (calcium, sodium, magnésium et potassium). En plus de ces analyses chimiques, la densité apparente et la granulométrie ont également été mesurées.

Lors des analyses chimiques, les besoins en engrais sont calculés. Le logiciel AZOBIL est utilisé pour fournir les recommandations de fertilisation azotée. Il permet d'estimer précisément la minéralisation des sources organiques.

Les stocks de carbone organique et d'azote sont deux indicateurs importants pour la qualité du sol. Ces stocks (S) sont généralement quantifiés à des profondeurs fixes en tenant compte de la densité apparente (ρ) (Eq. 3), de la profondeur (ΔZ) et de la concentration (C) en carbone organique ou d'azote selon l'équation suivante (Eq. 2) (IPCC, 2003) :

$$S = C \times \rho \times \Delta Z \quad (t/ha) \quad (2)$$

Où :

$$\rho = \frac{M_{sec}}{V_t} \quad (g/cm^3) \quad (3)$$

- M_{sec} : Masse de la terre sèche d'un volume donné
- V_t : Volume total donné

Cependant, cette méthode surestime systématiquement ces stocks dans les sols à densité apparente élevée, comme ceux soumis au labour minimal, ce qui exagère leurs avantages (Hauser, 2013).

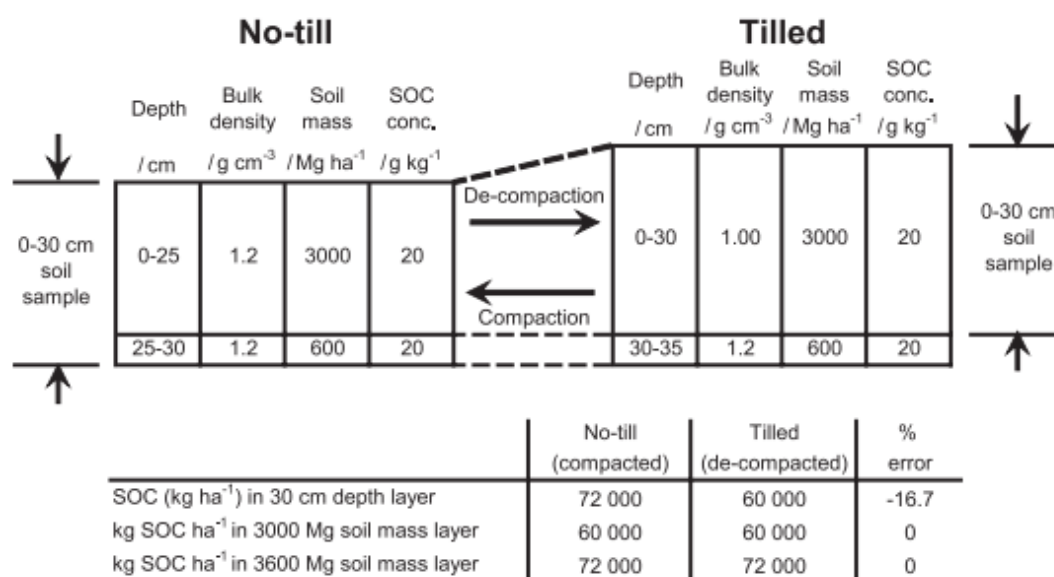


Figure 7. Influence du labour sur la mesure du stock en carbone organique (Hauser, 2013)

La figure 7 illustre l'effet du labour sur la concentration en carbone organique lors du prélèvement de deux échantillons ayant la même teneur en carbone organique. Un sol labouré ou décompacté sur les 25 premiers centimètres a pour conséquence que cette couche de sol occupe maintenant un plus grand volume (p. ex. 30 centimètres dans l'exemple de la figure 7). Lorsque la méthode de prélèvement à profondeur fixe est utilisée, il y a donc un biais (erreur systématique) qui survient, car les concentrations ne sont plus les mêmes à profondeurs égales.

7.3 Pratiques agricoles de gestion

Toutes les pratiques agricoles et de gestion de toutes les parcelles des deux systèmes sont recensées dans des tableurs Excel. Elles rassemblent le travail du sol, les types de semis, les traitements phytosanitaires, les couverts végétaux, et l'entretien et la gestion des résidus des cultures.

Concernant les traitements phytosanitaires, l'Indice de Fréquence de Traitements (IFT) a été utilisé. L'IFT sert plusieurs objectifs importants en agriculture, particulièrement en ce qui concerne la gestion des produits phytosanitaires et l'évaluation des pratiques culturales. Il permet aux agriculteurs de suivre et contrôler leur utilisation des pesticides et autres produits. Cela permet d'identifier les pratiques qui utilisent ces produits de manière excessive et de mettre en place des stratégies pour réduire leur quantité. En réduisant l'IFT, la biodiversité peut également être protégée et conduire à une diminution de la pollution des sols et des eaux (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2023).

L'IFT se calcule de la manière suivante :

$$IFT_i = \frac{\text{Dose appliquée}}{\text{Dose de référence}} \quad (4)$$

La dose appliquée est la quantité de produit phytosanitaire en kilogrammes par hectare. La dose de référence est la quantité recommandée pour l'application du produit phytosanitaire en

fonction de la culture et des maladies/ravageurs/adventices ciblées. Ces doses de référence proviennent principalement de l'atelier de calcul de l'IFT, en libre accès, proposé par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, s.d.).

Pour chaque traitement i , un IFT est calculé. L'IFT total d'une parcelle est la somme des IFT de chaque traitement :

$$IFT_{tot} = \sum IFT_i \quad (5)$$

8 Analyse des résultats

L'analyse des résultats est réalisée grâce à une base de données reprenant les données de rendement des cultures, d'analyses de sol, des pratiques agricoles sur quatre années. Le logiciel utilisé pour le calcul statistique et la création de graphiques est RStudio-2024.04.0.

Les graphiques utilisés sont des diagrammes en boîte à moustache (Boxplot) ou des graphiques d'estimations marginales des moyennes (EMM).

Le boxplot est utilisé pour représenter la distribution d'un ensemble de données en affichant les valeurs minimales, les quartiles (Q1 et Q3), la médiane (Q2), et les valeurs maximales, ainsi que d'éventuelles valeurs aberrantes.

Le graphique d'estimations marginales des moyennes est utilisé pour visualiser les moyennes de la variable de réponse. Il permet d'évaluer les effets principaux et les interactions de manière visuelle. Des barres d'erreur sont également utilisées pour représenter l'incertitude ou la variabilité des estimations.

8.1 Modèle statistique

Comme expliqué précédemment, le modèle utilisé est un modèle « split-plot ». Ce modèle a été utilisé pour analyser les rendements et les analyses de sol en fonction des différents systèmes de cultures au fil du temps. Le modèle a été ajusté pour tenir compte de la structure hiérarchique de l'expérimentation, où les blocs sont les répétitions et les systèmes de culture sont appliqués au sein de chaque bloc.

L'objectif principal de ce modèle est de déterminer l'effet des systèmes de culture et des années sur les rendements en tenant compte de la variabilité entre les blocs et des interactions potentielles entre les systèmes de culture et les blocs. Le modèle pour l'analyse du sol prend en compte un facteur supplémentaire, la profondeur.

Le modèle utilisé est un modèle linéaire mixte :

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 \cdot annee_i + \beta_2 \cdot sdc_j + annee_i \cdot sdc_j + u_k + v_{jk} + \epsilon_{ij} \quad (5)$$

Où :

- y_{ij} est la variable de réponse pour la i^e année et le j^e système de culture.
- β_0 est l'intercept.
- β_1 est le coefficient pour l'effet fixe de l'année ($annee_i$).
- β_2 est le coefficient pour l'effet fixe du système de culture (sdc_j).
- u_k est l'effet aléatoire associé au k^e bloc, avec $u_k \sim N(0, \sigma^2_{\text{bloc}})$.
- v_{jk} est l'effet aléatoire de l'interaction entre le j^e système de culture et le k^e bloc, avec $v_{jk} \sim N(0, \sigma^2_{\text{bloc}})$.
- ϵ_{ij} est l'erreur résiduelle, avec $\epsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$.

Le modèle (Eq. 5) calcule le rendement d'une culture.

8.2 Interprétation des composantes du modèle

La variable de réponse est la variable dépendante que le modèle cherche à expliquer ou à prédire en fonction des variables explicatives. Les variables de réponse dans cette étude sont les rendements des cultures, les concentrations des minéraux, les stocks en carbone organique d'azote, etc.

Les effets fixes des années et des systèmes de cultures permettent de comparer la variable de réponse au fil du temps et entre les différents systèmes, indépendamment des autres facteurs. L'effet du système de culture est crucial pour évaluer l'efficacité relative des différentes pratiques agricoles.

Les effets aléatoires du bloc et de l'interaction entre le système de culture et le bloc permettent d'interpréter la variabilité non expliquée par les effets fixes. Ces effets aléatoires améliorent la précision des estimations des effets fixes permettant de généraliser les conclusions au-delà des blocs spécifiques étudiés et de refléter la réalité expérimentale.

8.3 Evaluation du modèle

Afin d'analyser la pertinence et la fiabilité des résultats du modèle, une analyse de la variance (ANOVA) pour modèle mixte est réalisée. L'ANOVA va tester si les effets fixes ont des effets significatifs sur la variable de réponse tout en tenant compte des effets aléatoires. Pour que les résultats de l'ANOVA soient valides, plusieurs hypothèses doivent être respectées.

Premièrement, l'indépendance des résidus doit être vérifiée. Cela signifie que les données d'observation ne doivent pas être corrélées entre elles. Pour cette hypothèse, les dispositifs expérimentaux ont été conçus de manière que cette indépendance soit respectée, notamment grâce à l'utilisation de blocs aléatoires.

La deuxième hypothèse concerne la normalité des résidus. Pour la vérifier, les résidus ont été soumis au test de Shapiro-Wilk. Si l'hypothèse de normalité est rejetée ($p\text{-valeur} < 0,05$), une transformation des données est envisagée pour satisfaire cette hypothèse. Des résidus non normalement distribués peuvent affecter les tests de significativité et rendre les conclusions de l'ANOVA moins fiables.

La troisième hypothèse porte sur l'homogénéité des variances des résidus. Cette hypothèse est testée à l'aide du Test de Bartlett. Si cette hypothèse n'est pas respectée ($p\text{-valeur} < 0,05$), une transformation des données est également envisagée pour satisfaire cette hypothèse.

L'absence d'autocorrélation des résidus est généralement vérifiée à l'aide du test de Durbin-Watson. Cependant, ce test n'est pas applicable pour un modèle linéaire mixte. Une analyse visuelle est faite pour gérer l'autocorrélation des résidus. Une autocorrélation des résidus peut indiquer des erreurs dans le modèle de structure de covariance.

Enfin, une analyse de la variance conditionnelle (RANOVA) est utilisée pour déterminer si les effets aléatoires inclus dans un modèle linéaire mixte contribuent de manière significative à expliquer la variation dans les données observées. Dans certains cas, des effets aléatoires ont été retirés du modèle, car ils ne sont pas significatifs.

Troisième partie :

Résultats

9 Analyses des rendements

L'analyse des rendements des cultures est réalisée sur les cultures présentes au sein des deux systèmes. Dans le cas, où les prix de rente des différentes cultures seraient disponibles, le calcul des rendements des autres cultures peut être intéressant pour comparer la rentabilité des deux systèmes.

9.1 Froment d'hiver

Avant d'analyser les résultats, il est important de noter que deux cultures de froment d'hiver sont mises en place dans les deux systèmes. Dans le système Conv, les deux cultures se succèdent directement après une culture de pomme de terre. Dans le système Sol, les deux cultures suivent respectivement une culture de colza associée à du trèfle et une culture de betterave. Les cultures antérieures diffèrent entre les deux systèmes et doivent être prises en compte pour l'interprétation des résultats.

Modèle

$$rdt_{net} \sim \text{annee} \times sdc + (1 | sdc: \text{bloc}) \quad (6)$$

Le modèle (Eq. 6) a été ajusté pour comparer les rendements nets du froment d'hiver entre les deux systèmes de cultures au fil du temps et prend en compte la variabilité entre les blocs expérimentaux.

Tableau 6. Résultats de l'ANOVA du modèle du rendement moyen net du froment d'hiver

<i>Effets fixes</i>	<i>p-valeur</i>
Année	0.05848
Système de culture	0.01962
Année : Système de culture	0.17345
<i>Effets aléatoires</i>	<i>p-valeur</i>
Système de culture : Bloc	0.173

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 6) indiquent un effet significatif du système de culture sur les rendements moyens nets du froment d'hiver. L'effet de l'année tend à la signification avec une p-valeur égale à 0,05848. Cela suggère que les rendements pourraient varier selon les années, bien que le seuil de 0,05 ne soit pas atteint. Cet effet pourrait résulter des conditions climatiques impactant la croissance et le développement des grains de ces céréales.

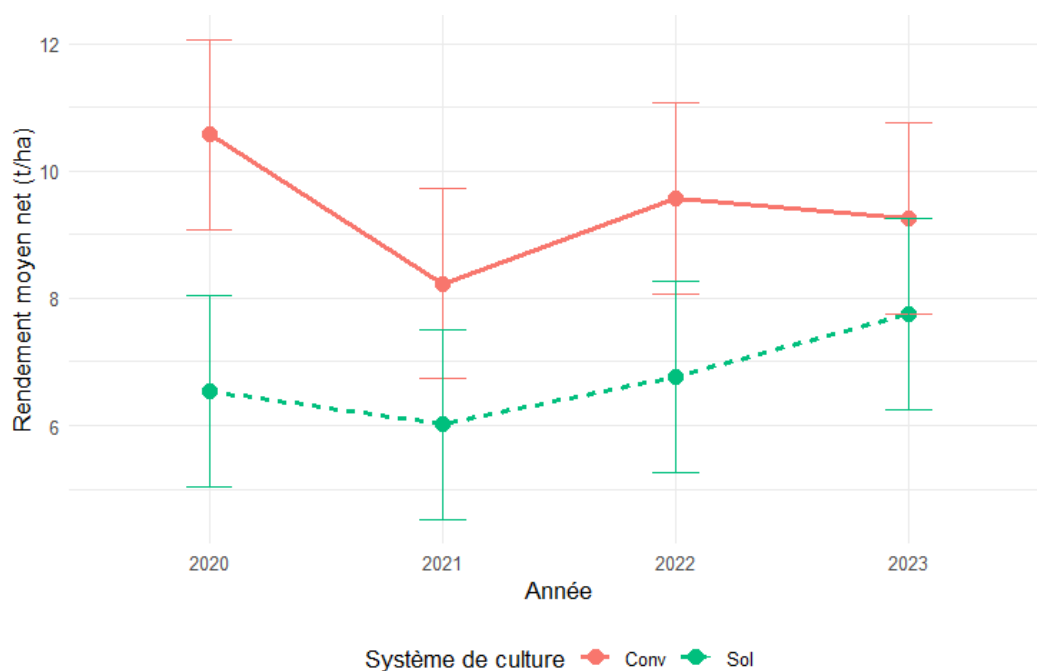


Figure 8. Evolution des rendements moyens nets par hectare du froment d'hiver en fonction du système de culture entre 2020 et 2023

La figure 8 met en évidence les rendements moyens nets par hectare de la culture de froment d'hiver en fonction du système de culture. Une différence significative est observée entre les rendements du système Conv et ceux du système Sol. Cependant, les rendements du système Sol montrent une tendance évolutive, convergeant progressivement vers les niveaux de rendement observés dans le système Conv.

En 2021, le printemps connaît un climat froid et humide favorisant le retour de la septoriose et le développement de la fusariose (Jacquemin, 2021). En juin, des orages éclatent et provoquent la verse des céréales, impactant le remplissage des grains et favorisant le risque de maladies sur les épis. Les pluies abondantes ont réduit les fenêtres de récolte, retardant celles-ci. La qualité des grains en fut impactée, expliquant la baisse des rendements cette année-là. Cependant, cette diminution est plus fortement marquée sous le système Conv.

Les deux années qui suivent, les conditions climatiques sont plus favorables au développement des céréales et le rendement augmente par rapport à 2021. En 2022, la durée mensuelle d'insolation bat des records, l'été est chaud et la fertilité des épis de froment est exceptionnelle (Jacquemin, Livre blanc des céréales 2022, 2022).

En 2023, à la sortie d'un automne et d'un hiver assez doux combiné à un mois de mars pluvieux, les céréales étaient fortement développées (Eylenbosch, et al., 2023). L'épiaison du froment a eu lieu à la dernière décade du mois de mai, un peu plus tard qu'en 2022, traduisant les températures froides du printemps et des écarts importants entre le jour et la nuit. Le début du mois de juin marqué par un déficit de précipitation et un ensoleillement important (IRM, 2023). Grâce au retour des précipitations vers le 18 juin, les conditions ont été idéales pour obtenir de bons rendements.

Tableau 7. Écart des rendements moyens nets du froment d'hiver du système sol par rapport au système conventionnel

	2020	2021	2022	2023	Moyenne
Écart rendement moyen net (t/ha)	-4.03	-2.21	-2.80	-1.51	-2.64

Le tableau 7 indique qu'en moyenne les rendements du froment d'hiver sont moins importants en système Sol mais confirme la tendance à tendre vers rendements égaux à ceux du système Conv.

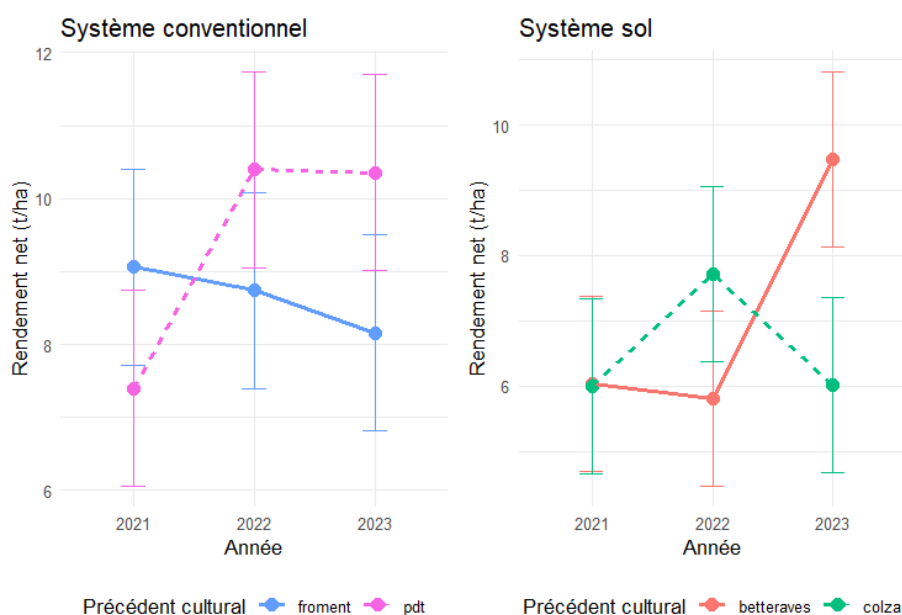


Figure 9. Evolution des rendements moyens nets par hectare du froment d'hiver en fonction du précédent culturel du système de culture entre 2021 et 2023

La figure 9 révèle des différences significatives entre les rendements du froment d'hiver des deux systèmes de culture en fonction des précédents cultureux. Dans le système Conv, où les deux cultures se succèdent, la première culture a tendance à afficher des rendements plus élevés. En revanche, aucune tendance discernable n'est observée dans le système Sol.

Pour l'année 2022, les rendements étaient supérieurs dans le système Sol après une culture de colza, tandis qu'en 2023, les rendements les plus élevés ont été enregistrés après la culture de betteraves.

Dans les deux systèmes de culture, le froment d'hiver ne bénéficie pas de couverture végétale préalable en raison de la durée limitée de la période interculturelle. En revanche, dans le système Sol, deux cultures principales précèdent le froment d'hiver. La succession de cultures de la même espèce sur une même parcelle peut entraîner une diminution de la fertilité du sol, principalement parce que ces cultures partagent des besoins nutritifs similaires.

De plus, la présence de maladies ou de ravageurs dans la première culture de froment d'hiver peut accroître le risque d'infection pour la culture suivante de la même espèce. Les

pathogènes et les ravageurs ayant déjà infesté la première culture peuvent survivre dans les résidus ou le sol et infecter la deuxième culture, réduisant ainsi son rendement.

Pour atténuer ces effets et maintenir des rendements optimaux, il est crucial de mettre en place des traitements phytosanitaires pour contrôler les maladies et ravageurs, ainsi que d'apporter des nutriments au sol pour restaurer sa fertilité.

9.2 Betteraves sucrières

Les rendements des betteraves sucrières ont été évalués en termes de taux de production de biomasse et de taux de sucre.

Modèle

$$rdt_{biomasse} \sim annee \times sdc \quad (7)$$

Le modèle (Eq. 7) analyse le rendement moyen net de la production de biomasse en fonction de l'année et du système de culture. Ce modèle est un modèle linéaire simple, car la variance des effets aléatoires est trop faible pour être estimée de manière fiable.

Tableau 8. Résultats de l'ANOVA du modèle du rendement de la biomasse des betteraves sucrières

Effets fixes	p-valeur
Année	2.493 E-06
Système de culture	0.8321
Année : Système de culture	0.1308

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 8) indiquent que seul l'effet de l'année a un impact sur le rendement moyen net de la biomasse. Le poids de la racine va donc principalement dépendre des conditions environnementales.

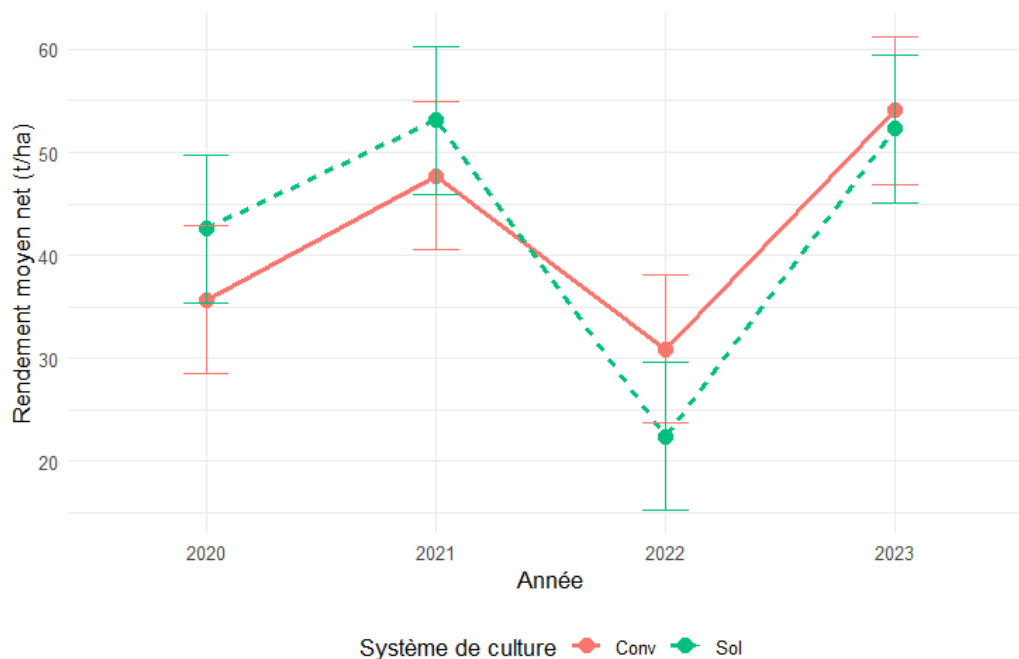


Figure 10. Evolution des rendements moyens nets par hectare de biomasse des betteraves sucrières par année et en fonction du système de culture

La figure 10 montre une production de biomasse plus importante dans le système Sol lors des deux premières années. Ensuite, une baisse notable des rendements est observée à partir de 2022 et est plus importante dans le système Sol. Tandis qu'en 2023, la production semble similaire dans les deux systèmes de cultures.

En 2021, une augmentation significative des rendements en biomasse a été observée par rapport à l'année de référence. Contrairement aux rendements moyens enregistrés dans la région des « grandes cultures », qui sont restés relativement stables entre ces deux années (SPW, 2023), cette hausse peut être attribuée à l'effet de la première année de culture.

Par la suite, une diminution progressive des rendements en biomasse a été observée sous le système Sol, tandis que les rendements sont restés stables au cours des deux années suivantes sous le système Conv. La différence de rendements entre les deux systèmes en 2022 peut être attribuée à une différence dans les dates de semis. En effet, le semis des betteraves en AC a été effectué un mois après celui en Aconv afin de permettre un développement plus complet du couvert végétal. Une période prolongée de sécheresse après le semis des betteraves en AC a entravé leur développement, ce qui pourrait en partie expliquer la diminution des rendements observée dans ce système.

En 2023, la seule différence notable entre les deux systèmes est le travail du sol. Le semis est précédé d'un labour et d'un travail superficiel en Aconv, tandis qu'en AC le semis est réalisé en strip-till. Cette année-là, une période prolongée de précipitations avant le semis a saturé le sol en eau, créant des conditions défavorables pour le travail du sol et le semis (IRM, 2023). Ce n'est qu'au début du mois de mai que ceux-ci ont pu être réalisés. Après le semis, une semaine de fortes précipitations (IRM, 2023) pourrait avoir causé un compactage du sol et des problèmes d'érosion, affectant la germination et le développement des jeunes plants. De plus, le strip-till

peut ne pas avoir offert les mêmes conditions de lit de semence optimales que le labour, ce qui pourrait avoir entraîné une germination inégale et une croissance retardée des plants de betteraves sous le système Sol.

Tableau 9. Écart des rendements moyens nets de biomasse des betteraves sucrières du système sol par rapport au système conventionnel

	2020	2021	2022	2023	Moyenne
Écart rendement moyen net (t/ha)	+6.90	+5.38	-8.45	-1.77	+0.515

Le tableau 9 indique qu'en moyenne les rendements sont égaux dans les deux systèmes. Cependant, l'année 2022 impacte fortement ce résultat. En ne tenant pas compte de cette année-là, où les semis n'ont pas été réalisés au même moment, le taux de production de biomasse semble plus important dans le système Sol.

Modèle

$$\%_{\text{sucre}} \sim \text{annee} \times \text{sdc} + (1 \mid \text{sdc: bloc}) \quad (8)$$

Le modèle (Eq. 8) analyse le taux de sucre moyen des betteraves sucrières en fonction de l'année et du système de culture, et prend en compte l'effet d'interaction du bloc sur le système de culture.

Tableau 10. Résultats de l'ANOVA du modèle du taux de sucre des betteraves sucrières

Effets fixes	p-valeur
Année	3.504 E-05
Système de culture	0.2606
Année : Système de culture	0.1688
Effets aléatoires	p-valeur
Système de culture : Bloc	0.3546

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 10) indiquent que seul l'effet de l'année a un impact sur le taux de sucre des betteraves sucrières. Quant à l'effet aléatoire, celui-ci n'est pas significatif, indiquant que le bloc n'apporte pas de variabilité à notre modèle.

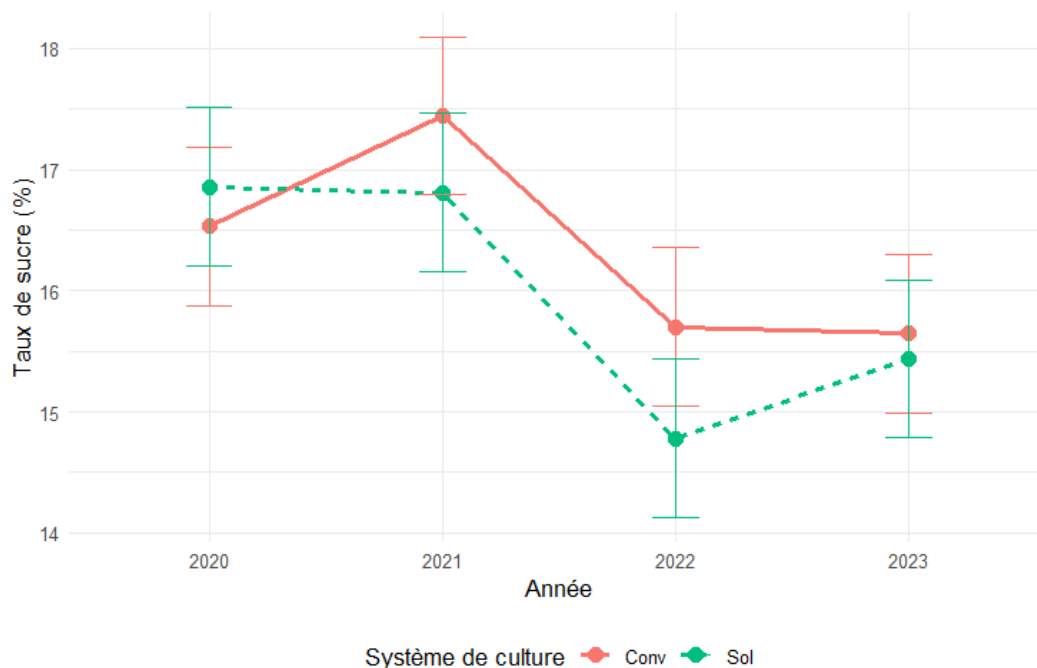


Figure 11. Evolution du taux de sucre des betteraves sucrières par année et en fonction du système de culture

La figure 11 montre que le taux de sucre a tendance à être moins important sous le système Sol. En 2022, une baisse du taux de sucre est observée dans les deux systèmes et en 2023, ils sont similaires.

L'évolution du taux de sucre est similaire à l'évolution du taux de production de biomasse. Cependant, en 2023, le taux de sucre n'a pas augmenté par rapport à 2022 dans le système Conv, tandis que la production de biomasse a augmenté. Concernant le système Sol, l'augmentation du taux de sucre en 2023 est faible par rapport à la production de biomasse.

Ces résultats peuvent être expliqués par les semis qui ont été réalisés tardivement. Malgré une récolte un peu plus tardive, début novembre, les rendements en sucres ont été observés en règle générale (Wullens, 2023).

Tableau 11. Écart des taux moyens nets de sucre des betteraves sucrières du système sol par rapport au système conventionnel

	2020	2021	2022	2023	Moyenne
Ecart taux moyen net (%)	+0.32	-0.63	-0.92	-0.21	-0.36

Le tableau 11 indique les taux de sucre des betteraves sucrières, qui est en général moins important sous le système Sol.

La tendance générale indique que les betteraves sucrières du système Sol produisent une biomasse plus élevée que celles du système Conv, alors que la production de sucre est plus élevée dans le système Conv.

9.3 Lin « fibres »

L'analyse du rendement du lin est très limitée. En 2020, le lin a été attaqué par des altises, tandis qu'en 2022, les levées étaient très hétérogènes et les parcelles étaient envahies par les adventices. Ces dernières ont été broyées pour ne pas impacter les cultures suivantes.

Modèle

$$rdt_{net} \sim \text{annee} \times \text{sdc} + (1 \mid \text{sdc: bloc}) \quad (9)$$

Le modèle (Eq. 9) a été ajusté pour comparer les rendements moyens nets du lin en fonction de l'année et du système de culture, et prend en compte l'effet d'interaction des blocs expérimentaux sur les systèmes de culture.

Tableau 12. Résultats de l'ANOVA du modèle du rendement moyen net du lin

Effets fixes	p-valeur
Année	0.0003029
Système de culture	0.9927038
Année : Système de culture	0.4540846
Effets aléatoires	p-valeur
Système de culture : Bloc	0.9518

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 12) montrent que seule l'année a un effet significatif sur le rendement du lin. Cependant, l'interprétation de ces résultats est limitée par la faiblesse du jeu de données, qui se base sur seulement deux années d'observation.

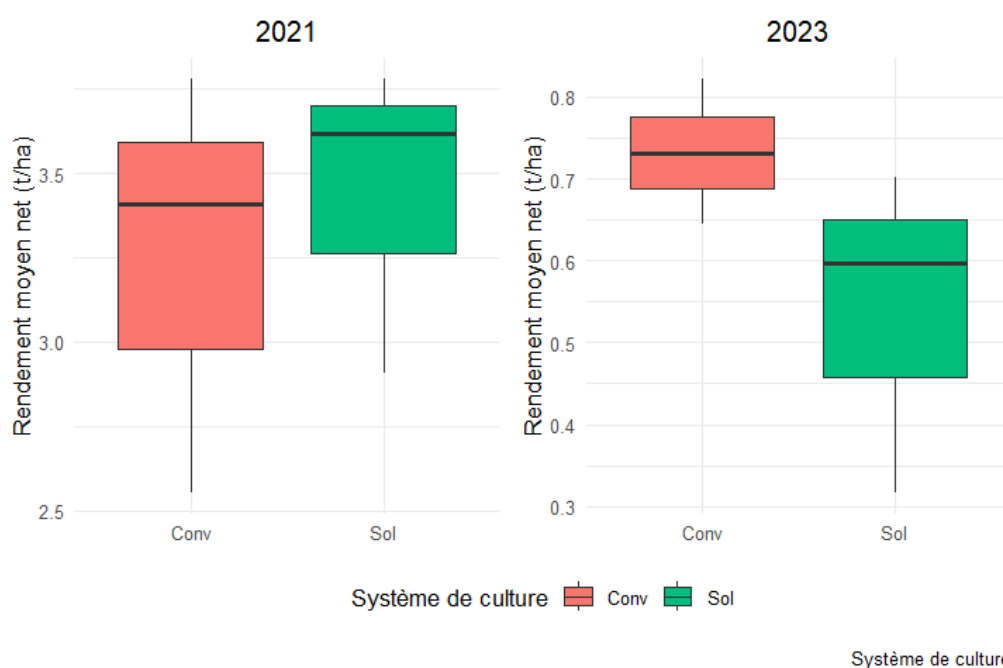


Figure 12. Rendements moyens nets par hectare du lin « fibres » en fonction du système de culture des années 2021 et 2023

La figure 12 illustre les rendements moyens nets du lin de 2021 et 2023. Les rendements en 2021 étaient très réussis, tandis que ceux de 2023 ne l'étaient pas. Aucune tendance ne peut être identifiée, car seulement une année de culture de lin a été réalisée avec succès.

9.4 Pois de conserverie

Les rendements des pois de conserverie sont analysés sur seulement trois années. En 2021, les cultures ont été détruites en raison de la dérive de pesticides appliqués à des cultures de maïs voisines.

Modèle

$$rdt_{net} \sim annee * sdc + (1|bloc) + (1|sdc: bloc) \quad (10)$$

Le modèle (Eq. 10) compare les rendements moyens nets à l'hectare des cultures de pois entre les deux systèmes de culture. Ce modèle analyse l'évolution de ceux-ci entre les années 2020, 2022 et 2023.

Tableau 13. Résultats de l'ANOVA du modèle du rendement du pois de conserverie

Effets fixes	p-valeur
Année	0.04353
Système de culture	0.27330
Année : Système de culture	0.24640
Effets aléatoires	p-valeur
Bloc	0.2738
Système de culture : Bloc	0.4628

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 13) indiquent que seul l'effet de l'année a un effet significatif (p-valeur = 0.04353). Le rendement net varie significativement entre les années, mais pas entre les systèmes de culture, et leur interaction n'est pas significative.

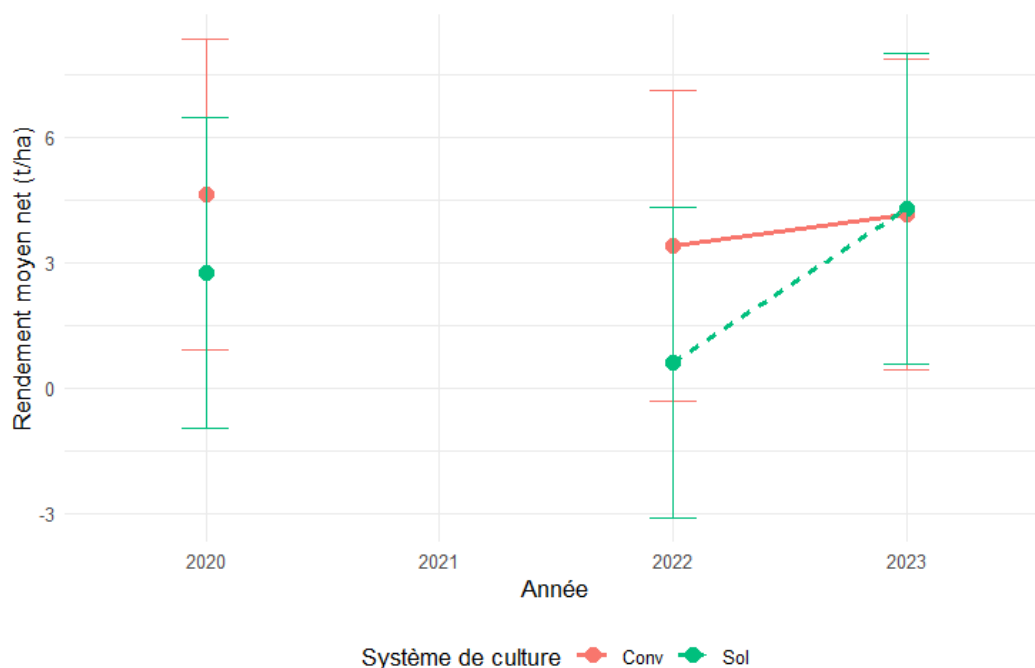


Figure 13. Evolution des rendements moyens nets par hectare des pois de conserverie en fonction du système de culture entre 2020 et 2023

La figure 13 montre qu'en 2020 et 2022, les rendements tendent à être plus importants en Aconv tandis qu'en 2023, les rendements sont équivalents entre les deux systèmes de culture.

Les semis sont réalisés selon des méthodes classiques et ont lieu aux mêmes dates pour les deux systèmes. La différence entre les deux systèmes réside dans le fait que, dans le système Conv, un labour est effectué avant ou à la sortie de l'hiver, tandis que, dans le système Sol, un désherbage chimique est effectué un mois avant le semis.

En 2022, une baisse des rendements a été observée. Le printemps a été chaud et sec (IRM, 2022) et un déchaumage fut nécessaire avant le semis afin d'aérer le sol et de bien préparer le lit de semence. Les cultures ont également dû être traitées contre la tordeuse du pois pouvant expliquer cette baisse générale de rendement.

Comme mentionné précédemment, le printemps 2023 a été assez pluvieux, retardant ainsi les semis des cultures de printemps. La seule différence notable est la pulvérisation de sulfate de potassium effectuée un mois avant le semis en AC.

Tableau 14. Écart des rendements moyens nets des pois de conserverie du système sol en fonction du système conventionnel entre 2020 et 2023

	2020	2021	2022	2023	Moyenne
Écart rendement moyen net (t/ha)	-1.87		-2.78	+0.14	-1.50

Le tableau 14 indique que les rendements moyens nets du pois de conserverie sont meilleurs sous le système Conv. Cependant, les rendements sont équivalents dans les deux systèmes en 2023.

10 Analyses des sols

Les modèles utilisés diffèrent en fonction des propriétés du sol analysées. Les données sont analysées sur les profondeurs 0-25 et 25-50 centimètres pour les années 2020, 2021 et 2023. Les données de 2022 sont analysées sur les profondeurs 0-9, 9-15 et 15-30 centimètres.

10.1 Les propriétés physiques du sol

10.1.1 Densité apparente

La densité apparente (DA) du sol représente la masse sèche d'un volume donné de sol, prenant en compte les particules solides et les pores. Elle est généralement exprimée en grammes par centimètre cube. Cette caractéristique physique du sol influence de manière significative ses propriétés et ses fonctions écologiques, entraînant des répercussions directes sur la productivité agricole, la gestion de l'eau et la santé environnementale.

Modèle

$$DA \sim \text{annee} * \text{profondeur} * \text{sdc} + (1|\text{bloc}) \quad (11)$$

Le modèle (Eq. 11) a été ajusté pour analyser la densité apparente du sol en fonction de l'année, de la profondeur et du système de culture.

Tableau 15. Résultats de l'ANOVA du modèle de la densité apparente

<i>Effets fixes</i>	<i>p-valeur</i>
Année	5.112 E-05
Profondeur	3.535 E-08
Système de culture	4.386 E-05
Année : Profondeur	2.083 E-05
Année : Système de culture	0.05818
Profondeur : Système de culture	0.29082
Année : Profondeur : Système de culture	0.15625
<i>Effets aléatoires</i>	<i>p-valeur</i>
Bloc	0.7905

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 15) indiquent que les trois effets fixes contribuent significativement à la variabilité du modèle. De plus, l'interaction entre l'année et la profondeur est également significative et celle entre l'année et le système de culture est marginalement significative.

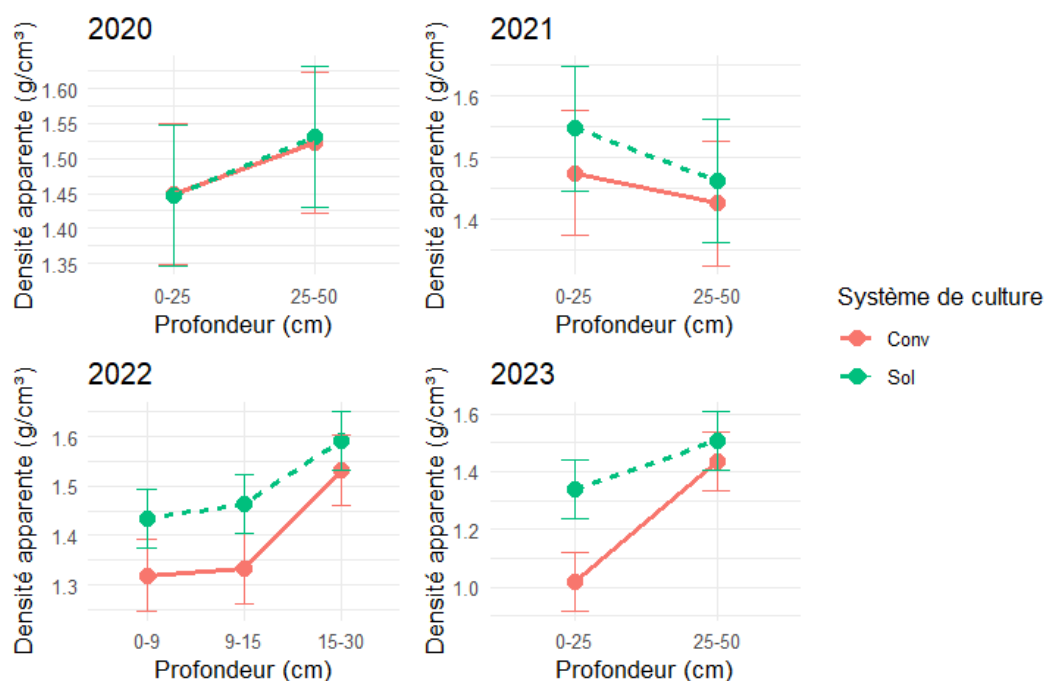


Figure 14. Densité apparente du sol moyenne en fonction de la profondeur, de l'année et du système de culture

La figure 14 représente les densités apparentes moyennes en fonction de la profondeur et du système de culture pour chaque année. En général, le système Sol semble présenter des densités apparentes plus élevées par rapport au système Conv pour les profondeurs étudiées. La densité apparente du système Conv montre une tendance à diminuer sur les 25 premiers centimètres.

Les valeurs de densité d'un sol limoneux varient entre 1,3 et 1,5 g/cm³ dans les sols limoneux (Rowell, 1994). Cependant, les valeurs proches de 1,0 dans le système Conv, en 2023, sont anormales pour ce type de sol. Cela peut être dû à des erreurs lors de l'échantillonnage.

10.2 Les propriétés chimiques du sol

10.2.1 pHeau et pHKCl

Le pH du sol est une propriété chimique essentielle qui influence la disponibilité des nutriments et divers processus pédologiques. Les nutriments sont absorbés par les plantes à des pH différents, ce qui signifie que chaque culture a une gamme de pH optimale pour sa croissance. Un pH compris entre 5,5 et 7,5 est idéal pour la plupart des cultures, car il permet la disponibilité d'une large gamme de nutriments (FAO).

Modèle

$$pH_{eau} \sim \text{profondeur} * sdc + (1|\text{bloc}) \quad (12)$$

$$pH_{KCl} \sim \text{profondeur} * sdc + (1|\text{bloc}) + (1|sdc:\text{bloc}) \quad (13)$$

Les modèles (Eq. 12 et 13) ont été ajustés pour analyser les pH du sol en fonction de la profondeur et du système de culture en 2022.

Tableau 16. Résultats de l'ANOVA des modèles de pH

	<i>pH eau</i>	<i>pH KCl</i>
Effets fixes	p-valeur	
Profondeur	0.9854	0.4709
Système de culture	0.8418	0.7233
Profondeur : Système de culture	0.8418	0.2712
Effets aléatoires	p-valeur	
Bloc	2.2 E-16	0.01889
Système de culture : Bloc		0.44255

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 16) indiquent que seul l'effet bloc explique la variabilité des modèles des pH.

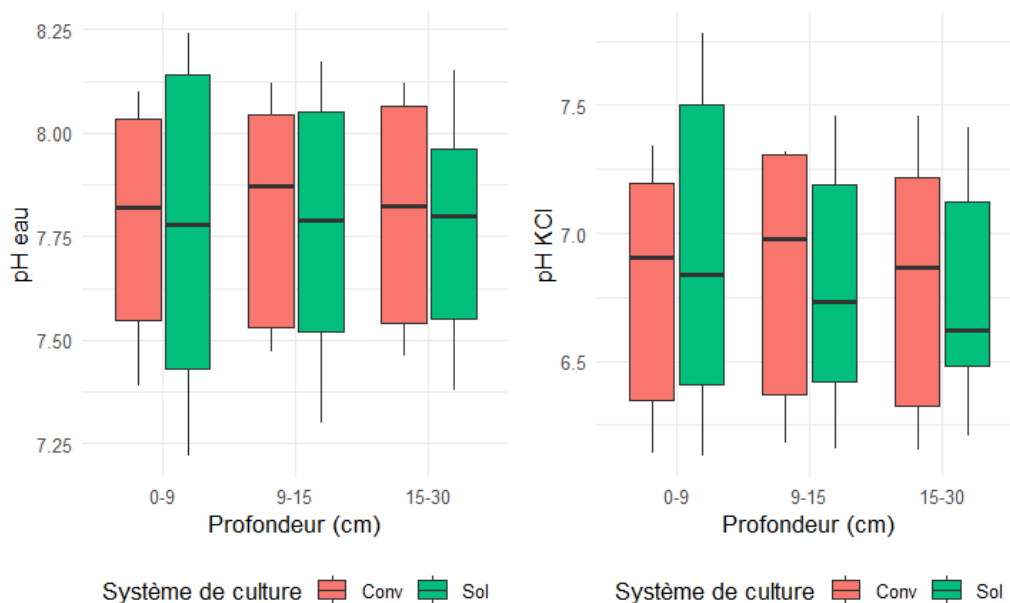


Figure 15. pH eau et pH KCl en fonction de la profondeur et du système de culture en 2022

La figure 15 présente la distribution des valeurs de pH pour l'eau et le KCl dans les deux systèmes de culture en 2022, selon la profondeur. Les données révèlent que le pH de l'eau fluctue entre 7,25 et 8,25, tandis que le pH de KCl varie de 6,20 à 7,75. En moyenne, le pH de l'eau reste constant à travers les trois profondeurs, alors que le pH de KCl montre une variation négligeable. Le pH de l'eau est en moyenne de 7,79 pour les deux systèmes, tandis que le pH de KCl moyen est de 6,81 pour le système Conv et de 6,84 pour le système de sol.

10.2.2 Carbone organique

Le carbone organique est essentiel pour la santé et la fertilité des sols. Il améliore la structure du sol en favorisant la formation d'agrégats, ce qui améliore l'aération et la rétention d'humidité. Une gestion adéquate du stock de carbone contribue à la durabilité des systèmes agricoles.

Modèle

$$C \sim \text{profondeur} * \text{annee} * \text{sd} + (1 | \text{bloc}) + (1 | \text{sd} : \text{bloc}) \quad (14)$$

$$C_{2022} \sim \text{profondeur} * \text{sd} + (1 | \text{sd} : \text{bloc}) \quad (15)$$

Le modèle (Eq. 14) analyse la concentration en carbone organique des années 2020, 2021 et 2023. Le modèle (Eq. 15) est ajusté pour analyser la concentration en carbone organique de l'année 2022. Ceux-ci étudient l'évolution de la teneur en carbone organique au fil du temps en fonction de la profondeur du sol et prennent en compte la variabilité entre les trois blocs expérimentaux.

Tableau 17. Résultats de l'ANOVA des modèles de la concentration en carbone organique

	20-21-23	2022
Effets fixes	p-valeur	
Profondeur	4.223 E-14	0.00918
Année	0.002237	
Système de culture (SDC)	0.092697	0.67189
Profondeur : Année	0.437911	
Profondeur : SDC	0.367105	0.03178
Année : SDC	0.175897	
Profondeur : Année : SDC	0.679586	
Effets aléatoires	p-valeur	
Bloc	0.4799	
SDC : Bloc	1	0.03387

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 17) montrent un effet très significatif de la profondeur sur la concentration en carbone organique dans le sol. Dans le cas du modèle 20-21-23, l'année a également un effet global significatif, mais les effets individuels des années 2021 et 2023 ne sont pas significatifs par rapport à 2020.

Dans le cas du modèle 2022, une interaction significative entre la profondeur et le système de culture est observée, indiquant que la variabilité de la concentration du carbone organique dans les différentes couches du sol dépend des pratiques agricoles utilisées. De plus, un effet significatif du bloc sur le système de culture est également constaté, suggérant que les variations de la concentration de carbone organique entre les systèmes de culture sont influencées par la variabilité entre les blocs expérimentaux.

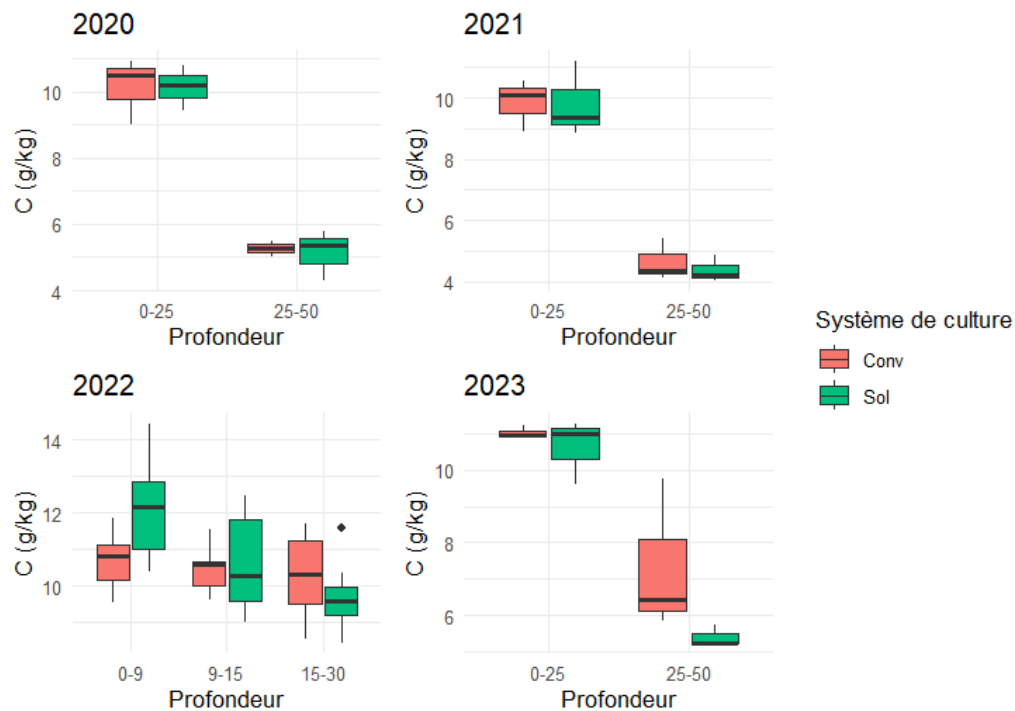


Figure 16. Concentration moyenne en carbone organique en fonction de la profondeur et du système de culture par année

La figure 16 illustre l'impact du système de culture sur la distribution du carbone organique dans le sol. Dans le système Conv, la teneur en carbone organique reste relativement constante dans les 30 premiers centimètres du sol, tandis qu'une stratification apparaît dans le système de l'AC. Une concentration plus élevée de carbone organique est observée en surface dans le système Sol, alors qu'à une profondeur plus importante, le système Conv présente une concentration accrue de carbone organique.

Ce graphique révèle une tendance à l'homogénéisation du carbone organique dans le sol du système Conv, en comparaison avec une accumulation en surface dans le système Sol.

Modèle

$$Stock_C \sim \text{annee} * sdc \quad (16)$$

Le modèle (Eq. 16) analyse l'évolution du stock de carbone organique sur les 50 premiers centimètres du sol entre 2020 et 2023. Le modèle a été ajusté en modèle linéaire car aucun effet aléatoire n'explique la variabilité du modèle. Il ne prend pas en compte l'année 2022.

Tableau 18. Résultats de l'ANOVA pour le modèle sur le stock de carbone organique

<i>Effets fixes</i>	<i>p-valeur</i>
Année	0.7467
Système de culture (SDC)	0.8162
Année : SDC	0.9716

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 18) révèlent qu'aucun effet fixe n'explique la variabilité du modèle, s'il y en a une.

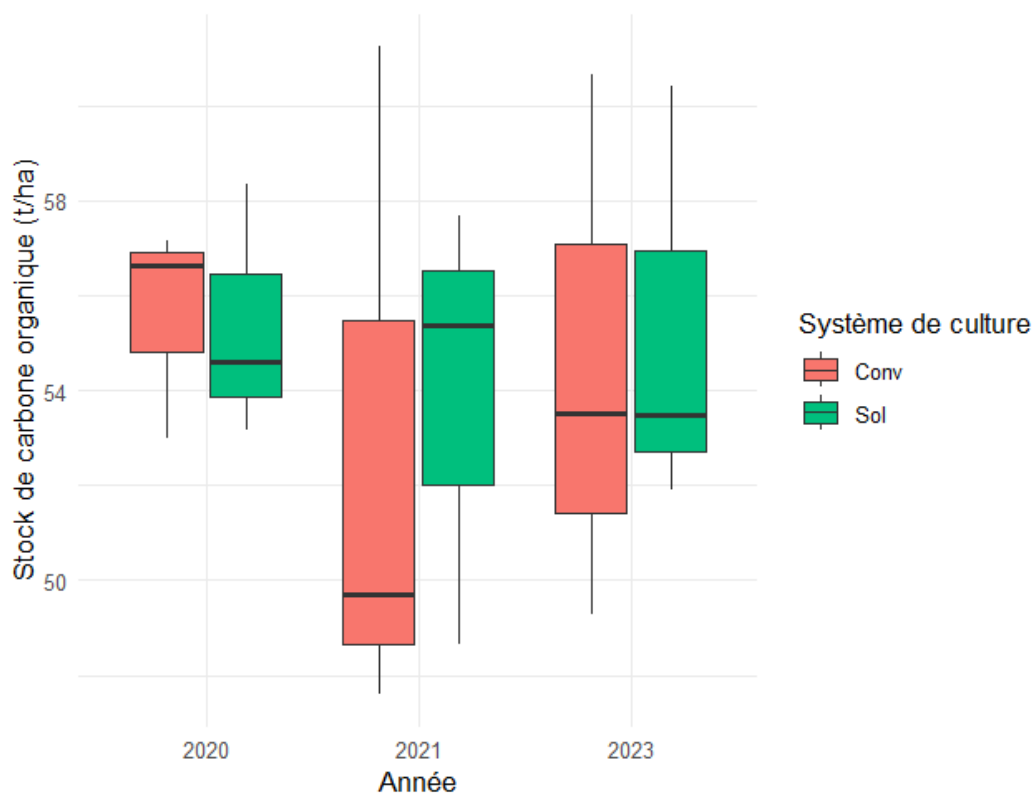


Figure 17. Stock total moyen de carbone organique dans les 50 premiers centimètres du sol en fonction du système de culture en 2020, 2021 et 2023

La figure 17 montre que le stock de carbone organique dans les 50 premiers centimètres ne varie que très légèrement pour le système Conv et semble stable dans les deux systèmes de cultures.

10.2.3 Azote total

L'azote, élément nutritif essentiel, joue un rôle central dans la synthèse des protéines, la croissance des plantes et le fonctionnement des microorganismes du sol. Il est indispensable au développement des cultures et à la qualité des sols. Une gestion adéquate du stock d'azote contribue également à la durabilité des systèmes agricoles en améliorant la fertilité du sol et en favorisant la biodiversité microbienne.

Modèle

$$N \sim \text{profondeur} * \text{annee} * \text{sd} + (1 | \text{bloc}) \quad (17)$$

$$N_{2022} \sim \text{profondeur} * \text{sd} + (1 | \text{sd} : \text{bloc}) \quad (18)$$

Le modèle (Eq. 17) analyse la concentration en azote total des années 2020, 2021 et 2023. Le modèle (Eq. 18) est ajusté pour analyser la concentration en azote total de l'année 2022. Ceux-ci étudient l'évolution de la teneur en carbone organique au fil du temps en fonction de la profondeur du sol et prennent en compte la variabilité entre les trois blocs expérimentaux.

Tableau 19. Résultats de l'ANOVA du modèle sur la concentration d'azote total

	20-21-23	2022
Effets fixes	p-valeur	
Profondeur	1.256 E-15	0.00042
Année	0.02473	
Système de culture (SDC)	0.20938	0.26743
Profondeur : Année	0.65541	
Profondeur : SDC	0.35986	0.00904
Année : SDC	0.65254	
Profondeur : Année : SDC	0.96295	
Effets aléatoires	p-valeur	
Bloc	0.5015	
SDC : Bloc		0.1089

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 19) indiquent que, pour le modèle couvrant les années 2020, 2021 et 2022, la profondeur ainsi que l'année ont un impact significatif sur la concentration en azote total dans le sol. En ce qui concerne le modèle de 2022, il confirme que

la profondeur a un effet significatif et que l'interaction avec le système de culture affecte également les 30 premiers centimètres du sol.

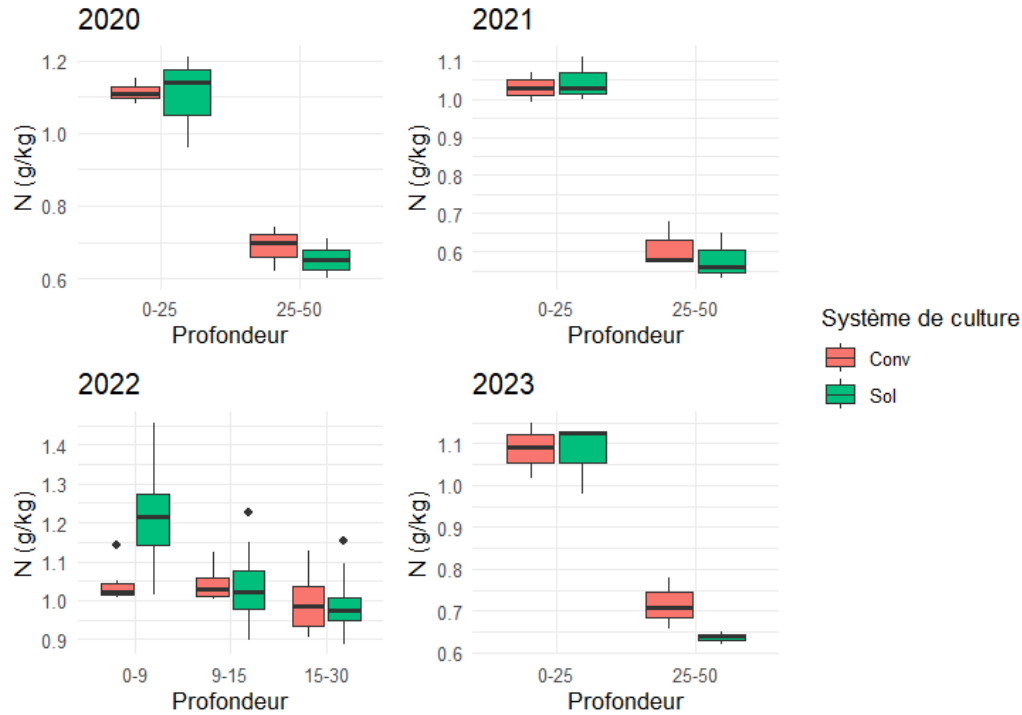


Figure 18. Concentration moyenne en azote total en fonction de la profondeur et du système de culture par année

La figure 18 illustre l'impact du système de culture sur la concentration en azote dans le sol. Elle montre les mêmes tendances que pour le carbone organique. Dans le système Conv, la teneur en azote reste relativement constante dans les 30 premiers centimètres du sol, tandis qu'elle diminue dans le système Sol. Une concentration plus élevée d'azote est observée en surface dans le système Sol, tandis qu'elle est plus importante en profondeur dans le système Conv.

Modèle

$$Stock_N \sim \text{profondeur} * \text{annee} * \text{sdc} + (1 | \text{bloc}) + (1 | \text{sdc} : \text{bloc}) \quad (19)$$

Le modèle (Eq. 19) analyse l'évolution du stock d'azote total sur les 50 premiers centimètres du sol entre 2020 et 2023. Le modèle a été ajusté en modèle linéaire, car aucun effet aléatoire n'explique la variabilité du modèle. Il ne prend pas en compte l'année 2022.

Tableau 20. Résultats de l'ANOVA du modèle sur le stock d'azote total

<i>Effets fixes</i>	<i>p-valeur</i>
Année	0.01943
SDC	0.25759
Année : SDC	0.35050

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 20) révèlent que l'année (p-valeur = 0,01943) a un effet significatif sur le stock d'azote total.

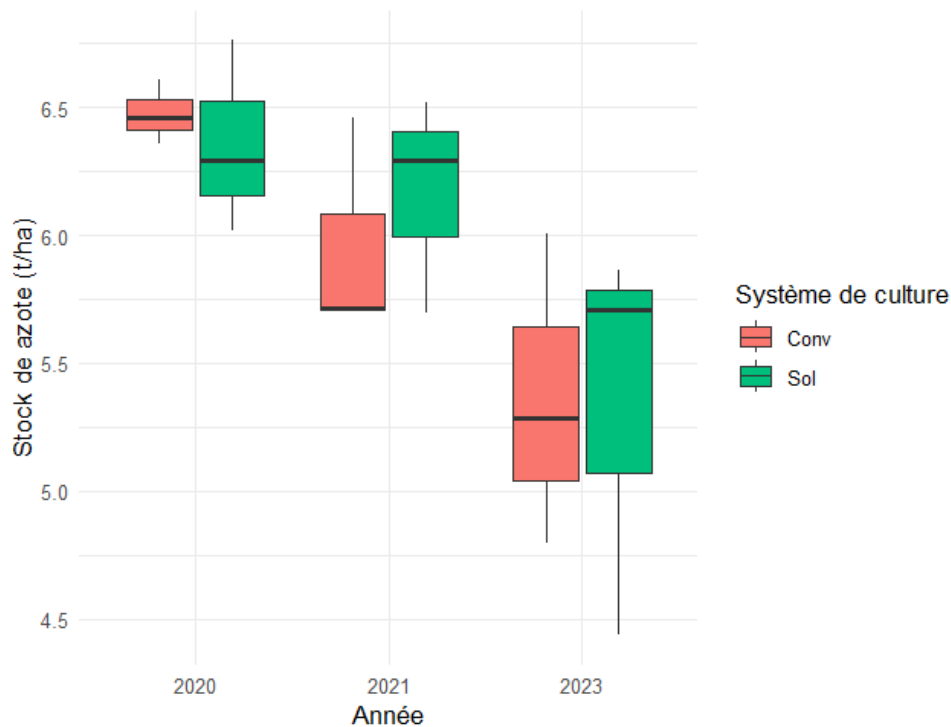


Figure 19. Stock total moyen d'azote dans les 50 premiers centimètres de sol en fonction du système de culture en 2020, 2021 et 2023

La figure 19 illustre l'évolution du stock d'azote dans les 50 premiers centimètres du sol, mettant en évidence une forte variabilité intra-système. Une diminution plus prononcée du stock d'azote est observée dans le système Conv. La littérature ne permet pas d'expliquer les différences observées, car le labour n'affecte pas la teneur en azote total, et la restitution des résidus de culture, identique dans les deux systèmes avec une culture de couverture, ne devrait pas entraîner de variations. La différence pourrait plutôt être due au biais créé par la différence de masse analysée, les systèmes ayant une densité apparente plus élevée en AC.

10.2.4 C/N

Modèle

$$C/N \sim \text{profondeur} * \text{sdc} + (1|\text{bloc}) + (1|\text{sdc}:\text{bloc}) \quad (20)$$

Le modèle (Eq. 20) analysant le rapport C/N valide les trois tests d'hypothèse de validité de l'analyse de la variance, sauf pour l'année 2023. Le modèle C/N n'aide pas à expliquer la baisse du stock d'azote dans le sol en système Conv.

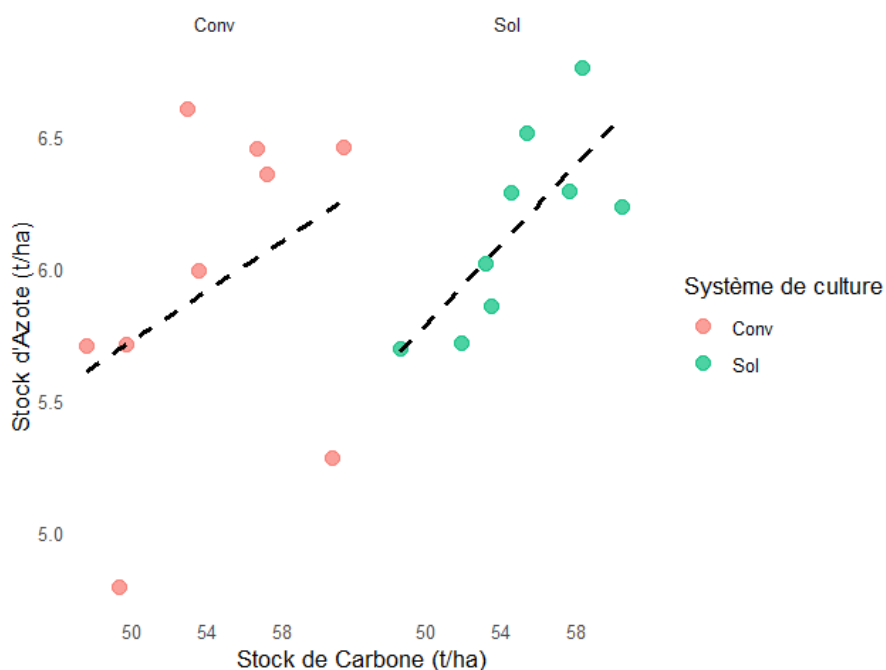


Figure 20. Corrélation entre le stock de carbone organique et le stock d'azote total du sol en 2022 en fonction du système de culture

La figure 20 permet d'illustrer la corrélation entre le stock de carbone organique et le stock d'azote total. Le rapport C/N avec une valeur moyenne de 10,21 en Aconv et de 9,96 en AC est constant dans les trois couches analysées en 2022. Il ne varie pas de manière significative entre les deux systèmes.

10.2.5 Phosphore

Le phosphore est un élément nutritif essentiel pour la croissance et le développement des plantes. Il joue un rôle crucial dans plusieurs processus physiologiques, notamment la photosynthèse, la respiration, et la synthèse des acides nucléiques et des ATP (adénosine triphosphate). De plus, le phosphore est impliqué dans la formation des racines, la floraison et la maturation des fruits, contribuant ainsi à des rendements agricoles optimaux (Hinsinger, 2001).

La disponibilité du phosphore dans le sol est souvent limitée, car il a tendance à se lier aux particules de sol, le rendant moins accessible aux plantes. Il est utile d'analyser sa concentration dans les sols, afin de pouvoir maîtriser la fertilisation phosphatée si nécessaire.

Modèle

$$P_{dispo} \sim \text{profondeur} * \text{annee} * \text{sdc} + (1|\text{bloc}) + (1|\text{sdc}:\text{bloc}) \quad (21)$$

Le modèle (Eq. 21) analyse la quantité de phosphore disponible et assimilable dans le sol. Le modèle étudie son évolution en fonction de la profondeur, du système, de l'année et prend en compte la variabilité entre les trois blocs expérimentaux et leurs interactions.

Tableau 21. Résultats de l'ANOVA du modèle du P disponible

<i>Effets fixes</i>	<i>p-valeur</i>
Profondeur	2.658 E-12
Année	0.811516
SDC	0.885916
Profondeur : Année	0.001242
Profondeur : SDC	0.407021
Année : SDC	0.24640
Profondeur : Année : SDC	0.267290
<i>Effets aléatoires</i>	<i>p-valeur</i>
Bloc	0.5798
SDC : Bloc	0.1513

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 21) indiquent que l'effet de la profondeur est fortement significatif. Cela suggère que la concentration de P diminue dans les couches de sol plus profondes. L'interaction entre profondeur et année est également significative, suggérant que l'effet de la profondeur sur le P disponible varie selon l'année.

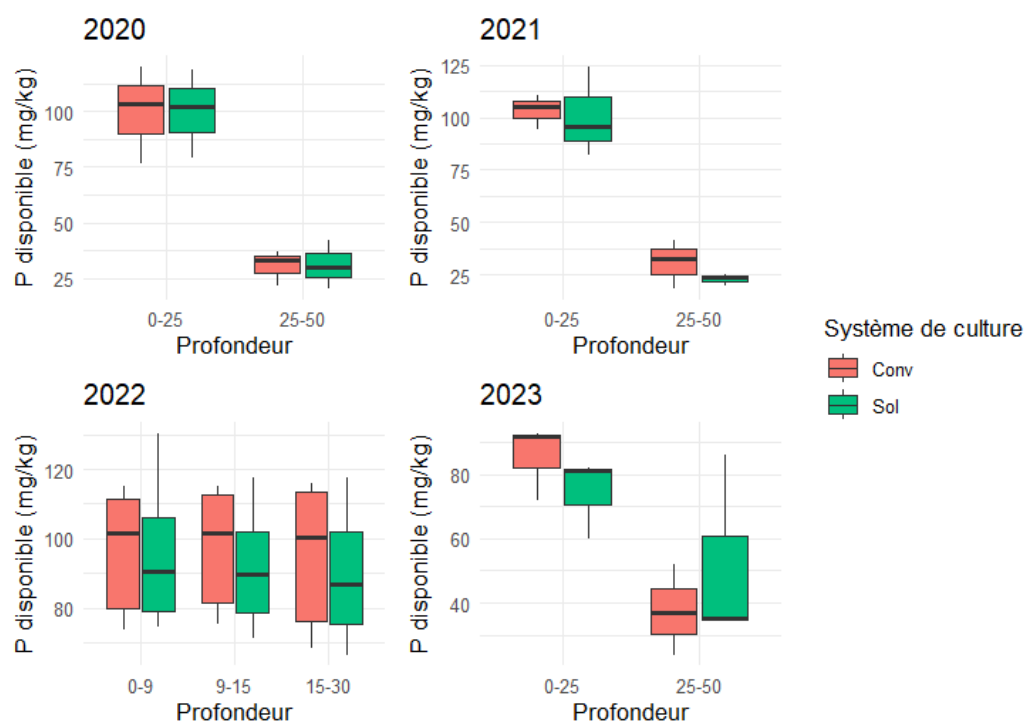


Figure 21. Concentration moyenne en phosphore disponible en fonction de la profondeur et du système de culture par année

La figure 21 illustre l'effet de la profondeur sur la concentration du phosphore dans les sols. Les teneurs en phosphore disponibles sont plus importantes en surface dans les deux systèmes. De plus, les concentrations semblent assez stables malgré une faible diminution en 2023 dans le système Sol.

En général, les systèmes conventionnels utilisent plus souvent des engrais phosphatés de manière plus intensive et plus fréquente, entraînant des niveaux plus élevés de phosphore dans le sol (Chien, 1995). Cependant, durant ces quatre années, aucune différence significative n'a été constatée dans l'application d'engrais phosphatés entre les deux systèmes. En 2020, seule la culture de pomme de terre et celle de betteraves ont bénéficié d'une fertilisation phosphatée.

10.2.6 Cations échangeables

L'analyse des cations échangeables (K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+) a été effectuée sur les données recueillies en 2022 afin de pouvoir les comparer à la couche superficielle du sol.

Modèles

$$1/K^+ \sim \text{profondeur} * \text{sd} + (1|\text{bloc}) + (1|\text{sd}:\text{bloc}) \quad (22)$$

$$1/Mg^{2+} \sim \text{profondeur} * \text{sd} + (1|\text{bloc}) + (1|\text{sd}:\text{bloc}) \quad (23)$$

$$1/Ca^{2+} \sim \text{profondeur} * \text{sd} + (1|\text{bloc}) + (1|\text{sd}:\text{bloc}) \quad (24)$$

$$\log(Na^+) \sim \text{profondeur} * \text{sd} + (1|\text{sd}:\text{bloc}) \quad (25)$$

Les modèles (Eq. 22, 23, 24 et 25) sont ajustés pour comparer la concentration des ions échangeables en fonction du système de culture et de la profondeur de l'année 2022. Les modèles pour le potassium, le magnésium et le calcium ont été inversés, tandis que le logarithme du modèle pour le sodium a été appliqué afin de mieux représenter les réalités des systèmes et de valider les tests d'hypothèses.

Tableau 22. Résultats des ANOVA des modèles des cations échangeables

	$1/K^+$	$1/Mg^{2+}$	$1/Ca^{2+}$	$\log(Na^+)$
Effets fixes	p-valeur			
Profondeur	3.606 E-07	0.2201	0.4089	0.8732
SDC	0.6401	0.8328	0.8092	0.7477
Profondeur : SDC	7.203 E-07	0.2035	0.4373	0.7106
Effets aléatoires	p-valeur			
Bloc	0.355177	0.3887	0.06239	
SDC : Bloc	0.006515	1.022 E-05	0.02467	0.517

Les résultats de l'ANOVA (Tab. 22) montrent que la profondeur a un effet hautement significatif sur la concentration en potassium. L'effet du système de culture sur cette concentration est significatif, mais surtout en interaction avec la profondeur. De plus, la p-valeur associée à l'effet aléatoire de l'interaction entre les systèmes de culture et les blocs suggère que les variations de concentration en potassium peuvent être en partie expliquées par ces interactions.

Pour le magnésium, aucun facteur fixe n'a d'effet significatif sur la variable $1/Mg^{2+}$. En revanche, l'interaction entre les blocs et les systèmes de culture montre une p-valeur bien inférieure à 0,05, ce qui indique qu'il existe une variabilité significative entre les blocs en fonction des systèmes de culture.

Les effets fixes des variables de profondeur, du système de culture, ainsi que leurs interactions, n'ont pas d'impact significatif sur $1/Ca^{2+}$. De plus, la variabilité entre les blocs au sein des systèmes de culture est très faible. Les différences entre blocs dans les systèmes de culture n'ont qu'un effet négligeable sur la concentration en calcium.

Enfin, aucun effet significatif n'est observé sur $\log(\text{Na}^+)$. La variabilité entre les blocs au sein des systèmes de culture est faible, et les différences entre les blocs n'ont qu'un impact marginal sur la concentration en sodium.

Tableau 23. Teneurs moyennes des cations échangeables dans les 30 premiers centimètres de sol en 2022 en fonction du système de culture et du bloc expérimental

Système	Bloc	K^+ (mg/100g)	Mg^{2+} (mg/100g)	Ca^{2+} (mg/100g)	Na^+ (mg/100g)
Conv	A	15.47	7.90	256.69	1.46
Conv	B	21.46	9.67	301.97	1.62
Conv	C	20.79	14.77	215.51	2.15
Sol	A	18.47	9.41	270.40	1.70
Sol	B	20.03	8.81	313.77	2.06
Sol	C	22.20	11.41	194.84	1.64

Le tableau 23 répertorie les teneurs moyennes des cations sur les 30 premiers centimètres en fonction du système et du bloc de culture. Les concentrations des différents cations échangeables varient principalement en fonction du bloc de culture. Presque aucune différence n'est observable entre les deux systèmes de cultures.

Les teneurs en potassium sont plus élevées dans le bloc A (parcelles 1 à 18) et varient donc en fonction de la profondeur (Tab. 22). Tandis que les teneurs en magnésium sont plus élevées dans le bloc C (parcelles 43 à 66) et les teneurs en calcium sont plus élevées dans le bloc B (parcelles 19 à 42). Les teneurs en sodium n'ont que très peu d'intérêts agronomiques dans ce cas-ci.

11 Analyses des traitements phytosanitaires

11.1 Protection des cultures

Tableau 24. IFT totaux moyens par culture en 2023

	<i>Betterave sucrière</i>	<i>Colza</i>	<i>Froment d'hiver</i>		<i>Lin Fibres</i>	<i>Pois de conserverie</i>	<i>Pomme de terre</i>	<i>Total</i>
Conv	6.94	/	3.78		3.14	3.53	24.2	41.59
Sol	8.22	3.21	4.17*	2.82**	3.14	2.71	/	24.27

* Froment d'hiver après une culture de colza

** Froment après une culture de betteraves sucrières

Le tableau 24 montre les résultats du calcul de l'IFT total moyen par culture de chaque système. Il a été calculé sur base des traitements de l'année 2023. Cependant, cet indice peut varier d'une année à l'autre en fonction des maladies, des adventices et des ravageurs qui apparaissent. L'IFT total moyen, de ce tableau, ne prend pas en compte la destruction chimique des couverts, car les quantités d'herbicides n'ont pas été recensées.

Des variations significatives selon les cultures et les systèmes sont observées. L'IFT pour les betteraves sucrières est supérieur dans le système Sol par rapport au système Conv. Cette augmentation est due à une gestion plus intensive des adventices en système de conservation, tandis que le labour en compense l'effet dans le système Conv.

Pour le froment, l'IFT est similaire entre les deux systèmes, avec une légère différence entre les deux cultures de froment d'hiver du système Sol. En ce qui concerne le lin, l'IFT est le même dans les deux systèmes. Effectivement, les cultures de lin respectives ont reçu la même quantité d'insecticides en 2023.

Par ailleurs, le pois de conserverie présente un IFT légèrement supérieur dans le système Conv avec un traitement plus important des adventices, résultant d'une différence de pratiques agricoles. Les pois en AC sont pulvérisés une fois de plus qu'en Aconv. Le système Sol utilise des herbicides pour détruire les mauvaises herbes avant le semis, tandis qu'en système Conv, un labour est réalisé.

Un cas notable est celui de la pomme de terre, avec un IFT de 24.2. Ce chiffre élevé souligne l'intensité des traitements phytosanitaires nécessaires pour cette culture, affectant ainsi de manière significative l'ensemble de l'IFT du système Conv.

Ces observations mettent en lumière les dynamiques variées des besoins en traitements phytosanitaires selon les cultures et les systèmes de culture, soulignant l'importance d'adapter les stratégies phytosanitaires aux spécificités de chaque système de culture.

11.2 Fertilisation minérale

Les traitements phytosanitaires comprennent également la pulvérisation d'engrais. Dans cette étude, les deux systèmes de culture se basent uniquement sur des engrais minéraux de fond ou annuels, sans utilisation d'engrais organiques. La comparaison entre les deux systèmes de culture vise à évaluer les différences de quantité et d'efficacité de cette fertilisation. Cette analyse permet d'identifier les pratiques qui réduisent le besoin en engrais chimiques supplémentaire, et d'adapter ainsi la quantité à fournir aux cultures.

L'azote minéral (N) est appliqué sous forme d'azote uréique, ammoniacal et d'acide nitrique, le phosphore minéral sous forme d'hémipentaoxyde de phosphore (P_2O_5), le potassium minéral en oxyde de potassium (K_2O), le magnésium minéral sous forme d'oxyde de magnésium (MgO) et le soufre sous forme d'anhydride sulfurique (SO_3). Les doses spécifiques de chaque nutriment par année sont détaillées dans le tableau 26 en annexe.

11.2.1 N

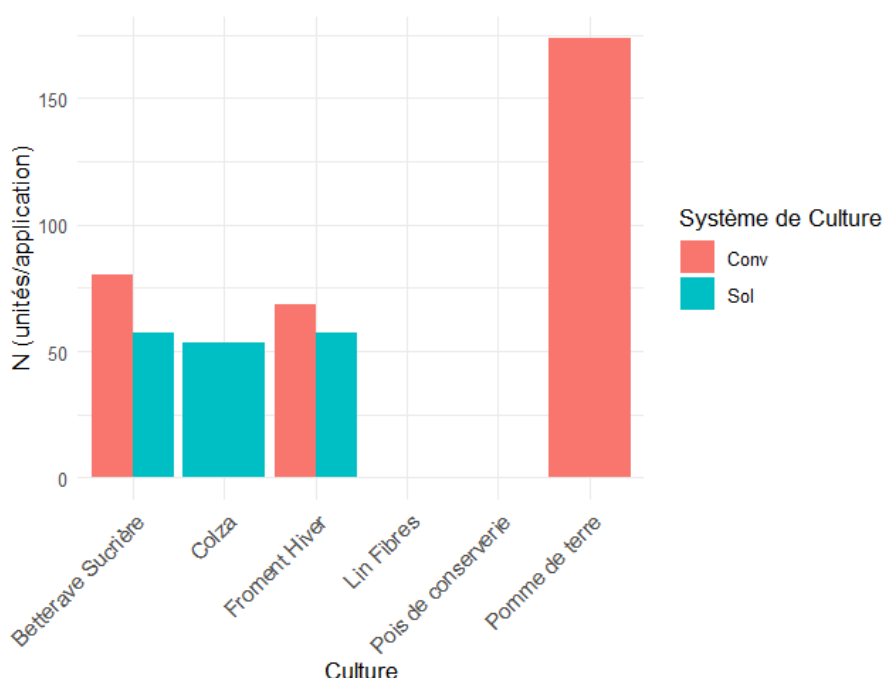


Figure 22. Doses moyennes de N par unités appliquées en fonction de la culture et du système de culture entre 2020 et 2023

La figure 22 indique que les cultures de betteraves et de froment d'hiver après la culture de pomme de terre ont reçu plus d'engrais azotés durant ces quatre années de cultures en système Conv. Aucune culture de lin ou de pois n'a reçu d'engrais azotés. La culture de colza, qui remplace la culture de pomme de terre dans le système Sol, a moins besoin d'azote que cette dernière. Ces résultats montrent que la pomme de terre impacte fortement la quantité de fertilisants azotés nécessaires dans le système de culture conventionnel.

11.2.2 P₂O₅

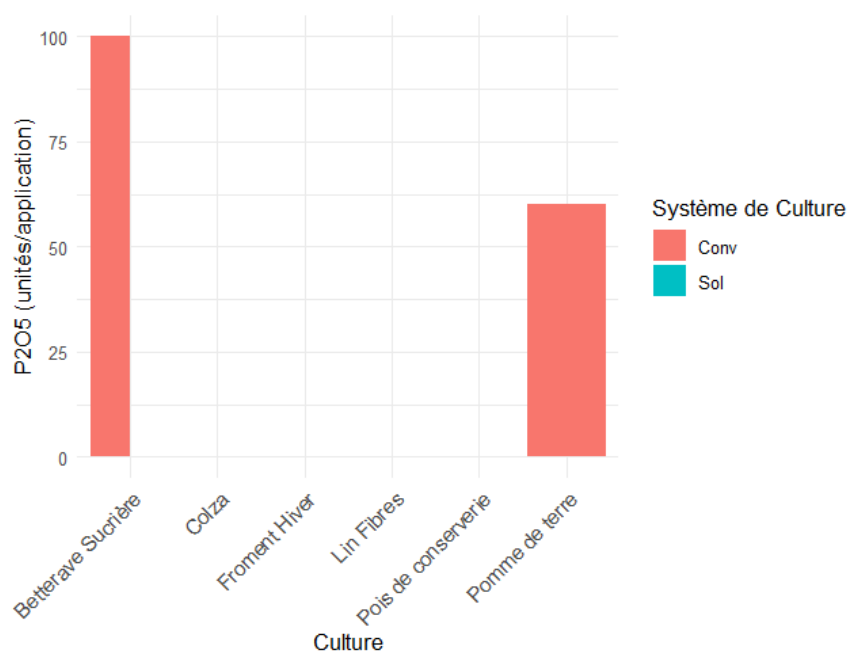


Figure 23. Doses moyennes de P₂O₅ par unités appliquées en fonction de la culture et du système de culture en 2020

En ce qui concerne le P₂O₅, l'apport de l'engrais de fond (0-10-18 BB) a eu lieu en 2020. La figure 23 montre que seules les cultures de pomme de terre et de betteraves ont eu une fertilisation phosphatée, avec une quantité plus importante pour les betteraves sucrières.

11.2.3 K₂O

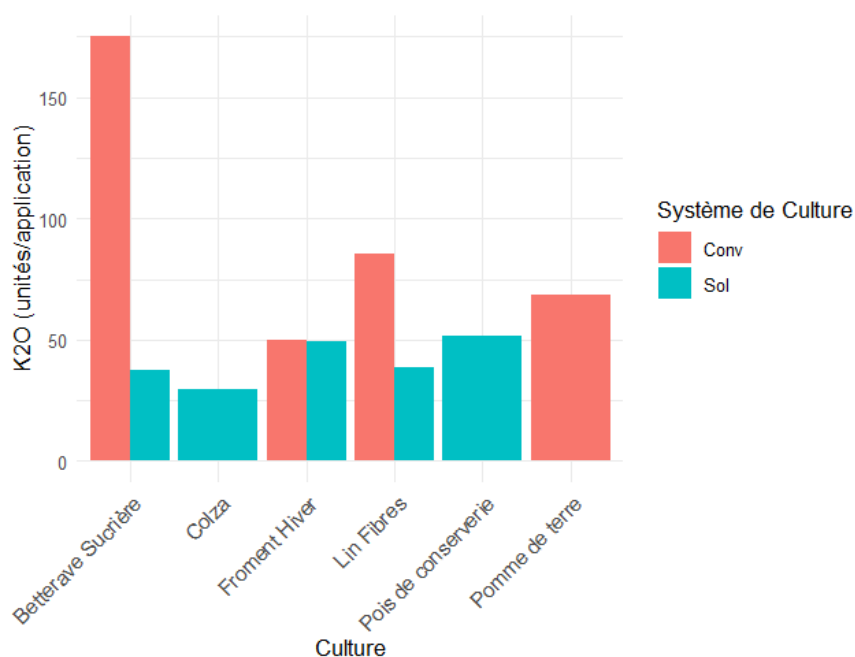


Figure 24. Doses moyennes de K₂O par unités appliquées en fonction de la culture et du système de culture entre 2020 et 2023

Au niveau du K_2O , la figure 24 indique que la culture de betteraves sucrières est la culture qui nécessite le plus de potassium en système Conv. De plus, comme pour le lin, la dose moyenne appliquée sur ces 4 années est nettement supérieure à celle du système Sol. Pour les cultures de froment d'hiver, l'apport en K_2O est équivalent, tandis que pour les pois de conserverie, aucun apport de potassium n'est appliqué en système Conv. Enfin, la culture de pomme de terre nécessite un apport plus conséquent que la culture de colza.

11.2.4 MgO

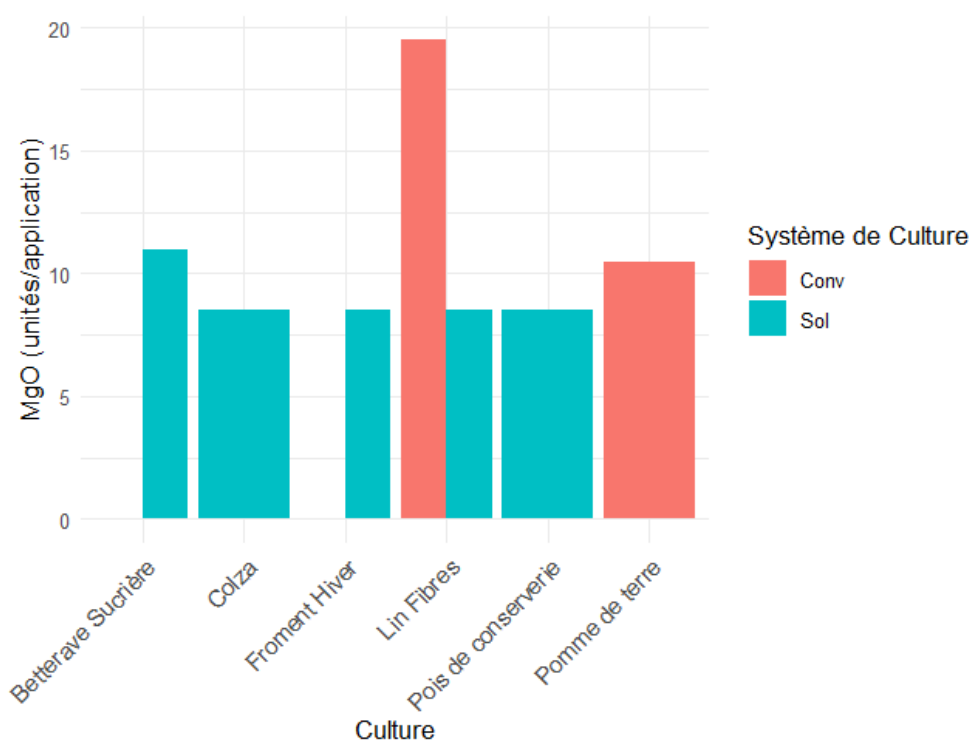


Figure 25. Doses moyennes de MgO par unités appliquées en fonction de la culture et du système de culture entre 2020 et 2021

Concernant le magnésium, celui-ci n'a été appliqué qu'en 2020 et 2021. La figure 25 indique que les quantités de MgO appliquées dans le système Conv sont plus élevées pour les cultures de lin. Ces cultures sont les seules ayant bénéficié de magnésium avec la culture de pomme de terre pour ce système. Dans le système Sol, toutes les cultures ont reçu la même dose, excepté la betterave sucrière en 2021 où il n'y a pas eu d'apport de magnésium.

11.2.5 SO₃

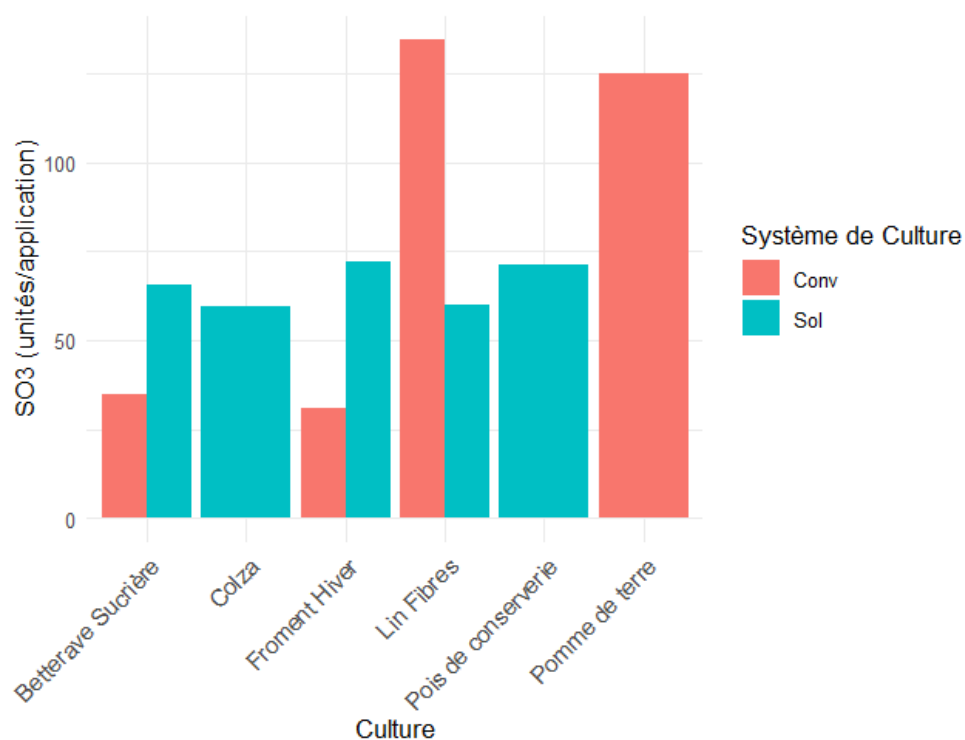


Figure 26. Doses moyennes de SO₃ par unités appliquées en fonction de la culture et du système de culture entre 2020 et 2023

Enfin, concernant les doses appliquées en SO₃, la figure 26 indique que celles-ci sont plus importantes pour les cultures en système Sol, à l'exception du lin. Cependant, les doses appliquées pour la culture de pomme de terre sont plus importantes que pour la culture de colza.

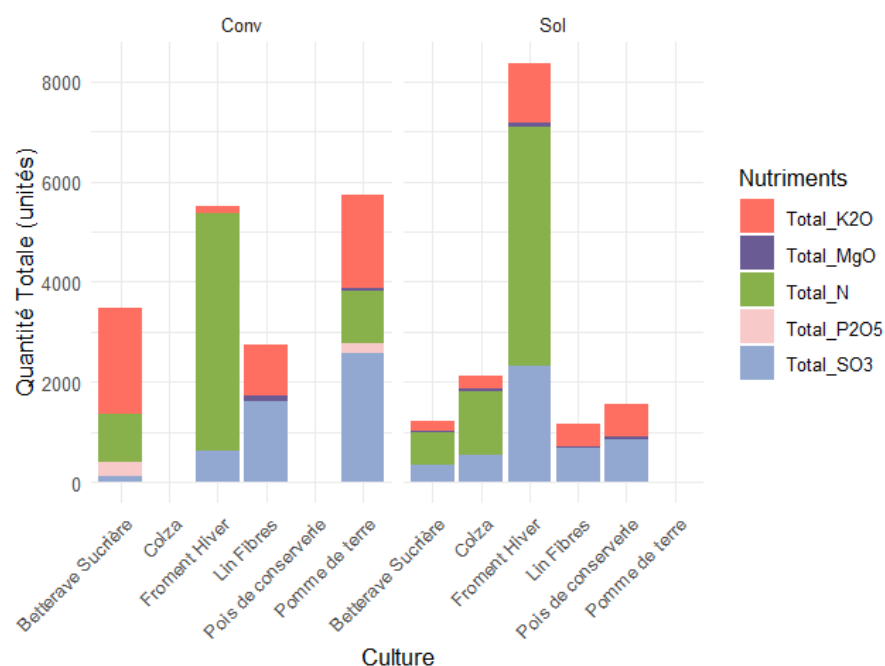


Figure 27. Quantité totale des nutriments apportés par unités appliquées en fonction du système de culture et de la culture entre 2020 et 2023

Dans l'ensemble, les résultats (Fig. 27) montrent que les systèmes de culture conventionnels tendent à avoir une fertilisation minérale plus importante. Cependant, la fertilisation du froment est beaucoup plus importante dans le système Sol que dans le système Conv.

Quatrième partie :

Discussion

12 Discussion

Ce mémoire a été axé sur deux objectifs. Le premier était d'identifier quelles sont les cultures les plus impactées par la transition d'un système conventionnel vers un système d'agriculture de conservation. Le second était de comparer l'impact des pratiques agricoles, des deux systèmes de cultures, sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Ces deux objectifs ont amené différents résultats et ceux-ci sont complémentaires pour exprimer les intérêts et les difficultés de cette transition systémique.

12.1 Evolution des rendements des cultures

Tout d'abord, l'analyse des résultats a révélé l'évolution des rendements des cultures au sein de chaque système de culture comparé. Il ressort que, au début de l'implantation du système Sol, les rendements du froment d'hiver sont inférieurs à ceux observés sous le système Conv. Cependant, au fil du temps, les rendements des cultures en système Sol tendent à se rapprocher de ceux du froment d'hiver cultivé selon les pratiques conventionnelles.

Concernant les betteraves sucrières, le système Sol présente des rendements en biomasse plus élevés durant les deux premières années par rapport au système Conv. En revanche, les rendements en sucre sont comparables entre les deux systèmes, avec une différence moyenne de seulement -0,36 % du taux de sucre au cours des quatre années d'étude. Les rendements des betteraves sucrières ont été principalement influencés par les conditions environnementales, et non par le système de culture.

Les cultures de lin ont été fortement affectées par diverses erreurs de gestion et de protection. Le lin étant particulièrement vulnérable aux altises, une surveillance attentive est indispensable pour prévenir les infestations de ces insectes. Afin d'évaluer correctement les rendements du lin et de détecter les tendances éventuelles, il sera nécessaire de poursuivre les analyses et les comparaisons dans les années à venir. Ces études futures permettront de mieux comprendre l'évolution des rendements et d'ajuster les pratiques de gestion et de protection pour optimiser la production.

Les rendements des pois de conserverie ont été inférieurs dans le système Sol par rapport au système Conv au cours des deux premières années où les cultures ont pu être réalisées, soit en 2020 et 2022. Cependant, en 2023, les rendements se sont équilibrés entre les deux systèmes.

En résumé, les rendements des cultures de froment d'hiver et des cultures de pois de conserverie sont les plus impactés par le système de culture. Les analyses statistiques ont montré que l'effet de l'année était le facteur le plus significatif. En effet, les conditions environnementales jouent un rôle prépondérant dans l'organisation des opérations culturales. Le choix des dates de semis, de travail du sol, des applications de produits phytosanitaires et de récoltes n'est pas toujours possible. Les agriculteurs doivent s'adapter, car ils sont tributaires des conditions climatiques.

De plus, les analyses statistiques ont également montré que la variabilité des rendements n'étaient pas affectées par les effets aléatoires des blocs expérimentaux du modèle split-plot.

12.2 Impact des pratiques agricoles sur les propriétés du sol

12.2.1 Le travail du sol

Le système Sol se distingue par un travail du sol beaucoup moins intensif comparé au système Conv. Contrairement au système Conv, le système Sol exclut le labour et privilégie le semis direct pour les cultures de froment d'hiver et de colza, réduisant considérablement l'intensité du travail du sol. Dans le système Sol, les seules opérations de préparation du lit de semences sont : un travail en bandes pour la betterave sucrière et un travail superficiel suivi d'un roulage pour les cultures de lin et de pois. En revanche, dans le système Conv, un labour est pratiqué chaque année sur toutes les cultures, sauf le lin, accompagné d'une ou plusieurs opérations de travail superficiel.

Ce contraste dans les méthodes de travail du sol entre les deux systèmes reflète des philosophies agricoles distinctes : l'une cherchant à minimiser les perturbations du sol pour améliorer sa santé et sa structure, l'autre s'appuyant sur des pratiques plus traditionnelles et intensives.

12.2.2 Les traitements phytosanitaires

Les traitements phytosanitaires incluant la gestion des adventices, des maladies et des ravageurs, ont un impact significatif sur les propriétés physiques du sol. L'Indice de Fréquence des Traitements (IFT) est souvent utilisé pour évaluer ces impacts. En effet, l'IFT permet de quantifier la fréquence et l'intensité des interventions phytosanitaires, et ainsi de mesurer leur effet potentiel sur le sol. Pour les systèmes de culture étudiés, l'IFT est de 41,59 pour le système Conv et de 24,27 pour le système Sol. Cette différence suggère que le système Conv, avec une fréquence plus élevée d'applications phytosanitaires, pourrait induire une compaction plus marquée du sol en raison des passages répétés des engins agricoles, entraînant ainsi une modification des propriétés physiques du sol.

Cependant, il est important de noter que les IFT calculés pour les systèmes de conservation des sols n'incluent pas les traitements chimiques utilisés pour la destruction des couverts végétaux, ce qui pourrait fausser l'interprétation des données. Dans le système Conv, la gestion des adventices se fait par une combinaison de techniques mécaniques et chimiques : les adventices sont d'abord éliminées par le labour avant la mise en place des cultures principales, réduisant ainsi le besoin d'interventions ultérieures. En revanche, dans le système Sol, où le labour est évité, la destruction des adventices repose principalement sur des traitements chimiques. Cette différence dans les stratégies de gestion peut affecter la structure du sol et sa compaction de manière distincte, mettant en lumière l'importance de prendre en compte l'ensemble des pratiques phytosanitaires pour une évaluation complète des impacts sur les propriétés physiques du sol.

Concernant, les engrais de fonds et les engrais annuels apportés aux cultures, l'analyse des quantités moyennes de nutriments appliqués dans les différents systèmes de culture révèle des variations significatives tant entre les systèmes conventionnels et de conservation des sols qu'au fil des années.

Pour l'azote (N), les systèmes conventionnels montrent généralement des apports plus élevés par rapport aux systèmes de conservation des sols, surtout pour des cultures comme la betterave sucrière et le froment d'hiver. Cependant, une inversion des tendances est observée

dans certaines années, comme en 2021 pour la betterave sucrière, où le système Sol dépasse le système Conv en termes d'apports en N. Cette fluctuation pourrait refléter une adaptation des pratiques de fertilisation en réponse aux variations des besoins des cultures.

L'analyse du potassium (K_2O) montre également un schéma similaire, avec des apports plus élevés dans le système Conv, particulièrement pour la betterave sucrière. En revanche, les apports en K_2O dans le système Sol restent faibles.

Les quantités de magnésium (MgO) et de soufre (SO_3) mettent en lumière des différences notables dans les pratiques de fertilisation. Pour le MgO , le système Conv applique souvent des quantités supérieures comparées au système Sol lorsque les données sont disponibles. Concernant le soufre, les apports varient considérablement entre les systèmes et les années, avec des quantités élevées appliquées au système Conv pour certaines cultures comme la pomme de terre en 2020, et des variations importantes pour d'autres cultures dans des années subséquentes.

Ces variations soulignent l'importance d'adapter les pratiques de fertilisation aux besoins spécifiques des cultures tout en considérant les impacts environnementaux et économiques des différents systèmes de culture. Les résultats reflètent la nécessité d'une gestion équilibrée des apports en nutriments pour optimiser la santé des sols et les rendements agricoles tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement.

12.2.3 Les couverts végétaux et gestion des résidus

L'intérêt du système Sol est d'avoir une couverture du sol permanente. Les résidus de cultures sont enfouis lors du semis de la culture principale subséquente ou laissés lors de semis directs. Tandis que pour les cultures du système Conv, la majorité du temps, un labour ou un déchaumage est réalisé.

Les cultures de froment d'hiver et de colza, en système Sol, sont semées directement sous couvert végétal, ce qui favorise un développement plus optimal de ce couvert. Cette pratique de semis direct permet au couvert végétal de se développer pleinement, offrant ainsi une meilleure protection et un enrichissement du sol. De plus, pour la culture de la betterave sucrière, le travail superficiel du sol est effectué en bandes, ce qui contribue à maintenir une couverture végétale continue.

Les couverts végétaux sont mis en place avant les cultures de lin, de betteraves sucrières et de pois de conserverie au sein des deux systèmes de cultures. Ces couverts végétaux sont aussi appelés engrais verts. Parmi les espèces utilisées, trois espèces sont souvent cultivées dans les deux systèmes de culture : la phacélie, la moutarde blanche et le radis chinois.

Au niveau du système Sol, en 2021, des féveroles de printemps sont plantées deux mois avant la culture de colza. Les féveroles de printemps sont des légumineuses, elles permettent également d'enrichir le sol en azote, réduisant ainsi le besoin en engrais azotés pour la culture de colza. De plus, lors du semis du colza en 2021 et 2022, d'autres légumineuses telles que les lentilles et du trèfle blanc sont également semées, réduisant ainsi encore plus la dépendance du colza aux besoins d'engrais azotés.

En introduisant des plantes spécifiques dans les rotations culturales, les engrais verts contribuent à plusieurs aspects cruciaux de la gestion des sols. D'une part, ils enrichissent le sol en augmentant sa teneur en matière organique grâce à la décomposition des résidus végétaux. D'autre part, les engrais verts contribuent à améliorer la structure du sol en favorisant la formation d'agrégats. Cela réduit le risque de compaction et améliore la porosité du sol.

De plus, les engrais verts favorisent la biodiversité du sol en offrant des habitats pour divers organismes tels que les insectes pollinisateurs, les vers de terre et les champignons mycorhiziens, ce qui contribue à un écosystème de sol plus équilibré et résilient.

En résumé, les variations observées entre les types de couverts végétaux sont relativement limitées, car les mêmes espèces sont souvent cultivées avant les mêmes cultures dans les deux systèmes de culture. La véritable distinction réside davantage dans la gestion de ces couverts et des résidus qui permet d'accroître le taux de matière organique en surface.

12.2.4 Les propriétés du sol

L'analyse statistique révèle que la densité apparente du sol est significativement plus élevée dans les 25 premiers centimètres sous le système Sol, suggérant une compaction accrue par rapport au système Conv. Cette augmentation de la densité apparente dans le système Sol est étroitement liée à l'absence de labour, qui est une caractéristique clé de ce système. Le labour joue un rôle crucial dans la gestion de la compaction du sol. En brisant les couches compactées et en aérant le sol, le labour favorise une meilleure structure du sol et une réduction de la densité apparente.

Dans le système Sol, où le labour est omis et remplacé par des techniques de semis direct, le sol reste plus densifié en surface. Cette absence de perturbation mécanique continue de laisser le sol dans un état plus compacté, particulièrement dans les premières couches. L'accumulation des résidus de culture à la surface et le passage des équipements peuvent accentuer cette compaction, car le sol n'est pas régulièrement aéré ou mélangé.

Ainsi, bien que l'AC présente des avantages en termes de préservation des sols et de réduction de l'érosion, elle doit faire face au défi de gérer la compaction du sol. Il est essentiel d'adopter des pratiques complémentaires, telles que l'utilisation de techniques de décompaction spécifiques ou l'intégration de cultures de couverture qui favorisent la structure du sol, pour atténuer les effets négatifs de la compaction accrue observée dans ce système.

La répartition du carbone organique et de l'azote total dans le sol montre des différences notables entre les systèmes conventionnels et de conservation des sols. Dans le système Conv, les teneurs en carbone organique et en azote total présentent une distribution relativement homogène sur les 30 premiers centimètres du sol. Cette répartition constante est en grande partie due aux pratiques de labour, qui mélangent régulièrement le sol et les résidus de culture, favorisant une intégration plus uniforme des éléments nutritifs à travers les couches du sol.

En revanche, dans le système Sol, une stratification marquée des nutriments est observée. Le carbone organique et l'azote tendent à s'accumuler en surface. Cette accumulation en surface est le résultat de l'absence de mélange du sol, ce qui limite la profondeur à laquelle ces nutriments sont intégrés. Par conséquent, les couches superficielles du sol présentent des

concentrations plus élevées en carbone et en azote, tandis que les couches plus profondes sont moins importantes en ces éléments.

Cette stratification peut avoir des implications importantes pour la gestion des sols et les pratiques culturales. Une concentration accrue de carbone et d'azote en surface peut améliorer la fertilité superficielle du sol à court terme, mais peut également entraîner une disponibilité réduite de ces nutriments en profondeur, affectant potentiellement la croissance des racines et le rendement des cultures. En outre, cette répartition inégale peut influencer la dynamique des nutriments, la décomposition de la matière organique et les processus biologiques dans le sol.

Les stocks de carbone organique et d'azote total mesurés dans le sol peuvent être biaisés en raison de la méthode utilisée pour leur calcul. Cette méthode, qui repose sur des prélèvements à profondeur fixe, tend à surestimer les quantités de ces éléments nutritifs dans les sols à densité apparente élevée. Dans un sol labouré ou décompacté, la densité apparente réduite signifie que les particules du sol sont plus espacées, ce qui augmente le volume global des couches superficielles. Lorsque les concentrations de carbone et d'azote sont mesurées à des profondeurs fixes, cette augmentation du volume n'est pas prise en compte, entraînant une surestimation des stocks de carbone et d'azote pour ces couches de sol.

Ainsi, pour obtenir une estimation précise des stocks de carbone organique et d'azote total, il est crucial d'ajuster les méthodes de prélèvement et d'analyse en fonction de la densité apparente et de la structure du sol. Des approches alternatives, telles que des prélèvements à volume constant ou des mesures plus détaillées de la densité du sol, pourraient aider à réduire ces biais et fournir une évaluation plus fidèle des stocks de carbone organique et d'azote.

En ce qui concerne les autres éléments nutritifs, les données montrent qu'aucune différence significative n'est observée pour le phosphore disponible entre les différents systèmes de culture. Cela suggère que, malgré les variations dans les pratiques agricoles, la disponibilité du phosphore reste relativement constante, indépendamment du système de gestion du sol utilisé. Ce constat pourrait indiquer que le phosphore, en tant qu'élément nutritif, est moins affecté par les différences dans le travail du sol ou les pratiques de gestion.

En revanche, la variabilité des cations échangeables dans le sol semble fortement influencée par les différents blocs de cultures. Les cations échangeables, qui incluent des éléments tels que le calcium, le magnésium et le potassium, sont cruciaux pour la fertilité du sol et le bon développement des plantes. Cette variabilité peut refléter des différences dans les pratiques de gestion des cultures, la composition des engrais utilisés, ou les caractéristiques spécifiques des sols dans chaque bloc de culture. Par exemple, les systèmes de culture différents peuvent entraîner des variations dans les apports en engrais, les rotations de cultures, ou les techniques de gestion des résidus, ce qui peut influencer la distribution et la disponibilité des cations échangeables.

Cette variabilité suggère que les pratiques de gestion des cultures et les caractéristiques spécifiques des blocs de cultures jouent un rôle important dans la modulation de la disponibilité des cations échangeables. Pour mieux comprendre ces influences, il serait pertinent d'examiner en détail les pratiques agricoles spécifiques et les propriétés des sols dans chaque bloc de culture. Une telle analyse permettrait d'identifier les facteurs précis qui contribuent à la

variabilité observée et d'optimiser les pratiques de gestion pour améliorer la fertilité du sol et la performance des cultures.

Cinquième partie :

Conclusion

13 Conclusion

La transition d'un système conventionnel vers un système d'agriculture de conservation offre des perspectives intéressantes tout en présentant certaines limites. Cette étude révèle des points clés sur les rendements des cultures, les propriétés du sol et les impacts des pratiques agricoles associées à chaque système.

L'adoption du système de conservation des sols se distingue par plusieurs avantages potentiels. D'abord, bien que les rendements initiaux, notamment pour le froment d'hiver et les pois de conserverie, puissent être inférieurs à ceux observés dans les systèmes conventionnels, une tendance à l'amélioration des rendements avec le temps est observée. Cela suggère une adaptation progressive des cultures au nouveau système, avec des rendements se rapprochant des niveaux conventionnels à mesure que le système se stabilise. De plus, le système Sol présente des rendements en biomasse plus élevés pour les betteraves sucrières durant les premières années, soulignant une amélioration dans la gestion des résidus et des couverts végétaux.

Les avantages environnementaux du système Sol sont également notables. La réduction du travail du sol et l'exclusion du labour favorisent la préservation de la structure du sol, diminuent le risque d'érosion et améliorent la biodiversité du sol. La couverture permanente du sol par les résidus et les engrais verts contribue à une meilleure conservation de l'humidité, enrichit le sol en matière organique et réduit les risques de compaction, bien que ce dernier soit un défi persistant.

Cependant, des défis importants doivent être surmontés pour optimiser les bénéfices du système Sol. La compaction accrue des sols, en raison de l'absence de labour, est une préoccupation majeure, nécessitant des stratégies complémentaires de décompaction et une gestion attentive des résidus de culture. Les différences dans les rendements entre les deux systèmes, notamment pour certaines cultures comme le lin, mettent en évidence la nécessité de pratiques de gestion spécifiques et d'une vigilance continue pour adapter les pratiques agricoles aux conditions locales. Les biais dans les mesures de stocks de carbone organique et d'azote en raison de la méthode de prélèvement soulignent la nécessité d'approches de mesure plus précises pour évaluer l'efficacité des pratiques de gestion du sol.

En conclusion, la transition vers un système en conservation des sols présente des avantages significatifs en termes de durabilité environnementale et de gestion des sols, tout en nécessitant une adaptation progressive des pratiques pour optimiser les rendements et gérer les défis associés à la compaction du sol et à la gestion des nutriments. Une compréhension approfondie des interactions entre les pratiques agricoles et les propriétés du sol est essentielle pour réussir cette transition et maximiser les bénéfices à long terme.

14 Bibliographie

- Agrigestion. (2022). *Les éco-régimes comment s'y retrouver*. Consulté le Mai 25, 2024, sur <https://agrigestion.fr/actualites/les-eco-regimes-comment-si-retrouver/>
- Agrocomposites. (s.d.). *Agriculture : quelles sont les différentes méthodes de travail du sol ?* Récupéré sur AgroComposites: <https://www.agrocomposites.fr/agriculture-queelles-sont-les-differentes-methodes-de-travail-du-sol/#le-pseudo-labour>
- Altieri, M. A. (2017). Agroecology: A Brief Overview. Dans *In Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 1-20). Springer.
- Alvear, M. R. (2005). Effects of three soil tillage systems on some biological activities in an Ultisol from southern Chile. *Soil Tillage Research*, 82, 195-202.
- Andersen, A. (1999). Plant protection in spring cereal production with reduced tillage. II. Pests and beneficial insects. *Crop Protection*, 18, 651-657.
- Andersson, J., & D'Souza, S. (2014). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187, 116-12.
- Ares, A., Thierfelder, C., Reyes, M., Eash, N., & Himmelstein, J. (2015). Global perspectives on conservation agriculture for small households. Dans *Conservation Agriculture in Subsistence Farming: Case Studies from South Asia and Beyond* (pp. 22-54).
- Arvalis. (2014). *Décompaction - Structure du sol : les actions à suivre pour corriger un tassement*.
- Arvalis. (2017). *Travail du sol - Bien régler sa charrue*. Consulté le Mai 26, 2024, sur Arvalis: <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/bien-regler-sa-charrue>
- Astrand, P., & Baruth, B. (2002). *MARS-PAC. AEMs image sample – Annex 9. Annex to WP4_report*. European Commission, Joint Research Centre, Ispra.
- Baker. (2005). *Using cover crops to improve soil quality*. Récupéré sur Sustainable Agriculture network.
- Baker, J. M., & Ochsner, T. E. (2007). Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? Dans *Agriculture, Ecosystems & Environment* (Vol. 118, pp. 1-5).
- Balota, E. C. (2004). . Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. *Soil Tillage Research*, 77, 137-145.
- Beillouin, D., Schneider, A., Carrouée, B., Flenet, F., Champolivier, L., Cohan, J.-P., & Jeuffroy, M.-H. (2018). *Risques de pertes de nitrate par lixiviation à court et moyen terme dans les rotations céréalières incluant du pois ou du colza*.

- Beuchelt, T., Villa, C., Gohring, L., Rodriguez, V., Hellin, J., Sonder, K., & Erenstein, O. (2015). Social and income trade-offs of conservation agriculture practices on crop residue use in Mexico's central highlands. *Agricultural Systems*, 134, 61-75.
- Bhan, S., & Behera, U. (2014). Conservation agriculture in India—Problems, prospects and policy issues. *International Soil and Water Conservation Research*, 2, 1-12.
- Bhullar, M., Pandey, M., Kumar, S., & Gill, G. (2016). Weed management in conservation agriculture in India. *Indian Journal of Weed Science*, 48, 1-12.
- Blanco-Canqui, H. a. (2007). Impacts of long-terms wheat straw management on soil hydraulic properties under no-tillage. *Soil Sciences Society of America*, 71, 1166-1173.
- Blouin, M. (2013). Soil Biodiversity in Agroecosystems. Dans *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 33, pp. 657-674).
- Bockus, W. a. (1998). The impact of reduced tillage on soilborne plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 36, 485-500.
- Bockus, W., & Shroyer, J. (1998). *The impact of reduced tillage on soilborne plant pathogens*.
- Bradford, J., & Peterson, G. (2000). Conservation tillage. Dans M. Sumner, *Handbook of soil science*.
- Brochier, M., & Savourié, M.-L. (2011). *Bien choisir sa culture dérobée*. Récupéré sur http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2016/02/OPTABIOM_Bien_choisir_ses_cultures_d%C3%A9rob%C3%A9es.pdf
- Brouder, S., & Gomez-Macpherson, H. (2014). The impact of conservation agriculture on smallholder agricultural yields: a scoping review of the evidence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187, 11-32.
- Brun, D., & Labreuche, J. (2022). *Opter pour la technique de destruction des couverts la plus appropriée*. Récupéré sur ARVALIS: <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/opter-pour-la-technique-de-destruction-des-couverts-la-plus-appropriee>
- Carter, M. (1992). Influence of Reduced Tillage Systems on Organic-Matter, Microbial Biomass, Macro-Aggregate Distribution and Structural Stability of the Surface Soil in A Humid Climate. *Soil Tillage Research*, 23, 361-372.
- Chambre d'agriculture du Puy de Dôme. (2018). *Le travail superficiel du sol en interculture*. Consulté le Mars 12, 2024, sur https://extranet-puy-de-dome.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Auvergne-Rhone-Alpes/Travail_superficiel_du_sol_en_interculture_-_septembre_2018.pdf

- Chambre d'Agriculture de Bourgogne. (2015). *Cultures dérobées*. Récupéré sur Chambre d'agriculture: https://bourgognefranche-comte.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Bourgogne-Franche-Comte/061_Inst-Bourgogne-Franche-Comte/Actualites/2018/2015_Cultures_derobees_VF.pdf
- Chenu, C., & Butault, J.-P. (2013). Développer les techniques culturales sans labour. Dans *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?* (pp. 159-193).
- Chevrier, A., & Barbier, S. (2002). *Performances économiques et environnementales des techniques agricoles et conservation des sols. Création d'un référentiel et premiers résultats. Mémoire de fin d'études*. Thivernal-Grignon: INRA-APAD.
- Chien, M. (1995). *Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application*. Fertilizer Research. doi:doi:10.1007/BF00748312
- Cohan, J.-p., & Labreuche, J. (2015). Couverts intermédiaires - Les légumineuses confirment leur avantage. (L. indispensables, Éd.) *Les indispensables*. Consulté le Mai 21, 2024, sur https://www.perspectives-agricoles.com/sites/default/files/imported_files/420_3910572248836429283.pdf
- Cook, R. (2006). Toward cropping systems that enhance productivity and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103, 18389-18394.
- Dabney, D. M. (2011). *Using Cover Crops and Cropping Systems for Nitrogen Management*. Soil and Water Conservation Society. Consulté le Août 10, 2024, sur https://www.researchgate.net/publication/260083363_Using_Cover_Crops_and_Cropping_Systems_for_Nitrogen_Management
- Das, T., Nath, C., Das, S., Biswas, S., Bhattacharyya, R., Sudhishri, S., . . . al., e. (2020). Conservation agriculture in rice-mustard cropping system for five years: Impacts on crop productivity, profitability, water-use efficiency, and soil properties. *Field Crops Research*, 250.
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., & Li, H. (2010). Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3, 1-25.
- Duiker, S., & Beegle, D. (2006). Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and. *Soil and Tillage Research*, 88, 30-41.
- Evers, A. e. (2018). Exploring the Role of Crop Diversification in Sustainable Agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 38, 37.
- Eylenbosch, D., Bataille, C., Godin, B., Heens, B., Henriët, F., Jacquemin, G., . . . Mahieu, O. (2023). *Déroulement de la saison*. Consulté le Août 04, 2024, sur Livre blanc céréales

- 2023: <https://livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2023/10/2023-09-1-Deroulement-de-la-saison.pdf>
- FAO. (2011). *Save and Grow: A Policymaker's Guide to the Sustainable Intensification of Smallholder Crop Production*. Récupéré sur Food and Agriculture: <https://www.fao.org/3/i2215e/i2215e.pdf>
- FAO. (2024). *La couverture organique du sol*. Récupéré sur <https://www.fao.org/conservation-agriculture/in-practice/soil-organic-cover/fr/#:~:text=Les%20cultures%20de%20couverture%20am%C3%A9liorent,dans%20l'agro%2D%C3%A9cosyst%C3%A8me>.
- FAO. (s.d.). *L'agriculture de conservation*. Consulté le Mars 13, 2024, sur FAO: <https://www.fao.org/conservation-agriculture/in-practice/soil-organic-cover/fr/#:~:text=Les%20cultures%20de%20couverture%20am%C3%A9liorent,dans%20l'agro%2D%C3%A9cosyst%C3%A8me>.
- FAO. (s.d.). *Soil pH using indicator strips*. Consulté le Août 05, 2024, sur fao.org: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/GSDP/Field_exercises/pH_strips_EN.pdf
- FAO. (s.d.). *What is Conservation Agriculture ?* Récupéré sur Food and Agriculture Organization of the United Nations: <https://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/what-is-conservation-agriculture/en/>
- Farooq, M., Flower, K., Jabran, K., Wahid, A., & Siddique, K. (2011). Crop yield and weed management in rainfed conservation agriculture. *Soil Tillage Research*, 117, 172-183.
- Franzluebbers, A., & Hons, F. (1996). Soil-profile distribution of primary and secondary plant-available nutrients under conventional and no tillage. *Soil and Tillage Research*, 39, 229-239.
- Franzluebbers, A., & Hons, F. a. (1994). Long-Term Changes in Soil Carbon and Nitrogen Pools in Wheat Management-Systems. *Soil Science Society of America*, 58, 1639-1645.
- Franzluebbers, A., & Stuedemann, J. (2002). Particulate and non-particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont USA. *Environment and Pollution*, 116.
- Frederick, B. (2016). Impact of Tillage on Soil Biodiversity. *Soil Biology and Biochemistry*.
- Friedrich, Derpsch, & Kassam. (2012). *Overview of the Global Spread of Conservation Agriculture*. Field Actions Science Reports.
- Friedrich, T., & Kassam, A. (2012). No-till farming and the environment: do no-till systems require more chemicals ? *Outlooks on Pest Management*, 23, 153-157.

- Futura. (s.d.). *Dust Bowl : qu'est-ce que c'est ?* Consulté le 02 26, 2024, sur futura-sciences: <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/meteorologie-dust-bowl-7131/>
- Garnier, P. e. (2006). Biodiversity and agricultural production: The role of diversification in sustainable agriculture. *Agricultural Systems*, 88, 266-272.
- Gianquinto, G. C. (2018). Crop rotation for sustainable agriculture: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38, 1-17.
- Govaerts, B., Mezzalama, M., Unno, Y., Sayre, K., Luna-Guido, M., Vanherck, K., & Dendooven, L. a. (2007). Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass and catabolic diversity. *Applied Soil Ecology*, 37, 18-30.
- Govaerts, B., Sayre, K., & al. (2007). Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain fed maize/wheat systems. Dans *Plant and Soil* (Vol. 291, pp. 39-54).
- Govaerts, B., Sayre, K., Goudeseune, B., De Corte, P., Lichter, K., Dendooven, L., & Deckers, J. (2009). Conservation agriculture as a sustainable option for the central Mexican highlands. *Soil and Tillage Research*, 103, 222-230.
- Govaerts, B., Sayre, K., Lichter, K., Dendooven, L., & Deckers, J. (2007). Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain fed maize/wheat systems. Dans *Plant and Soil* (Vol. 291, pp. 39-54).
- Gregorich, E., Rochette, P., VandenBygaart, A., & Angers, D. (2005). Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil Tillage Research*, 83, 53-72.
- Gwózdź, K. (2022). *Effect of plant growth regulators on potato tuber yield and quality*. Department of Agroecology and Crop Production, Faculty of Agriculture and Economics, University of Agriculture in Krakow, Krakow, Poland. doi:<https://doi.org/10.17221/215/2022-PSE>
- Hauser, W. &. (2013, Février). An equivalent soil mass procedure for monitoring soil organic carbon in multiple soil layers. *European Journal of Soil science*. doi:10.1111/ejss.12002
- Heddadj, D., & Le Roux, L. (2014). Récupéré sur Chambres d'agriculture de Bretagne: <https://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/sans-labour-bretagne.pdf>
- Hermle, S., & Anken, T. (2008). The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. *Soil and Tillage Research*, 98, 94-105.
- Hinsinger. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, pp. 173-195. doi:<https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>

- Hobbs, P. (2007, Janvier). Conservation agriculture : what is it and why is it important for future sustainable food production ? *Journal of Agricultural Science*. Consulté le Février 28, 2024, sur ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/305397361_Conservation_agriculture_what_is_it_and_why_is_it_important_for_future_sustainable_food_production
- Hobbs, P., & Sayre, K. e. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. Dans *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* (Vol. 363, pp. 543-555).
- Holland, J. (2004). *The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence*. Consulté le Mai 25, 2024, sur <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.018>
- IPCC. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use change and Forestry*. (I. f. Strategies, Éd.) Consulté le Juin 14, 2024, sur https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/GPG_LULUCF_FULLEN.pdf
- IRM. (2022). *Bilans climatologiques de 2022*. Consulté le Août 05, 2024, sur météo.be: <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2022/printemps>
- IRM. (2023). *Bilans climatologiques de 2023*. Consulté le Août 04, 2024, sur météo.be: <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2023/annee>
- Ismail, I., Blevins, R., & al. (1994). Long-Term No-Tillage Effects on Soil Properties and Continuous Corn Yields. *Soil Science Society of America*, 58, 193-198.
- Jacquemin, G. (2021). *Livre Blanc des Céréales*. (G. S. B. Dumont, Éd.) Consulté le Aout 03, 2024, sur <https://www.livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2021/10/Livre-Blanc-Cereales-de-sept-2021.pdf>
- Jacquemin, G. (2022). *Livre blanc des céréales 2022*. Consulté le Août 04, 2024, sur <https://livre-blanc-cereales.be/wp-content/uploads/2022/09/1.LB-2022-09-08-Deroulement.pdf>
- Jantalia, C., & Resck, D. (2007). Tillage effect on C stocks of a clayey Oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado region. Dans *Soil Till* (Vol. 95, pp. 97-109).
- Jasinski. (2020). The influence of plow pan on soil properties and crop yield. *Soil Science of America Journal*.
- Kassam. (2022). *Advances in Conservation Agriculture* (Vol. Volume 3: Adoption and Spread). London.

- Lal. (1998). Soil erosion and conservaiton. *Geoderma*.
- Lal. (2001). Soil degradation by erosion. Dans *Land Degradation & Development* (Vol. 12, pp. 519-539).
- Lal. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security.
- Laurent. (2015). Conservation Agriculture and its distribution in France and in the world. *European journal of geography*. Consulté le 02 26, 2024, sur OpenEdition Journals: <https://journals.openedition.org/cybergeog/27284>
- Lee, B.-B. L. (2023). Assessing the impact of plant growth regulators on anther retention and Fusarium head blight in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) infected by *Fusarium graminearum* in field conditions. doi:<https://doi.org/10.1139/cjps-2023-0059>
- Leteinturier, B., & Tychon, B. e. (2006). Diagnostic agronomique et agro-environnemental des successions culturales en Wallonie (Belgique). *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 11, 27-38.
- Lipiec, J. K.-J. (2006). Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil Tillage Research*, 89, 210-220.
- López-Bellido, L. L.-B.-A. (2006). Crop rotation effects on soil properties and productivity in a semi-arid Mediterranean environment. *Agronomy Journal*, 98, 650-659.
- Loubes, F., Brasiles, V., & al., e. (2016). *Couverture végétale permanente*. Récupéré sur <https://dicoagroecologie.fr/dictionnaire/couverture-vegetale-permanente/>
- Lupwayi, N. M. (2001). Soil microbial biomass and diversity respond to tillage and sulphur fertilizers. *Canadian Journal of Soil Science*, 81, 577-589.
- Métais, P. (2020). Couverts végétaux - Un outil agronomique multifonction. *Terre-Net*. Récupéré sur Terre-net: <https://www.terre-net.fr/couverts-vegetaux/article/169794/couverts-vegetaux-un-outil-agronomique-multifonction>
- Minette. (2011, Juillet). *Caractéristiques des principales cultures intermédiaires*. (C. d. Poitou-Charentes, Éditeur) Consulté le Mai 21, 2024, sur Chambre d'Agriculture Poitou-Charentes: https://nouvelle-aquitaine.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Nouvelle-Aquitaine/094_Inst-Nouvelle-Aquitaine/Documents/innovation/3._Liste_cultures_intermediaires_2011.pdf
- Minette. (2011). *Caractéristiques des principales cultures intermédiaires*. (C. d. Poitou-Charentes, Éd.) Consulté le Mai 21, 2024, sur https://nouvelle-aquitaine.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Nouvelle-Aquitaine/094_Inst-Nouvelle-Aquitaine/Documents/innovation/3._Liste_cultures_intermediaires_2011.pdf

- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire. (2023). *Indicateur de Fréquence de Traitements Phytopharmaceutiques*.
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire. (s.d.). *IFT de mon traitement*. Récupéré sur agriculture.gouv.fr: <https://alim.agriculture.gouv.fr/ift/traitement-ift/2024>
- Mollier, P. (2013, 11 08). *A l'origine de l'agriculture de conservation, les problèmes d'érosion*. Consulté le 02 28, 2024, sur INRAE: <https://www.inrae.fr/actualites/lorigine-lagriculture-conservation-problemes-derosion>
- Morelle, M., & Braibant, J. (2018). *L'Agriculture de Conservation en Wallonie - Diversité et verouillages*.
- Morgan, R. (2005). Dans *Soil Erosion and Conservation*.
- Morris, P. (2010). Soil compaction : a review of the evidence. Dans *Agriculture, Ecosystems & Environment*.
- Naseri, M., Iden, S., & al., e. (2019). Influence of Stone Content on Soil Hydraulic Properties: Experimental Investigation and Test of Existing Model Concepts. *Vadose Zone Journal*, 18, 1-10.
- Oorts, K., Bossuyt, H., & al. (2007). Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventionnal tillage in nothern Franc. *European Journal Soil Sciences*, 58, 248-259.
- Pérez-Escamilla, R. (2017). Food Security and the 2015–2030 Sustainable Development Goals: From Human to Planetary Health: Perspectives and Opinions. *Current Developments in Nutrition*.
- Pierce, F., Fortin, M., & Staton, M. (1994). Periodic plowing effects on soil properties in a no-till farming system. *Soil Science Society of America*, 1782-1787.
- Pousset, J. (2014). Dans J. Pousset, *Assolements et rotations* (éd. 2e). France Agricole.
- PROTECTEAU. (2018, Décembre). Consulté le Juin 6, 2024, sur https://www.protecteau.be/sites/default/files/2022-06/FT_fertilisation_froment_hiver.pdf
- PROTECTEAU. (2024). *Cultures pièges à nitrate*. Récupéré sur <https://www.protecteau.be/fr/cultures-pieges-nitrate>
- Purdue University. (2019). *Understanding Soil Compaction : Causes and Effects*.
- Rodenburg, J., Büchi, L., & Hagggar, J. (2020). Adoption by adaptation: Moving from Conservation Agriculture to conservation practices. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 19, 437-455.

- Roper, M., & Gupta, V. (1995). Management practices and soil biota. *Australian Journal of Soil Research*, 321-339.
- Rowell, D. L. (1994). *Soil Science Methods & Applications* (éd. 1).
- Sahu, G., Mohanty, S., & Das, S. (2020). Conservation agriculture—A way to improve soil health. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 8, 355-368.
- Salles, J. v. (2014). Multivariate analyses of Burkholderia species in soil: Effect of crop and land use history. *Applied Environment Microbiology*, 70, 4012-4020.
- Six, J., & Guggenberger, G. (2001). Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. *European Journal Soil Sciences*, 52, 607-618.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Research*, 79, 7-31.
- Six, J., Elliott, E., & Paustian, K. (2000). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 2099-2103.
- SPW. (2015). *Carte des Principaux Types de Sols de Wallonie à 1/250000*. Récupéré sur Géoportail de Wallonie - WalOnMap.
- SPW. (2022). *Relief de la Wallonie – Modèle Numérique des Pentes 2013-2014*. Récupéré sur Géoportail de Wallonie - WalOnMap.
- SPW. (2022). *Sensibilité des sols à l'érosion*. Récupéré sur Géoportail de Wallonie - WalOnMap.
- SPW. (2023). *Betterave sucrière : produits, charges et marge brute*. Consulté le Août 04, 2024, sur Etat de l'Agriculture Wallonne: https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-C_III_b_5.html
- Stagnari, F., Galieni, A., Specca, S., Cafiero, G., & Pisante, M. (2014). Effects of straw mulch on growth and yield of durum wheat during transition to conservation agriculture in Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 167, 51-63.
- Stinner, B. a. (1990). Arthropods and Other Invertebrates in Conservation-Tillage Agriculture. *Annual Review of Entomology*, 35, 299-318.
- Tauvel. (2019). *Bien positionner les apports d'azote*. Consulté le Août 08, 2024, sur Institut Technique de la Betterave: <https://www.itbfr.org/tous-les-articles/article/news/bien-positionner-les-apports-dazote/>

- Tauvel. (2022). *Les conseils de l'ITB pour la fertilisation en bore*. Consulté le Août 08, 2024, sur Institut Technique de la Betterave: <https://www.itbfr.org/tous-les-articles/article/news/les-conseils-de-litb-pour-la-fertilisation-en-bore/>
- Tejada, M. (2009). Effects of soil tillage on organic matter content and microbial activity. *Applied Soil Ecology*, 41, 87-94.
- Toomsan, B., Limpinuntana, V., Jogloy, S., Patanothai, A., Pathak, P., Wani, S., & Sahrawat, K. L. (2012). Role of Legumes in Improving Soil Fertility and Increasing Crop Productivity in Northeast Thailand. Dans S. Wani, & P. P. L. (Éds.), *Community Watershed Management for Sustainable Intensification in Northeast Thailand* (Vol. 194, pp. 162-174).
- Turpin, J., Thompson, J., Waring, S., & MacKenzie, J. (1998). Nitrate and chloride leaching in Vertosols for different tillage and stubble practices in fallow-grain cropping. *Soil Research*, 36, 31-44.
- Université de Genève. (2014). *Dust Bowl et la dégradation des sols*. Consulté le 02 26, 2024, sur IS@DD Information sur le développement durable: <https://ise.unige.ch/isdd/spip.php?article425>
- USDA. (2008). *Soil Tillage Intensity Rating (STIR)*. Récupéré sur <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-11/CEAP-Croplands-2008-Methodology-SoilTillageIntensityRating.pdf>
- Vankeerberghen, & Stassart. (2016). *The transition to conservation agriculture : an insularization process towards sustainability*. (I. J. Sustainability, Éd.) Consulté le Mai 25, 2024, sur <https://doi.org/10.1080/14735903.2016.1141561>
- Vankeerberghen, A., Dannevoeye, B., & al., e. (2014). L'insularisation comme mode de transition. Le cas de l'agriculture de conservation en Région wallonne. Dans *Sociologie des grandes cultures* (pp. 61-76). Quae.
- Vanlauwe, B. D. (1994). Residue Fractionation and Decomposition - the Significance of the Active Fraction. Dans *Plant and Soil* (Vol. 158, pp. 263-274).
- Vereijken, P. (1997). A methodological way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy*, 7, 235-250.
- Wullens, G. (2023). Betteraves sucrières : Un début de campagne en demi-teinte. (E. Puel, Intervieweur)
- Yigezu, Y., El-Shater, T., Boughlala, M., Devkota, M., Mrabet, R., & Moussadek, R. (2021). Can an incremental approach be a better option in the dissemination of conservation agriculture? Some socioeconomic justifications from the drylands of Morocco. *Soil Tillage Research*, 212.

Zhang, Z. Y. (2018). *Effects of intercropping on soil microbial community structure: A review*.
Récupéré sur Frontiers in Plant Science.

Evaluation systémique de la transition d'un système agricole conventionnel à un système de conservation des sols

Arnaud de Decker

L'agriculture est à un tournant face à des enjeux environnementaux, économiques et sociaux majeurs. Historiquement dominé par une logique de maximisation de la production, le système agricole conventionnel a conduit à une intensification des pratiques et à une détérioration progressive des sols, essentiels à la durabilité des systèmes de production.

Pour répondre à ces défis, l'Agriculture de Conservation émerge comme une alternative viable, axée sur le minimum de travail du sol, la couverture permanente et la rotation des cultures. Cette approche vise à améliorer la santé des sols, restaurer les écosystèmes dégradés et renforcer la résilience des exploitations face aux aléas climatiques.

Cependant, la transition vers l'Agriculture de Conservation rencontre des obstacles nécessitant une compréhension approfondie des pratiques de conservation pour faciliter un changement vers des pratiques agricoles plus durables.

Cette étude est réalisée avec le Centre de Recherches Agronomiques de Wallonie, dans le cadre d'un projet de comparaison de systèmes innovants de grandes cultures, nommé « SYCI » lancé en 2019. Ce mémoire vise à comparer le système agricole conventionnel au système de conservation des sols en analysant de manière systémique les pratiques agricoles mises en place et leurs impacts sur les rendements et les propriétés du sol.

Les résultats de cette analyse montrent des changements significatifs en termes de productivité et une tendance évolutive des rendements du système de conservation à atteindre des niveaux de rendements égaux à ceux du système conventionnel. Les pratiques de conservation des sols affectent également les propriétés du sol, telles que la densité apparente et la répartition du carbone organique et de l'azote dans le sol, plus importantes en surface. En ce qui concerne le phosphore et les cations échangeables, le système de culture n'a pas d'impact sur ces variables. Les pratiques d'agriculture de conservation illustrent également un compromis entre la réduction de la perturbation du sol et l'utilisation intensive d'herbicides. Par ailleurs, les apports en fertilisants chimiques diminuent au fil du temps, ce qui indique une amélioration de la fertilité dans le système d'agriculture de conservation.

L'agriculture de conservation présente ainsi des différences par rapport à l'agriculture conventionnelle, certaines étant positives et d'autres moins. Cependant, étant encore en transition, ces parcelles évoluent et nécessitent des études continues dans les années à venir.