

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Effet de l'adoption de systèmes de culture inspirés de l'agriculture de conservation des sols sur les performances technico-économiques et environnementales de 4 exploitations du territoire de la Boucle du Rhône en Dauphiné

Guillem BENET

Calice

2021

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Effet de l'adoption de systèmes de culture inspirés de l'agriculture de conservation des sols sur les performances technico-économiques et environnementales de 4 exploitations du territoire de la Boucle du Rhône en Dauphiné

Guillem BENET

Option CALICE

Maître de stage : Jean-François VIAN

Enseignant référent : Nathalie VASSAL

« L'étudiant conserve la qualité d'auteur ou d'inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup »

Remerciements

Je tiens à remercier mon maître de stage, Jean-François VIAN pour son humour, sa gentillesse son accompagnement et sa disponibilité, durant tout le stage. Je te remercie de m'avoir partagé ton expertise et ton regard scientifique et pragmatique sur la fertilité du sol et l'agriculture.

Je remercie également Anthony ROUME, ingénieur de recherche à l'Isara, pour m'avoir formé à l'outil Systerre®. Merci pour ta patience, ton calme et ta disponibilité. Je te remercie aussi pour ce que tu m'as appris sur le terrain.

Je remercie ma tutrice de stage, Nathalie VASSAL, pour m'avoir encadré durant mon stage et mes études.

Je remercie Florian Cellette et Joséphine Peigne pour m'avoir aiguillé dans les choix importants de l'évaluation multicritère.

Je remercie mes collègues stagiaires de l'Isara, Léo, Anna, Clara, Agathe, Alex, Viviane, Camille, Charles, Marie, Ernesto et Olivia pour les bons moments de convivialités pendant nos pauses déjeuner d'une heure et demi (hors taxe) et nos sorties lyonnaises.

Je tiens à remercier sincèrement tous les étudiants (amis), les professeurs, les entraîneurs, l'IUT de Perpignan, VetAgro Sup, l'USAP, l'ASM (Clermont Ferrand) et l'ASM (Mâcon) pour m'avoir permis de mener à bien mes deux projets professionnels. Grace à vous tous(tes), je vie sans aucun regret.

Je tiens à remercier mes grands-pères, Pablo TODELANO, ancien agriculteur en Andalousie, et Jean-Joseph BENET, ancien viticulteur dans les Fenouillèdes, pour m'avoir transmis leur passion pour l'agriculture.

Enfin je remercie mes parents pour m'avoir soutenu dans tous mes échecs et réussites depuis le début bro.

Table des matières

Introduction	1
1. Etat de l'art, contexte et problématique.....	2
1.1 <i>L'évaluation multicritère de systèmes de culture.....</i>	<i>2</i>
1.2 <i>Effets des systèmes de culture en ACS sur les performances technico-économiques et environnementales des exploitations.....</i>	<i>4</i>
1.3 <i>Contexte de l'étude</i>	<i>7</i>
1.4 <i>Objectifs, problématique et hypothèses de la mission</i>	<i>8</i>
2. Matériels et méthodes	10
2.1 <i>Le dispositif expérimental.....</i>	<i>10</i>
2.2 <i>L'évaluation multicritère des systèmes de culture</i>	<i>13</i>
Résultats.....	18
3.1 <i>Exploitation productrice de maïs semence (MS)</i>	<i>18</i>
3.2 <i>Exploitation polyculture élevage (PE).....</i>	<i>19</i>
3.3 <i>Exploitation céréalière avec un sol profond (CP).....</i>	<i>21</i>
3.4 <i>Exploitation céréalière avec un sol superficiel (CS)</i>	<i>22</i>
4. Discussion générale des résultats	23
4.1 <i>Les performances technico-économiques</i>	<i>23</i>
4.2 <i>Les performances environnementales.....</i>	<i>31</i>
Conclusion :	35
Références bibliographiques
Annexes.....

Liste des figures

- Figure 1 - Localisation du territoire de la boucle de Rhône en Dauphiné
- Figure 2 - Localisation des parcelles de l'expérimentation
- Figure 3 - SdC Agriculteur et Innovant de l'exploitation MS
- Figure 4 - SdC Agriculteur et Innovant de l'exploitation PE
- Figure 6- SdC Agriculteur et Innovant de l'exploitation CP
- Figure 5- SdC Agriculteur et Innovant de l'exploitation CS
- Figure 7 - Exemple de simulation du SdC Innovant à l'échelle de l'exploitation polyculture élevage sur Systemre®
- Figure 8 - Catégories d'entrée et de sorties de Syst'N, avec les principales sorties utilisées.
- Figure 9 -Un bilan de l'azote minéral entre la récolte du précédent et l'entrée de l'hiver utile pour guider le diagnostic des pertes de nitrates en automne et hiver (Le Gall, Reau et al., 2021).
- Figure 10 - Rendement en t/ha des SdC Agriculteurs et Innovants du collectif sol
- Figure 11 - Charges moyennes en intrants en €/ha/an
- Figure 12 - Charges moyennes de mécanisation en €/ha/an
- Figure 13- IFT moyen/ha/an
- Figure 14- Emissions moyenne de GES en kg eq CO2/ha/an
- Figure 15 - Consommation moyenne d'énergie primaire en MégaJoul/ha/an
- Figure 16 - Schéma de synthèse des performances des SdC de MS
- Figure 17 - Schéma de synthèse des performances des SdC de PE
- Figure 18 - Schéma de synthèse des performances des SdC de CP
- Figure 19 - Schéma de synthèse des performances des SdC de CS

Liste des tableaux

- Tableau 1 - Effets d'un SdC en ACS par rapport à un SdC avec labour
- Tableau 2 - Les objectifs hiérarchisés des SdC
- Tableau 3 - Caractéristiques des exploitations et des parcelles de l'expérimentation
- Tableau 4 - Période de l'évaluation multicritère en fonction des exploitations
- Tableau 5 - Les variables de l'outil Systemre®
- Tableau 6 - Les choix pour l'évaluation des performances technico-économique et environnementale sur Systemre®
- Tableau 7 - Les variables des indicateurs I-Phy eso et I-Phy su
- Tableau 8- Résultats de l'évaluation multicritère des systèmes de culture
- Tableau 9 - Comparaison des charges de mécanisations de l'interculture et du semis entre les SdC de l'exploitation céréalières sol profond
- Tableau 10 - Comparaison des charges de mécanisations de l'interculture et du semis entre les SdC de l'exploitation céréalières sol superficiel
- Tableau 11- Performances économiques de l'atelier méthanisation du SdC agriculteur de l'exploitation PE.
- Tableau 12 - Tableau de comparaison du niveau d'IFT/ha des cultures des SdC Innovants par rapport aux références de la région Auvergne-Rhône-Alpes
- Tableau 13 - Les principales matières actives qui ont un risque élevé d'être transféré dans les eaux pour les SdC Innovants

Listes des abréviations, sigles et acronymes

ACS : Agriculture de conservation

CASDAR : Le Compte d'affection Spécial au Développement Agricole et Rural

CO2 : Dioxyde de carbone

CV : Chevaux

DJA : Dose Journalière Admissible

GES : Gaz à effet de serre

IFT : Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

ITK : Itinéraire technique

KoC : Coefficient de partage carbone organique/eau

JD : John Deere

MSA : Sécurité sociale agricole

SAU : Surface agricole utile

SdC : Système de culture

TCSL : Techniques culturales sans labour

PAC : Politique Agricole Commune

PEPIT : Pôles d'Expérimentations agricoles Partenariales pour l'Innovation et le Transfert aux agriculteurs d'Auvergne-Rhône-Alpes

Introduction

Le monde agricole est aujourd'hui confronté à de nombreux défis. La société impose aux agriculteurs de fournir des denrées alimentaires de qualité et respectueuses de l'environnement (Santos 2010). Les conséquences de l'intensification de l'agriculture sont de plus en plus préoccupantes pour les exploitations agricoles (dégradation des sols, déséquilibres écologiques, résistances des bioagresseurs aux pesticides...) (Lairez et al. 2015). Le changement climatique affaiblit la rentabilité économique des exploitations agricoles (Denhartigh 2014). Les agriculteurs sont confrontés à des prix de vente faibles et volatils. L'addition de l'ensemble de ces contraintes provoque des conséquences tragiques sur le bien être des agriculteurs (faibles revenus, temps de travail important, suicides) (Cabanel, Férat, 2021).

Pour répondre à ces nombreux enjeux, parfois contradictoires, il est nécessaire de reconcevoir les systèmes de production afin d'améliorer la rentabilité et les performances environnementales des exploitations agricoles (Meynard 2012). Ces systèmes doivent s'appuyer sur les processus écologiques et les régulations biologiques afin de limiter le recours aux intrants de synthèse (Malézieux 2012; Wezel et al. 2014). Parmi les voies proposées, l'agriculture de conservation des sols (ACS) semble être intéressante notamment vis-à-vis de sa capacité à améliorer la fertilité des sols (Scopel et al. 2013). L'ACS repose en effet sur 3 principes qui sont la réduction des perturbations mécaniques, la diversification des rotations et la promotion des associations de culture et la couverture permanente des sols *via* des couverts végétaux vivants ou mulch morts (FAO 2017).

C'est dans ce contexte que l'Isara, en partenariat avec la chambre d'agriculture de l'Isère et des agriculteurs du territoire de la Boucle du Rhône en Dauphiné, ont constitué un groupe de travail autour de la conception de systèmes de culture (SdC) permettant d'améliorer la fertilité des sols dans ce territoire. Depuis 2015, ce « collectif sol » a co-conçu 4 SdC innovants répondant aux problématiques de fertilité des sols rencontrées dans les exploitations agricoles du territoire (structure du sol, amélioration des activités biologiques, réduction de l'usage des engrais minéraux...). Ces 4 SdC co-conçus s'inspirent des principes de l'ACS. Ils sont testés depuis 2016 chez 4 agriculteurs « pilotes » et comparés au SdC classiquement conduit par l'agriculteur pilote. L'objectif est de mesurer l'impact de ces SdC innovants sur la fertilité des sols (Annexe 1).

Au-delà de la fertilité des sols, ces SdC innovants modifient également les performances économiques, techniques et environnementales des exploitations. L'ACS est reconnue par exemple pour réduire les charges de mécanisation et le temps de travail par rapport à des systèmes de culture « conventionnels » (Schaller 2013) ou pour utiliser davantage d'herbicides afin de compenser la réduction du travail du sol (Lucas et al. 2018). Il est donc important d'évaluer l'impact de ces SdC innovants sur les performances économiques, techniques et environnementales des exploitations qui les mettent en place.

L'objectif de ce travail est de réaliser une évaluation multicritère des performances technico-économiques et environnementales des 4 SdC innovants co-conçus initialement pour améliorer la fertilité des sols. Leurs performances sont comparées à celles des SdC classiquement conduits par les agriculteurs pilotes. Les performances technico-économiques sont évaluées à partir des rendements, des charges de mécanisation et d'intrants, de la marge directe, du temps de travail et du niveau d'IFT par culture. L'impact environnemental est évalué à partir des émissions de GES, de la consommation d'énergie primaire et des risques de pertes des nitrates et pesticides vers les eaux superficielles et souterraines.

1. Etat de l'art, contexte et problématique

1.1 L'évaluation multicritère de systèmes de culture

1.1.1 Origine et principe de l'évaluation multicritère de systèmes de culture

Un système de culture (SdC) est défini comme l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur une ou plusieurs parcelles traitées de manière identique au fil des années. Chaque SdC est caractérisé par la nature des cultures et leur ordre de succession, les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, et les éléments structurels (Havard et al. 2018). Dans le passé, les SdC étaient conçus principalement dans un objectif de production et de rentabilité économique (Prével 2008). La prise de conscience des effets négatifs de l'agriculture intensive sur l'environnement et la demande sociétale de plus en plus exigeante, impose aujourd'hui au monde agricole de reconcevoir des SdC plus durables. Un SdC durable est défini par la FAO comme un SdC qui « répond aux besoins des générations présentes et futures quant aux produits et aux services, tout en garantissant une rentabilité, une santé environnementale, et une équité sociale et économique » (FAO 2015).

Afin de déterminer la durabilité d'un nouveau SdC, il est indispensable de l'évaluer (Meynard, Savini 2003). Historiquement, les agronomes évaluent les pratiques agricoles par une approche statistique. Le rendement est souvent le seul critère évalué (Auberger et al. 2016). L'objectif est d'identifier, par l'intermédiaire de lois statistiques, les facteurs qui influencent le rendement (Loyces, Wery 2006). Meynard (2001) et Loyces et Wery (2006) expliquent que cette approche statistique n'est pas adaptée pour évaluer la durabilité d'un SdC. L'objectif est différent. L'objectif n'est pas d'analyser l'effet de plusieurs facteurs mais plutôt d'évaluer la capacité d'un SdC à répondre à différents critères du développement durable (économique, social et environnemental).

C'est pourquoi, la méthode d'évaluation multicritère s'est développée depuis les années 1990 (Auberger et al. 2016). L'évaluation multicritère consiste à analyser la contribution d'un SdC aux différents enjeux du développement durable (Lairez et al. 2015). Cette méthode permet d'identifier les points forts et faibles d'un SdC afin de proposer des améliorations (Auberger et al. 2016).

L'évaluation multicritère n'utilise pas de lois statistiques. La capacité d'un SdC à répondre à différents critères du développement durable est évaluée par l'intermédiaire d'indicateurs. Un indicateur est un outil qui simplifie des données ou des variables jugées pertinentes pour rendre compte d'un phénomène complexe (Boulangier, 2004). Ainsi, un ou plusieurs indicateurs sont calculés pour évaluer la capacité d'un SdC à répondre à un des critères de la durabilité. Par exemple, le critère de rentabilité économique d'une exploitation peut être évalué à partir des indicateurs « chiffre d'affaires » et « coût de production ».

Une évaluation multicritère peut être réalisée *ex-ante* et *ex-post* (Lairez et al. 2015). L'évaluation *ex-ante* est généralement utilisée lors de la conception de SdC. Cette méthode évalue le potentiel d'un SdC à répondre à des critères du développement durable avant son application au champ. Cette évaluation s'effectue généralement à dire d'expert. L'évaluation *post-ante* correspond à l'évaluation d'un SdC après son application au champ. Cette évaluation s'effectue à partir des mesures réalisées sur le SdC.

La mise en place d'une évaluation multicritère d'un SdC nécessite une réflexion préalable. Les différents aspects à prendre en compte sont décrits dans la partie suivante.

1.1.2 Méthodologie et mise en place d'une évaluation multicritère de systèmes de culture

Il existe de nombreuses méthodes d'évaluation multicritère de SdC. Il est important de comprendre leur construction afin de choisir une méthode adaptée aux finalités d'un projet. Les méthodes d'évaluation multicritère se différencient principalement par (Lairez et al. 2015; Auberger et al. 2016) :

- Les échelles évaluées (spatiale, temporelle et organisationnelle)
- Les critères évalués
- Les indicateurs utilisés
- L'interprétation des résultats

Un SdC peut être évalué à des échelles spatiales, organisationnelles et temporelles différentes. Un SdC a des effets sur une parcelle mais aussi sur l'exploitation ou un territoire. Un SdC impacte directement l'agriculteur mais aussi d'autres acteurs liés à l'exploitation (consommateur, fournisseurs, acheteurs). Enfin ces effets sont variables dans le temps. En fonction des objectifs d'un projet, les échelles d'évaluations sont différentes. Les méthodes d'évaluation qui portent sur des échelles larges identifient l'ensemble des effets d'un SdC. Les méthodes d'évaluation à des échelles réduites permettent d'obtenir des informations plus fines mais l'ensemble des effets du SdC ne sont pas pris en compte (Lairez et al. 2015).

Les SdC sont évalués sur plusieurs critères. Les critères sont généralement ceux du développement durable. Ils sont d'ordres économiques, sociaux et environnementaux. Cependant, le développement durable est un concept qui peut être interprété et représenté différemment en fonction des acteurs de l'évaluation et de leur sensibilité (Lairez et al. 2015).

Ensuite, il faut sélectionner des indicateurs afin d'évaluer les critères retenus. Un indicateur peut être mesuré, calculé ou estimé à dire d'expert (Boulangier, 2004). L'indicateur doit reposer sur une relation connue ou supposée entre la variable et le critère évalué.

L'interprétation des indicateurs dans une évaluation multicritère est une étape complexe. Elle nécessite plusieurs opérations. Les indicateurs sont souvent interprétés à partir de valeurs de références. Les valeurs de références sont de différentes origines : normes réglementaires, bande témoin, littérature scientifique, dire d'expert... (Acosta-Alba, der Werf, 2011). Un indicateur interprété est appelé un « indicateur élémentaire » (Lairez et al. 2015). Les indicateurs ont des grandeurs et unités de mesure différentes. La comparaison des indicateurs élémentaires est impossible. Il est possible de créer une notation commune pour tous les indicateurs élémentaires en leur attribuant des classes, des notes ou des scores. La comparaison devient alors possible. Ces indicateurs sont appelés « indicateurs élémentaires transformés » (Lairez et al. 2015). Enfin, les indicateurs élémentaires transformés peuvent être agrégés. L'agrégation permet de regrouper plusieurs indicateurs pour former un seul indicateur. Une note, un score ou une classe est attribuée à l'indicateur agrégé ce qui permet de faciliter l'interprétation. Les critères d'évaluation peuvent être aussi agrégés. Un critère agrégé permet alors d'exprimer la durabilité globale d'un SdC avec un seul indicateur.

L'interprétation des résultats obtenus peut être réalisée selon deux méthodes. Auberger et al. (2016), différencient l'évaluation multicritère descriptive (EMD) et d'interprétation (EMI). L'évaluation multicritère descriptive est une méthode qui génère un ensemble d'indicateurs pour décrire un SdC sous différents angles. Il n'y a pas d'agrégation d'indicateurs. L'interprétation n'est pas intégrée dans l'évaluation. Ce sont les évaluateurs qui interprètent les indicateurs avec des valeurs de références qu'ils définissent. L'évaluation multicritère d'interprétation correspond à l'agrégation d'un ensemble d'indicateurs. La durabilité d'un SdC

est synthétisée par un indicateur sous forme d'une note, d'un score ou d'une classe. L'interprétation des indicateurs est intégrée *de facto* dans l'évaluation.

Ces deux méthodes ont des avantages et des limites. L'évaluation multicritère d'interprétation synthétise l'information et facilite l'interprétation des résultats. En revanche, beaucoup d'information est perdu avec l'agrégation des indicateurs. De plus l'agrégation d'indicateurs de nature et d'unité différentes peut faire l'objet de simplification abusives (Loyces, Wery 2006). De son côté, l'évaluation multicritère descriptive ne synthétise pas l'information. L'ensemble des indicateurs sont analysés séparément ce qui rend l'interprétation plus complexe. En revanche, cette méthode permet d'avoir des informations précises sur l'ensemble des indicateurs.

Afin de choisir la méthode d'évaluation multicritère, Lairez et al. (2015) proposent une démarche pour choisir une méthode adaptée au contexte d'étude. Tout d'abord, il faut cadrer et définir les finalités d'une évaluation multicritère. Cette étape est primordiale car elle conditionne l'ensemble des choix de l'évaluation multicritère. Ensuite il faut choisir les échelles et les critères d'évaluation. Après il est conseillé de chercher une méthode d'évaluation qui correspond aux finalités et aux choix de l'évaluation. Le site internet du RMT ERYTAGE (www.plage-evaluation.fr) propose un outil d'aide à la décision pour choisir une méthode adaptée aux finalités, échelles et critères d'une évaluation. Plusieurs méthodes évaluent les mêmes critères à des échelles identiques. Néanmoins, les méthodes se différencient par le type d'indicateurs utilisé. Les indicateurs sont construits à partir de mesures ou/et de calculs ou/et d'estimations à dire expert. Les acteurs de l'évaluation doivent s'assurer qu'ils bénéficient des ressources financières et économiques suffisantes pour construire ces indicateurs.

Cette démarche permet alors de choisir une méthode d'évaluation adaptée aux finalités d'un projet. Il est possible qu'aucune méthode ne réponde aux finalités d'un projet. Il est alors possible de créer sa propre méthode d'évaluation multicritère. Néanmoins la construction d'une méthode est complexe.

1.1.3 Limites de l'évaluation multicritère de systèmes de culture

Nous avons vu que le choix de l'échelle d'évaluation, des critères, des indicateurs, des références utilisées et du choix de la méthode d'interprétation impacte considérablement le résultat de l'évaluation. L'orientation de l'évaluation multicritère d'un SdC est grandement influencée par les acteurs de l'évaluation. Ainsi en fonction des choix des acteurs de l'évaluation, un SdC peut être considéré comme durable ou non (van der Werf et al. 2007 ; Ensslin et al., 2001). Il est alors primordial de décrire et de justifier avec transparence l'ensemble des choix d'une évaluation afin de ne pas faire des interprétations abusives et partiales des résultats (Lairez et al. 2015).

1.2 Effets des systèmes de culture en ACS sur les performances technico-économiques et environnementales des exploitations

Les SdC innovants du projet collectif sol sont inspirés des principes de l'ACS. L'ACS est un concept de production qui a pour objectif de valoriser les services écosystémiques du sol pour produire durablement (Laurent, 2015).

Les effets bénéfiques de l'ACS sur la fertilité du sol ont été démontrés par de nombreuses études. L'ACS peut par exemple réduire l'érosion (Laurent 2015), améliorer la structure du sol par l'activité biologique (Séguy et al., 2001), augmenter la rétention en eau et le taux de matière organique des sols (Ghosh et al., 2019).

Au-delà de la fertilité du sol, l'ACS impacte aussi les performances technico-économiques et environnementales des SdC.

1.2.1 Effet de l'ACS sur les performances technico-économiques

L'ACS a des effets positifs sur les performances technico-économiques d'une exploitation. L'amélioration de la rentabilité économique est d'ailleurs l'argument principal qui incite les agriculteurs à se convertir à l'ACS (de Tourdonnet et al., 2013)/

Plusieurs expérimentations ont démontré que le semis direct diminue les charges de mécanisation par rapport à des SdC avec labour (Labreuche 2007 ; Vastola, 2017). Dans les essais d'Arvalis, sur 11 sites expérimentaux, le semis direct diminue en moyenne les charges de mécanisation de 80€/ha par rapport à un SdC avec labour (Labreuche, 2007). Les charges de mécanisation en semis direct sont plus faibles car il n'y a pas d'opérations culturales pour préparer le sol avant le semis. Ainsi, il y a moins de matériel utilisé et de carburant consommé. Le temps de travail est également diminué de 1h à 2h/ha en fonction du niveau de réduction du travail du sol (Thomas, 2006 ; Schaller 2013).

D'un point de vue technique, la réduction du travail du sol rend souvent plus difficile la maîtrise des adventices. Les SdC en ACS utiliseraient davantage d'herbicides, notamment le glyphosate, pour éliminer les adventices et les couverts végétaux pendant les périodes d'interculture (Lucas et al., 2018 ; Labreuche et al., 2015). Les SdC sans labour réalisent entre 0.3 et 0.7 passages d'herbicide en plus respectivement pour le blé et le colza par rapport aux SdC avec labour (Agreste, 2008). Les charges en herbicides seraient alors plus importantes dans les SdC en ACS (Thomas, 2006). Cependant, des disparités existent entre les SdC en ACS selon les réussites constatées dans la maîtrise des couverts d'intercultures ou permanents, d'associations de cultures et selon le degré d'allongement des rotations (Lucas et al., 2018; Schaller 2013). Certaines techniques comme l'utilisation de couverts gélifs ou la destruction mécanique des couverts végétaux par roulage permettraient de limiter l'utilisation d'herbicides mais elles restent difficiles à maîtriser.

En ce qui concerne les rendements, une méta-analyse de 600 expérimentations a montré que les SdC qui appliquent les 3 principes de l'ACS avaient des rendements inférieurs de 2.5 % par rapport aux SdC avec labour (Pittelkow et al., 2014). Le chiffre d'affaires des SdC en ACS n'est pas fortement diminué. Cependant, les résultats sont variables entre les expérimentations, dans certains cas, les rendements peuvent être très faibles notamment à cause du manque de maîtrise technique ou bien de problème de fertilité du sol (de Tourdonnet et al., 2021). Ces fortes baisses de rendement affectent alors les performances économiques des exploitations.

1.2.2 Effet de l'ACS sur les performances environnementales

L'ACS modifie aussi l'impact environnemental des exploitations. La réduction du travail du sol diminue la consommation de carburant (Labreuche, 2007). Cette diminution a pour conséquence de réduire l'émission de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie fossile (Fenny, Machane 2010).

Les procédés de fabrication des engrais azoté ont un impact environnemental élevé. La production d'une unité d'azote consomme 1.51 litres de gazole non routier et émet 12,6 kg eq de CO₂ (Chambre agriculture du grand est, 2020). L'implantation de couverts limite les pertes d'azote par lixiviation durant les périodes hivernales (Beaudoin et al., 2012) et augmente la concentration d'azote organique du sol (Thorup-Kristensen, Magid, Jensen 2003). De plus,

l'intégration de légumineuses pour diversifier les espèces cultivées dans la rotation permet de capter l'azote atmosphérique et de réduire les apports d'azote minéral. Ces pratiques permettraient donc d'augmenter les fournitures d'azote minéral du sol et de maximiser les effets précédents ce qui pourrait contribuer à la réduction des apports d'azote de synthèse et ainsi les émissions de GES et la consommation d'énergie fossile.

La combinaison des 3 principes de l' ACS permet de stocker davantage de matière organique dans le sol ce qui diminue le bilan carbone des SdC (Laurent, 2015). En revanche, des travaux de recherche ont démontré que les phénomènes de nitrification/dénitrification sont plus importants dans les SdC en ACS (Schaller 2013; Autret et al. 2019; Shan et Yan, 2013). La dénitrification et la nitrification sont des processus qui sont réalisés par les microorganismes en conditions anaérobies et humides, qui provoquent des pertes d'azote sous forme d'acide nitreux (N₂O) et nitrites (NO). Ces phénomènes seraient favorisés par la présence d'un mulch et l'absence de labour qui augmente l'humidité et diminue la concentration d'oxygène (Autret et al. 2019 ; Chenu et al. 2014). Les pertes en N₂O et NO à l'hectare sont faibles (quelques kg) mais ces gaz ont un pouvoir réchauffant 310 fois plus élevé que le CO₂ (Malique et al., 2019). Dans l'expérimentation de Autret et al. (2019), les émissions de N₂O étaient supérieures de 5 kg/ha/an par rapport au SdC avec labour. L'augmentation de l'émission de 5 kg N₂O équivaut à l'émission de 1 550 kg de CO₂/ha/an.

Il semblerait que l'ACS permette de réduire les émissions de GES en limitant la consommation de carburant et de fertilisants azoté de synthèse et en augmentant le stockage du C dans les sols. Toutefois, les phénomènes de nitrification/dénitrification peuvent réduire les effets bénéfiques de l'ACS sur les quantités émises de GES.

Les effets de l'ACS sur la perte des nitrates et des pesticides dans les eaux sont contrastés. La perte des produits phytosanitaires dans les eaux est principalement influencée par les caractéristiques pédologiques d'une parcelle et par la quantité et le type de produits phytosanitaires utilisés (Alleto et al., 2010). Les SdC en ACS ont tendance à utiliser plus d'herbicides pour compenser la réduction du travail du sol. Le risque de perte de produits phytosanitaires est alors plus élevé pour les SdC en ACS. Par ailleurs, l'ACS améliore la connectivité des macropores du sol grâce à l'activité biologique ce qui augmente l'infiltration de l'eau et donc le lessivage des produits phytosanitaires (Alleto et al., 2010). En revanche, puisque l'eau s'infiltre davantage, la perte par ruissellement diminue. De plus, les pratiques d'ACS accumulent la matière organique à la surface du sol et favorisent l'activité biologique ce qui peut augmenter la rétention et la dégradation des produits phytosanitaires (Giuliano et al., 2021). Les résultats des effets de l'ACS sur la perte de produits phytosanitaires sont contrastés. Les résultats, varient beaucoup en fonction des substances actives étudiées (Labreuche et al., 2015).

La perte des nitrates par lixiviation s'effectue généralement lors de périodes pluvieuses, en automne-hiver sous nos climats. L'intensité des précipitations, les caractéristiques pédologiques (texture et profondeur d'enracinement) et la quantité de nitrate dans le sol avant l'entrée de l'hiver sont les principaux facteurs qui influencent la perte des nitrates par lixiviation (Le Gall et Reau, 2021). Pour limiter la perte des nitrates, la fertilisation doit être adaptée aux besoins de la culture précédant la période hivernale. L'implantation de couverts végétaux d'interculture (Beaudoin et al., 2012) et la présence d'un mulch (Dai et al. 2021) en ACS limitent les pertes d'azote par lixiviation. En revanche, il semblerait que la réduction travail du sol ait peu d'effet sur la lixiviation des nitrates (Daryanto et al., 2017; Labreuche et al., 2015).

Tableau 1 - Effets d'un SdC en ACS par rapport à un SdC avec labour

Performances technico-économiques	
Charges de mécanisation	Diminution
IFT Herbicide	Augmentation
Apport d'azote	Diminution
Rendement	Faible diminution
Temps de travail	Diminution
Marge économique	Augmentation
Performances environnementales	
Emissions de GES	Diminution
Consommation d'énergie primaire	Diminution
Pertes produits phytosanitaires	Augmentation
Pertes d'azote	Diminution

Les effets des SdC en ACS sur les performances technico-économiques et environnementales sont synthétisés dans le Tableau 1. Dans l'ensemble, les SdC en ACS sont performants sauf pour l'utilisation d'herbicides et les risques de perte de produits phytosanitaires vers les eaux souterraines.

Ces résultats sont toutefois à prendre avec du recul, car ils dépendent du SdC de référence ainsi que des modalités techniques du SdC en ACS et de la réussite de certaines pratiques clefs (couverts végétaux, rotation, maîtrise des adventices...). Dans cette synthèse bibliographique, les SdC en ACS sont comparés à des SdC avec labour. Le labour est une opération onéreuse, longue et consommatrice d'énergie fossile. Cette opération est principalement responsable des écarts de charges de mécanisation, de marge, de temps de travail, d'émission de GES et de consommation d'énergie primaire entre les SdC en ACS et avec labour. Les parcelles de SdC « conventionnels » ne sont pas systématiquement labourées. Il y a 34 % des surfaces de grandes cultures qui ne sont pas labourées en France (Agreste 2014). Si les SdC en ACS étaient comparés à des SdC sans labour, les écarts de performances seraient probablement plus faibles.

D'autre part, les résultats des SdC en ACS dépendent aussi des exploitations étudiées. L'ACS ne possède pas une définition stricte. Ses principes sont mis en pratique de façon très variable selon les conditions pédoclimatiques, les ressources humaines et financières rencontrées dans les exploitations agricoles (Ghosh et al. 2015). Par exemple, des systèmes en ACS peuvent être en semis direct ou en travail superficiel du sol.

Par ailleurs, la période de transition vers un SdC en ACS est délicate. Les bénéfices de l'ACS sur la fertilité du sol ne sont généralement pas visibles à court terme (Labreuche et al., 2015). Un agriculteur ne profite pas de l'augmentation de la fertilité de sol au début de la transition. De plus, un agriculteur a besoin de temps pour maîtriser les nouvelles pratiques d'ACS. Il est récurrent d'observer des erreurs d'apprentissages. Enfin, la transition peut nécessiter l'achat de matériel ce qui augmente les charges financières. Un SdC en ACS est généralement moins performant pendant la période de transition (de Tourdonnet et al., 2013). Le résultat de la comparaison par rapport à un SdC conventionnel sera donc différent en fonction de l'ancienneté du SdC en ACS et de la maîtrise technique de l'agriculteur.

1.3 Contexte de l'étude

Le collectif sol est composé d'une vingtaine d'agriculteurs du territoire de la Boucle du Rhône en Dauphiné (Figure 1), de chercheurs de l'ISARA et d'une conseillère de la chambre d'agriculture de l'Isère. Ces acteurs travaillent à travers une démarche participative sur la problématique de la fertilité du sol dans le territoire de la boucle du Rhône Dauphiné.

Depuis 2016, le collectif sol expérimente 4 SdC Innovants inspirés de l'ACS qui ont pour objectif d'améliorer la fertilité du sol. Ces SdC ont été définis *via* des ateliers de co-conception impliquant l'ensemble des partenaires du collectif sol. Les principaux leviers mobilisés pour augmenter la fertilité du sol sont la réduction du travail du sol, l'allongement de la rotation, l'implantation de couverts végétaux d'interculture diversifiés, l'association de culture et le maintien d'un couvert permanent.

Les 4 SdC Innovants sont expérimentés chez 4 agriculteurs pilotes aux spécialisations et aux types de sols différents : producteur de maïs semence (MS), polyculture élevage (PE), céréalier avec un sol profond (CP) et céréalier avec un sol superficiel (CS). Chaque SdC Innovant est adapté aux exploitations des agriculteurs pilotes (matériels, débouchés, type de sol

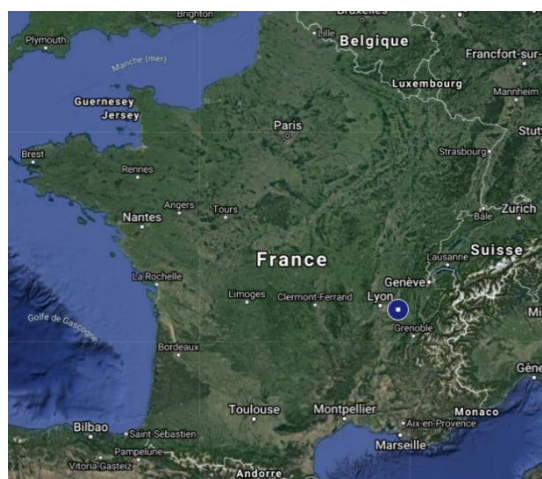


Figure 1 - Localisation du territoire de la boucle de Rhône en Dauphiné

Tableau 2 - Les objectifs hiérarchisés des SdC

	Mais semence (MS)	Polyculture élevage (PE)	Céréalière sol profond (CP)	Céréalière sol superficiel (CS)
1	Conserver voire améliorer la marge du SdC (Stabilité des performances, maîtrise des charges)	Vie du sol et structure du sol	Réussir l'implantation de toutes les cultures et intercultures en semis-direct	Avoir une stabilité dans les rendements pour pouvoir sécuriser le revenu
2	Améliorer la qualité du sol (Matière Organique et activités biologiques)	Baisse des intrants chimiques – si possible suppression insecticide et fongicide	Améliorer la qualité des sols : « autofertilité »	Améliorer la rétention en eau
3	Réussir l'implantation de couverts pour réduire les apports d'azote, améliorer la maîtrise des adventices	Réussir l'implantation en Semis Direct (SD) des cultures de printemps	Diminution des intrants (pesticides en particulier)	Améliorer les indicateurs de qualité des sols
4	Améliorer les indicateurs environnementaux	Marges et stabilité des performances	Augmentation des rendements et stabilisation des performances	Réduire l'utilisation d'intrants (herbicides principalement, mais si possible engrais aussi)

et climat.). Au-delà de la fertilité des sols, les agriculteurs du territoire ont défini et hiérarchisé d'autres objectifs assignés au SdC (Tableau 2).

Les SdC Innovants sont testés et comparés aux SdC conduits classiquement par les agriculteurs pilotes. L'expérimentation s'effectue sur une parcelle de chaque agriculteur pilote depuis 2016. Chaque parcelle de l'expérimentation a été divisée en 3 bandes : bande agriculteur, bande innovante N et bande innovante N+1. La bande agriculteur est le SdC que l'agriculteur pilote applique sur son exploitation. Cette bande agriculteur sert de « référence » dans chaque exploitation. Les SdC Innovants sont mis en place sur les bandes innovantes N et N+1. La bande innovante N+1 est le SdC Innovant appliqué avec une année d'avance par rapport à la bande innovante N. Cette bande permet de tester des innovations et de les ajuster l'année suivante sur la bande innovante N en cas d'échec ou d'erreur technique. Cette bande a donc pour objectif de limiter les échecs dû à un manque d'expérience dans la bande innovante N. Ce sont les agriculteurs pilotes qui conduisent les SdC Agriculteurs et Innovants selon des règles de décisions définies chaque année.

Tous les ans, des entretiens individuels avec chaque agriculteur pilote sont réalisés. Ces entretiens ont pour objectif d'échanger sur les échecs, les difficultés et les réussites des SdC. Ces entretiens permettent d'avoir le ressenti des agriculteurs sur la faisabilité des SdC Innovants, de discuter des règles de décision, de discuter des écarts à l'itinéraire technique prévisionnel et de prévoir l'itinéraire technique de la culture suivante.

L'Isara mesure les performances agronomiques et l'évolution de la fertilité du sol. Les performances agronomiques sont mesurées annuellement tandis que la fertilité du sol est mesurée tous les 3 ans (2016, 2019, 2022). Les mesures réalisées par l'Isara sont décrites dans l'annexe 1.

1.4 Objectifs, problématique et hypothèses de la mission

Au-delà des performances agronomiques et de la fertilité du sol, l'objectif de ce collectif sol est d'évaluer l'impact des SdC Innovants sur les performances technico-économiques et environnementales des exploitations. La rentabilité économique est un critère important pour les agriculteurs du territoire de la Boucle de Rhône en Dauphiné. Si les SdC améliorent la fertilité des sols mais dégradent les performances économiques, ils ne seront jamais adoptés par les agriculteurs. Il est alors indispensable d'évaluer les performances technico-économiques de ces SdC Innovants. Pour être durable, un SdC doit être aussi performant d'un point de vue environnemental (FAO 2015).

L'objectif du stage est alors de réaliser une évaluation multicritère afin d'évaluer les performances technico-économiques et environnementales des SdC Innovants mis en place et suivis sur le territoire de la Boucle du Rhône en Dauphiné depuis 2016.

Nous avons vu qu'une évaluation multicritère peut s'effectuer à des échelles et sur des critères différents. De plus, nous avons vu que le type d'indicateurs et leurs interprétations varient en fonction des méthodes d'évaluation retenues. Le collectif sol est un projet à destination des agriculteurs du territoire de la Boucle du Rhône en Dauphiné. L'évaluation des SdC Innovants est donc réalisée à l'échelle de l'exploitation agricole (échelle spatiale et organisationnelle). Les SdC Innovants sont évalués sur 5 ans ce qui correspond à la durée de l'expérimentation (échelle temporelle).

Nous avons identifié que les SdC en ACS modifient les charges de mécanisation, les IFT, les apports d'azote, le rendement, le temps de travail, la marge, les émissions de GES, la consommation d'énergie primaire et la perte des nitrates et des pesticides dans les eaux. L'évaluation multicritère porte alors sur l'ensemble de ces éléments. Nous ne souhaitons pas utiliser de méthodes d'évaluation d'interprétation car l'agrégation des indicateurs conduit à des pertes d'informations et à des simplifications parfois abusives.

Il n'existe pas de méthode d'évaluation multicritère qui permet de répondre à l'ensemble de nos objectifs. Nous avons alors décidé d'utiliser différents outils (Systeme®, I-Phy3, Syst'N®).

Afin d'interpréter les indicateurs, nous avons vu qu'il était nécessaire de les comparer avec des valeurs de références. L'objectif du stage est de comprendre les conséquences de l'adoption du SdC Innovant sur les performances des exploitations des agriculteurs pilotes. Nous avons choisi d'utiliser comme valeurs de références les performances des SdC Agriculteurs mesurées sur la bande agriculteur. Des références régionales et nationales sont également utilisées pour certains indicateurs.

Cette évaluation multicritère permettra alors de déterminer dans quelle mesure la mise en place de SdC innovants inspirés de l'ACS modifie les performances technico-économiques et environnementales des exploitations des agricultures pilotes du territoire de la Boucle du Rhône en Dauphiné.

D'après la synthèse bibliographique (partie 3.1), nos hypothèses sont :

- H1 : Les SdC Innovants améliorent la marge directe des exploitations en diminuant les charges de mécanisation et d'engrais, malgré une légère baisse du rendement.
- H2 : Les SdC Innovants réduisent le temps de travail des agriculteurs pilotes.
- H3 : La pression des adventices augmente dans les SdC Innovants entraînent une augmentation de l'utilisation d'herbicides.
- H4 : Les SdC Innovants permettent de diminuer les émissions de GES et la consommation d'énergie primaire.
- H5 : Les SdC Innovants diminuent les pertes d'azote par lixiviation.

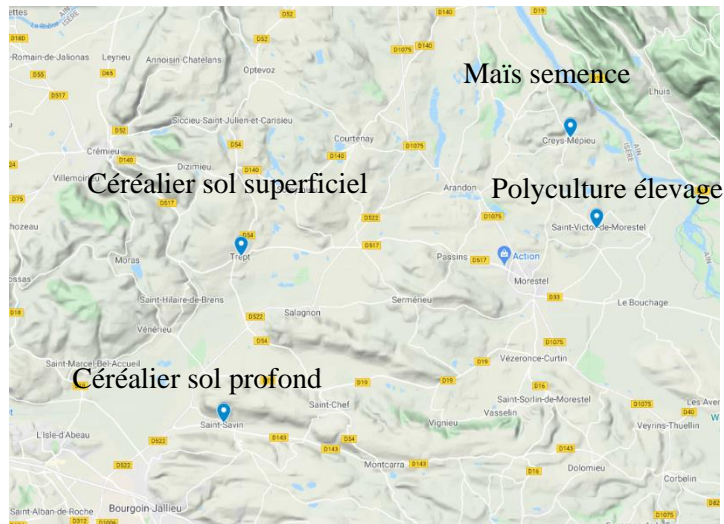


Figure 2 - Localisation des parcelles de l'expérimentation

2. Matériels et méthodes

2.1 Le dispositif expérimental

2.1.1 Description des exploitations et des systèmes de cultures

Les 4 agriculteurs pilotes de l'expérimentation sont des agriculteurs actifs et innovants. Ils participent régulièrement à des formations et tours de plaines. Ils sont tous sensibilisés sur l'importance de la fertilité du sol. Ils réalisaient déjà des pratiques favorables à la fertilité du sol dans leur SdC (couverts végétaux, réduction du travail du sol ou semis direct).

Les exploitations des agriculteurs pilotes sont localisées dans le territoire de la Boucle du Rhône en Dauphiné en Isère (Figure 1) au sein de la petite région agricole du Bas Dauphiné. Les exploitations sont principalement spécialisées en système polyculture élevage ou céréalier.

- Exploitation maïs semence (MS) :

L'exploitation productrice de maïs semence est située à Creys-Mépieu (Figure 2). L'exploitation est composée de deux associés et d'une SAU cultivable de 174 ha.

L'exploitation fait le choix de réaliser des monocultures de maïs semence car c'est une culture rémunératrice. La rotation de l'exploitation est de 6 ans de maïs semence coupée d'une à deux cultures de blé. Les parcelles sont irriguées et labourées annuellement pour répondre aux cahiers des charges du maïs semence. Malgré un système intensif, les associés portent une grande attention à la fertilité de leurs sols. Ils sèment régulièrement des intercultures de ray-grass à la volée dans le maïs semence. Ces couverts sont régulièrement pâturés par des moutons. De plus, les agriculteurs apportent régulièrement de la matière organique sous forme de fumier et de lisier grâce à des échanges avec un éleveur voisin.

L'exploitation possède peu de matériel. Elle loue la quasi-totalité de son matériel à une CUMA. Depuis 2019, l'exploitation a mis en place une stratégie de méthanisation pour diversifier ses revenus et valoriser le digestat du méthaniseur afin de réduire les apports d'engrais minéraux. Les couverts végétaux sont alors exportés.

Le SdC Innovant de l'expérimentation se distingue du SdC de l'exploitation par l'intégration de légumineuses dans les couverts associés au maïs semence et le raccourcissement de la rotation (3 ans maïs semence 1 an blé) afin de couper la monoculture de 6 ans pour mieux maîtriser les adventices et limiter l'usage d'herbicides (Figure 3). Dans le SdC Innovant, les couverts ne sont pas exportés. Les couverts associés au maïs semence sont composés de ray-grass, vesce et trèfle incarnat. L'introduction de légumineuses et la non-exportation des couverts a pour objectif de stimuler les activités biologiques du sol et de réduire les apports d'azote minéral pour le maïs semence. Le travail du sol n'est pas réduit dans le SdC Innovant, car la parcelle doit être labourée pour respecter le cahier des charges du maïs semence. Les itinéraires techniques détaillés du SdC Innovant et Agriculteur de l'expérimentation sont décrits en annexe 2.

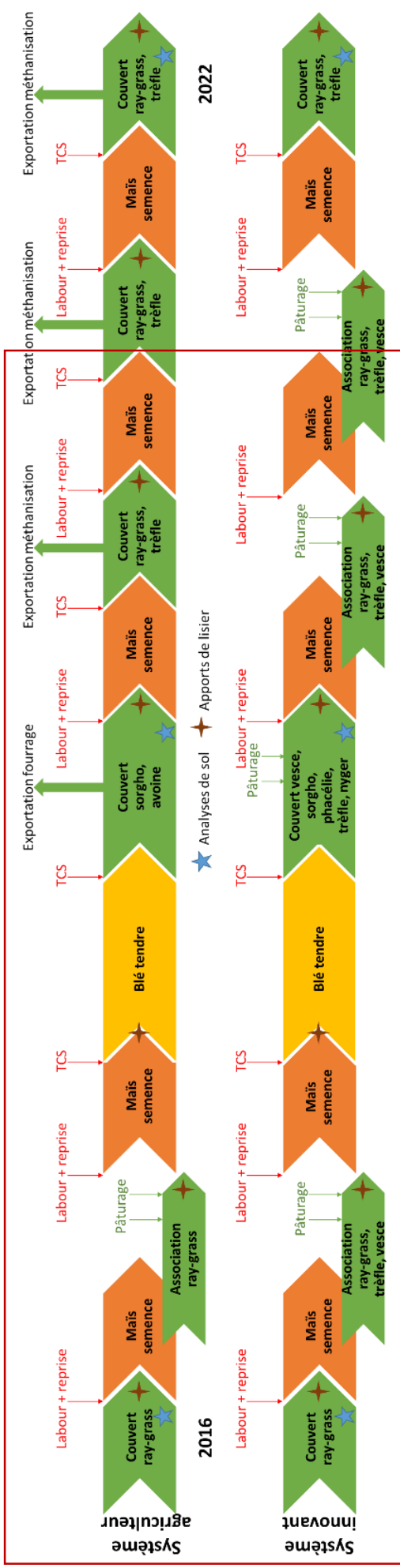


Figure 3 - SdC Agriculteur et Innovant de l'exploitation MS

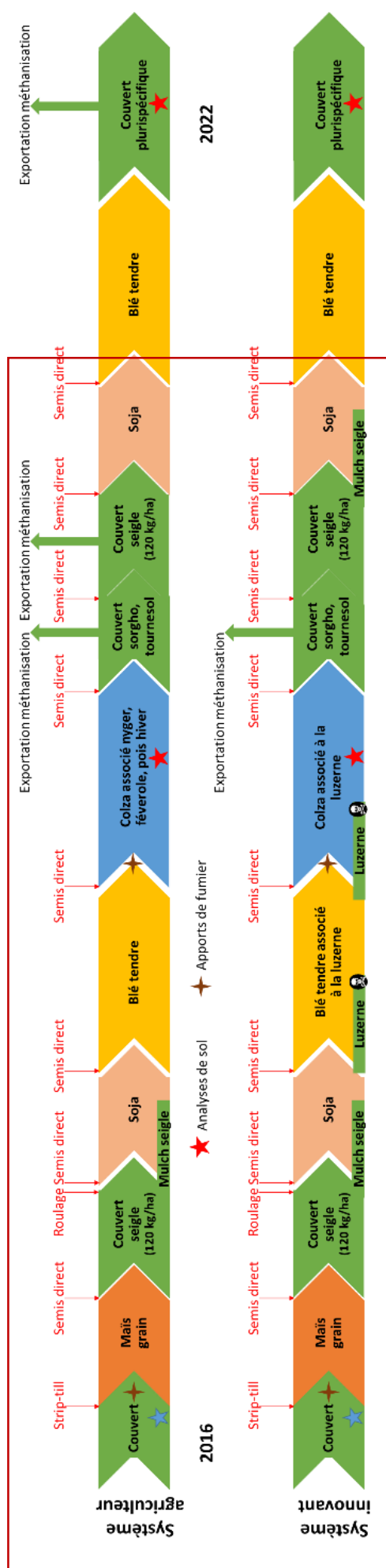


Figure 4 - SdC Agriculteur et Innovant de l'exploitation PE

- Exploitation polyculture élevage (PE) :

L'exploitation de polyculture élevage (bovins allaitants) se situe à Saint-Victor-de-Morestel (Figure 2). L'exploitation possède 220 ha de SAU. L'agriculteur estime qu'il y a 2 UTH qui travaillent sur l'atelier production végétale.

L'agriculteur conduit l'ensemble de l'exploitation en ACS afin de se libérer du temps pour l'atelier élevage. Il pratique le semis direct, intègre des couverts végétaux et sème des associations de cultures.

La rotation du SdC de l'agriculteur est maïs, soja, blé, colza associé, soja, blé. L'agriculteur investit régulièrement dans du matériel performant et onéreux afin de limiter le temps de travail.

Depuis 2019, l'exploitation a mis en place une stratégie de méthanisation pour diversifier ses revenus et valoriser le digestat du méthaniseur afin de réduire les apports d'engrais minéraux. Les couverts végétaux sont depuis exportés.

Dans le SdC Innovant, les acteurs ont décidé d'aller encore plus loin dans la stratégie d'ACS de l'agriculteur avec l'intégration d'un couvert vivant permanent de luzerne associé aux cultures d'hiver (blé et colza) (Figure 4). Le couvert permanent de luzerne a pour objectif de diminuer les apports d'azote et la pression des adventices. De plus, il peut être valorisé pour l'atelier élevage de l'exploitation. Par ailleurs, dans un objectif de diminuer la dépendance du SdC au glyphosate, des semis directs de soja sous couvert de seigle roulé ont été testés. Les itinéraires techniques détaillés du SdC Innovant et Agriculteur de l'expérimentation sont décrits en annexe 2.

- Exploitation céréalière avec un sol profond (CP) :

L'exploitation céréalière est située à Saint-Savin (Figure 2). L'exploitation est conduite par un agriculteur et la SAU cultivable est de 90 ha. La stratégie de l'agriculteur est de minimiser les coûts de production et le temps de travail. C'est pourquoi l'ensemble de l'exploitation est conduite en techniques culturales sans labour (TCSL). L'agriculteur réalise seulement un travail de sol superficiel avant l'implantation de ses cultures. La rotation de l'exploitation est maïs, maïs, soja et blé. L'agriculteur minimise les charges de mécanisation en achetant peu de matériel à faible prix et ne réalise pas de couverts d'interculture.

Dans le SdC Innovant, les acteurs du projet ont décidé de passer en semis direct (sauf pour le maïs avec un strip-till). La rotation est plus diversifiée afin de diminuer la pression d'adventice (Figure 2). Malgré le semis direct, l'agriculteur pilote a décidé ne pas utiliser de glyphosate afin d'évaluer la faisabilité d'un SdC en semis direct sans glyphosate. Pour cela, un semis direct de soja dans un couvert de seigle roulé a été testé. Pour limiter le développement des adventices des associations de culture ont été mises en place (colza, féverole et fenugrec) et l'insertion de couverts végétaux diversifiés en interculture est devenue systématique. Les itinéraires techniques détaillés du SdC Innovant et Agriculteur de l'expérimentation sont décrits en annexe 2.



Figure 6- SdC Agriculteur et Innovant de l'exploitation CP



Figure 5- SdC Agriculteur et Innovant de l'exploitation CS

- Exploitation céréalière avec un sol superficiel (CS) :

L'exploitation est située à Trept (Figure 2), elle est dirigée par un agriculteur et la SAU cultivable est de 150 ha.

L'ensemble de l'exploitation est conduit en techniques culturales sans labour (TCSL). L'exploitation possède quelques parcelles avec un sol superficiel caractéristique du territoire. Ces sols sont qualifiés de « très séchant » par l'agriculteur. L'agriculteur n'apporte pas de matières organiques (non disponibles sur l'exploitation). La rotation pratiquée par l'agriculteur est 2 années de maïs grain suivis de 2 années de céréales d'hiver. Le maïs grain est une culture qui souffre dans ces sols séchant à cause du manque d'eau. Néanmoins, l'agriculteur fait le choix de conserver cette culture dans l'objectif de casser le cycle des adventices. Le matériel de l'exploitation est en propriété.

L'agriculteur souhaite améliorer la fertilité de ses sols séchant. Le SdC Innovant est conduit en semis direct avec insertion de couverts végétaux d'interculture (Figure 5). Le semis direct a pour objectif de limiter l'évaporation de l'eau en maintenant un mulch à la surface. Les couverts végétaux ont pour objectif de diminuer la pression des adventices et d'augmenter la matière organique du sol afin d'augmenter la rétention en eau sur le long terme.

La rotation du SdC Innovant est toujours l'alternance entre deux cultures de printemps et deux cultures d'hiver. Néanmoins, le second maïs grain a été remplacé par le soja afin de diminuer les apports d'engrais azotés. La rotation du SdC Innovant n'est pas complète, car l'expérimentation a débuté en 2018. La rotation se terminera par une culture d'orge en juillet 2021. Les itinéraires techniques détaillés du SdC Innovant et Agriculteur de l'expérimentation sont décrits en annexe 2.

2.1.2 Les caractéristiques pédoclimatiques des parcelles de l'expérimentation

Les parcelles de l'expérimentation possèdent une texture limono-sableuse ou sablo-limoneuse. Le sol des parcelles a un taux de matières organiques, un pH et une profondeur différente. D'après les données de la station météo de Corbas-Bron de 2000 à 2018, la pluviométrie annuelle moyenne est de 802 mm/an et la température moyenne journalière est de 13.2 °C.

Les caractéristiques des exploitations et des parcelles de l'expérimentation sont synthétisées dans le Tableau 3.

Tableau 3 - Caractéristiques des exploitations et des parcelles de l'expérimentation

	Maïs semence	Polyculture élevage	Céréaliier avec sol profond	Céréaliier avec sol superficiel
<i>Caractéristiques de l'exploitation</i>				
SAU cultivable (ha)	174	220	90	150
UTH pour l'atelier Grandes cultures	2	2	1	1
Activités	Semences, méthanisation	Grandes cultures, Élevage, méthanisation	Grandes cultures	Grandes cultures
Autres informations	CUMA intégrale Irrigation sur 90 hectares	SdC en ACS Matériel performant	TCSL Minimisation des charges de mécanisation	TCSL Aucun apport de matière organique
<i>Caractéristiques de la parcelle de l'expérimentation</i>				
Superficie/bande (ha)	2,1	0,5	0,23	0,25
Texture de sol	Sablo-limoneux caillouteux	Sablo-limoneux	Limono-sableux	Sablo-limoneux
Taux de matière organique	3,20%	2,30%	5,50%	2,20%
Profondeur	60 cm	> 90 cm	> 90 cm	60 cm
pH	7,1	6,3	8,3	7
Autres informations	Parcelle irriguée			Sol séchant

2.2 L'évaluation multicritère des systèmes de culture

L'évaluation multicritère porte uniquement sur les bandes agriculteur et innovantes N des exploitations de l'expérimentation. La bande innovante N+1 n'a pas été intégrée dans l'évaluation (à l'exception du système céréalier sur sol superficiel) car cette bande sert à tester les pratiques innovantes pour les ajuster ensuite l'année suivante sur la bande innovante N. Pour le système céréalier sur sol superficiel, la bande innovante N+1 est évaluée à la place de la bande innovante N, car en 2020 l'agriculteur pilote n'a pas récolté le soja sur la bande innovante N (stress hydrique trop important). L'absence de récolte modifiant trop fortement l'ensemble des indicateurs (émissions GES, marge, temps de travail...).

La période de l'évaluation multicritère de chaque SdC est décrite dans le Tableau 4. Ces périodes sont encadrées en rouge dans les Figure 3, Figure 4, Figure 5. et Figure 6.

2.2.1 Evaluation des performances technico-économiques et environnementales

L'outil Systerre® a été utilisé pour évaluer les performances technico-économiques et environnementales des SdC. Systerre® est un outil d'évaluation multicritère descriptif. Cet outil calcule 20 indicateurs qui caractérisent les multi-performances d'un SdC à l'échelle de l'exploitation agricole (Arvalis 2017). Les indicateurs sont calculés à partir d'une description détaillée des itinéraires techniques, des caractéristiques du matériel et des données économiques d'une exploitation. L'ensemble des facteurs pris en compte par Systerre® sont synthétisés dans le Tableau 5.

Ces informations ont été recueillies auprès des agriculteurs pilotes lors d'entretiens, appels téléphoniques ou échanges de mails. Les SdC ont été simulés à l'échelle des exploitation pilote sur Systerre®. La rotation des SdC de l'expérimentation correspond à l'assolement d'une exploitation fictive d'une année sur Systerre® (Figure 7).

La simulation des SdC sur Systerre® nécessite d'effectuer des choix de simulations. Ces choix modifient les résultats. La construction d'un SdC est influencée par la stratégie d'achats de matériel de l'agriculteur, les prix de vente des cultures et le coût des intrants (Havard et al., 2018). Dans la simulation Systerre®, **il a été décidé d'utiliser le prix d'achat du matériel, les coûts d'intrants et les prix de vente réels des exploitations afin d'intégrer ces éléments dans l'analyse des résultats.** Les stratégies d'achats de matériel, les prix de vente et les coûts d'intrants sont différents entre les exploitations des agriculteurs pilotes. Par conséquent, la comparaison des performances économiques entre les SdC des exploitations n'est pas pertinente, car elle est fortement biaisée par ces différences. En revanche, la comparaison « intra-exploitation » entre les SdC Agriculteur et Innovant est pertinente.

Le principe de notre évaluation est de prendre les données réelles des exploitations et de l'expérimentation. Cependant, il n'a pas été possible d'appliquer ce principe constamment. Pour le SdC céréalier sur sol profond, il n'a pas été possible de recueillir les prix d'achat du matériel, le coût des intrants et les prix de vente réels de l'exploitation. Il a été décidé d'utiliser les références d'Arvalis de la région Auvergne-Rhône Alpes pour le prix de vente (Arvalis 2019) et les références de Systerre® pour le coût des intrants. En ce qui concerne le matériel, la stratégie de l'exploitation est de minimiser les charges de mécanisation. Il a été comparé pour chaque matériel, les charges de mécanisation entre une stratégie d'achat ou de location de matériel en CUMA. Les références du logiciel Systerre® ont été utilisées pour la stratégie

Tableau 4 - Période de l'évaluation multicritère en fonction des exploitations

Exploitation	Années
Maïs semence (MS)	2016 à 2020
Polyculture élevage (PE)	2016 à 2020
Céréalière avec un sol profond (CP)	2016 à 2019
Céréalière avec un sol superficiel (CS)	2018020

Tableau 5 - Les variables de l'outil Systerre®

Informations générales de l'exploitation	Parc matériel de l'exploitation	ITK	Données économiques
SAU UTH Aides PAC Coût de fermage Cotisation MSA	Puissance (Cv) Modèle Largeur de travail Débit de chantier Poids Prix d'achats ou coût de location	Doses intrants Type et profondeur de travail de sol Semis Rendement	Prix d'achat intrants Prix de vente

Expérimentation sur plusieurs années

Simulation à l'échelle de l'exploitation sur 220 ha sur un an

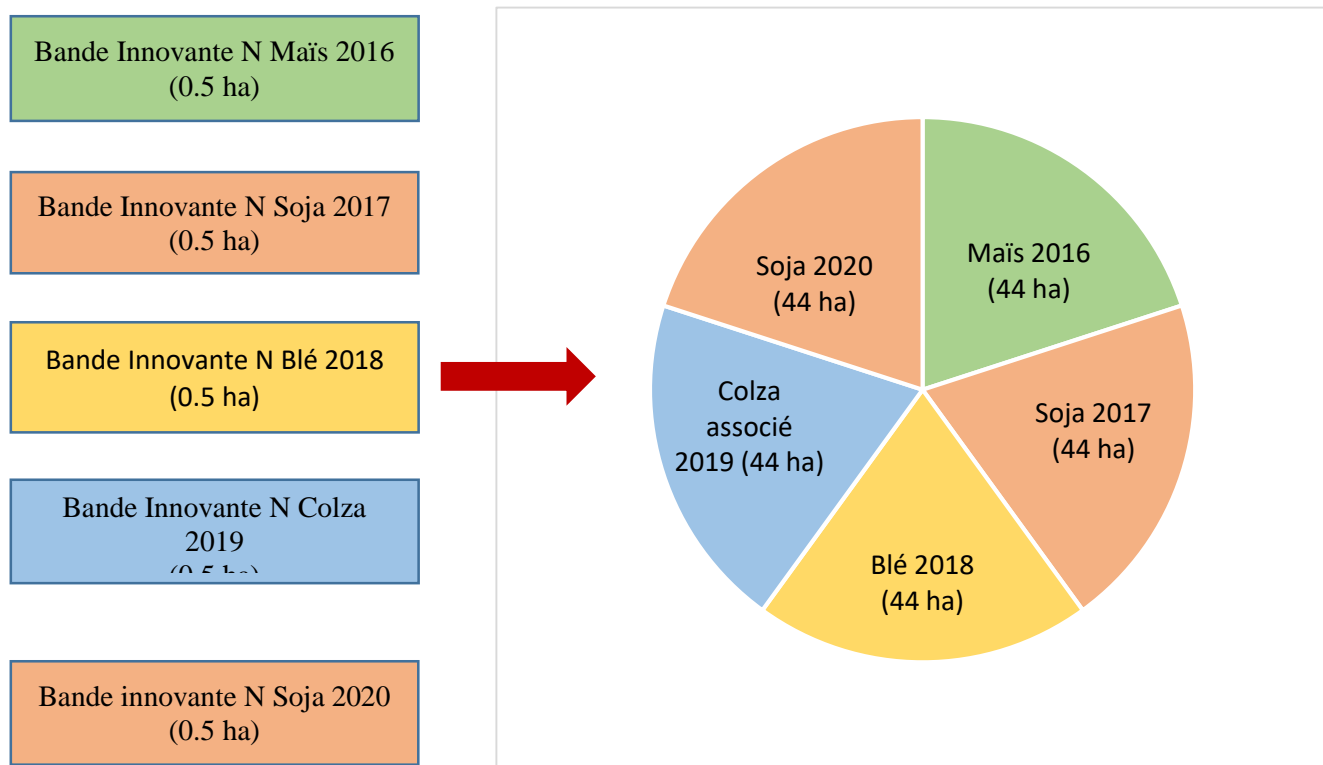


Figure 7 - Exemple de simulation du SdC Innovant à l'échelle de l'exploitation polyculture élevage sur Systerre®

d'achat tandis que le barème d'entraide de la fédération régionale des CUMA d'Auvergne Rhône-Alpes a été utilisé pour la stratégie de location (Fédération Régionale des CUMA d'Auvergne Rhones Alpes 2020). La stratégie la plus économe a été sélectionnée pour chaque matériel afin de correspondre à la stratégie générale mise en place par l'agriculteur pilote.

De plus, le colza associé du SdC Innovant de cette même exploitation a été détruit par un gel tardif en avril 2019. L'agriculteur pilote a remplacé le colza par une culture de maïs. Cet événement a affaibli les performances technico-économiques et environnementales du SdC Innovant. Il a donc été décidé de simuler sur Systerre® la conduite du colza sans le gel. Le rendement a été estimé à dire d'expert entre l'agriculteur pilote et les chercheurs de l'Isara. Le programme de traitement classique de l'agriculteur pilote sur le colza a été rentré dans Systerre®.

Enfin, les agriculteurs pilotes céréalière sur sol profond et superficiel ont utilisé du matériel prêté gratuitement pour le SdC Innovant (strip-till et semoir direct). Des locations ou des achats fictifs de ces outils ont été rentrés sur Systerre®. Les différents choix pour l'évaluation de chaque exploitation sont synthétisés dans le (Tableau 6). Le coût des intrants, le prix des ventes et les caractéristiques du matériel sont décrits en annexe 3, 4 et 5.

Les indicateurs retenus sont calculés à l'échelle de l'exploitation et sont ramenés à l'hectare. Les indicateurs sélectionnés sont :

- **Le rendement (t/ha) :** les rendements sont issus des mesures de l'expérimentation. Ils correspondent au rendement machine. Les rendements sont présentés pour chaque culture.
- **Les charges en intrants (€/ha/an) :** les charges en intrants/ha/an sont composées des charges de semences, d'engrais, de produits phytosanitaires et d'eau pour l'irrigation. Ces charges en intrants sont calculées à partir des doses de semis, d'engrais et de produits phytosanitaires appliquées et de leurs prix d'achats.
- **Les charges de mécanisation (€/ha/an) :** les charges de mécanisation/ha/an sont composées des coûts de location et réparation, de carburant, d'amortissement, de réparation et des frais financiers à long terme. Les coûts de location correspondent au coût d'une location d'un matériel en CUMA ou d'une prestation d'une d'ETA. Le coût de réparation correspond aux frais pour entretenir le matériel en propriété de l'exploitation. Les amortissements correspondent aux amortissements techniques du matériel. Ils sont calculés à partir de l'usage annuel, de la durée de vie et d'obsolescence de chaque matériel. Les coûts de carburant sont calculés à partir de la consommation en carburant pour chaque opération culturale et de son prix (0.8 €/litre). La consommation en carburant est calculée à partir des caractéristiques du matériel : nombre de chevaux du tracteur, débit de chantier de l'opération culturale et besoin de puissance pour tractier un outil. Les frais financiers correspondent aux frais financiers pour l'achat d'un matériel (empreint d'une durée de 7 ans à un taux de 2.5 %).
- **La marge directe (€/ha/an) :** la marge directe correspond à la différence entre les produits et les coûts de production du système de culture. Le calcul détaillé est :
Marge directe = (produits bruts + aides découplées de la PAC) - (charges en intrants + charges de mécanisation + charges salariales). Les charges de MSA, les frais de fermage, les frais financiers à court terme et les charges diverses de l'exploitation (électricité, téléphonie...) ne sont pas pris en compte dans le calcul. Cet indicateur a été choisi à la place de la marge nette, car il n'intègre pas la stratégie d'investissement de l'exploitation.

Tableau 6 - Les choix pour l'évaluation des performances technico-économique et environnementale sur Systemre®

	Matériel	Cout des intrants	Prix de vente	ITK
Céréaliier avec sol profond	Réel mais simulation des prix d'achats et de location	Référence Systemre®	Référence Arvalis	Réel sauf simulation pour le colza innovant 2019
Céréaliier avec sol superficiel	Réel sauf simulation d'achat pour le strip-till	Réel	Réel	Réel
Polyculture élevage	Réel	Réel	Réel	Réel
Maïs semence	Réel	Réel	Réel	Réel

- **Le temps de travail (heure/ha/an)** : le temps de travail correspond au temps de traction dans les parcelles. Le temps de transport entre les parcelles n'est pas pris en compte dans le calcul.
- **Indicateur de fréquence de traitement (IFT/ha/an)** : les IFT sont composés des traitements herbicides, hors herbicides (insecticides/fongicides/molluscicides) et des traitements de semence. Les IFT sont calculés à partir des doses d'application des produits phytosanitaires et de leurs doses d'homologation et de la surface traitée. Les IFT sont analysés par culture.
- **Emissions de GES (eq kg CO₂/ha/an)** : les émissions de GES correspondent au cumul des émissions de CO₂, CH₄ et N₂O. L'indicateur est exprimé en kg eq CO₂ car les GES n'ont pas les mêmes pouvoirs réchauffant. Le calcul prend en compte les émissions directes et indirectes. Les émissions directes correspondent aux émissions de l'exploitation. Les émissions indirectes correspondent à l'ensemble des émissions des fournisseurs en amont de l'exploitation (fabrication et transport du matériel, des engrais, des pesticides et des semences). Pour l'évaluation, cet indicateur est décomposé en émissions directes des fertilisants (nitrification et dénitrification), émissions indirectes des fertilisants (fabrication), émissions directe et indirecte de carburant (opérations culturales et transport des intrants respectivement) et autres émissions de GES (fabrication semences, pesticides et matériels et émissions de GES des résidus de cultures).
- **Consommation d'Énergie primaire (Mégajoule/ha/an)** : l'énergie primaire correspond à l'énergie non renouvelable utilisée pour produire. L'indicateur prend en compte la consommation d'énergie primaire directe et indirecte. Pour l'évaluation, cet indicateur est décomposé en consommation d'énergie primaire liée à la fabrication des fertilisants, en consommation d'énergie primaire liée au carburant (transport des intrants et opérations culturales), en consommation d'énergie primaire liée à l'irrigation (électricité pour la pompe) et autres consommations d'énergie primaire (fabrication des semences, pesticides et matériels).

Les premiers résultats de l'évaluation technico-économique et environnementale ont été présentés individuellement à chaque agriculteur pilote. Ces présentations avaient pour objectif de vérifier avec les agriculteurs pilotes la cohérence des résultats. Dans certains cas, les agriculteurs ont identifié des erreurs ce qui nous a permis de les corriger.

Afin d'aller plus loin dans l'évaluation de l'impact des SdC innovants sur la qualité de l'eau, il a été décidé d'évaluer plus spécifiquement les transferts de pesticides vers les eaux superficielles et souterraines à l'aide du logiciel I-Phy3 (Bockstaller, Girardin 2008) et les transferts de nitrates vers les eaux souterraines en appliquant la démarche de diagnostic des pertes d'azote issu du CASDAR AgroEcoSyst'N (Le Gall et Reau, 2021) et des simulations issues du logiciel Syst'N® (Parnaudeau, Reau, Dubrulle, 2012).

2.2.2 Evaluation des pertes des produits phytosanitaires dans les eaux.

L'outil I-Phy3, dérivé du logiciel INDIGO 2 grandes cultures de l'INRAE, évalue les risques de transfert de produits phytosanitaires dans l'air, les eaux superficielles et les eaux souterraines. L'outil I-Phy3 a été utilisé, car il prend en compte l'effet du travail du sol sur les pertes de produits phytosanitaires contrairement à d'autres outils.

I-Phy3 ne détermine pas une quantité de perte de produits phytosanitaires. Il estime un risque de transfert des produits phytosanitaires dans l'environnement. Une classe de risque est

Tableau 7 - Les variables des indicateurs I-Phy eso et I-Phy su

	I-Phy eso	I-Phy su
Variable liée à la substance active		
Nom de la substance active	X	X
Quantité	X	X
Demi-vie (DT50)	X	X
KoC	X	
DJA	X	X
Aquatox	X	
Variable liée à la parcelle		
Texture du sol	X	X
Profondeur du sol	X	
Taux de matière organique	X	
Pente		X
Bande enherbée		X
Distance d'un point d'eau		X
Culture et son stade de développement	X	X
Travail du sol	X	X
Battance	X	
Hydromorphie	X	
Variable liée aux conditions d'applications		
Date d'application de la substance active	X	X
Couverture du sol lors de l'application	X	X
Type de pulvérisateur		X

déterminée pour chaque culture de la rotation et peut être exprimée *in fine* à l'échelle du SdC. Nous avons retenu uniquement pour cette étude les risques de transferts vers les compartiments eaux superficielles et eaux souterraines soit :

- I-Phy eso : Indicateur qui estime les risques de transfert des produits phytosanitaires vers les eaux souterraines (lixiviation).
- I-Phy su : Indicateur qui estime les risques de transfert des produits phytosanitaires vers les eaux superficielles (ruissellement et dérive dans les cours d'eau).

La méthode de calcul des indicateurs I-Phy eso et I-Phy su est basée sur la logique floue. Les pertes de produits phytosanitaires dans les eaux dépendent à la fois des propriétés physico-chimiques de la substance active, des caractéristiques de la parcelle (pédologie et pratiques de l'agriculteur) et des conditions d'applications. L'ensemble de ces variables est utilisé pour calculer les risques de transfert de produits phytosanitaires pour chaque culture de la rotation (Tableau 7). Les risques I-Phy eso et I-Phy su varient entre 0 et 10 à l'échelle d'une culture. Plus la note est proche de 0, plus le risque de perte est important. Si l'indicateur est égal ou supérieur à 7 alors le risque de transfert de pesticides est faible. La description détaillée des indicateurs est disponible dans la publication de Bockstaller et Girardin (2008).

Les caractéristiques des parcelles de l'expérimentation et les pratiques des agriculteurs ont été saisies dans l'outil I-Phy. Elles sont décrites dans l'annexe 6. Les cultures de l'expérimentation (espèce, travail du sol et date de semis) et les traitements phytosanitaires associés (date, dose et nom de la substance active) ont été saisis dans l'outil I-Phy.

Les indicateurs I-Phy eso et I-Phy su ont été calculés pour chaque culture des SdC de l'expérimentation. La moyenne des indicateurs I-Phy eso et I-Phy su a été ensuite calculée à l'échelle du SdC. Christian Bockstaller, ingénieur de recherche à l'INRAE et responsable de l'outil I-Phy3, a été contacté pour le calcul des indicateurs I-Phy eso et I-Phy su.

2.2.3 Evaluation des pertes des nitrates dans les eaux.

Les pertes de nitrates vers les eaux souterraines et superficielles ont été simulées avec le logiciel Syst'N® (V1.4) (Parnaudeau et al., 2012). C'est un outil d'aide au diagnostic environnemental des pertes azotées à l'échelle de la parcelle sur la durée d'une rotation complète (donc pluriannuelle). Cet outil vise à faire le lien entre les pertes et les pratiques dans un contexte donné grâce à la modélisation journalière des relations sol-plante-climat. Syst'N® a été développé pour être utilisé par des professionnels (Chambres d'agriculture, Agences de l'eau, etc.). En ce sens, l'outil n'a pas vocation à intégrer des modèles mathématiques très complexes et vise surtout à donner des ordres de grandeur des stocks et flux d'azote dans le SdC. Notons que la possibilité d'entrer des données expérimentales (NO_3^- lixivié ou ruisselé, ainsi que l'azote minéral du profil) permet de comparer les sorties de Syst'N® aux données expérimentales. Syst'N® permet de comparer différents SdC et d'évaluer l'impact d'une modification du climat, de la rotation culturale, des stratégies de gestion des périodes d'interculture ou de stratégies d'apports de fertilisants azotés sur les flux d'azote à l'échelle du SdC. Cinq catégories de variables d'entrées sont renseignées (Figure 8) afin d'obtenir des sorties journalières caractérisant les pertes d'azote (lixiviation, volatilisation, dénitrification) et des variables d'état des cultures et du sol (concentration en azote minéral) ainsi que la lame d'eau drainante du sol (Figure 8).

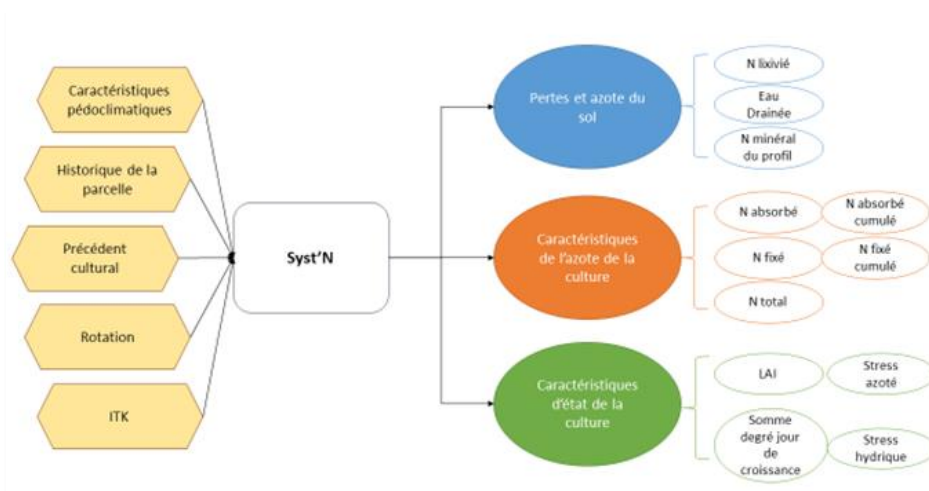


Figure 8 - Catégories d'entrée et de sorties de Syst'N, avec les principales sorties utilisées.

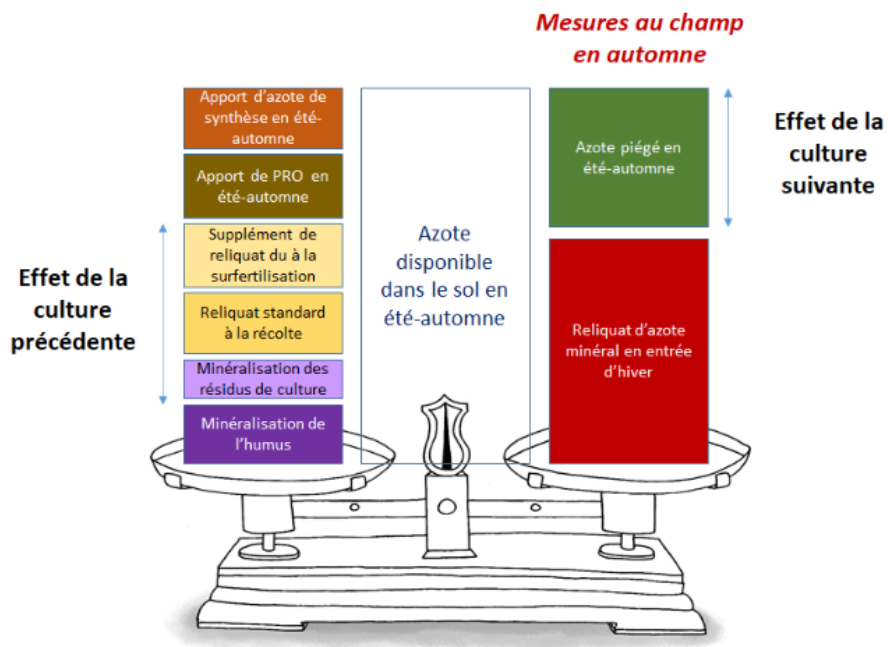


Figure 9 -Un bilan de l'azote minéral entre la récolte du précédent et l'entrée de l'hiver utile pour guider le diagnostic des pertes de nitrates en automne et hiver (Le Gall, Reau et al., 2021).

Nous nous concentrerons ici sur les pertes d'azote par lixiviation. Les résultats présentés sont exprimés à l'échelle du SdC et sont exprimés en kgN/ha/an ou en kgN/100 mm d'eau drainée. Afin de qualifier la performance des SdC étudiés, nous avons utilisé les seuils définis par le Casdar AgroEcoSyst'N (2016-2020, n°5611). Ce projet a fixé un seuil de « haute performance azotée (HPN) » vis-à-vis de la qualité de l'eau. Ce seuil ne doit pas dépasser 10 kg N lixivié pour 100 mm d'eau drainée afin de parvenir au seuil de potabilité 50 mg/l de nitrate dans les eaux souterraines. C'est un seuil ambitieux qui, même dans le Casdar, a rarement été atteint. Cependant, il donne un objectif clair et simple vis-à-vis de la qualité des eaux. Au-delà de ce seuil, les sorties graphiques du simulateur permettent d'identifier les périodes à risques vis-à-vis des pertes d'azote par lixiviation et ainsi permettent de pointer les faiblesses du SdC et les leviers potentiellement mobilisables pour limiter ces risques.

Syst'N® a été utilisé pour 3 des 4 SdC étudiés : systèmes céréaliers sur sol profond et superficiel et système en polyculture-élevage. Il n'a pu être utilisé pour le système semence car le maïs semence n'est pas paramétré et les associations de culture sont encore mal simulées par l'outil. Les dynamiques et flux d'azote de chacun des SdC ont été simulées sur 14 années climatiques et la validité des sorties du modèle a été vérifiée avec les données terrain collectées.

Afin d'évaluer la performance du SdC semence, nous avons utilisé la méthode de diagnostic qui a été développée dans ce même Casdar (Le Gall, Reau et al., 2021). Cette méthode se focalise sur les périodes les plus à risque vis-à-vis des pertes d'azote par lixiviation à savoir, sous nos climats, la période automnale-hivernale en considérant le couple précédent-suivant. Les mesures réalisées au champ et le suivi des cultures et couverts végétaux réalisés sur les expérimentations ont permis d'estimer chacun des postes détaillés dans la Figure 9. Cette méthode, moins précise et complète que celle utilisée pour les 3 autres systèmes, permet néanmoins d'identifier les séquences culture précédente – culture suivante les plus à risque et de donner une approximation des quantités d'azote potentiellement lixiviable.

2.2.4 Analyse des résultats de l'évaluation multicritère

Dans un premier temps, les performances des SdC Innovant seront comparées à celles des SdC Agriculteur de chaque exploitation. L'objectif de cette comparaison « intra » exploitation est d'observer l'effet des SdC Innovant sur les performances des exploitations pilotes.

Dans un second temps, les performances SdC Innovant et Agriculteur seront comparés à des références et des normes réglementaires. Cette comparaison permettra de resituer les performances des SdC Innovant par rapport à des références régionales et nationales. Cette comparaison portera sur les indicateurs suivants : IFT, temps de travail, émissions de GES, consommation d'énergie primaire, perte des nitrates vers les eaux et perte des pesticides dans les eaux. Ces indicateurs ont été sélectionnés car ils possèdent des valeurs de références fiables et comparables.

Résultats

Les résultats de l'évaluation multicritère sont présentés dans le Tableau 8. Les indicateurs rendements, charges en intrants, charges de mécanisation, IFT, émission de GES, et consommation d'énergie primaire sont détaillés respectivement dans les Figure 10, Figure 11, Figure 12, Figure 13, Figure 14 et Figure 15.

3.1 Exploitation productrice de maïs semence (MS)

3.1.1 Performances technico-économiques

Les rendements du SdC Innovant sont supérieurs de 2016 à 2018 puis inférieurs en 2019 et 2020 (Figure 10). Ces différences de rendement se traduisent par un chiffre d'affaires inférieur de 45 €/ha/an pour le SdC Innovant (hors chiffre d'affaires du méthaniseur). La récolte des couverts en 2019 et 2020 pour la méthanisation a augmenté le chiffre d'affaires de 690€/ha à l'échelle de la rotation (5 ans) pour le SdC Agriculteur (Annexe 2).

L'intégration de légumineuses dans le SdC Innovant a permis de diminuer les apports d'azote en 2017, 2019 et 2020. De plus dans le SdC Agriculteur, les couverts d'intercultures sont fertilisés et irrigués depuis 2019 afin de maximiser la production de biomasse pour la méthanisation. Les agriculteurs pilotes ont aussi épandu un biostimulant dans le SdC Agriculteur en 2018 (bactériolite). Les charges en engrais et en irrigation sont alors inférieures dans le SdC Innovant (Figure 11). A l'inverse, l'intégration de légumineuses dans les couverts d'intercultures du SdC Innovant (trèfle et vesce) augmente les charges en semences par rapport au SdC Agriculteur (Figure 11). Le SdC Innovant n'a pas modifié la stratégie de traitements phytosanitaires. Les charges en pesticides sont identiques entre les deux SdC (Figure 11). Finalement, les charges totales en intrants sont en moyenne supérieures de 27 €/ha/an dans le SdC Agriculteur à cause de la stratégie méthanisation (Tableau 8).

Dans le SdC Agriculteur, les couverts sont fauchés, andainés puis récoltés depuis 2019. Ces opérations génèrent des charges de mécanisation supplémentaires par rapport au SdC Innovant. Les charges de mécanisation sont alors en moyenne supérieures de 103 €/ha/an dans le SdC Agriculteur (Tableau 8).

Ces différentes performances économiques se traduisent par une marge directe moyenne inférieure de 48 €/ha/an dans le SdC Innovant (Tableau 8). Le temps de travail est supérieur de 36 minutes/ha/an dans le SdC Agriculteur avec la stratégie de méthanisation (Tableau 8). Le niveau d'IFT est identique entre les deux systèmes de cultures (Figure 13).

3.1.2 Performances environnementales

En moyenne, le SdC Innovant émet 388 kg équivalent de CO₂/ha/an de moins et consomme 3 619 MJ/ha/an de moins que le SdC Agriculteur (Tableau 8). Ce résultat est la conséquence de la fertilisation, l'irrigation et des récoltes des couverts d'intercultures pour la méthanisation et de la réduction d'apport d'azote dans le SdC Innovant grâce aux légumineuses associées au maïs semence et insérées en interculture entre le blé et le maïs semence.

Le risque de perte de pesticides dans les eaux souterraines et superficielles est identique entre les deux SdC. La note est de 4.82 pour Iphy eso et de 4.78 Iphy su (Tableau 8). Ces valeurs indiquent qu'il y a un risque élevé de transfert de plusieurs substances actives dans les eaux souterraines et superficielles.

Tableau 8- Résultats de l'évaluation multicritère des systèmes de culture

	Mais semence (MS)		Polyculture élevage (PE)		Céréaliier avec sol profond (CP)		Céréaliier avec sol superficiel (CS)		Références
	Agriculteur	Innovant	Agriculteur	Innovant	Agriculteur	Innovant	Agriculteur	Innovant	
Performance technico-économique									
Charges en intrants (€/ha/an)	854	827	498	535	340	394	330	424	X
Charges de mécanisation (€/ha/an)	1218	1115	410	345	295	312	275	269	280 à 320 (1)
Marge directe (€/ha/an)	648	600	348	147	506	247	271	109	X
Temps de travail (heure/ha/an)	10,42	9,76	3,95	3,37	2,6	2,8	2,77	2,03	4 à 5 (1)
IFT/ha/an	5	5	4,8	4,8	2,31	1,98	3,29	2,49	Voir figure X
Performance environnementale									
Emission de GES (kgeq CO2/ha/an)	3 355	2 843	2 191	2 122	1 706	1 750	1 785	1 249	1400 à 1600 (1)
Consommation Energie primaire (MJ/ha/an)	46 149	41 991	11 940	11 072	10 514	10 087	9 620	7 065	9000 à 11 000 (1)
Pertes des nitrates et des pesticides									
Iphy eso	4,82	4,82	5,98	5,98	6,7	6,37	5,7	5,7	> 7 (2)
Iphy su	4,78	4,78	6,16	6,16	6,2	6,2	5,43	6,76	> 7 (2)
Syst'N®	élevé	élevé	25	26	17	11	27	19	<10 kgN/100 mm (3)

(1) Ces valeurs correspondent aux performances moyenne nationale des exploitations en grandes cultures Françaises (Arvalis [sans date])

(2) Ces valeurs correspondent aux seuil de risque de perte de produits phytosanitaires dans les eaux (Bockstaller, Girardin 2008)

(3) Ces valeurs correspondent aux seuils de risque de perte d'azote par lixiviation définis par le Casdar AgroEcoSyst'N (Le Gall et Reau, 2021)

Les risques de pertes d'azote par lixiviation durant la période automnale et hivernale est élevée quelle que soit le SdC considéré ; les quantités d'azote en jeu sont similaires entre les 2 SdC (Annexe 7). Un des facteurs principaux sont les reliquats azotés post-récolte du maïs semence qui sont élevés (environ 70 kgN/ha en 2017 et plus de 100 kgN/ha en 2019 et 2020).

Automne-hiver 2017-2018, maïs semence – blé : un apport de lisier (environ 30 kgN sous forme minéral en jeu) a été effectué avant le semis du blé. Les mesures de reliquats azotés en entrée d'hiver sous le blé et la faible absorption d'azote du blé (5 kgN/ha) indiquent un potentiel élevé de lixiviation d'azote (environ 50 kgN/ha en jeu). Ces pertes continuent durant la période hivernale (décembre-janvier) si on se réfère aux reliquats sortie-hiver mesurés ainsi qu'à l'azote absorbé par la culture du blé (environ 15 kgN/ha). Cette phase de la rotation, quel que soit le SdC considéré, présente un risque élevé de lixiviation de l'azote avec environ 70 kgN/ha en jeu : sol filtrant, reliquats post-récolte élevés, fertilisation organique à l'automne et faible capacité du blé à immobiliser l'azote minéral du sol.

Automne-hiver 2018-2019, blé – couverts d'interculture : un apport de lisier (environ 30 kgN sous forme minéral en jeu) a été effectué avant le semis des couverts. Les mesures de reliquats azotés en entrée d'hiver sous les couverts et la bonne absorption d'azote de ces couverts (plus de 50 kgN/ha) limitent les risques de lixiviation d'azote. En revanche, le couvert a été exporté sur la bande agriculteur (méthanisation) et la présence de sol nu au cours de l'hiver entraîne un potentiel de perte d'environ 20 kgN/ha ; *a contrario*, le couvert sur le SdC innovant limite ce risque.

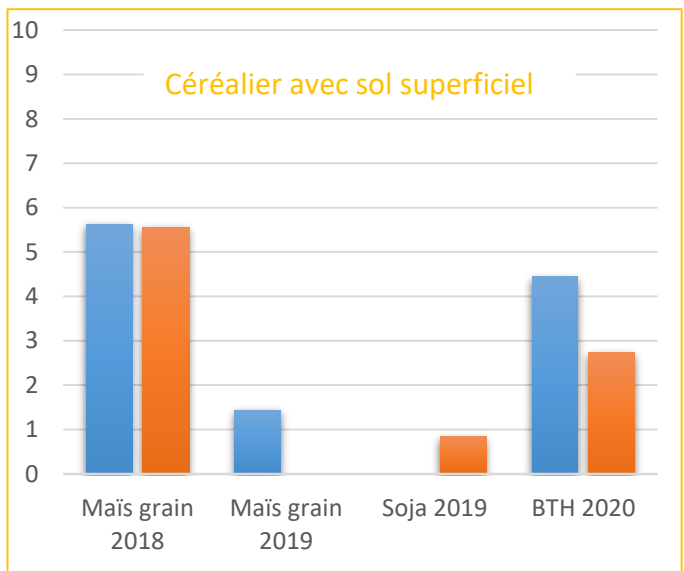
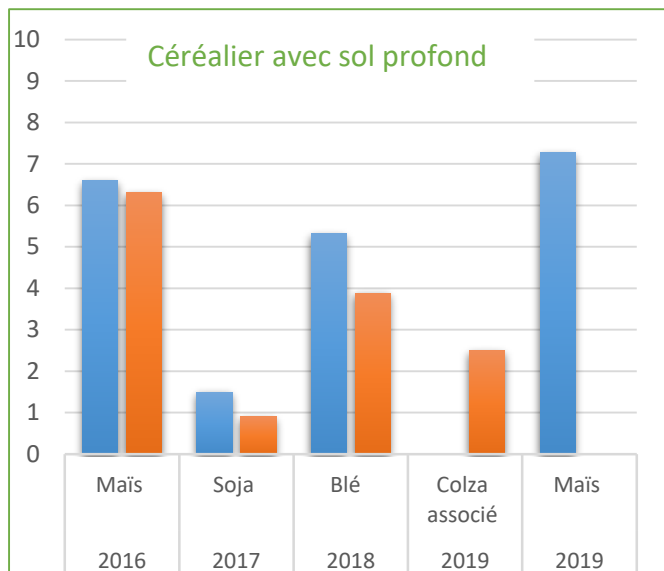
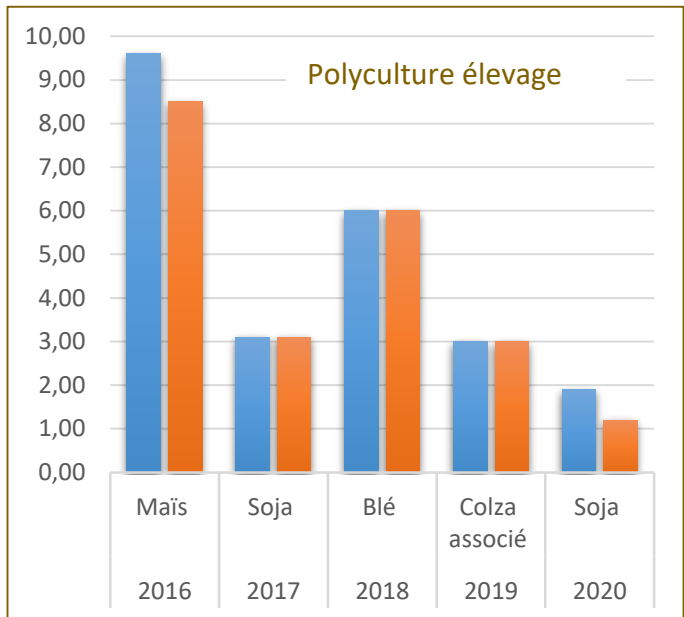
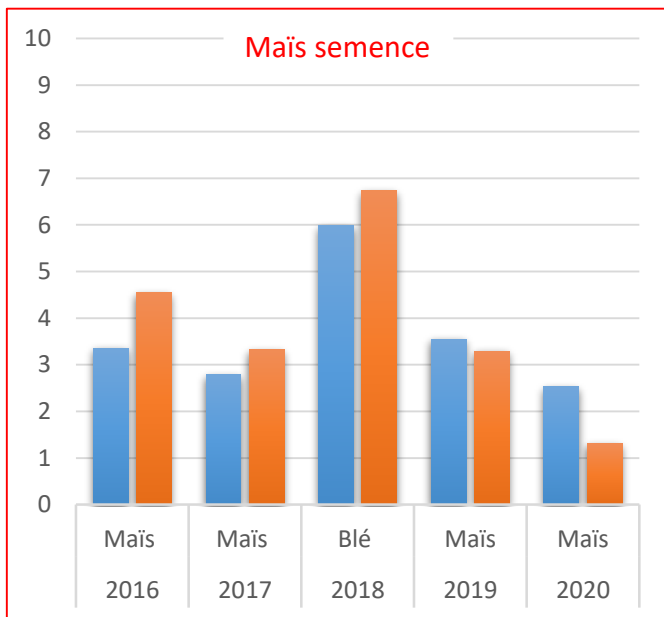
Automne-hiver 2018-2019 et 2019-2020, maïs semence-couverts végétaux : les reliquats azotés post-récolte des maïs semence sont élevés (plus de 100 kgN/ha) et la présence de couverts végétaux semés à la récolte ne permet pas de piéger tout l'azote minéral en jeu. Le suivi des reliquats et des dynamiques d'absorption des couverts montre que, quel que soit le SdC, entre 50 et 100 kgN/ha peuvent être lixiviés sur cette période (plus de 50 en année sèche – automne 2020 – et environ 100 kg en année plus humide – automne 2019). Ensuite le fort développement des couverts limite les risques de lixiviation durant la période hivernale.

3.2 Exploitation polyculture élevage (PE)

3.2.1 Les performances technico-économiques

L'implantation d'un couvert permanent de luzerne n'a pas fonctionné dans le SdC Innovant malgré deux tentatives en 2018 et 2019 (erreurs de stratégie de désherbage et colza trop concurrentiel la 2^{ème} année). Les différences d'itinéraires techniques ne sont donc in fine pas importantes mis à part la stratégie d'exportation des couverts végétaux pour le SdC agriculteur. Les rendements du SdC Innovant sont inférieurs en 2016 et 2020 par rapport au SdC Agriculteur (Figure 10). L'agriculteur pilote n'a pas différencié les rendements du SdC Innovant et Agriculteur de 2017 à 2019 car les itinéraires techniques étaient identiques avec les échecs d'implantation de la luzerne. Ces différences de rendements se traduisent par un chiffre d'affaires moyen inférieur de 76 € ha/an pour le SdC Innovant (hors chiffre d'affaires du méthaniseur). La récolte des couverts en 2020 pour la méthanisation a augmenté le chiffre d'affaires de 850 €/ha à l'échelle de la rotation pour le SdC Agriculteur.

Dans le SdC Innovant, la tentative d'intégration d'un couvert de luzerne et le semis de seigle à haute densité a augmenté les charges en semences par rapport au SdC Agriculteur (Figure 11). Le semis direct de soja sous le couvert de seigle roulé n'a pas réduit l'utilisation d'herbicides dans le SdC Innovant (objectif initial de cette technique). L'agriculteur pilote n'a



■ SdC Agriculteur
 ■ SdC Innovant

Figure 10 - Rendement en t/ha des SdC Agriculteurs et Innovants du collectif sol

pas voulu réduire l'utilisation d'herbicides car il a observé des adventices sous le mulch de seigle ce qui lui a fait « peur ». Les charges en produits phytosanitaires sont alors identiques entre les deux SdC (Figure 11). Les pratiques innovantes n'ont pas non plus modifié la stratégie de fertilisation de l'agriculteur pilote. Les charges en engrais sont identiques (Figure 11). Ainsi les charges en intrants sont en moyenne supérieures de 37 €/ha/an dans le SdC innovant par rapport au SdC agriculteur à cause des charges en semences plus importantes (Tableau 8).

Les couverts d'intercultures sont fauchés, andainés et récoltés pour la méthanisation dans le SdC Agriculteur en 2020. Ces opérations génèrent des charges de mécanisation supplémentaires par rapport au SdC Innovant. Les charges de mécanisation sont alors supérieures de 65 €/ha/an dans le SdC Agriculteur (Figure 12).

Ces différentes performances économiques se traduisent par une marge directe moyenne inférieure de 207 €/ha/an dans le SdC Innovant (Tableau 8). Le temps de travail en moyenne est supérieur de 34 min/ha/an dans le SdC Agriculteur avec la stratégie méthanisation (Tableau 8). Le niveau d'IFT est identique entre les deux SdC (Figure 13).

3.2.2 Les performances environnementales

Les émissions de GES et la consommation d'énergie primaire sont légèrement supérieures dans le SdC Agriculteur (stratégie de méthanisation) (Figure 14 et Figure 15).

Le risque de perte de pesticides dans les eaux est identique entre les deux SdC (pas de nette distinction des stratégies et échecs des semis directs sans glyphosate). La note est de 5.98 pour Iphy eso et de 6.16 pour Iphy su (Tableau 8). Il y a un risque de transfert de plusieurs substances actives dans les eaux souterraines. Ce risque est moins élevé pour les eaux superficielles mais il est tout de même présent.

Le Tableau 1 de l'annexe 8 présente les sorties de la modélisation des flux d'azote avec l'outil Syst'N® pour le SdC Agriculteur et Innovant de cette exploitation. Il n'y a pas de différences entre les 2 SdC. On note toutefois que ces SdC présentent des pertes d'azote par lixiviation de 25 et 26 kgN/100 mm d'eau drainée. Le seuil de potabilité fixé (10 kgN/100 mm d'eau drainée) est largement dépassé. Les périodes les plus à risque pour ces 2 SdC sont entre le soja et le blé. Les reliquats azotés post-récolte du soja sont supérieurs à 40 kgN/ha et la minéralisation des résidus de culture du soja (riches en azote) est rapide. L'azote minéral s'accumule dans le profil de sol et les faibles besoins du blé en azote durant l'automne et l'hiver ne permettent pas d'immobiliser cet azote accumulé (pertes moyennes simulées de septembre à février d'environ 40 kgN/100 mm d'eau drainée). La 2nde période à risque identifiée pour les 2 SdC est la période d'interculture entre le colza et le soja. La minéralisation rapide des résidus du colza ne sont pas suffisamment immobilisés et les pertes sont comprises entre 30 et 40 kgN/100 mm d'eau drainée entre novembre et janvier. Certains automnes pluvieux des pertes peuvent également survenir pendant l'interculture maïs grain-soja (couvert de seigle).

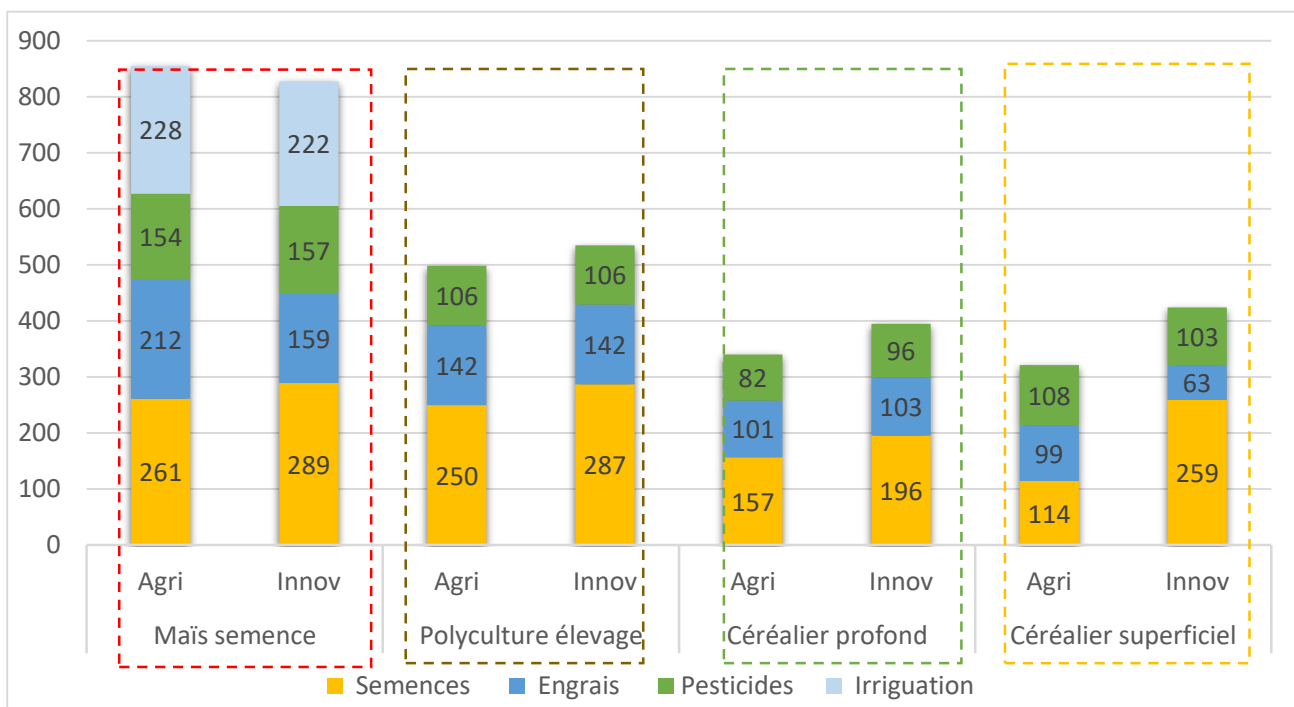


Figure 11 - Charges moyennes en intrants en €/ha/an

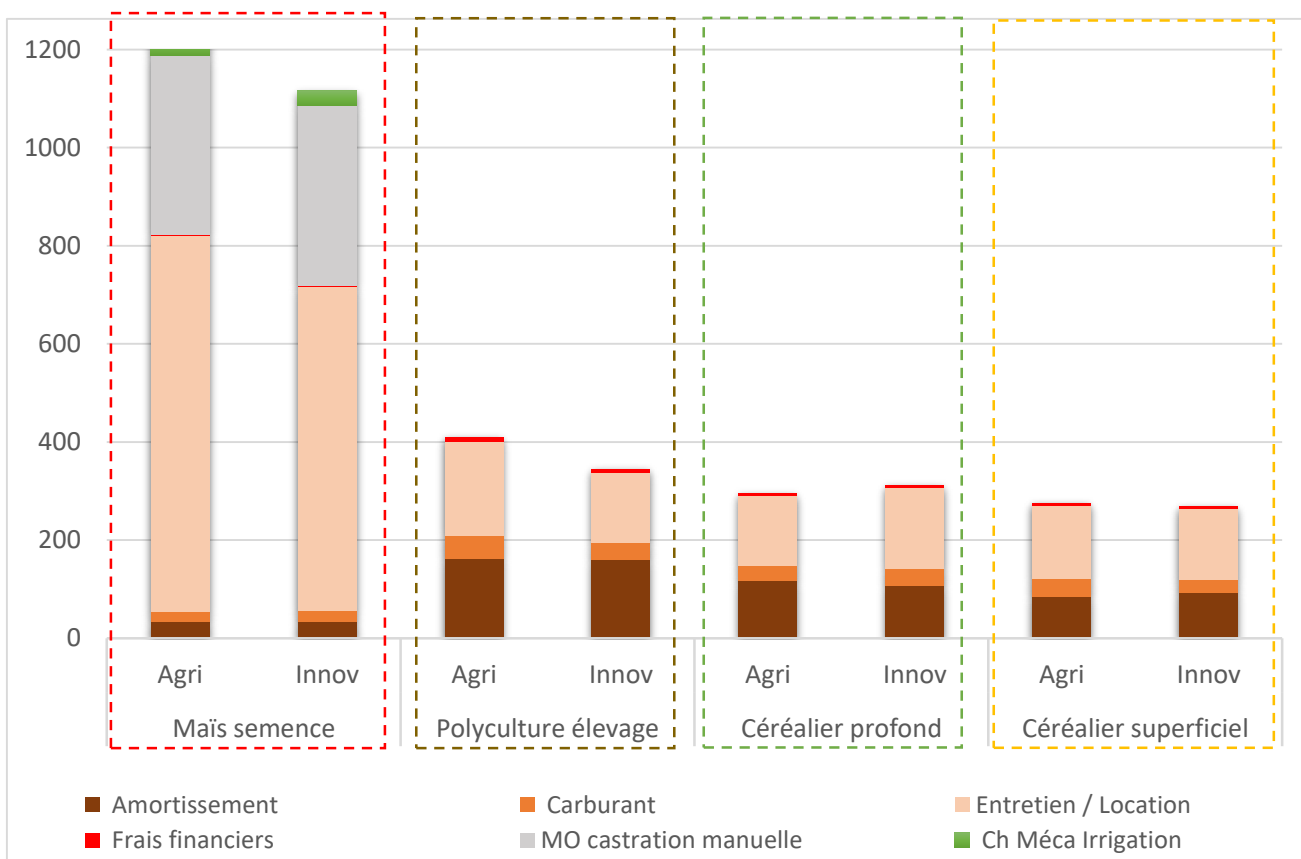


Figure 12 - Charges moyennes de mécanisation en €/ha/an

3.3 Exploitation céréalière avec un sol profond (CP)

3.3.1 Performances technico-économiques

Les rendements du SdC Innovant sont inférieurs en 2016, 2017 et 2018 par rapport au SdC Agriculteur (Figure 10). En 2019, les rendements ne sont pas comparables, car ce ne sont pas les mêmes cultures. Ces différences de rendements se traduisent par un chiffre d'affaires moyen inférieur de 187 €/ha/an pour le SdC Innovant.

La pression des adventices a augmenté dans le SdC Innovant malgré l'implantation de couverts d'interculture. La forte pression des adventices a contraint l'agriculture pilote à retravailler le sol en 2019 (1 passage de déchaumeur et 2 passages de vibroculteur). Par ailleurs, l'agriculteur pilote a fait des erreurs d'apprentissages dans le SdC Innovant. L'agriculteur pilote a par exemple rencontré des difficultés de semis du couvert de seigle après le maïs grain (broyage des cannes de maïs) et pour sa destruction mécanique (3 passages de rouleau contre un seul passage initialement prévu) (annexe 2). Les erreurs d'apprentissages et les solutions de rattrapage (reprise du travail du sol) ont augmenté les charges de mécanisation du SdC Innovant. Ce sont pour ces raisons que les charges de mécanisation sont en moyenne légèrement supérieures de 17€/ha/an dans le SdC Innovant par rapport au SdC Agriculteur (Figure 12).

L'implantation du couvert de seigle en 2017 a augmenté les charges en semences dans le SdC Innovant (Figure 11). Le semis direct du soja sous couvert roulé de seigle n'a pas réduit l'utilisation d'herbicides. L'agriculteur pilote n'a pas roulé correctement le seigle ce qui a permis aux adventices de se développer. La stratégie de traitement est identique entre les deux SdC sauf en 2019 car il y a culture de maïs dans le SdC Agriculteur et une culture de colza dans le SdC Innovant. Les traitements sont plus onéreux pour la culture de colza que pour la culture de maïs. Les charges en pesticides sont alors plus élevées pour le SdC Innovant (Figure 11). Les charges en engrais sont identiques entre les SdC (Figure 11). Finalement, les charges en intrants sont en moyennes supérieures de 54 €/ha/an dans le SdC Innovant.

Ces différentes performances économiques se traduisent par une marge directe moyenne inférieure de 256 €/ha/an dans le SdC Innovant (Tableau 8). Le temps de travail est en moyenne supérieur de 12 minutes/ha/an dans le SdC Innovant à cause de la reprise du travail du sol et les erreurs d'apprentissages (Tableau 8). Malgré des charges pesticides plus élevées, le niveau d'IFT moyen est inférieur de 0.34/ha/an dans le SdC Innovant (Figure 13). Cette différence s'explique par le niveau d'IFT plus faible en 2019 du colza du SdC Innovant par rapport au maïs du SdC Agriculteur.

3.3.2 Performances environnementales

Les émissions de GES sont quasiment identiques entre les deux SdC (Figure 14). La consommation d'énergie primaire est en moyenne inférieure de 426 MJ/ha/an dans le SdC Innovant (Figure 15).

Le risque de perte de pesticides dans les eaux souterraines est légèrement plus élevé dans le SdC Innovant (Iphy eso = 6.37) que le SdC Agriculteur (Iphy eso = 6.7) (Tableau 8). Le risque de transfert de pesticides vers les eaux souterraines est modéré. Il y a tout de même des substances actives qui sont susceptibles d'être transférées dans les eaux souterraines. Le risque de perte de pesticides vers les eaux de surface est identique entre les deux SdC (Iphy = 6.2). Il y a un risque de transfert modéré de pesticides dans les eaux superficielles.

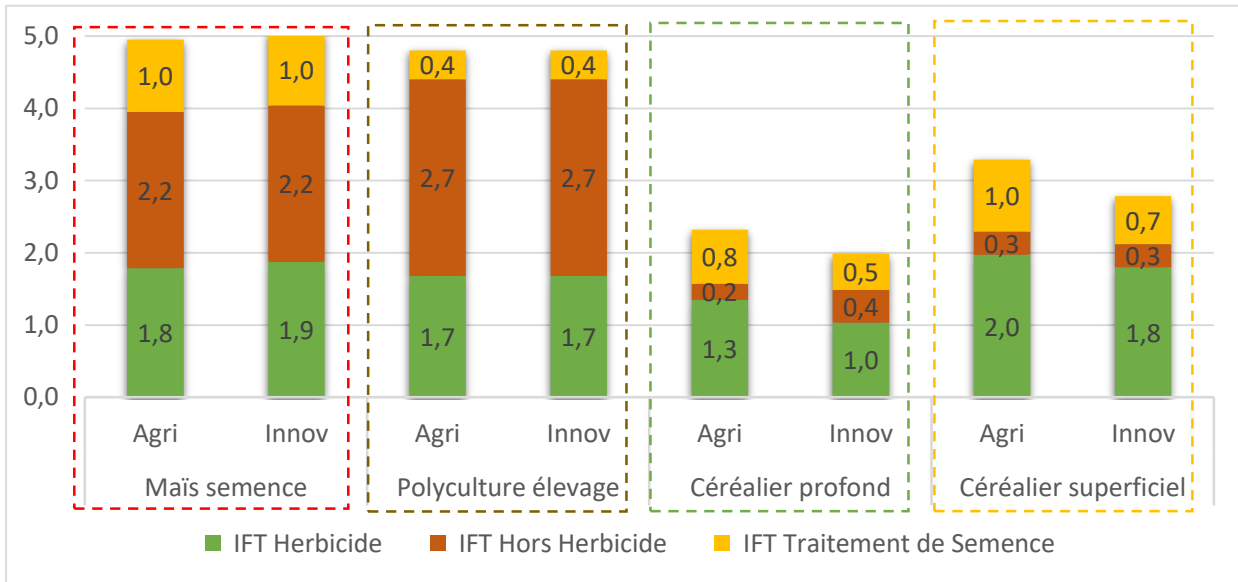


Figure 13- IFT moyen/ha/an

Le Tableau 2 de l'annexe 8 présente les sorties de la modélisation des flux d'azote avec l'outil Syst'N® pour les SdC Agriculteur et Innovant de cette exploitation. Le SdC Innovant présente des pertes moyennes d'azote proches du seuil fixé vis-à-vis de la potabilité de l'eau (11 kgN/100 mm d'eau drainée) tandis que le système agriculteur s'en éloigne (17 kgN/100 mm d'eau drainée). Les périodes les plus à risque pour le SdC Agriculteur sont lors des périodes d'interculture maïs-maïs et maïs-soja. Le sol est nu et les pertes s'étalent de 15 à plus de 20 kgN/100 mm d'eau drainée entre novembre et avril. La présence d'un couvert de seigle sur le SdC Innovant limite ces pertes sans pour autant les réduire totalement (moins de 15 kgN/100 mm d'eau drainée). Pour les 2 SdC la phase de la rotation soja-blé présente des risques importants de lixiviation. Les reliquats azotés post-récolte du soja sont supérieurs à 40 kgN/ha et la minéralisation des résidus de culture du soja (riches en azote) est rapide. L'azote minéral s'accumule dans le profil de sol et les faibles besoins du blé en azote durant l'automne et l'hiver ne permettent pas d'immobiliser cet azote accumulé (pertes moyennes simulées de septembre à février d'environ 20 kgN/100 mm d'eau drainée). L'insertion de couverts végétaux dans le SdC Innovant a permis de réduire les risques de pertes d'azote par lixiviation par rapport au SdC Agriculteur.

3.4 Exploitation céréalière avec un sol superficiel (CS)

3.4.1 Les performances technico-économiques

Les rendements du maïs grain sont quasiment identiques entre les deux SdC en 2018 (Figure 10). Les rendements ne sont pas comparables en 2019 car ce ne sont pas les mêmes cultures. En 2019, les cultures ont souffert de la sécheresse ce qui explique les rendements très faibles. En 2020, le rendement du blé est inférieur de 1.7 t/ha dans le SdC Innovant. Ces différences de rendements se traduisent par un chiffre d'affaires moyen inférieur de 86€/ha/an.

La pression des adventices a augmenté dans le SdC Innovant. Le semis direct de soja sous couvert roulé de seigle n'a pas permis de réduire l'utilisation d'herbicides. Le couvert de seigle ne s'est pas bien développé à cause du manque d'eau, il a donc peu concurrencé les adventices durant l'interculture et a faiblement recouvert le sol lorsqu'il a été roulé. Les adventices se sont alors développées dans le soja. L'agriculteur pilote a été contraint de réaliser trois désherbages chimiques de plus que le SdC Agriculteur en 2018, 2019 et 2020. Ces traitements génèrent des charges en pesticides supplémentaires. Les charges en pesticides sont tout de même inférieures dans le SdC Innovant car en 2019, les traitements pesticides sont moins onéreux pour la culture de soja dans le SdC Innovant que la culture de maïs dans le SdC Agriculteur (Figure 11). L'implantation de couvert d'interculture en 2018 et 2019 a augmenté les charges de semences dans le SdC Innovant (Figure 11). L'implantation d'un couvert de légumineuse en 2018 et l'intégration de la culture de soja en 2019 a permis de réduire les apports d'azote dans le SdC Innovant. Les charges en engrais sont alors plus faibles dans le SdC Innovant (Figure 11). Finalement, les charges en intrants sont supérieures de 94 €/ha/an dans le SdC Innovant (Tableau 8).

Les charges de mécanisation sont quasiment identiques entre les deux SdC (Figure 12). Ces différentes performances économiques se traduisent par une marge directe moyenne inférieure de 181 €/ha/an dans le SdC Innovant (Tableau 8). Le temps de travail est en moyenne inférieur de 44 minutes/ha/an dans le SdC Innovant grâce à la réduction du travail de sol (Tableau 8). Le niveau d'IFT est en moyenne inférieur de 0.6/ha/an dans le SdC Innovant car le soja est une culture avec un niveau d'IFT faible (Figure 13).

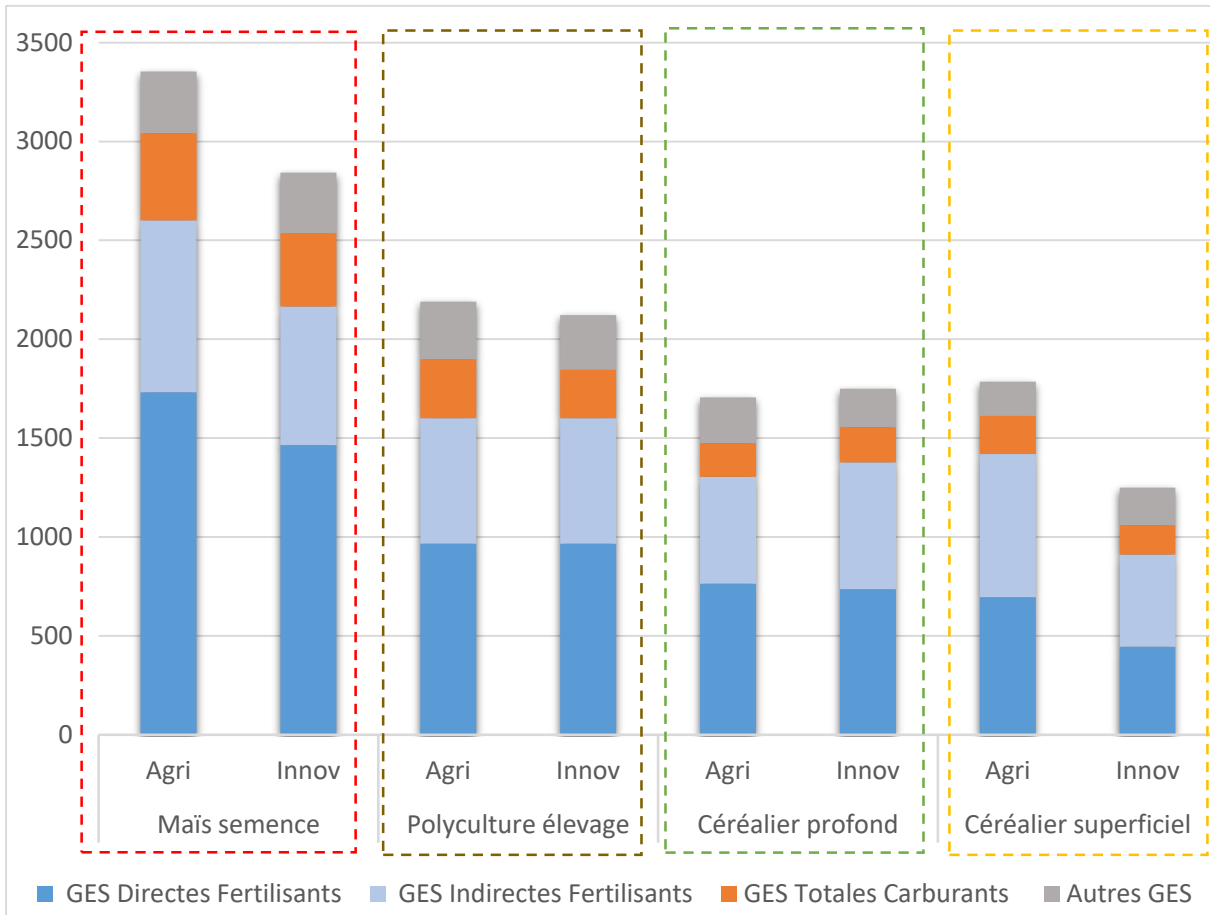


Figure 14- Emissions moyenne de GES en kg eq CO2/ha/an

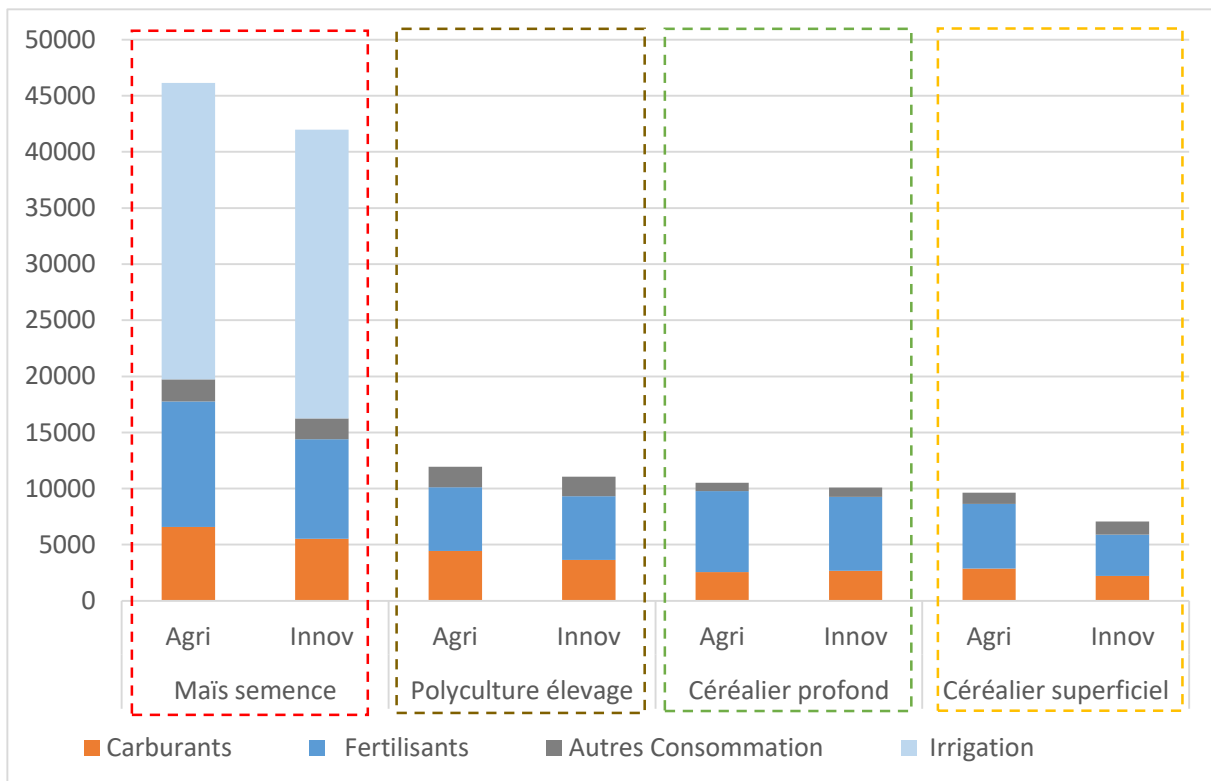


Figure 15 - Consommation moyenne d'énergie primaire en Mégajoul/ha/an

3.4.2 Les performances environnementales

Les émissions de GES et la consommation d'énergie primaire sont en moyenne inférieures dans le SdC Innovant grâce à la réduction des apports d'azote et la réduction du travail du sol (Figure 14 et Figure 15).

Le risque de pertes de pesticides vers les eaux souterraines est identique entre les deux SdC (Iphy eso = 5.7). Il y a un risque élevé de transferts de plusieurs substances actives dans les eaux souterraines. Le risque de perte de pesticides vers les eaux superficielles est inférieur dans le SdC Innovant (Iphy su = 6.76) par rapport au SdC Agriculteur (Iphy su = 5.43). Le risque de transfert de substances actives dans les eaux superficielles est quasiment nul dans le SdC Innovant alors qu'il est élevé dans le SdC Agriculteur.

Le Tableau 3 de l'annexe 8 présente les sorties de la modélisation des flux d'azote avec l'outil Syst'N® pour le SdC Agriculteur et Innovant de cette exploitation. Le SdC Innovant présente des pertes moyennes d'azote plus faibles que celles simulées pour le SdC Agriculteur (19 contre 27 kgN/100 mm d'eau drainée). Cependant ces pertes sont bien au-dessus du seuil fixé vis-à-vis de la potabilité de l'eau (10 kgN/100 mm d'eau drainée). Les deux SdC ont les mêmes périodes à risque de transfert de nitrates : durant les intercultures entre les cultures de printemps (transferts diminués sur le SdC innovant grâce à la présence du couvert de seigle, 26 kgN/100 mm d'eau drainée vs 46 kgN/100 mm d'eau drainée) ; sous la culture de blé précédent soja à l'automne pour les mêmes raisons que décrites précédemment pour les 2 autres exploitations) ; sous le couvert d'interculture entre le colza et le maïs grain (pertes d'environ 20 kgN/100 mm d'eau drainée de novembre à janvier). L'insertion de couverts végétaux dans le SdC Innovant a permis de réduire les risques de pertes d'azote par lixiviation par rapport au SdC Agriculteur mais n'a pas permis d'atteindre le seuil fixé de 10 kgN/100 mm d'eau drainée.

4. Discussion générale des résultats

4.1 Les performances technico-économiques

4.1.1 Rendement et chiffre d'affaires

Pittelkow et al. (2014) et Schaller (2013) expliquent que les rendements diminuent légèrement en ACS. Les résultats sont tout de même différents en fonction des situations (Labreuche et al., 2015). Les rendements des différentes cultures diminuent dans les SdC Innovants par rapport aux SdC agriculteurs sauf pour le SdC MS (Figure 10). Les pertes de rendements se traduisent par une diminution du chiffre d'affaires (hors méthaniseur) de 76, 187 et 86 €/ha/an respectivement pour PE, CP et CS.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces baisses de rendement. Les agriculteurs pilotes de CP et CS sont novices dans la technique du semis direct. Brun et al. (2013) et Labreuche (2013) expliquent que le manque de maîtrise technique au début d'une transition d'un SdC en semis direct est souvent l'élément principal qui explique la baisse du rendement. Le manque d'expérience des agriculteurs pilotes peut expliquer la baisse des rendements. Ensuite, l'arrêt du travail du sol a augmenté la pression des adventices pour CP et CS. L'augmentation de la pression des adventices est un phénomène fréquent pour SdC qui arrêtent le travail du sol (Labreuche et al., 2015). Malgré les solutions de rattrapages des agriculteurs (travail du sol superficiel et herbicides), la pression des adventices a probablement diminué le rendement des cultures. De plus, durant les premières années d'une transition en ACS, l'arrêt du travail du sol peut détériorer la structure du sol car la matière organique n'est pas encore

concentrée à la surface et l'activité biologique n'est pas encore élevée (Labreuche, et al., 2015). Il est parfois nécessaire d'attendre quelques années pour obtenir une meilleure structure de sol et bénéficier des effets bénéfiques de la diversification de la rotation et de l'insertion de couverts végétaux sur le fonctionnement du sol. Par ailleurs, certaines cultures insérées dans les SdC ne sont pas adaptées aux conditions de certaines exploitations. C'est le cas du soja introduit dans le SdC Innovant de l'exploitation CS. Le sol superficiel et séchant de l'exploitation a fortement limité la réussite du soja. Enfin, certaines techniques innovantes non maîtrisées ont conduit à une réduction des rendements. C'est le cas par exemple du semis direct du soja dans un seigle roulé et semé à haute densité (200 kg/ha). Cette technique est prometteuse si un ensemble de conditions techniques (type de matériel, sens de roulage) et d'états du milieu et du couvert (biomasse, stade de développement) sont réunies (Vincent-Caboud, 2020). Ainsi, plusieurs conditions n'étaient pas respectées notamment dans les SdC Innovants des exploitation CP et CS et dans une moindre mesure dans le SdC Innovant de l'exploitation PE. Ceci a conduit à une baisse de rendement des sojas sur les bandes innovantes et à un salissement accru des parcelles.

Pour l'exploitation MS, les rendements du SdC Innovant sont supérieurs de 2016 à 2018 puis inférieurs de 2019 à 2020 par rapport au SdC Agriculteur (Figure 10). Cependant les différences sont faibles (plus 2 quintaux de maïs et 7 quintaux de blé pour le SdC innovant par rapport au SdC Agriculteur). Ces résultats ne sont pas étonnants puisque le SdC Innovant est proche du SdC Agriculteur, seule les stratégies d'association et d'exportation des couverts sont différentes. Il faut toutefois noter que la non exportation des couverts végétaux et l'insertion de légumineuses dans les couverts du SdC innovant a permis de baisser les apports d'azote minéral de 50 kgN/ha sur les maïs semence sans entraîner de baisse de rendement. Malgré des rendements équivalents entre les deux SdC, le chiffre d'affaires du SdC Innovant est inférieur de 45€/ha/an. Cette diminution s'explique par la variation du prix de vente du maïs semence en fonction des années. Les rendements du SdC Innovant sont supérieurs lorsque le prix de vente est faible et inversement (Annexe 4).

Une des limites de ces résultats est le manque de répétitions des modalités sur le terrain. La variabilité des rendements en fonction des conditions climatiques n'est pas prise en compte dans ces résultats en raison du design des expérimentations conduites chez des agriculteurs en conditions « réelles ».

4.1.2 Charges en intrants

L'implantation de couverts d'interculture et permanents, leurs diversifications (légumineuse) et l'association de culture ont augmenté les charges en semences pour l'ensemble des SdC Innovants. Les charges en semences ont augmenté de 28, 37, 39 et 145 €/ha/an (Figure 11) respectivement pour MS (diversification des couverts avec des légumineuses), PE (couvert permanent de luzerne et haute densité de semis du seigle), CP (implantation d'un couvert d'interculture et associations de culture) et CS (implantation de couverts d'interculture).

Pour les charges d'engrais, il n'y a eu aucune économie dans le SdC Innovant pour PE et CP (Figure 11). Pour PE, les échecs d'implantation de la luzerne n'ont pas permis de réaliser des économies d'engrais pour le SdC Innovant.

Pour CS, l'intégration du soja et la réduction de l'apport d'azote en 2018 grâce au couvert diversifié avec des légumineuses, ont permis de réduire les charges d'engrais de 36 €/ha dans le SdC Innovant (Figure 11). La diminution de l'apport d'azote en 2018 n'a pas impacté le rendement du maïs par rapport au SdC Agriculteur.

Pour MS, les charges d'engrais sont plus faibles de 53€/ha/an dans le SdC Innovant (Figure 11). L'intégration de légumineuses dans les couverts d'interculture a permis de diminuer les apports d'azote en 2017, 2019 et 2020 de 50 kgN/ha. De plus, le couvert d'interculture a été fertilisé en 2020 pour la méthanisation dans le SdC Agriculteur.

En ce qui concerne les produits phytosanitaires, il n'y a eu aucune réduction de charges pour les SdC Innovant de MS et PE (Figure 11). Pour CS, les charges ont légèrement diminué de 5 €/ha/an dans le SdC Innovant. Malgré l'augmentation des herbicides pour réguler la pression des adventices, l'intégration du soja dans la rotation a limité les charges de produits phytosanitaires dans le SdC Innovant. Pour CP, c'est l'inverse qui s'est réalisé. L'intégration d'un colza en 2019 dans le SdC Innovant a augmenté les charges de pesticides.

Pour synthétiser, l'implantation de couverts d'interculture et permanents, la diversification des couverts d'intercultures et l'association de culture ont augmenté les charges en semences pour l'ensemble des SdC Innovant. Les effets des SdC Innovants sur les charges d'engrais et de pesticides sont plus variables. Les charges d'engrais sont identiques (PE et CP) ou diminuent (MS et CS). Les charges de pesticides sont identiques (MS et PE), diminuent (CS) ou augmentent (CP). Lorsqu'on fait le bilan, les charges totales en intrants sont supérieures pour tous les SdC Innovants sauf pour MS (Tableau 8).

L'augmentation des charges de semences est un résultat cohérent puisque de nombreux couverts et associations de cultures ont été semés dans les SdC Innovants. Ces résultats ont aussi été observés dans d'autres travaux de recherches (Thomas 2006 ; Chambre d'agriculture de la Moselle 2021). Ces charges élevées peuvent être compensées par des économies de charges d'engrais, de produits phytosanitaires et/ou de charges de mécanisation (Thomas 2006), ce qui n'a pas été toujours observé dans ces essais.

Pour MS et CS, l'augmentation des charges en semences pour les couverts de légumineuse ont été compensé par une réduction d'apport. N. Néanmoins, les économies d'azote ne compensent pas totalement les charges supplémentaires de semences. En effet pour MS, les légumineuses ont généré 28 €/ha/an de charges en semences supplémentaires pour une économie de 18€/ha/an d'engrais. Pour CS, le couvert de légumineuses avant la culture maïs a généré 44€/ha de charges en semence supplémentaire pour une économie de 28 €/ha d'engrais.

Pour PE, les charges élevées en semences de luzerne n'ont pas été compensé car l'implantation n'a pas fonctionné et n'a donc pas conduit à réduire à terme les apports d'engrais et l'utilisation d'herbicides.

Pour PE, CP et CS, le semis à haute densité de seigle (4 à 5 fois supérieurs à la préconisation) a généré entre 207 à 264 €/ha de charges de semences. Ces charges élevées peuvent être compensées par les services agronomiques du couvert de seigle. En effet, le couvert seigle améliore la fertilité du sol (stimulation activité biologique, structure du sol, augmentation de la matière organique, diminution d'érosion et de la lixiviation des nitrates). Le couvert limite le développement des adventices durant l'interculture et durant la culture du soja lorsqu'il est roulé pour former un mulch. La concurrence pendant l'interculture et le mulch peut réduire totalement l'utilisation d'herbicide (Vincent-Caboud, 2020). Pour les SdC Innovant, le semis direct du soja sous couvert roulé de seigle n'a pas réduit l'usage d'herbicide à cause d'erreurs d'apprentissages (CP), de la sécheresse (CS) ou de freins psychologiques (PE). En cas de réussite, cette pratique Innovante réduit les charges d'herbicides et de mécanisation (passages de pulvérisateur). Nous avons calculé les économies (herbicides et passage du pulvérisateur) que pourraient éventuellement procurer cette technique pour la culture de soja dans les SdC Innovants de PE, CP et CS. En cas de réussite, cette pratique peut potentiellement réduire les charges liées aux traitements herbicides de 80€/ha, 86 €/ha et 136 €/ha

respectivement pour les SdC Innovant de PE, CP et CS. Ces économies ne compensent pas totalement les charges de semences mais permettent à terme d'améliorer la fertilité des sols et de limiter l'usage du glyphosate et des herbicides en semis direct.

Dans l'expérimentation, les charges supplémentaires en semences sont compensées ou pas fonction des pratiques. D'après les chercheurs de l'ISARA, les économies d'engrais et d'herbicide auraient pu être plus important dans les SdC Innovant. Certains agriculteurs pilotes n'ont pas voulu réduire davantage les doses par peur de diminuer le rendement bien que les pertes de rendement soient compensées financièrement par L'ISARA. Ces blocages « psychologiques » n'ont pas permis de réaliser davantage d'économies.

L'utilisation de semences de ferme peut être une solution pour diminuer les coûts des couverts et des associations de cultures. Par exemple, l'agriculteur pilote de PE a utilisé des semences de ferme de tournesol à 0.5 €/kg pour un couvert d'été. Cette stratégie diminue les charges de semences. Les couverts d'intercultures ont des effets à court terme mais surtout à long terme sur une l'exploitation (Venkateswarlu et al. 2007). Les couverts augmentent par exemple la matière organique ou limitent l'érosion. Ces effets positifs peuvent compenser l'augmentation des charges de semences sur le long terme.

4.1.3 Charges de mécanisation

Pour MS et PE, l'ensemble des charges de mécanisation (carburant, entretiens/locations, amortissement et frais financiers) sont inférieures dans le SdC Innovant (Figure 12). Cette diminution s'explique par la stratégie de méthanisation mise en place dans les SdC agriculteurs depuis 2019. La fauche, l'andainage et la récolte des couverts augmentent les charges de mécanisation. La différence de charges de mécanisation entre les SdC Agriculteur et Innovant n'est que de 95 et 65 €/ha/an respectivement pour MS et PE car la stratégie de méthanisation a été mise en place que depuis 2019.

Les charges de mécanisation sont identiques entre les deux SdC pour CS. Elles sont légèrement supérieures dans le SdC Innovant pour CP. Ces résultats sont étonnants, car l'ACS (notamment le semis direct), est réputé pour diminuer les charges de mécanisation (Labreuche 2007; Schaller, 2013). La réduction des charges de mécanisation est l'argument principal des agriculteurs pour convertir leurs SdC en ACS (Peschaud, 2018). Plusieurs éléments expliquent ce résultat.

Le Tableau 9 et le Tableau 10 comparent les charges de mécanisation pour l'implantation des couverts d'intercultures et des cultures de vente entre les SdC Agriculteurs et Innovants pour CP et CS. En fonction des cultures, les charges de mécanisation des SdC Innovants sont plus élevées ou plus faibles. Pour les cultures de maïs 2016, soja 2017 pour CP (Tableau 9) et de maïs 2018 pour CS (Tableau 10), les charges de mécanisations sont plus élevées dans le SdC Innovant par rapport au SdC Agriculteur. A l'inverse pour le maïs 2019 pour CP (Tableau 9) et le maïs/soja 2019 et blé 2020 pour CS (Tableau 10), les charges de mécanisation sont inférieures dans le SdC Innovant. L'implantation d'un couvert végétal génère des charges de mécanisation supplémentaires. De plus, les outils utilisés ont des charges de mécanisations importantes comme le strip-till (50€/ha) ou un semoir direct (44€/ha). Les charges de mécanisation de ces outils peuvent être plus importantes que ceux des SdC Agriculteurs (vibroculteur 14-16€/ha, déchaumeur 30€/ha, semis blé à la volée : 4€/ha). Les charges de mécanisation supplémentaires liées à l'implantation des couverts et le prix élevé des outils du SdC Innovant expliquent en partie l'augmentation des charges de mécanisations dans les SdC Innovants dans certaines situations notamment quand les stratégies originelles des agriculteurs sont de limiter leurs charges de mécanisation (matériels simples, rapides et peu nombreux). L'insertion de nouvelles cultures et de couverts végétaux nécessite d'investir dans des

Tableau 9 - Comparaison des charges de mécanisations de l'interculture et du semis entre les SdC de l'exploitation céréalières sol profond

	SdC Agriculteur	SdC Innovant
Mais 2016	Vibroculteur (16 €/ha) Semis maïs (38 €/ha) Cout total = 54 €/ha	Strip Till (43 €/ha) Semis maïs (32 €/ha) Cout total 75 €/ha
Soja 2017	Déchaumage (30 €/ha) Vibroculteur (16 €/ha) Semis soja (38€/ha) Roulage (28 €/ha) Cout total = 112 €/ha	Broyage x2 (30 €/ha*2) Semis direct seigle (44€/ha) Fertilisation couvert (5 €/ha) Roulage (destruction) (25€/ha) Semis soja (32€/ha) Roulage * 3 (27 €/ha* 3) Cout total = 247 €/ha
Blé 2018	Vibroculteur x2 (16 €/ha*2) Semis blé (35 €/ha) Cout total = 67 €/ha	Semis direct blé (44 €/ha) Cout total = 44 €/ha
Mais 2019 (agriculteur) Colza (innovant)	Déchaumage (30€) Vibroculteur x2 (16 *2) Déchaumage (30€/ha) Vibroculteur 16€/ha) Semis Maïs (32€/ha) Cout total 140 €/ha	Déchaumage (28 €/ha) Vibroculteur x2 (21 €/ha) Semis colza (44€/ha) Cout total 114 €/ha

Tableau 10 - Comparaison des charges de mécanisations de l'interculture et du semis entre les SdC de l'exploitation céréalières sol superficiel

	SdC agriculteur	SdC innovant
Maïs 2018	Déchaumage (32 €/ha) Chisel (30 €/ha) Vibroculteur x2 (14 €/ha * 2) Semis maïs (28€/ha) Cout total = 118 €/ha	Semis direct vesce + trèfle (40 €/ha) Déchaumage superficiel (35€/ha) Strip-till (50€/ha) Semis maïs (37 €/ha) Cout total = 162 €/ha
Maïs 2019 (agriculteur) ou Soja 2019 (innovant)	Déchaumage (32€/ha) Chisel (30€/ha) Vibroculteur x2 (14 €/ha*2) Semis maïs (28€/ha) Cout total = 118 €/ha	Semis direct seigle (40€/ha) Herbicide (7€/ha) Semis direct soja (39€/ha) Cout total = 86 €/ha
Blé 2020	Broyage (31 €/ha) Chisel (30 €/ha) Semis à la volé blé (4€/ha) Vibroculteur (14€/ha) Roulage (9 €/ha) Cout total = 88 €/ha	Semis direct blé (39 €/ha) Roulage (12 €/ha) Cout total= 51€/ha

matériels diversifiés et souvent coûteux par rapport aux SdC des agriculteurs basés sur une rotation peu diversifiée et des itinéraires techniques en TCSL.

L'arrêt du travail du sol dans le SdC Innovant a augmenté la pression des adventices par rapport au SdC Agriculteur pour les exploitations CS et CP. Pour CS, l'agriculteur pilote a décidé de diminuer la pression des adventices en réalisant 3 passages de désherbages chimiques supplémentaires par rapport au SdC Agriculteur. Les charges de mécanisation d'un traitement phytosanitaires sont faibles (7 €/ha), ces traitements n'augmentent pas beaucoup les charges de mécanisation du SdC Innovant. Pour CP, l'agriculteur pilote ne voulait pas utiliser de glyphosate. Il a décidé de réaliser un déchaumage (28 €/ha) et deux passages de vibroculteur (21€/ha x 2) après 2 ans de semis direct sans glyphosate. Cette stratégie est plus coûteuse en charges de mécanisation que le désherbage chimique. Ce travail du sol explique en partie l'augmentation des charges de mécanisation du SdC Innovant de CP. Ces passages supplémentaires d'outils en raison du développement des adventices n'étaient pas prévus et reflètent encore une fois un manque de maîtrise technique d'un SdC conduit en semis direct. Tourdonnet et al. (2013) expliquent que la conversion en ACS peut s'accompagner d'échecs en partie liés à ce type d'erreurs d'apprentissage. Ces échecs nécessitent des solutions de rattrapage comme l'usage de produits phytosanitaires ou le retour au travail du sol ce qui diminue la rentabilité économique du SdC. C'est exactement ce qui s'est passé pour les SdC Innovants de CP et CS. Avec l'apprentissage de ces nouvelles pratiques il est probable que les agriculteurs pilotes ne feront plus ces erreurs dans le futur. Néanmoins, lors de la transition d'un SdC en semis direct, ces erreurs peuvent fragiliser les performances économiques d'une exploitation et remettre en cause cette stratégie.

L'indicateur « charges de mécanisation » évalue les performances à l'échelle de la rotation. Or, les pratiques des SdC Innovants peuvent diminuer les charges de mécanisation sur le long terme. En effet dans les SdC Innovants les tracteurs sont moins utilisés chaque année. Par exemple, pour CS, le tracteur JD 140 CV est utilisé 148 ha en moins/an dans le SdC Innovant par rapport au SdC Agriculteur. Ainsi sur 10 ans, le tracteur JD 140 CV est utilisé sur 1 148 hectares de moins dans le SdC Innovant par rapport au SdC agriculteur. Le tracteur JD 140 CV sera moins usé ce qui permettra de le garder plus longtemps ou bien le vendre à un meilleur prix. De plus la manière dont est utilisée le tracteur est différente entre les SdC Agriculteurs et Innovants. Les opérations culturales en ACS demandent moins de puissance, car le sol n'est pas travaillé. L'utilisation des tracteurs est moins intensive dans les SdC Innovants. ce qui limite leur usure (Thomas, 2006). L'effet de l'ACS sur les charges de mécanisation peuvent donc être mesurée à court terme mais aussi à long terme si on intègre la plus faible utilisation des outils ce qui limite les charges de réparations et d'amortissements. Ces effets à long terme ne sont pas pris en compte dans cette étude.

Pour synthétiser, les charges de mécanisations sont inférieures dans les SdC Innovants de MS et PE. Cette diminution n'est pas la conséquence des pratiques innovantes mais plutôt de la stratégie méthanisation dans les SdC Agriculteurs depuis 2019. Pour CP et CS, les SdC Innovants n'ont pas réduit les charges de mécanisation en raison d'échecs des stratégies mises en œuvre (apprentissage), des coûts d'implantation des couverts végétaux peu ou pas présents dans les SdC Agriculteurs et du coût important des outils innovants par rapport aux stratégies de « moindre coût de mécanisation » mises en place dans certains des SdC Agriculteurs.

Le Tableau 8 compare les charges de mécanisation des SdC Innovants par rapport aux références nationales d'exploitations céréalières. Pour MS, les charges de mécanisations sont logiquement supérieures aux références car l'exploitation utilise beaucoup de matériel et travaille le sol pour produire du maïs semence. Les charges de mécanisation sont supérieures de 25 €/ha pour PE. Ces résultats sont surprenants car le SdC Innovant est en semis direct. De

plus, l'agriculteur pilote est expérimenté dans le semis direct. Ce résultat s'explique pour deux raisons. Premièrement l'exploitation possède du matériel onéreux. Par exemple, les charges de mécanisation d'un semis direct de céréales avec le tracteur 230 CV et le semoir direct de 8 mètres est de 75 €/ha ce qui est élevé. Le matériel onéreux augmente les charges de mécanisation de PE. Ce matériel onéreux génère des avantages fiscaux mais ils ne sont pas pris en compte dans les calculs. Ce choix d'investissement s'explique par la taille importante de l'exploitation qui recherche en retour des débits de chantiers élevés. Deuxièmement, l'exploitation a une stratégie de traitements phytosanitaires particulière. L'agriculteur pilote fait le choix de réaliser beaucoup de traitements phytosanitaires à faibles doses. Par exemple pour le blé 2018, il a réalisé 10 passages de traitement phytosanitaires. La moyenne régionale est de 2 à 3 passages sur le blé (Agréste 2021). Ces nombreux passages augmentent les charges de mécanisation. L'agriculteur pilote choisit des interventions très précoces sur les adventices (stratégies « pointes vertes ») avec des doses réduites mais multiplie les interventions pour maîtriser leur développement. D'un point de vue économique, cette pratique n'est pas performante.

Pour CS, les charges de mécanisation du SdC Innovant sont inférieures aux références nationales. Pour CP, les charges de mécanisations sont comparables aux références régionales. Sans les erreurs d'apprentissages et la stratégie 0 glyphosate, les charges de mécanisations seraient probablement inférieures.

4.1.4 Marge directe

La marge directe est l'indicateur qui synthétise les performances économiques des SdC. L'ensemble des SdC Innovants ont une marge directe nettement inférieure par rapport aux SdC Agriculteurs.

Pour les exploitations CP et CS, la diminution des rendements, l'augmentation des charges en intrants (semences) et l'effet nul des pratiques innovantes sur les charges de mécanisation, expliquent cette forte diminution de la marge directe. La diminution de la marge directe provoque respectivement une perte de revenu en moyenne de 259 €/ha/an et 162 €/ha/an pour CP et CS. Au vu de ces résultats, les SdC Innovants des exploitations CP et CS ne sont pas viables économiquement. Ces résultats contredisent différentes publications (Schaller, 2013; Thomas, 2006) qui affirment que l'ACS améliore les marges économiques. La baisse de rendement n'a pas été compensée par une baisse des coûts de production. En revanche ces résultats sont similaires à ceux observé par Graubner et Ray (2019).

Les exploitations MS et PE valorisent leurs couverts végétaux et résidus de cultures pour la méthanisation au prix de 25 €/tonne de matière fraîche. Pour le SdC Innovant de PE, les rendements faibles et les charges élevées en intrants couplés à l'absence de méthanisation ont pour conséquence de diminuer en moyenne la marge directe 201 €/ha/an par rapport au SdC Agriculteur.

Pour l'exploitation MS, les rendements sont quasiment identiques entre les deux SdC à l'échelle de la rotation. Le chiffre d'affaire hors méthaniseur du SdC Innovant est pourtant inférieur de 45€/ha/an à cause de la variation des prix de vente. Les charges en intrants et de mécanisation ont augmenté dans SdC Agriculteur avec la stratégie de méthanisation. La valorisation des couverts avec la méthanisation augmente le chiffre d'affaires du SdC agriculteur.

Les écarts de marge directe ne sont pas très importants entre les SdC MS. Dans le SdC Innovant, la marge directe est en moyenne légèrement inférieure de 48 €/ha/an par rapport au SdC Agriculteur. Au vu de ces résultats, il est légitime de s'interroger sur la rentabilité de l'activité méthanisation. Il semblerait que l'écart de marge directe soit principalement la conséquence du chiffre d'affaire hors méthaniseur plus élevée à cause de la variation des prix de vente (+45€/ha/an). Le Tableau 11 compare les charges et les produits de l'atelier méthanisation du SdC Agriculteur MS. En 2019, l'activité est déficitaire de -55 €/ha. Les charges de mécanisation sont supérieures aux produits. Les opérations de récoltes de couverts sont onéreuses (189 €/ha). Afin de couvrir ces charges le couvert d'interculture doit produire au minimum 7.56 t/ha de matière fraîche (25€/t x 7.56 t/ha = 189 €/ha). En 2019, les agriculteurs ont décidé de récolter les cannes de maïs (5 t/ha) ce qui n'a pas permis de couvrir les coûts de récolte. En 2020, la production de biomasse était supérieure ce qui a permis d'obtenir un bénéfice de 78 €/ha/an.

L'ensemble des charges et des chiffres d'affaires ne sont pas pris en compte dans le calcul du Tableau 11. Les charges de transport de la parcelle jusqu'au méthaniseur et les économies de fertilisant avec le digestat ne sont pas pris en compte dans ce calcul. Il manque du recul pour observer les effets à long terme du méthaniseur sur les performances économiques de ces 2 exploitations.

L'analyse des rendements, des charges d'intrants, des charges de mécanisation et de la marge directe nous permettent d'affirmer que l'hypothèse H1 est fautive. Les SdC Innovants n'améliorent pas la marge économique des exploitations dans le projet collectif sol. Les principales raisons que nous pouvons évoquer sont :

- Diminution des rendements à cause des erreurs d'apprentissage, d'échecs techniques et du salissement des parcelles.
- Augmentation des charges de semences à cause la stratégie de couverture permanente du sol et de la diversification des cultures.
- L'effet nul des SdC Innovants sur les charges de mécanisation à cause des erreurs d'apprentissage, de l'implantation des couverts, du matériel onéreux et des charges de mécanisation initialement faibles dans les SdC Agriculteurs.

4.1.5 Le temps de travail

Le temps de travail des SdC Innovants est inférieur pour MS, PE et CS et supérieur pour CP par rapport aux systèmes agriculteurs.

Pour MS et PE, ce n'est pas le SdC Innovant qui a réduit le temps de travail mais plutôt la stratégie méthanisation qui l'a augmenté dans le SdC Agriculteur. Pour CP, le temps de travail est supérieur dans le SdC Innovant à cause des erreurs d'apprentissages de l'agriculteur pilote sur le soja 2017 (2 broyages et 3 roulages). Une simulation sans ces erreurs d'apprentissage a été réalisée sur Systemre® afin de déterminer le temps de travail lorsque le SdC sera maîtrisé par l'agriculteur. Sans les erreurs d'apprentissage, le temps de travail du SdC est 2.44 h/ha/an. Il est légèrement inférieur au SdC agriculteur. L'absence de la stratégie sans glyphosate pour CP aurait aussi permis de diminuer le temps de travail en remplaçant le travail du sol en 2019 (1h/ha) par un traitement phytosanitaire (6 minutes/ha). Pour CS et CP sans les erreurs d'apprentissages, les pratiques innovantes réduisent le temps de travail de l'exploitant.

Le Tableau 8 compare le temps de travail entre les SdC Innovants et les références nationales. Pour MS, le temps de travail est nettement supérieur, car la production de maïs semence demande beaucoup d'opérations culturales. La différence serait encore plus

Tableau 11- Performances économiques de l'atelier méthanisation du SdC agriculteur de l'exploitation PE.

Année	Charges (€/ha)	Chiffres d'affaires (€/ha)	Marge (€/ha)
2019	Deux récoltes = 345	Vente 11,6 T = 290	-55
2020	Une récolte = 189 Irrigation = 30 Engrais = 70	Vente 15.9T = 397.5	+78.5

importante si les opérations manuelles de castration étaient prises en compte. Pour PE, CP et CS le temps de travail est nettement inférieur aux références nationales.

Ces résultats sont en accord avec les différents travaux de recherche (Arvalis 2019 ;, Labreuche, 2007). De Tourdonnet et al. (2013) expliquent que la réduction du temps de travail est constatée dans la plupart des cas dans une transition vers l'ACS. Cette hypothèse est à prendre avec du recul, car nous avons vu dans l'exploitation CP que des erreurs d'apprentissage et la pression des adventices augmentent le temps de travail par rapport au SdC Agriculteur. Par ailleurs un changement de rotation, l'insertion de cultures plus exigeantes en termes de suivis (colza), l'implantation des couverts et le temps d'observation des cultures et des états des parcelles peuvent entraîner une augmentation du temps de travail et susciter également du stress pour les agriculteurs peu habitués à ces nouvelles techniques de production.

Il est intéressant de noter que le temps de travail à l'hectare est supérieur pour PE par rapport à CS et CP alors que l'exploitation possède du matériel plus performant notamment le semoir direct de 8 mètres. Le temps de travail supérieur pour PE s'explique par la stratégie de multiplication des traitements phytosanitaires à faibles doses de l'agriculteur pilote.

Au vu de ces résultats, l'hypothèse H2 est partiellement vérifiée. Le passage d'une stratégie TCSL sans recours systématiques aux couverts végétaux à une stratégie semis direct avec couverture végétale permanente permet de limiter le temps de travail (exemple des exploitations CS et CP). Néanmoins, en cas d'erreurs d'apprentissage ou d'échecs techniques (pression des adventices), comme pour le SdC Innovant de CP, le temps de travail peut aussi augmenter. Les résultats obtenus sur les exploitations MS et PE ne permettent pas de répondre cette hypothèse car le temps de travail est inférieur dans les SdC Innovants à cause de la stratégie méthanisation mise en place dans les SdC Agriculteurs.

4.1.6 Niveau d'IFT

Pour MS et PE, les SdC Innovants n'ont eu aucun effet sur le niveau d'IFT. Les agriculteurs n'ont pas modifié leurs stratégies de traitements phytosanitaires.

Pour les exploitations CP et CS, les IFT sont inférieurs dans les SdC Innovants. Pour CS, l'arrêt du travail du sol dans le SdC innovant a augmenté la pression des adventices. L'agriculteur pilote a alors décidé de réaliser un traitement herbicide supplémentaire en 2017, 2018 et 2019. Malgré cette augmentation, le niveau d'IFT herbicide à l'échelle de la rotation du SdC Innovant (1.8 IFT/ha) est inférieur à celui du SdC Agriculteur (2 IFT/ha) (Figure 13). En 2019, l'agriculteur pilote a utilisé moins d'herbicides pour le soja du SdC Innovant (1.5) que pour le maïs du SdC agriculteur (2.89). De plus, les semences de soja ne sont pas traitées contrairement à celles du maïs. C'est pour ces raisons que l'IFT du SdC Innovant est inférieur à celui du SdC Agriculteur.

Pour CP, l'arrêt du travail du sol dans le SdC Innovant a augmenté la pression des adventices. Cette forte pression n'apparaît pas dans les IFT car l'agriculteur a décidé de désherber mécaniquement (réalisation de faux semis). L'intégration de la culture de colza en 2019 dans le SdC Innovant a diminué le niveau d'IFT par rapport à la culture de maïs du SdC agriculteur. Cette observation est étonnante car le colza est une culture sensible aux bioagresseurs. Les références régionales d'IFT sont de 5 pour le colza et de 3.1 pour le maïs (Agreste 2021). L'agriculteur pilote n'a pas traité les semences et n'a pas réalisé d'insecticides sur le colza. C'est pour ces raisons que l'IFT est inférieur dans le SdC Innovant. Ces résultats sont à prendre avec précaution car le colza a gelé 2019. Nous avons pris le programme de traitement de l'agriculteur pilote qu'il avait réalisé l'année précédente sur la bande innovante N+1. Cependant, les leviers mobilisés (semis précoce et associé pour éviter un traitement

insecticide en automne et mélange de semences précoces et tardives de colza pour l'évitement des méligèthes) semblent être prometteurs pour réduire les IFT de cette culture.

Dans l'ensemble, les SdC Innovants ont peu modifié le niveau d'IFT des exploitations. La diversification de la rotation et les associations de culture sont les leviers principaux qui ont permis de diminuer le niveau d'IFT dans les exploitations CS et CP. Les essais de semis direct sans herbicides du soja sous couvert de seigle roulé n'ont pas été concluants. Un mauvais développement du seigle (CS), le stade de destruction du seigle par roulage et le sens du roulage non respectés (CP) ou encore la crainte de se faire dépasser par les adventices (PE) sont autant d'éléments qui expliquent que les agriculteurs ont eu recours à des herbicides pendant la culture de soja. La maîtrise de cette technique permettrait d'éviter toute utilisation d'herbicides pour cette culture (Vincent-Caboud, 2020).

Le Tableau 12 compare les niveaux d'IFT des SdC Innovants par rapport aux références de la région Auvergne-Rhône-Alpes (Agreste 2021). La comparaison est à l'échelle de la culture. Pour PE, le niveau d'herbicide est nettement plus élevé par rapport aux références. L'agriculteur réalise beaucoup de traitements à faibles doses. Cependant, l'addition de l'ensemble des traitements conduit à un IFT élevé. De plus, l'agriculteur pilote est en semis direct depuis plus de 10 ans. L'absence de travail du sol a tendance à favoriser les populations de limaces (Guerin 2017). L'agriculteur pilote est lui aussi concerné par la pression des limaces. Il réalise en moyenne des traitements Molluscicides à 0.92 IFT/ha/an (Annexe 2). Pour CP et CS, les niveaux d'IFT sont inférieurs aux références régionales. Pour MS, il n'y a pas de références pour le maïs semence mais pour le blé, le niveau d'IFT est plus faible.

A partir de ces éléments, nous pouvons répondre à l'hypothèse H4. Pour MS et PE, les SdC Innovants n'ont eu aucun effet sur la pression des adventices, car les SdC Agriculteurs et Innovants sont proches. La stratégie de traitement est alors identique entre les SdC. Il est difficile de répondre à la problématique H4 avec le résultat des SdC Innovants de MS et PE. Pour CP et CS, la pression des adventices a augmenté dans les SdC Innovants. Cette augmentation est probablement dû à l'arrêt du travail du sol, à l'échec du semis direct de soja sous couvert roulé de seigle. Pour CP, l'agriculteur pilote a décidé de retravailler le sol. Il n'a pas utilisé davantage d'herbicides. Pour CS l'agriculteur pilote a réalisé 3 herbicides supplémentaires.

L'hypothèse H3 est alors partiellement confirmée. Les SdC Innovants de CP et CS ont augmenté la pression des adventices. Cependant cette augmentation ne se traduit pas forcément par une augmentation des herbicides car il est aussi possible qu'un agriculteur décide de retravailler le sol. De plus pour CS, l'agriculteur a réalisé 3 traitements supplémentaires dans le SdC Innovant mais à l'échelle de la rotation, les IFT herbicides sont supérieurs dans le SdC Agriculteur. La diversification de la rotation a permis de diminuer l'utilisation d'herbicides.

4.2 Les performances environnementales

4.2.1 Emissions de GES

Les SdC Innovants des exploitations MS et CS émettent moins de GES que les SdC Agriculteurs tandis que les émissions de GES sont similaires pour les SdC de PE et CP.

Les engrais azotés sont les principaux facteurs d'émission de GES dans les exploitations car une quantité importante de GES est émise lors de leur fabrication et ensuite lors de leur

Tableau 12 - Tableau de comparaison du niveau d'IFT/ha des cultures des SdC Innovants par rapport aux références de la région Auvergne-Rhône-Alpes

		SdC Innovant	Références Agreste Auvergne Rhône Alpes *
MS	Blé	2,91	3,2
PE	Mais 2016	4,9 (dont 0,5 interculture)	3,1
	Soja 2017	3 (dont 0,7 interculture)	2,1
	Blé 2018	6 (dont 0,27 interculture)	3,2
	Colza 2019	5,9 (dont 0,38 interculture)	5
	Soja 2020	4,3 (dont 2,47 interculture)	2,1
CP	Mais 2016	2,96	3,1
	Soja 2017	1,07	2,1
	Blé 2018	1,89	3,2
	Colza 2019	2	5
CS	Mais 2018	2,8	3,1
	Soja 2019	1,46 (dont 0,5 interculture)	2,1
	Blé 2020	3,1	3,2

*Ces références sont issues des enquêtes de pratiques culturales en grandes cultures en 2017 dans la région Auvergne Rhône Alpes (Agreste 2021)

utilisation au champ (nitrification/dénitrification). C'est la réduction des apports d'azote minéraux qui a permis de réduire les émissions de GES pour les SdC Innovants de MS et GS.

Les opérations culturales et la réduction du travail sol impactent dans une moindre mesure les émissions de GES (Figure 14). Par exemple pour CS, l'arrêt du travail du sol a permis de diminuer les émissions de GES de 70 kg eqCO₂/ha/an par rapport au SdC Agriculteur.

Pour PE et CP, les émissions de GES sont équivalentes entre les SdC car il n'y a pas eu de réductions d'apports d'azote. Pour le PE, les couverts ont été récoltés qu'une seule fois dans le SdC Agriculteur. A l'échelle de la rotation, la différence d'émissions de GES est alors faible. Si la stratégie de méthanisation était en place depuis 2016, les écarts d'émissions de GES seraient plus conséquents pour le SdC agriculteur (opérations de fauchage et andainage et apports de fertilisants sur les couverts). Cependant à terme, le retour des digestats au sol permettra de réduire les quantités d'engrais azotés de synthèse achetés. C'est en tout cas l'objectif annoncé des exploitations MS et PE qui visent une réduction de 30% de leurs achats d'engrais minéraux azotés.

Le Tableau 8 compare les émissions des SdC par rapport aux références nationales. Pour MS et PE, les émissions de GES sont nettement supérieures par rapport aux références. Les émissions de CP sont similaires aux références tandis que celles de CS sont inférieures.

La quantité de carbone stockée dans le sol n'est pas pris en compte dans le calcul de Systerre®. Il est probable que la combinaison des pratiques innovantes (semis direct et couverture du sol) stocke davantage de carbone que les SdC Agriculteurs ce qui compenserait les émissions des SdC Innovants. Néanmoins, nous avons vu que les rendements des SdC Innovants étaient inférieurs au SdC Agriculteur. Les cultures du SdC Innovant fixent peut-être alors moins de carbone. De plus, nous avons vu dans *la partie 1.2.2* que les phénomènes de nitrification/dénitrification étaient plus importants en ACS à cause de la présence d'un mulch et de l'absence de labour. Cette question reste ouverte et les résultats des expérimentations dans la littérature sont contradictoires.

4.2.2 Consommation énergie primaire

La consommation d'énergie primaire a diminué dans l'ensemble les SdC Innovants (Figure 15). Cette diminution s'explique par la réduction des apports d'azote (MS et CS) et la réduction de consommation de carburant (MS, PE et CS). Pour CP, la consommation de carburant n'a pas diminué à cause des erreurs d'apprentissages.

Le Tableau 8 compare la consommation d'énergie primaire des SdC par rapport aux références nationales. Pour MS, le SdC Innovant consomme nettement plus d'énergie primaire par rapport aux références. Ce résultat s'explique par l'irrigation intensive des maïs semence qui consomme beaucoup d'électricité pour pomper l'eau. La consommation d'énergie primaire est équivalente aux références pour le SdC Innovant de PE et CP et inférieure aux références pour CS.

L'hypothèse H4 est dans l'ensemble vérifiée. Les SdC Innovants réduisent les émissions de GES (sauf pour (CP) et la consommation d'énergie primaire. Le principal levier qui permet de diminuer les émissions de GES et la consommation d'énergie primaire est la réduction des apports d'azote grâce aux couverts d'interculture de légumineuses et l'intégration de légumineuses à graines dans la rotation (soja). La réduction du travail du sol diminue dans une moindre mesure les émissions de GES et la consommation d'énergie primaire. Pour CP, les

émissions de GES ne sont pas réduites dans le SdC Innovant à cause des erreurs d'apprentissages et des échecs techniques.

4.2.3 Pertes des pesticides

Les SdC Innovants de PE et CP ont un risque de perte plus faible que MS et CS. Cet écart s'explique en partie par les caractéristiques des parcelles de l'expérimentation (Annexe 6). Les parcelles de PE et CS ont un sol profond et sont entourées par des bandes enherbées. Ces facteurs limitent le risque de pertes des eaux par rapport à MS et CS (sol peu profond et aucune bande enherbée). Le sol de CP possède un taux de matière organique élevé (5,5%) ce qui limite également le risque de transferts de pesticides (Bockstaller, Girardin 2008).

Néanmoins, l'ensemble des SdC Innovants ont un risque élevé de pertes de produits phytosanitaires vers les eaux souterraines et superficielles (Iphy eso et Iphy su < 7). Ce sont principalement les traitements herbicides en pré ou post levé qui augmentent le risque de perte de produits phytosanitaires dans les eaux. Les substances actives qui présentent le plus grand risque de transfert vers les eaux souterraines et superficielles dans les SdC Innovants sont le S-Métolachlore pour le maïs, le chlorturon pour le blé, le métazochlore pour le colza et le bentazone pour le soja.

Le S-Métolachlore, le chlorturon et le métazochlore ont le même mode d'action. Ces matières actives sont appliquées en pré ou post levée sur les cultures. Ces matières actives se dissolvent dans la solution du sol puis elles sont absorbées par les racines des adventices. Ces molécules sont très mobiles dans la solution du sol ce qui leur permet d'atteindre les racines des adventices. En revanche, cette mobilité est aussi responsable de leur risque élevé de lessivage dans les eaux souterraines et superficielles. Le bentazone est un herbicide de contact utilisé en pré-levé. Cette molécule est très lessivable dans les eaux souterraines. Ces molécules sont souvent détectées dans les analyses d'eau d'Auvergne Rhône Alpes (Fredon 2019).

Il y a d'autres substances actives qui augmentent le risque de perte vers les eaux dans les SdC Innovants, mais ces molécules ont un risque plus faible et elles sont moins utilisées. Ces substances actives sont décrites dans le Tableau 13. Il est intéressant de noter que le glyphosate possède un faible risque de transfert dans les eaux dans les SdC Innovants. En moyenne, le glyphosate possède une note Iphy eso de 8,8 et une note Iphy su de 8,6. L'utilisation d'autres substances actives avec un risque plus faible de perte peut être une solution pour diminuer le risque de pertes vers les eaux. En cas de réussite, les pratiques de semis direct sous couvert roulé et l'implantation de couverts permanents sont aussi de bonnes alternatives. Ces techniques peuvent limiter l'usage d'herbicides en pré ou post levé. Les herbicides de contact sont moins susceptibles d'être transférés dans les eaux, car ils ne se sont pas appliqués directement sur le sol mais sur la végétation.

Les SdC Innovants ont peu d'effets sur le risque de perte de produits phytosanitaires. Les indicateurs Iphy sont peu sensibles à l'effet de la réduction du travail du sol car nous avons vu dans *la partie 1.2* que le travail du sol impacte dans une moindre mesure le transfert des pesticides dans les eaux.

Les SdC Innovants de MS et PE n'ont pas modifié le risque de perte de produits phytosanitaires vers les eaux par rapport aux SdC Agriculteurs. Pour CP, le risque de perte des pesticides vers les eaux de surface est identique entre les SdC mais le risque de perte des pesticides vers les eaux souterraines est supérieur dans le SdC Innovant. L'utilisation du métazochlore pour le colza 2019 du SdC Innovant explique ce résultat (non utilisé dans le SdC agriculteur sur maïs). Pour CS, le risque de perte de pesticides par les eaux souterraines est identique entre les SdC mais inférieur dans le SdC Innovant vis-à-vis des eaux superficielles.

Tableau 13 - Les principales matières actives qui ont un risque élevé d'être transféré dans les eaux pour les SdC Innovants

Pertes eaux souterraines	Pertes eaux superficielles
<p>S-Métolachlore Chlorturon Métazochlore Bentazone Bénoxacor Prochloraze</p>	<p>S-Métolachlore Chlorturon Métazochlore Dimethenamid-p Diflufenicanil Prochloraze Terbutylazine</p>

La culture de soja en 2019 dans le SdC Innovant a permis de ne pas utiliser de S-Métolachlore contrairement au maïs 2019 du SdC Agriculteur.

4.2.4 Pertes des nitrates

Les SdC étudiés n'atteignent pas la « haute performance azotée » telle que définie dans le Casdar AgroEcoSyst'N. En effet, les pertes moyennes de nitrates vers les eaux souterraines des SdC étudiés dépassent largement le seuil de 10 kgN/100 mm d'eau drainée. Ce seuil a été fixé afin de respecter le seuil de potabilité des eaux souterraines (50 mgNO₃⁻/l). De très faibles différences entre les SdC Agriculteurs et Innovants ressortent ; ces différences restant dans la variabilité et l'incertitude des mesures et modélisations réalisées. On peut toutefois noter que l'insertion de couverts végétaux pendant les intercultures longues (CP et CS) ainsi que la réduction des doses d'azote minéral (effet des légumineuses dans les couverts et de l'insertion d'un soja dans la rotation – CS) ont permis de réduire les pertes d'azote vers les eaux souterraines dans les SdC innovants CP et CS. Le SdC Innovant de CP se rapprochant du seuil de potabilité des eaux, il présente des pertes moyennes à l'échelle du SdC de 11 kgN/100 mm d'eau drainée. Les leviers mobilisés dans le SdC Innovant de PE n'ayant pas fonctionné, il n'y a pas de différences de pertes avec le SdC agriculteur. Il est toutefois intéressant de noter que bien que l'exploitant PE ait une bonne maîtrise technique de ses SdC conduits en ACS (plus de 10 ans d'expérience), les SdC présentent des pertes de nitrates importantes (25 kgN/100 mm d'eau drainée).

Les SdC des exploitations PE, CP et CS ont finalement les mêmes périodes de sensibilité accrue aux pertes d'azote par lixiviation : lors des intercultures longues et lors de la phase soja-blé. Les risques de transferts d'azote au cours des intercultures longues sont limités par la présence de couverts végétaux dans les SdC innovants par rapport aux SdC agriculteurs pour CP et CS. Cependant, lors d'automne pluvieux ou en raison d'un semis tardif du couvert (ex. du seigle), des pertes de nitrates surviennent tout de même. C'est particulièrement le cas pour PE pour l'interculture colza-soja ; l'apport de fumier avant le colza génère des reliquats post-récoltes élevés ce qui occasionne des pertes d'azote par lixiviation automnale malgré la présence d'un couvert au fort développement. Ces pertes peuvent être renforcées dans le SdC agriculteur ou un premier couvert est semé tôt (fin juillet) et récolté en octobre avant le semis d'un second couvert. Le développement de ce second couvert est plus lent ce qui peut occasionner des pertes hivernales. Enfin, on note un point commun à tous les SdC étudiés, quel que soit le type de sol ou l'année climatique considéré. Des pertes importantes d'azote par lixiviation sont modélisées sous la culture de blé ayant comme précédent un soja. L'effet précédent du soja (reliquats post-récolte et minéralisation des résidus de récolte) est en partie lixivié lors d'automne pluvieux en raison des faibles besoins en azote du blé au cours de ses premiers mois de développement.

Les SdC de l'exploitation MS présentent également de forts risques de transferts de nitrates vers les eaux souterraines. Nous n'avons pas pu modéliser ces SdC avec l'outil Syst'N® mais le suivi des reliquats et de l'absorption de l'azote par les cultures et les couverts végétaux montrent des quantités d'azote en jeu importantes (souvent plus de 50 kgN/ha potentiellement lixiviables au cours de l'automne). La principale raison est liée à la culture du maïs semence qui laisse des reliquats azotés post-récolte très élevés. La présence d'un couvert végétal semé après la récolte du maïs semence ne suffit pas à capter l'azote accumulé dans le profil de sol, d'autant plus que le sol de l'essai est particulièrement filtrant. Ces risques sont accentués si la

culture suivante est un blé car les agriculteurs apportent souvent en plus du lisier à l'automne. Les suivis réalisés ont convaincu les agriculteurs de décaler au printemps ces apports de lisier.

L'association du maïs semence avec des plantes de services (ray-grass pour le SdC agriculteur, et ray-grass, trèfle et vesce pour le SdC innovant) permettent de limiter ces risques de pertes en immobilisant une partie des reliquats post-récolte en cours de culture. Le maïs semence, au contraire du maïs grain, laisse passer de la lumière dans les inter-rangs et ainsi les couverts se développer (les rangs mâles sont broyés ce qui facilite la pénétration de la lumière). Les années où cette association a fonctionné (2016, 2017 sur la bande n+1 non simulée dans cette étude), les quantités d'azote à la récolte du maïs semence sont diminuées ainsi que les risques de transfert vers les eaux souterraines. Cependant, en raison d'un développement trop important de liserons ces 2 dernières années, les agriculteurs n'ont pas pu mettre en place cette association (utilisation d'un herbicide anti-racinaire, incompatible avec le développement des couverts). Enfin, l'insertion de légumineuses dans le SdC innovant a bien permis de réduire les doses d'azote minéral dans le SdC innovant mais cette réduction ne permet pas réellement de réduire les risques de transferts. Les quantités d'azote en jeu sont trop importantes, particulièrement pour le maïs semence, et les apports de lisier à l'automne contrebalancent ces réductions de dose.

Au vu des très faibles différences qu'il existe entre les SdC Innovants et Agriculteurs, l'hypothèse H5 n'est pas vérifiée. Les SdC Innovants ne diminuent pas les pertes d'azotes par lixiviation.

Conclusion :

La problématique était de déterminer dans quelle mesure la mise en place de SdC Innovants inspirés des principes de l'ACS modifie les performances technico-économiques et environnementales des exploitations des agriculteurs pilotes du territoire de la Boucle du Rhône en Dauphiné. Les effets des SdC Innovants sur les performances des exploitations sont synthétisés dans la Figure 16 ,17, 18 et 19.

Les rendements ont diminué dans les SdC Innovants ce qui a diminué les chiffres d'affaires (sauf pour MS). Cette baisse de rendement peut s'expliquer par le manque de maîtrise techniques des agriculteurs pilotes et par l'augmentation de la pression des adventices dans certaines situations. Par ailleurs, l'implantation de couverts d'interculture diversifiés et permanents a augmenté les charges en semences pour l'ensemble des SdC Innovants. Par conséquent, les charges en intrants sont supérieures dans les SdC Innovants par rapport aux SdC Agriculteurs (sauf pour MS). Cette augmentation des charges de semences peut être plus ou moins compensée par des réductions d'apports d'engrais azotés dans certaines situations. C'est le cas notamment des SdC innovants de MS et CS où l'intégration de légumineuses a permis de réduire les charges d'engrais azotés. Cette diminution des apports d'azote permet aussi de réduire nettement les émissions de GES et la consommation d'énergie primaire des SdC Innovants. D'après les résultats de l'expérimentation, cette pratique est fiable et facile à mettre en œuvre. Elle dépend essentiellement du bon développement des légumineuses et présente peu de risques économiques.

Les effets du semis direct de soja sans herbicide sous couvert de seigle roulé (PE, CS et CP) et de l'implantation d'un couvert permanent de luzerne (PE) sont plus négatifs sur les performances économiques des SdC Innovants. Ces pratiques ont échoué pour des raisons de maîtrise technique, d'aléas climatique ou de « barrière psychologique » chez les agriculteurs

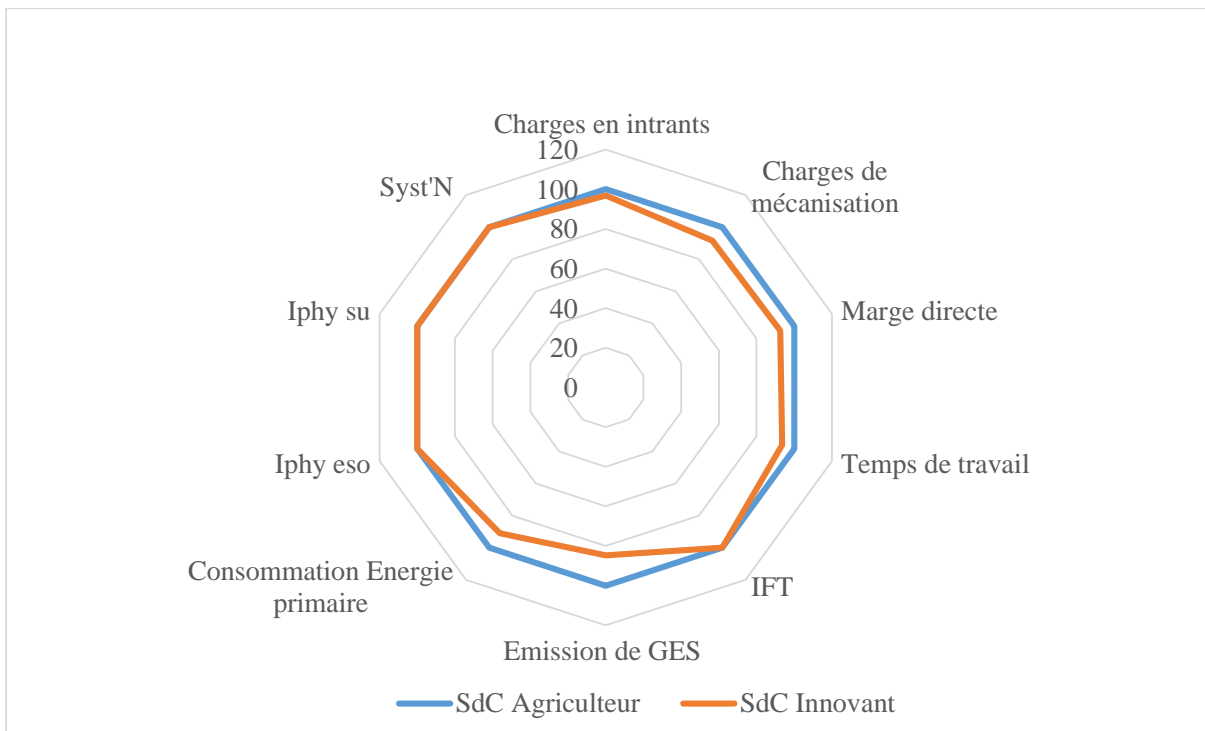


Figure 16 - Schéma de synthèse des performances des SdC de MS

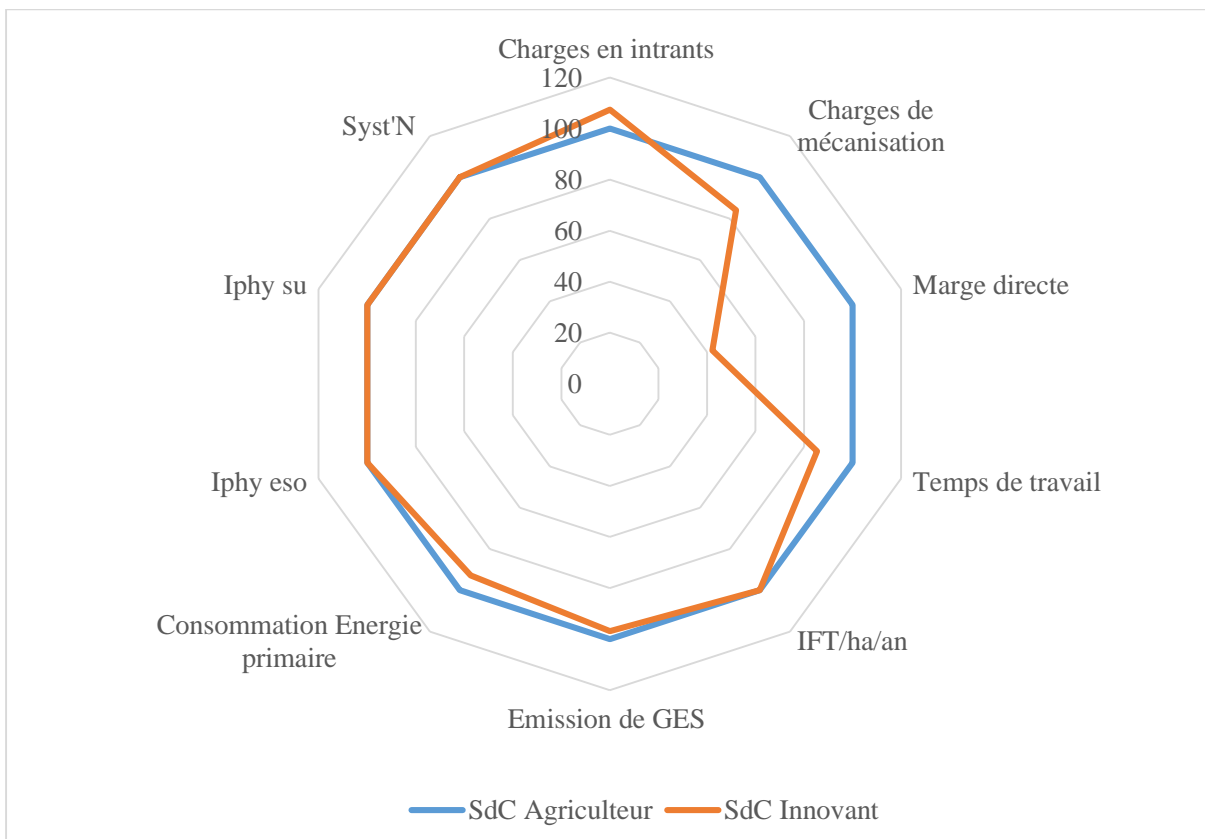


Figure 17 - Schéma de synthèse des performances des SdC de PE

pilotes. Les charges élevées en semence n'ont pas été compensées en retour par la réduction d'utilisation de pesticides et d'engrais ce qui a nettement dégradé les performances économiques des SdC Innovants. Ces pratiques innovantes sont difficiles à mettre en place et nécessitent une certaine expérience et maîtrise technique de la part des agriculteurs. Ces pratiques sont plus aléatoires et donc plus risquées économiquement. En cas d'échec, les agriculteurs peuvent être amenés à mobiliser des solutions de rattrapage (herbicides pour CS, travail du sol, broyage et roulage pour CP) ce qui diminue encore plus les performances économiques et augmente l'impact environnemental des SdC innovants. Néanmoins, en cas de réussite, ces pratiques peuvent améliorer considérablement les performances économiques et environnementales des exploitations (réduction d'apports d'azote, de pesticides et du travail du sol).

Malgré l'arrêt du travail du sol, les SdC Innovants de CP et CS ont eu peu d'effets sur les charges de mécanisation. Ce résultat s'explique tout d'abord par les charges de mécanisation initialement faibles des SdC Agriculteurs (stratégie TCSL). Les écarts auraient été probablement en comparaison avec des systèmes labourés. Ensuite, nous avons vu que l'implantation des couverts, l'utilisation de matériel innovant onéreux (strip-till et semoir direct), les erreurs d'apprentissages et les solutions de rattrapage ont augmenté les charges de mécanisation.

Au vu des performances économiques, il est légitime de s'interroger sur les difficultés techniques et économiques qu'impliquent la conduite des SdC Innovants et sur l'acceptabilité de ces innovations. Les SdC Innovants modifient totalement les méthodes des agriculteurs notamment pour CP et CS et dans une moindre mesure pour PE. Les pratiques innovantes nécessitent une certaine maîtrise technique de la part des agriculteurs qui s'acquiert au fil du temps. Les échecs initiaux peuvent affaiblir les performances économiques de l'exploitation et remettre en cause la stratégie définie. L'échec d'implantation du couvert permanent de luzerne, les erreurs d'apprentissages sur le semis direct sans herbicides de soja sous un couvert de seigle roulé ont impacté la rentabilité économique dans le projet collectif sol. Les SdC Innovants s'appuient sur des processus écologiques et des régulations biologiques. Les effets positifs des pratiques ne sont pas garantis. La conduite de ces systèmes est donc plus complexe pour des résultats incertains comparativement aux systèmes classiquement conduits par les agriculteurs avec un recours au travail du sol, aux pesticides et engrais minéraux. Autant de leviers maîtrisés qui sécurisent les résultats économiques. Le risque économique, la complexification technique, le temps d'apprentissage et l'incertitude des résultats, notamment lors des premières années, sont autant d'éléments qui peuvent freiner les agriculteurs dans l'adoption de certains leviers issus de l'ACS.

D'un point de vue environnemental, nous avons vu que la réduction des apports d'azote avait un effet bénéfique sur les émissions de GES et la consommation d'énergie primaire. La réduction du travail du sol impacte dans une moindre mesure les performances environnementales des SdC par rapport à l'azote. Nous pouvons noter que l'intégration d'une culture de soja dans la rotation permet de diminuer l'impact environnemental du SdC grâce à son autonomie en azote et son faible besoin en produits phytosanitaires.

Les leviers mobilisés dans les SdC Innovants n'ont pas permis de réduire l'utilisation de pesticides. Des échecs techniques de certains des leviers mobilisés (réussite des couverts,

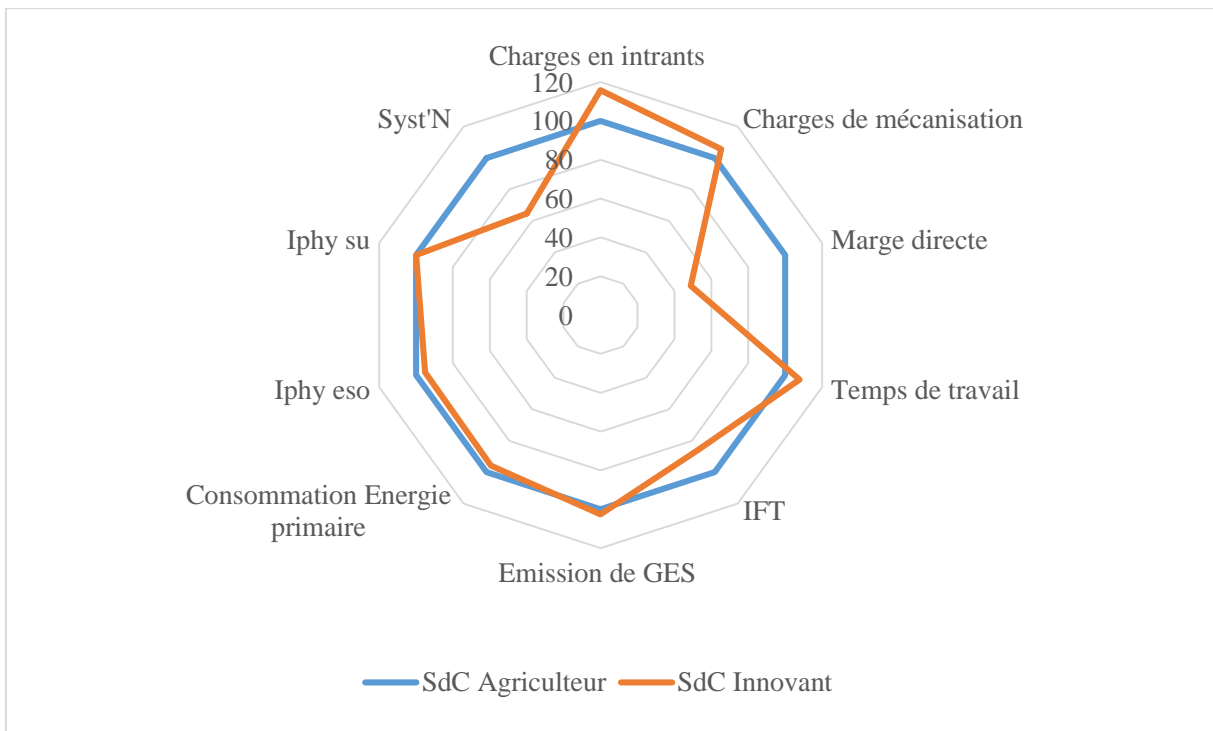


Figure 18 - Schéma de synthèse des performances des SdC de CP

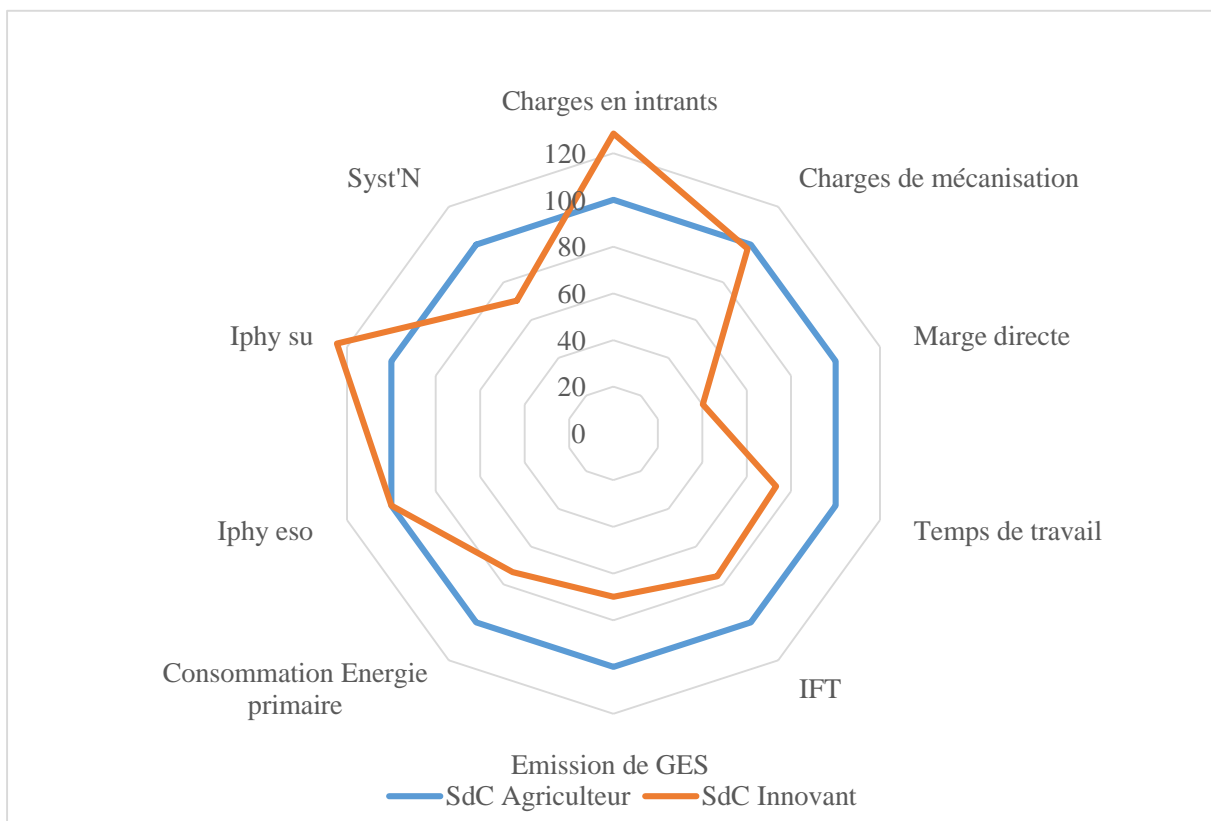


Figure 19 - Schéma de synthèse des performances des SdC de CS

destruction mécanique sans herbicides, associations pluriannuelles) expliquent cette absence de résultats. Les risques de transferts des herbicides vers les eaux souterraines et superficielles restent donc élevés pour l'ensemble des SdC étudiés. Nous notons toutefois que la diversification de la rotation permet de réduire l'usage de certains pesticides et que le remplacement de certaines molécules particulièrement sensible au lessivage pourrait être envisagé dans certains SdC étudié.

L'insertion de couverts végétaux en interculture a permis de diminuer les risques de lixiviation des nitrates vers les eaux souterraines. Cependant, ce levier n'est pas suffisant car dans certaines situations les quantités d'azote en jeu sont trop importantes en automne malgré la présence de couverts végétaux. C'est particulièrement vrai dans les situations avec des apports de matières organiques fréquents combinés à des stratégies de fertilisation azotée de synthèse. Enfin, si l'insertion de légumineuses à graines permet de réduire globalement l'utilisation d'engrais minéraux de synthèse, la culture suivante doit être réfléchi en fonction de sa capacité précoce à absorber de l'azote minéral sinon les risques de transferts vers les eaux souterraines peuvent être importants lors d'automne pluvieux.

L'analyse des performances de la stratégie méthanisation n'est pas l'objectif du projet. Néanmoins, les résultats acquis depuis le début la mise en place de cette stratégie en 2019 dans les SdC Agriculteurs MS et PE permettent de discuter des performances de cette activité. La vente des couverts augmente la rentabilité des exploitations (attention toutefois aux charges engagées pour la production de ces couverts). Le retour du digestat au sol peut permettre de réduire les achats d'engrais minéraux azotés ce qui améliorera à terme l'impact environnemental des exploitations. Cependant, les opérations de récolte et de transport des couverts émettent également des GES et consomment de l'énergie primaire ce qui n'a pas été pris en compte dans cette étude. Il pourrait être intéressant de calculer plus précisément les performances économiques et le bilan environnemental de l'activité méthanisation en intégrant également la production d'énergie primaire sous forme de biogaz.

Pour conclure, les leviers mobilisés dans les SdC Innovants ont affaibli les performances économiques des exploitations, en grande partie en raison de la non maîtrise de techniques innovantes durant la période de transition vers l'ACS. La diversification de la rotation et l'insertion de couverts végétaux a en revanche permis de diminuer les émissions de GES, la consommation d'énergie primaire (réduction des apports d'azote minéral) et dans certains cas, les risques de transfert des nitrates vers les eaux souterraines. En revanche les leviers mobilisés ont eu peu d'effets sur les risques de transferts des pesticides vers les eaux superficielles et souterraines.

Références bibliographiques

ACOSTA-ALBA, Ivonne et DER WERF, Hayo Van, 2011. The Use of Reference Values in Indicator-Based Methods for the Environmental Assessment of Agricultural Systems. *Sustainability*. 2011. Vol. 3, n° 12, pp. 424-442. The Use of Reference Values in Indicator-Based Methods for the Environmental Assessment of Agricultural Systems

AGRESTE, 2008. Dans le sillon du non-labour. 2008.

AGRESTE, 2014. *Enquête pratiques culturales 2011*. 2014.

AGRESTE, 2021. *Auvergne Rhône-Alpes -Enquête pratiques culturales grandes cultures en 2017*. 2021.

ALLETO, COQUET, BENOIT, HEDDADJ et BARRUIISO, 2010. Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review | SpringerLink. [en ligne]. 2010. [Consulté le 18 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://link.springer.com/article/10.1051/agro/2009018>

ARVALIS, [sans date]. *Signification des indicateurs*.

ARVALIS, 2017. *Systerre : Évaluer des systèmes de culture, concevoir des alternatives innovantes et pluriperformantes*. 2017.

ARVALIS, 2019. Performances économiques des systèmes de culture - Comparaison d'un système Labour et Non-Labour / Semis Direct. 2019.

AUBERGER, Julie, AVADI TAPIA, Angel Daniel, CHIFFE, Jérôme, CORSON, Michael S., LABBÉ, Tiphaine, MALNOË, Caroline, RAIMBERT, Véronique, TROCHET, Thierry et VAN DER WERF, Hayo M. G., 2016. Concepts, méthodes et outils pour l'évaluation multicritère de la durabilité des systèmes agricoles. *Agronomie, Environnement et Sociétés* [en ligne]. 2016. [Consulté le 16 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/584426/>

AUTRET, Bénédicte, BEAUDOIN, Nicolas, RAKOTOVOLOLONA, Lucia, BERTRAND, Michel M., GRANDEAU, Gilles, GRÉHAN, Eric, FERCHAUD, Fabien et MARY, Bruno, 2019. Can alternative cropping systems mitigate nitrogen losses and improve ghg balance? Results from a 19-yr experiment in northern France. *Geoderma*. 2019. Vol. 342, pp. 20-33. DOI 10.1016/j.geoderma.2019.01.039.

BEAUDOIN, Nicolas, TOURNEBIZE, Julien, RUIZ, Laurent, CONSTANTIN, Julie et JUSTES, Eric, 2012. Nitrate et eau en période d'interculture. . 2012. pp. 84.

BOCKSTALLER, C et GIRARDIN, P, 2008. *Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO*: 2008. INRA.

BOULANGER, Paul-Marie, 2004. Les indicateurs de développement durable : un défi scientifique, un enjeu démocratique. . 2004. pp. 25.

BRUN, D, RAY, T, LÈGÈRE, R et AUTHIER, A, 2013. *Strip-till Une technique efficace sur maïs si elle est bien positionnée*. 2013.

CABANEL, Henri et FÉRAT, Françoise, 2021. *Rapport d'information au nom de la commission des affaires économiques sur les moyens mis en œuvre par l'État en matière de prévention, d'identification et d'accompagnement des agriculteurs en situation de détresse*, Sénat.

CHAMBRE AGRICULTURE DE L'ISÈRE, 2019. *Panorama de l'agriculture iséroise*. 2019.

CHAMBRE AGRICULTURE DU GRAND EST, 2020. *Mieux connaître l'empreinte carbone et énergétique des systèmes agricoles du Grand Est*. 2020.

CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA MOSELLE, 2021. Agriculture de conservation des sols : des résultats économiques encourageants. [en ligne]. 5 août 2021. [Consulté le 25 août 2021]. Disponible à l'adresse : <https://moselle.chambre-agriculture.fr/actualites/detail-de-lactualite/actualites/agriculture-de-conservation-des-sols-des-resultats-economiques-encourageants/>

- CHENU, Claire, KLUMPP, Katja, BISPO, A., ANGERS, D., COLNENNE, C. et METAY, Aurelie, 2014. Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations Agronomiques*. 2014. Vol. 37, pp. 23-37.
- DAI, Zijun, HU, Jinsheng, FAN, Jun, FU, Wei, WANG, Huan et HAO, Mingde, 2021. No-tillage with mulching improves maize yield in dryland farming through regulating soil temperature, water and nitrate-N. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 1 avril 2021. Vol. 309, pp. 107288.
- DARYANTO, Stefani, WANG, Lixin et JACINTHE, Pierre-André, 2017. Impacts of no-tillage management on nitrate loss from corn, soybean and wheat cultivation: A meta-analysis. *Scientific Reports*. 21 septembre 2017. Vol. 7.
- DE TOURDONNET, Stephane, BRIVES, Hélène, DENIS, Michel, OMON, Bertrand et THOMAS, Frédéric, 2013. Accompagner le changement en agriculture: du non labour à l'agriculture de conservation. . 2013. pp. 15.
- DENHARTIGH, Cyrielle Denhartigh, 2014. *Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques, Recueil d'expériences territoriales*. 2014. Réseau Action Climat France.
- ENSSLIN, Leonardo, MONTIBELLER NETO, Gilberto et NORONHA, Sandro MacDonald, 2001. *Apoio à decisão: metodologias para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas*. Florianópolis : Insular. I
- FAO, 2015. Agriculture durable | Objectifs de développement durable | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. [en ligne]. 2015. [Consulté le 9 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/fao-and-post-2015/sustainable-agriculture/fr/>
- FAO, 2017. *Conservation Agriculture*. 2017.
- FÉDÉRATION RÉGIONALE DES CUMA D'Auvergne Rhones Alpes, 2020. *Braème d'entraide 2020-2021*. 2020.
- FENNY et MACHANE, 2010. CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AGRICULTURE DE CONSERVATION.. 2010. pp. 7. CLIMATE CHANGE AND AGRICULTURAL CONSERVATION
- FREDON, 2019. *Qualité des eaux en Auvergne-Rhone-Alpes, Résultats d'analyses 2019*. 2019.
- GHOSH, Sonaka, T.K.DAS, SHARMA, Dinesh et GUPTA, Kamlika, 2019. Potential of conservation agriculture for ecosystem services: A review. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 22 octobre 2019. Vol. 89, pp. 1572-1579.
- GIULIANO, S., ALLETTO, L., DESWARTE, C., PERDRIEUX, F., DAYDÉ, J. et DEBAEKE, P., 2021. Reducing herbicide use and leaching in agronomically performant maize-based cropping systems: An 8-year study. *Science of The Total Environment*. 20 septembre 2021. Vol. 788, pp. 147695.
- GRAUBNER, Normand et RAY, Thibaut, 2019. *Analyse technico-économique d'un essai système de travail du sol en labour/semis direct*. 2019.
- GUERIN, Fabien, 2017. *Gestion des limaces*. 2017. Chambre agriculture des Pays de la Loire.
- HAVARD, ALAPHILPE, DEYTIEUX, ESTORGUES, LABEYRIE, LAFOND, MEYNARD, PETIT, PLENET, PICAULT, et FALOYA, 2018. *Guide de l'expérimentateur système : concevoir , conduire, et valoriser une expérimentation système pour les cultures assolées et perennes* [en ligne]. GIS PICgléc, GIS fruit, Réseau ECOVITI, RMT système de culture innovants, GIS Relange agronomique. [Consulté le 16 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/pic/concevoir-son-systeme/guide-de-lexperimentateur-systeme>
- LABREUCHE, J., 2013. *Essai travail du sol de Boigneville : une rotation maïs-blé propice au sol réduit*. 2013. Perspectives Agricoles.
- LABREUCHE, J., LAURENT, F. et ROGER-ESTRADE, J., 2015. *Faut il travailler le sol ? acquis et innovations pour une agriculture durable*. Quae.

- LABREUCHE, Jérôme, 2007. Techniques sans labour : des économies de charges à la clé. [en ligne]. 2007. [Consulté le 5 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis-infos.fr/les-economies-de-charges-a-la-cle-@/view-250-arvarticle.html>
- LAIREZ, Juliette, FESCHET, Pauline, AUBIN, Joël et ALAPHILPE, Aude, 2015. *Agriculture et développement durable, guide pour l'évaluation multicritère*.
- LAURENT, François, 2015. L'Agriculture de Conservation et sa diffusion en France et dans le monde. *Cybergeo : European Journal of Geography* [en ligne]. 10 novembre 2015. [Consulté le 5 juillet 2021]. DOI 10.4000/cybergeo.27284. Disponible à l'adresse : <https://journals.openedition.org/cybergeo/27284>
- LOYCES, Chantal et WERY, Jacques, 2006. *Outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture*.
- LUCAS, Véronique, DE TOURDONNET, Stéphane, BARBIER, Jean-Marc, CITTADINI, Roberto et GASSELIN, Pierre, 2018. *Le glyphosate en agriculture de conservation : Un cas illustratif de la dépendance de l'agriculture française aux pesticides*.
- M. PITTELKOW, Cameron, LIANG, Xinqiang, A. LINQUIST, Bruce et JAN VAN GROENIGEN, Kees, 2014. *faut*. 2014.
- MALÉZIEUX, E., 2012. Designing cropping systems from nature. [en ligne]. 2012. [Consulté le 3 septembre 2021]. Disponible à l'adresse : http://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=562976
- MALIQUE, Francois, KE, Piaopiao, BÖTTCHER, Jürgen, DANNENMANN, Michael et BUTTERBACH-BAHL, Klaus, 2019. Plant and soil effects on denitrification potential in agricultural soils. *Plant and Soil*. 1 juin 2019. Vol. 439.
- MEYNARD, J. et SAVINI, Isabelle, 2003. La désintensification : Point de vue d'un agronome. *undefined* [en ligne]. 2003. [Consulté le 13 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.semanticscholar.org/paper/La-d%C3%A9sintensification-%3A-Point-de-vue-d%27un-agronome-Meynard-Savini/af8d5ea71091bb97c0be3b2134aedddc570c3ab>
- MEYNARD, Jean Marc, 2001. *L'évaluation et la conception de système de culture pour une agriculture plus durable*. 2001.
- MEYNARD, Jean-Marc, 2012. *Chapitre 4. Innover dans les systèmes de culture et de production* [en ligne]. Éditions Quæ. [Consulté le 3 septembre 2021]. ISBN 978-2-7592-1858-5. Disponible à l'adresse : <https://www.cairn.info/apprendre-a-innover-dans-un-monde-incertain--9782759218585-page-75.htm> Bibliographie_available : 0Cairndomain : www.cairn.infoCite
- PARNAUDEAU, Virginie V., REAU, Raymond R. et DUBRULLE, Pascal P., 2012. Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture : le logiciel Syst'N. *Innovations Agronomiques*. 2012. Vol. 21, pp. 59-70.
- PESCHAUD, Mathieu, 2018. Réussir sa transition en agriculture de conservation des sols. 2018. pp. 33.
- PRÉVEL, Maxime, 2008. *Le productivisme agricole Socioanthropologie de l'industrialisation des campagnes françaises*. 2008. Etudes rurales.
- REAU, Raymond et LE GALL, Cécile, 2021. *Guide pratique de diagnostic des pertes d'azote dans les systèmes de culture. Livrable du projet CASDAR (2016-2020) « Agro-éco-Syst'N : Identification de systèmes agro-écologiques à hautes performances azotées par le diagnostic avec l'outil Syst'N® »*.
- SANTOS, Rui Oliveira, 2010. Pour une nouvelle régulation de l'agriculture : l'utilité du droit sociétal. *Pour*. 2010. Vol. N° 204, n° 1, pp. 16-22. Bibliographie_available: 1Cairndomain: www.cairn.infoCite
- SCHALLER, Noémie, 2013. *L'agriculture de conservation*. 2013. Le Centre d'études et de prospective.
- SCOPEL, Eric, TRIOMPHE, Bernard, AFFHOLDER, François, DA SILVA, Fernando Antonio Macena, CORBEELS, Marc, XAVIER, José Humberto Valadares, LAHMAR, Rabah, RECOUS, Sylvie, BERNOUX, Martial, BLANCHART, Eric, DE CARVALHO MENDES, Ieda et DE TOURDONNET, Stéphane, 2013.

Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. janvier 2013. Vol. 33, n° 1, pp. 113-130.

SÉGUY, L, BOUZINAC, S et MARONEZZI, A C, 2001. Les systèmes de culture et la dynamique de la matière organique. 2001. pp. 202.

SHAN, Jun et YAN, Xiaoyuan, 2013. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils. *Atmospheric Environment*. juin 2013. Vol. 71, pp. 170-175.

SPOTIFARM, Alexandre de, 2021. Label bas carbone : quels revenus pour les agriculteurs ? [en ligne]. 2021. [Consulté le 6 septembre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://blog.spotifarm.fr/tour-de-plaine-spotifarm/label-bas-carbone-quels-revenus-pour-les-agriculteurs>

THOMAS, Frédéric, 2006. TCS et semis direct : quelles sont les marges d'économies ? . 2006. N° 36, pp. 12 à 26.

THORUP-KRISTENSEN, Kristian, MAGID, Jakob et JENSEN, Lars, 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy*. 31 décembre 2003. Vol. 79, pp. 227-302.

VAN DER WERF, Hayo M. G., TZILIVAKIS, John, LEWIS, Kathy et BASSET-MENS, Claudine, 2007. Environmental impacts of farm scenarios according to five assessment methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 1 janvier 2007. Vol. 118, n° 1, pp. 327-338.

VASTOLA, Antonella, 2017. *A comparative multidimensional evaluation of conservation agriculture systems: A case study from a Mediterranean area of Southern Italy*. 2017.

VENKATESWARLU, B., SRINIVASARAO, Ch, RAMESH, G., VENKATESWARLU, S. et KATYAL, J. C., 2007. Effects of long-term legume cover crop incorporation on soil organic carbon, microbial biomass, nutrient build-up and grain yields of sorghum/sunflower under rain-fed conditions. *Soil Use and Management*. 2007. Vol. 23, n° 1, pp. 100-107.

VINCENT-CABOUT, L, PEIGNÉ, J et CASAGRANDE, M, 2017. *Semis direct de cultures de printemps sous couvert végétal roulé en agriculture biologique. Partie 1 : Les apports de la recherche Nord-Américaine*. 2017. ISARA.

VINCENT-CABOUD, L., 2020. *Semis direct sous couvert végétal sans herbicide : conception, expérimentation et évaluation conjointes d'itinéraires techniques entre praticiens et chercheurs. Thèse de doctorat*

WEZEL, Alexander, CASAGRANDE, Marion, CELETTE, Florian, VIAN, Jean-François, FERRER, Aurélie et PEIGNÉ, Joséphine, 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2014. Vol. 34, n° 1, pp. 1-20.

Annexes

Annexe 1 : Présentation de la démarche et du réseau collectif sol



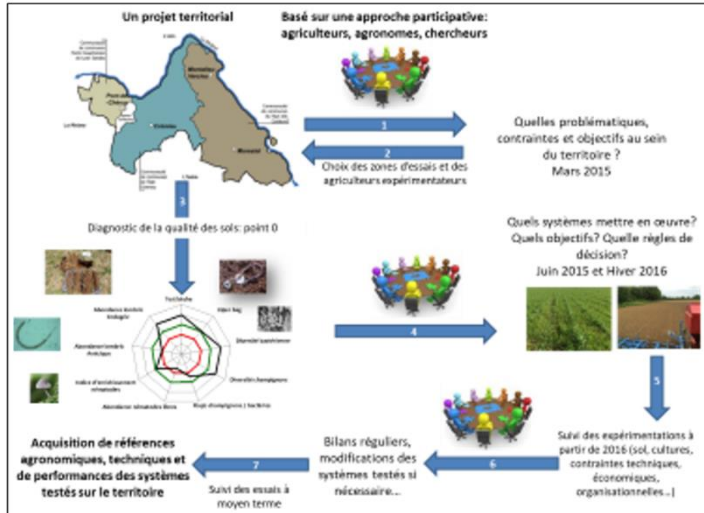
Réductions d'Intrants– Systèmes de Culture Innovants

Des systèmes de culture conçus avec les agriculteurs du Nord Isère pour améliorer la fertilité des sols



Présentation de la démarche et du réseau

Un projet collaboratif et des expérimentations de systèmes de culture dans les fermes depuis 2016



4 systèmes sur 4 exploitations pilotes

Système céréalier sans apports de MO

- Sol sableux superficiel

Système céréalier sans apports de MO

- Sol limon-sableux (marais)

Polyculture élevage, apports de MO

- Sol sablo argilo limoneux

Production de maïs semences, apports de MO

- Sol sablo-argilo-limoneux

Des objectifs communs en terme de fertilité des sols

- Améliorer les activités biologiques du sol: « **autofertilité** » du sol
- Préservation de la **structure du sol**
- Améliorer la **réserve hydrique** du sol
- **Réduire les intrants**: engrais et pesticides grâce à l'amélioration de la fertilité du sol



Des leviers agronomiques communs mis en œuvre:

- Intensification et diversification des **couverts végétaux**
- Non exportation de la biomasse des couverts
- **Diversification de la rotation**
- **Stratégies semis direct**, sauf en production de semence

Une approche globale de la fertilité des sols

D'après Casdar Agrinnov 2012-2015

Abondance diversité microbienne

Abondance diversité nématodes

Abondance diversité vers de terre

Physico-chimie

Structure du sol

Le plus, le mieux !

Le moins, le mieux (parthogènes)!

Optimum (ratio bactéries-champignons)

Les autres performances mesurées

Agronomiques

- Rendement
- Adventices
- Couverts
- Dynamique MO et azote sol-plante

Socio économiques et environnementales

- Temps de travail (modélisation Systeme)
- Rentabilité (modélisation Systeme)
- IFT
- Risques de lixiviation (azote)

Annexe 2 : Itinéraires techniques des SdC Agriculteurs et Innovant des agriculteurs pilotes

Polyculture élevage, SdC Agriculteur :

Culture	Mais 2016	Soja 2017	Blé 2018	Colza associé 2019	Soja 2020
Interculture	22/03/16 : Fumier (20 T/ha) 21/04/16 : Herbicide (0.24 IFT) 23/04/16 : Ammonitrate (133 kg/ha) 04/05/16 : Herbicide (0.24 IFT)	17/11/16 : Semis direct seigle (120 kg/ha) 17/11/16 : Molluscicide (0.42 IFT) 24/04/17 : Roulage 14/05/17 : Herbicide (0.3 IFT)	27/09/17 : Herbicide (0.27 IFT)	21/07/18 : Herbicide (0.38 IFT) 02/08/18 : Fumier (25 T/ha)	12/07/19 : Herbicide (0.30 IFT) 16/07/19 : Semis direct tournesol (19 kg/ha) + sorgho (20 kg/ha) 18/07/19 : Roulage 30/07/19 : Molluscicide (0.42 IFT) 07/08/19 : Ammonitrate (150 kg/ha) 25/10/19 : Récolte couvert (fauchage, Aindainage et récolte) 30/10/19 : Semis direct seigle (140 kg/ha) + pois (30 kg/ha) + Vesce (4kg/ha) 31/10/19 : Herbicide (0.33 IFT) 13/11/19 : Molluscicide (1 IFT) 16/01/20 : Molluscicide (0.42 IFT) 01/03/20 : Ammonitrate (100kg/ha) 09/05/20 : Récolte couvert (fauche, Aindainage et récolte)
Travail du sol et semis	07/05/16 : Strip till 08/05/16 : Semis mais (29 kg/ha)	17/05/17 : Semis direct soja (125 kg/ha)	29/09/17 : Semis direct blé (4 variétés pour total de 152 kg/ha)	11/08/18 : Semis direct colza (8 kg/ha) + féverole (20 kg/ha) + poids (35 kg/ha) + Nyger (2.5 kg/ha)	20/05/20 : Semis direct soja (160 kg/ha) 22/05/20 : Roulage
Fertilisation	27/05/16 : Epsa top (1.1 kg/ha) 04/06/16 : Epsa top (1 kg/ha) 11/06/16 : Urée (242 kg/ha)	17/05/17 : TMF (0.41/ha) 29/05/17 : Epsa top (1 kg/ha) 08/06/17 : Epsa top (1 kg/ha)	19/10/17 : Epsa top (1 kg/ha) 09/02/18 : Ammonitrate (180 kg/ha) 25/03/18 : Kiéserite (80 kg/ha) 26/03/18 : Ammonitrate (281 kg/ha) 08/04/18 : Epsa top (1 kg/ha) 10/04/18 : Epsa top (1 kg/ha) 07/05/18 : Epsa top (1 kg/ha) + TMF (0.52L/ha) 22/05/18 : Epsa top (1.11 kg/ha) + TMF (0.45 l/ha) 26/05/18 : Epsa top (1 kg/ha)	11/08/18 : Seed sprint (20 kg/ha) 22/08/18 : Epsa Top (0.92 kg/ha) 21/02/19 : Epsa top (1.87 kg/ha) 26/02/19 : Ammonitrate 26-16S (300 kg/ha) 15/03/19 : Epsa top (0.94 L/ha) 20/03/19 : Ammonitrate 26-16S (280 kg/ha) 11/04/19 : Epsa top (0.94 L/ha) + TMF (0.51L/ha) 22/04/19 : Ammonitrate (39 kg/ha)	20/05/20 : Oligo red (biostimulant, 9kg/ha) 06/06/20 : Epsa Top (1 kg/ha) 12/06/20 : Epsa top (0.8 kg/ha) 16/06/20 : Epsa top (1kg/ha)
Protection des cultures	15/05/16 : Molluscicide (0.95 IFT) 25/05/16 : Molluscicide (0.28 IFT) 27/05/16 : Herbicide (0.45 IFT) 04/06/16 : Herbicides (1.03 IFT)	17/05/17 : Molluscicide (0.7 IFT) 29/05/17 : Herbicide (0.25 IFT) 08/06/17 : Herbicide (0.45 IFT)	19/10/17 : Insecticide (1 IFT) 21/10/17 : Herbicides (1 IFT) 01/04/18 : Fongicide (0.25 IFT) 08/04/18 : Fongicide (0.42 IFT) 10/04/18 : Herbicide (1 IFT) 07/05/18 : Fongicide (0.21 IFT) 18/05/18 : Fongicide (0.22 IFT) 22/05/18 : Fongicide (0.45 IFT) 26/05/18 : Fongicide (0.33 IFT)	11/08/18 : Molluscicide (0.42 IFT) 22/08/18 : Insecticide (0.8 IFT) 13/12/18 : Herbicide (1 IFT) 21/02/19 : Insecticide (0.8 IFT) 15/03/19 : Insecticide (0.7 IFT) 11/04/19 : Fongicide (0.71 IFT) 22/04/19 : Fongicide (1 IFT)	22/05/20 : Herbicide (0.45 IFT) 06/06/20 : Herbicide (0.17 IFT) 12/06/20 : Herbicide (0.27 IFT) 16/06/20 : Herbicide (0.24 IFT)
Récolte	06/10/16 : 9,6 T/ha	25/09/17 :3,1 T/ha	03/07/18 : 6 T/ha 13/07/18 : Paille 1.29T/ha	09/07/19 : 3 T/ha	26/10/20 : Récolte couvert 15 T/ha 09/05/20 : Récolte couvert 19T/ha 15/09/20 : Soja grain 1.9 T/ha

Polyculture élevage, SdC Innovant

Culture	Mais 2016	Soja 2017	Blé 2018	Colza associé 2019	Soja 2020
Interculture	22/03/16 : Fumier (20 T/ha) 21/04/16 : Herbicide (0.24 IFT) 23/04/16 : Ammonitrate (133 kg/ha) 04/05/16 : Herbicide (0.24 IFT)	17/11/16 : Semis direct seigle (180 kg/ha) 17/11/16 : Molluscicide (0.42 IFT) 24/04/17 : Roulage 14/05/17 : Herbicide (0.3 IFT)	27/09/17 : Herbicide (0.27 IFT)	03/07/18 : Semis volée luzerne (10 kg/ha) 21/07/18 : Herbicide (0.38 IFT) 02/08/18 : Fumier (25 T/ha)	12/07/19 : Herbicide (0.30 IFT) 16/07/19 : Semis direct tournesol (19 kg/ha) + sorgho (20 kg/ha) 18/07/19 : Roulage 30/07/19 : Molluscicide (0.42 IFT) 07/08/19 : Ammonitrate (150 kg/ha) 30/10/19 : Semis direct seigle (140 kg/ha) + pois (30 kg/ha) + Vesce (4kg/ha) 31/10/19 : Herbicide (0.33 IFT) 13/11/19 : Molluscicide (1 IFT) 16/01/20 : Molluscicide (0.42 IFT) 01/03/20 : Ammonitrate (100kg/ha)
Travail du sol et semis	07/05/16 : Strip till 08/05/16 : Semis maïs (29 kg/ha)	17/05/17 : Semis direct soja (125 kg/ha)	29/09/17 : Semis direct blé (4 variétés pour total de 152 kg/ha) + luzerne (10 kg/ha)	11/08/18 : Semis direct colza (8 kg/ha) + féverole (20 kg/ha) + poids (35 kg/ha) + Nyger (2.5 kg/ha)	20/05/20 : Semis direct soja (160 kg/ha) 22/05/20 : Roulage
Fertilisation	27/05/16 : Epsos top (1.1 kg/ha) 04/06/16 : Epsos top (1 kg/ha) 11/06/16 : Urée (242 kg/ha)	17/05/17 : TMF (0.4L/ha) 29/05/17 : Epsos top (1 kg/ha) 08/06/17 : Epsos top (1 kg/ha)	19/10/17 : Epsos top (1 kg/ha) 09/02/18 : Ammonitrate (180 kg/ha) 25/03/18 : Ktésérte (80 kg/ha) 26/03/18 : Ammonitrate (281 kg/ha) 08/04/18 : Epsos top (1 kg/ha) 10/04/18 : Epsos top (1 kg/ha) 07/05/18 : Epsos top (1 kg/ha) + TMF (0.52L/ha) 22/05/18 : Epsos top (1.11 kg/ha) + TMF (0.45 l/ha) 26/05/18 : Epsos top (1 kg/ha)	11/08/18 : Seed sprint (20 kg/ha) 22/08/18 : Epsos Top (0.92 kg/ha) 21/02/19 : Epsos top (1.87 kg/ha) 26/02/19 : Ammonitrate 26-16S (300 kg/ha) 15/03/19 : Epsos top (0.94 L/ha) 20/03/19 : Ammonitrate 26-16S (280 kg/ha) 11/04/19 : Epsos top (0.94 L/ha) + TMF (0.5L/ha) 22/04/19 : Ammonitrate (39 kg/ha)	20/05/20 : Oligo red (biostimulant, 9kg/ha) 06/06/20 : Epsos Top (1 kg/ha) 12/06/20 : Epsos top (0.8 kg/ha) 16/06/20 : Epsos top (1kg/ha)
Protection des cultures	15/05/16 : Molluscicide (0.95 IFT) 25/05/16 : Molluscicide (0.28 IFT) 27/05/16 : Herbicide (0.45 IFT) 04/06/16 : Herbicides (1.03 IFT)	17/05/17 : Molluscicide (0.7 IFT) 29/05/17 : Herbicide (0.25 IFT) 08/06/17 : Herbicide (0.45 IFT)	19/10/17 : Insecticide (1 IFT) 21/10/17 : Herbicides (1 IFT) 01/04/18 : Fongicide (0.25 IFT) 08/04/18 : Fongicide (0.42 IFT) 10/04/18 : Herbicide (1 IFT) 07/05/18 : Fongicide (0.21 IFT) 18/05/18 : Fongicide (0.22 IFT) 22/05/18 : Fongicide (0.45 IFT) 26/05/18 : Fongicide (0.33 IFT)	11/08/18 : Molluscicide (0.42 IFT) 22/08/18 : Insecticide (0.8 IFT) 13/12/18 : Herbicide (1 IFT) 21/02/19 : Insecticide (0.8 IFT) 15/03/19 : Insecticide (0.7 IFT) 11/04/19 : Fongicide (0.71 IFT) 22/04/19 : Fongicide (1 IFT)	22/05/20 : Herbicide (0.45 IFT) 06/06/20 : Herbicide (0.17 IFT) 12/06/20 : Herbicide (0.27 IFT) 16/06/20 : Herbicide (0.24 IFT)
Récolte	06/10/16 : 8,5 T/ha	25/09/17 : 3,1 T/ha	03/07/18 : Grain : 6 T/ha 13/07/18 : Paille : 1.29T/ha	09/07/19 : 3 T/ha	15/09/20 : Soja grain 1.2 T/ha

Maïs semence, SdC Agriculteur

Culture	Maïs semence 2016	Maïs semence 2017	Blé semence 2018	Maïs semence 2019	Maïs semence 2020
Interculture	25/05/15 : Semis volé Ray gras (9 kg/ha) + tréfle (9 kg/ha) 07/04/16 : Apport lisier (28m3/ha)	28/06/16 : Semis volé Ray gras (18 kg/ha) 22/02/17 : Pâturage moutons 20/04/17 : Pâturage moutons 07/04/17 : Apport lisier (28 m3/ha)	10/10/17 : Apport lisier (32m3/ha)	08/08/18 : Herbicide (0.85 IFT) + Sulfate ammoniacal (1.88kg/ha) 09/08/18 : Semis direct avoine (14 kg/ha) + sorgho (9 kg/ha) + roulage 16/11/18 : récolte couvert (fauchage, Aindainage, récolte) 24/08/18 : Apport lisier (22m3/ha) 26/03/19 : Apport lisier (30 m3/ha) + bactériolite (30 kg/ha)	27/09/19 : Déchaumage 30/09/19 Semis direct Ray Grass (20kg/ha) + Tréfle (6kg/ha) 01/10/19 : Roulage 13/02/20 : Urée (205kg/ha) 01/04/20 : Irrigation (30 mm/ha) 07/05/20 : Récolte couvert (fauchage, Aindainage, récolte) 07/05/20 : Apport lisier 26 m3
Travail du sol et semis	22/04/16 : Broyage + labour 28/04/16 : Hersage 03/05/16 : Vibroculteur 03/05/16 semis maïs femelles (44 kg/ha) 09/05/16 : semis maïs males (20 kg/ha)	04/05/17 : Broyage 05/05/17 : Labour 15/05/17 : Hersage 17/05/17 : Vibroculteur + semis maïs femelles (44 kg/ha) + roulage 26/05/17 : Semis maïs male (30 kg/ha)	17/10/17 : Déchaumage 17/10/17 : Semis direct blé (140 kg/ha) 19/10/17 : Roulage	27/03/19 : Labour 23/03/19 : Hersage 24/03/19 : Roulage 14/05/19 : Vibroculteur 16/05/19 : Semis maïs femelles (34 kg/ha) 24/05/19 : Semis maïs males (20 kg/ha)	09/05/20 : Labour 09/05/20 : Roulage 21/05/20 : Vibroculteur 22/05/20 : Semis maïs femelles (34kg/ha) 29/05/20 : Semis maïs male (20kg/ha)
Fertilisation	03/05/16 : sulfate ammoniacal (1.2 kg/ha) 22/05/16 : sulfate ammoniacal (1.2 kg/ha) 26/05/16 : Engrais 16-14-14 (305 kg/ha) 20/06/16 : Solution azoté 30% (450 kg/ha) 26/06/16 : Engrais binaire PK 44-7 (4.56 L/ha) 04/08/16 : Sulfate de magnésium (1.19kg/ha)	01/06/17 : Urée (82 kg/ha) 02/06/17 : Sulfate ammoniacal (1kg/ha) 10/06/17 : Sulfate ammoniacal (1kg/ha) 10/06/17 : Engrais binaire PK 44-7 (3 L/ha) 20/06/16 : Solution azoté 30% (450 kg/ha) 05/07/17 : Sulfate de magnésium (1 L/ha) 16/08/17 : Sulfate de magnésium (1. L/ha)	21/02/18 : Sulfonitrate (138 kg/ha) 23/03/18 : Urée (190 kg/ha) 02/05/18 : Sulfate ammoniacal (1.32kg/ha) 04/05/18 : Urée (104 kg/ha) 17/05/18 : Sulfate ammoniacal (1.32kg/ha)	05/06/19 : Sulfate ammoniacal (1kg/ha) 14/06/19 : Sulfate ammoniacal (0.7kg/ha) 25/06/19 Solution azoté 30% (407 kg/ha) 01/07/19 : Sulfate de magnésium (1.67 kg/ha) 09/08/19 : Sulfate de magnésium (1.67 kg/ha)	23/05/20 : Sulfate ammoniacal (1kg/ha) 02/06/20 : Urée (84 kg/ha) 20/06/20 : Solution azoté 30% (450 kg/ha) 15/08/20 : Sulfate magnésium (1.736) 18/09/20 : Sulfate ammoniacal (1.37 kg/ha)
Protection des cultures	03/05/16 : Herbicide (0.68 IFT) 22/05/16 : Herbicide (0.41 IFT) 05/06/16 : Herbicide (0.41 IFT) 09/07/16 : Fongicide (0.85 IFT) + Insecticide (1 IFT) 04/08/16 : Fongicide (0.98 IFT) + Insecticide (0.88 IFT) 08/09/16 : Herbicide (0.76 IFT)	17/05/17 : Insecticide (1 IFT) 24/05/17 : Herbicide (0.5 IFT) 02/06/17 : Herbicide (0.56 IFT) 10/06/17 : Herbicide (0.59 IFT) 05/07/17 : Fongicide (0.7 IFT) 16/08/17 Fongicide (0.69 IFT)	23/11/17 : Herbicide (0.82 IFT) 02/05/18 : Fongicide (0.5 IFT) 17/05/18 : Fongicide (0.5 IFT)	17/05/19 : Herbicide (0.80 IFT) 05/06/19 : Herbicide (0.70 IFT) 14/06/19 : Herbicide (0.43 IFT) 01/07/19 : Fongicide (0.7 IFT) 02/07/19 : Insecticide (1 IFT) 09/08/19 : Fongicide (0.7 IFT)	22/05/20 : Insecticide (0.5 IFT) 23/05/20 : Herbicide (0.7 IFT) 12/06/20 : Herbicide (0.43 IFT) 15/08/2020 : Fongicide (0.7 IFT) 19/09/2020 : Herbicide (1.1 IFT)
Irrigation	9 tours d'eau de 30 mm/ha (270 mm/ha au total)	9 tours d'eau de 30 mm/ha (270 mm/ha au total)	1 tour d'eau (30 mm/ha)	9 tours d'eau de 30 mm/ha (270 mm/ha au total)	10 tours d'eau de 30 mm/ha (270 mm/ha au total)
Autres opérations	Castrations mécaniques femelles Broyage male Castration manuelle	Castrations mécaniques femelles Broyage male Castration manuelle	Castrations mécaniques femelles Broyage male Castration manuelle	Castrations mécaniques femelles Broyage male Castration manuelle	Castrations mécaniques femelles Broyage male Castration manuelle
Récolte	19/09/16 : 3.35 T/ha maïs	19/09/17 : 2.78 T/ha	01/07/17 : 5.98 T/ha	16/11/18 : récolte couvert 6.59 T de MB/ha 15/09/19 : Récolte maïs 3.55 T/ha 26/09/19 : Récolte canne maïs 5 T/ha	07/05/20 : Récolte couvert 15.9 T de MB/ha 29/09/20 : 2.53 T/ha

Maïs semence, SdC Innovant

Culture	Maïs semence 2016	Maïs semence 2017	Blé semence 2018	Maïs semence 2019	Maïs semence 2020
Interculture	25/05/15 : Semis volé Ray gras (9 kg/ha) + trèfle (9 kg/ha) 07/04/16 : Apport lisier (28m3/ha)	28/06/16 : Semis volé Ray Grass (18 kg/ha) + trèfle (8.42 kg/ha) + Vesce (4.74 kg/ha) 22/02/17 : Pâturage moutons 20/04/17 : Pâturage moutons 07/04/17 : Apport lisier (28 m3/ha)	10/10/17 : Apport lisier (32m3/ha)	20/07/18 : Herbicide (0.5 IFT) + Sulfate ammoniacale (1.88kg/ha) 09/08/18 : Semis direct phacélie (2 kg/ha) + millet (7.73 kg/ha) + trèfle (4.5 kg/ha) + vesce (9 kg/ha) + roulage 24/08/18 : Apport lisier (22m3/ha) 26/03/19 : Apport lisier (20 m3/ha)	27/09/19 : Déchaumage 30/09/19 Semis direct Ray Grass (7 kg/ha) + Trèfle (7 kg/ha) + Ray Gras (7 kg/ha) 01/10/19 : Roulage 25/04/20 : Apport lisier 26 m3
Travail du sol et semis	22/04/16 : Broyage + labour 28/04/16 : Hersage 03/05/16 : Vibroculteur 03/05/16 semis maïs femelles (44 kg/ha) 09/05/16 : semis maïs males (20 kg/ha)	04/05/17 : Broyage 05/05/17 : Labour 15/05/17 : Hersage 17/05/17 : Vibroculteur + semis maïs femelles (44 kg/ha) + roulage 26/05/17 : Semis maïs male (30 kg/ha)	17/10/17 : Déchaumage 17/10/17 : Semis directe blé (140 kg/ha) 19/10/17 : Roulage	27/03/19 : Labour 23/03/19 : Hersage 24/03/19 : Roulage 14/05/19 : Vibroculteur 16/05/19 : Semis maïs femelles (34 kg/ha) 24/05/19 : Semis maïs males (20 kg/ha)	09/05/20 : Labour 09/05/20 : Roulage 21/05/20 : Vibroculteur 22/05/20 : Semis maïs femelles (34kg/ha) 29/05/20 : Semis maïs male (20kg/ha)
Fertilisation	03/05/16 : sulfate ammoniacale (1.2 kg/ha) 22/05/16 : sulfate ammoniacale (1.2 kg/ha) 26/05/16 : Engrais 16-14-14 (305 kg/ha) 20/06/16 : Solution azoté 30% (450 kg/ha) 26/06/16 : Engrais binaire PK 44-7 (4.56 L/ha) 04/08/16 : Sulfate de magnésium (1.19kg/ha)	01/06/17 : Urée (82 kg/ha) 02/06/17 : Sulfate ammoniacale (1kg/ha) 10/06/17 : Sulfate ammoniacale (1kg/ha) 10/06/17 : Engrais binaire PK 44-7 (3 L/ha) 20/06/16 : Solution azoté 30% (320 kg/ha) 05/07/17 : Sulfate de magnésium (1 L/ha) 16/08/17 : Sulfate de magnésium (1. L/ha)	21/02/18 : Sulfonylurea (138 kg/ha) 23/03/18 : Urée (190 kg/ha) 02/05/18 : Sulfate ammoniacale (1.32kg/ha) 04/05/18 : Urée (104 kg/ha) 17/05/18 : Sulfate ammoniacale (1.32kg/ha)	05/06/19 : Sulfate ammoniacale (1kg/ha) 14/06/19 : Sulfate ammoniacale (0.7kg/ha) 25/06/19 Solution azoté 30%(366 kg/ha) 01/07/19 : Sulfate de magnésium (1.67 kg/ha) 09/08/19 : Sulfate de magnésium (1.67kg/ha)	23/05/20 : Sulfate ammoniacale (1kg/ha) 02/06/20 : Urée (84 kg/ha) 20/06/20 : Solution azoté 30% (320 kg/ha) 15/08/20 : Sulfate magnésium (1.736) 18/09/20 : Sulfate ammoniacale (1.37 kg/ha)
Protection des cultures	03/05/16 : Herbicide (0.68 IFT) 22/05/16 : Herbicide (0.41 IFT) 05/06/16 : Herbicide (0.41 IFT) 09/07/16 : Fongicide (0.85 IFT) + Insecticide (1 IFT) 04/08/16 : Fongicide (0.98 IFT) + Insecticide (0.88 IFT) 08/09/16 : Herbicide (0.76 IFT)	17/05/17 : Insecticide (1 IFT) 24/05/17 : Herbicide (0.5 IFT) 02/06/17 : Herbicide (0.56 IFT) 10/06/17 : Herbicide (0.59 IFT) 05/07/17 : Fongicide (0.7 IFT) 16/08/17 Fongicide (0.69 IFT)	23/11/17 : Herbicide (0.82 IFT) 02/05/18 : Fongicide (0.5 IFT) 17/05/18 : Fongicide (0.5 IFT)	17/05/19 : Herbicide (0.80 IFT) 05/06/19 : Herbicide (0.70 IFT) 14/06/19 : Herbicide (0.43 IFT) 01/07/19 : Fongicide (0.7 IFT) 02/07/19 : Insecticide (1 IFT) 09/08/19 : Fongicide (0.7 IFT)	22/05/20 : Insecticide (0.5 IFT) 23/05/20 : Herbicide (0.7 IFT) 12/06/20 : Herbicide (0.43 IFT) 15/08/2020 : Fongicide (0.7 IFT) 19/09/2020 : Herbicide (1.1 IFT)
Irrigation	9 tours d'eau de 30 mm/ha (270 mm/ha au total)	9 tours d'eau de 30 mm/ha (270 mm/ha au total)	1 tour d'eau (30 mm/ha)	9 tours d'eau de 30 mm/ha (270 mm/ha au total)	9 tours d'eau de 30 mm/ha (270 mm/ha au total)
Autres opérations	Castrations mécaniques femelles Broyage male Castration manuelle	Castrations mécaniques femelles Broyage male Castration manuelle		Castrations mécaniques femelles Broyage male Castration manuelle	Castrations mécaniques femelles Broyage male Castration manuelle
Récolte	19/09/16 : 4.55 T/ha maïs	19/09/17 : 3.32 T/ha	01/07/17 : 6.73 T/ha	15/09/19 : Récolte maïs 3.29 T/ha	29/09/20 : 1.30 T/ha

Céréaliier avec sol profond , SdC Agriculteur

Culture	Mais 2016	Soja 2017	Blé 2018	Mais 2019
Interculture	26/04/16 : Chlorure de potassium (100 kg/ha)	30/10/16 : Déchaumage		29/07/18 : Déchaumage 11/08/18 : Vibroculteur 01/09/18 : Vibroculteur combiné avec semis moutarde (7 kg/ha)
Travail du sol et semis	28/04/16 : Vibroculteur 28/04/16 : semis maïs (30 kg/ha)	26/04/17 : Vibroculteur 10/05/17 : semis soja (121 kg/ha) 10/05/17 : Roulage	29/09/17 : Vibroculteur 24/10/17 : Vibroculteur 07/11/17 : Semis blé (3 variétés à 120 kg/ha au total)	04/03/19 : Déchaumage 23/04/19 : Vibroculteur 29/04/19 : Semis maïs (30 kg/ha)
Fertilisation	08/06/16 : Urée (320 kg/ha)		07/03/18 : Engrais azoté/soufré 30-5 (344 kg/ha) 23/03/18 : Ammonitrate (150 kg/ha) 18/04/18 : Bore 10% (1L/ha) 05/05/18 : Ammonitrate (90 kg/ha)	04/06/19 : Urée (350 kg/ha)
Protection des cultures	06/06/16 : Herbicide (1.46 IFT) 23/06/16 : Herbicide (0.5 IFT)	10/05/17 : Herbicide (0.34 IFT) 05/06/17 : Herbicide (0.5 IFT) 16/06/17 : Herbicide (0.25 IFT)	18/04/18 : Fongicide (0.9 IFT)	01/06/19 : Herbicide (1,77 IFT) 23/06/19 : Herbicide (0,5 IFT)
Récolte	27/10/16 : 6.6 T/ha	27/09/16 : 1.5 T/ha	05/05/18 : 5.3 T/ha	27/10/19 : 7.3 T/ha

Céréaliier avec sol profond , SdC Innovant

Culture	Mais 2016	Soja 2017	Blé 2018	Colza associé fictif 2019
Interculture	26/04/16 : Chlorure de potassium (100 kg/ha)	27/10/16 : Broyage résidus x 2 (erreur apprentissage) 31/10/16 : Semis direct seigle (200 kg/ha) 25/02/17 : Ammonitrate (90 kg/ha)		
Travail du sol et semis	28/04/16 : Strip-till 28/04/16 : semis maïs (30 kg/ha)	09/05/17 : Roulage couvert 10/05/17 : semis soja (121 kg/ha) 10/05/17 : Roulage semis x 3 (erreur apprentissage)	07/11/17 : Semis direct blé (3 variétés à 120 kg/ha au total)	29/07/18 : Déchaumage 11/08/18 : Vibroculteur 01/09/18 : Vibroculteur 03/09/18 : Semis colza (2.25 kg/ha) + colza précoce méligèthes (0.25 kg/ha) + féverole (59 kg/ha) + fenugrec (16 kg/ha)
Fertilisation	08/06/16 : Urée (320 kg/ha)		07/03/18 : Engrais azoté/soufré 33-5 (344 kg/ha) 23/03/18 : Ammonitrate (150 kg/ha) 18/04/18 : Bore 10% (1L/ha) 05/05/18 : Ammonitrate (90 kg/ha)	06/03/19 : Engrais azoté/soufré 33-5 (158 kg/ha) 23/03/19 : Ammonitrate (158 kg/ha)
Protection des cultures	06/06/16 : Herbicide (1.46 IFT) 23/06/16 : Herbicide (0.5 IFT)	10/05/17 : Herbicide (0.34 IFT) 05/06/17 : Herbicide (0.5 IFT) 16/06/17 : Herbicide (0.25 IFT)	18/04/18 : Fongicide (0.9 IFT)	04/09/18 : Herbicide (0.63 IFT) 08/03/19 : Herbicide (0,47 IFT) 18/04/19 : Fongicide (0,9 IFT)
Récolte	27/10/16 : 6.3 T/ha	27/09/16 : 1.5 T/ha	05/05/18 : 3.8 T/ha	27/10/19 : 2.5 T/ha

Céréaliier avec sol superficiel, SdC Agriculteur

Culture	Mais grain 2018	Mais grain 2019	Blé 2020
Interculture	27/07/17 : Herbicide (0.28 IFT)		
Travail du sol et semis	13/02/18 : Déchaumage 09/04/18 : Chisel 11/04/18 : Vibroculteur 20/04/18 : Vibroculteur 21/04/18 : Semis maïs (25 kg/ha)	23/02/19 : Déchaumage 22/03/19 : Chisel 27/03/18 : Vibroculteur 01/04/18 : Vibroculteur 21/04/18 : Semis maïs (23 kg/ha)	19/11/19 : Broyage 22/11/19 : Chisel 22/11/19 Semis à la volé blé (150 kg/ha) 22/11/19 : Vibroculteur 13/03/20 : Roulage
Fertilisation	24/05/18 : Ammonitrate (285 kg/ha)	26/04/19 : Sulfate ammoniacque (84.82 kg/ha) 03/06/19 : Ammonitrate (240 kg/ha)	28/02/20 : Ammonitrate (176 kg/ha) 18/03/20 : Sulfate d'ammoniaque (92 kg/ha) 30/03/20 : Ammonitrate (150 kg/ha) 29/04/20 : Ammonitrate (94 kg/ha)
Protection des cultures	09/05/18 : Herbicide (1.55 IFT)	18/05/19 : Herbicide (2,89 IFT)	04/03/20 : Herbicide (0.57 IFT) 18/05/20 : Fongicide (0.95 IFT)
Récolte	20/09/18 :5.63 T/ha	20/09/13 : 1.4 T/ha	13/07/20 : 4.45 T/ha grain + 3.2 T/ha paille

Céréaliier avec sol superficiel, SdC Innovant

Culture	Mais grain 2018	Soja 2019	Blé 2020
Interculture	27/07/17 : Herbicide (0.28 IFT) 15/09/17 : Semis direct vesce (12 kg/ha) + tréfle (3 kg/ha) + repousse colza 18/04/18 : Déchaumage	02/10/18 : semis direct seigle (231 kg/ha) 03/05/18 : herbicides (0.5 IFT)	
Travail du sol et semis	19/04/18 : Strip till 21/04/18 : Herbicide 1 IFT 21/04/18 : Semis maïs (25 kg/ha)	06/05/18 : Semis direct soja (141 kg/ha)	22/11/19 Semis direct blé (150 kg/ha) 13/03/20 : Roulage
Fertilisation	24/05/18 : Ammonitrate (200 kg/ha)		28/02/20 : Ammonitrate (176 kg/ha) 18/03/20 : Sulfate d'ammoniaque (92 kg/ha) 30/03/20 : Ammonitrate (150 kg/ha) 29/04/20 : Ammonitrate (94 kg/ha)
Protection des cultures	09/05/18 : Herbicide (1.55 IFT)	18/05/19 : Herbicide (1 IFT)	23/12/19 : Herbicide (0.6 IFT) 04/03/20 : Herbicide (0.57 IFT) 18/05/20 : Fongicide (0.95 IFT)
Récolte	20/09/18 :5.56 T/ha	20/09/13 : 0.84 T/ha	13/07/20 : 2.73 T/ha grain

Annexe 3 : Prix d'achats des intrants en €/kg en fonction des exploitations

		Polyculture élevage	Céréaler sol profond	Mais semence	Céréaler sol superficiel		
Fertilisation	Fertilisation minérale	Ammonitrate 26%	0,3				
		Ammonitrate 33,5%	0,33	0,33			
		Solution azotée 30%			0,29		
		Engrais 26 - 0 - 0 (12)	0,3				
		Engrais 12 - 43 - 0 (5)	2,11				
		Engrais Minéral 33 - 0 - 5 (5)		0,33			
		Engrais Ternaire 16 - 14 - 14 (0)			0,43		
	organique	Kiesérite	0,31				
		Chlorure de potassium 40%		0,25			
		Porc - Liser de truies allaitantes			0		
		Rumi - Fumier de bovins, litière accumulée, m	0		0		
		Biosstimulant/engrais foliaire	Sulfate d'ammoniaque			0,3	0,29
			Sulfate de magnésium			0,3	
			Sulfonitrate			0,28	
			Urée	0,3	0,34	0,34	
			Zeatrel			4,94	
			Zintrac			6,59	
Bacteriolit			3,31				
Oligo redd	3,5						
Epsa Top	0,5						
Engrais 0 - 0 - 2,9 (2,8)	5,94						
Semence	Culture	Ble Tendre (Bonifacio)			0,27		
		Ble Tendre ARMSTRONG	0,6	0,61			
		Ble Tendre Absalon	0,55	0,56	0,45		
		Ble Tendre Nemo		0,6			
		Ble Tendre oregrain	0,55				
		Ble Tendre Celest	0,58				
		Colza (générique)		4,36			
		Colza ES ALICIA	4,36				
		Colza HYBRIDE FERME	0,5				
		Mais	5,88	5,32	5,73	6,28	
	Soja	1,85	1,81		1,87		
	Couvert et plante compagne	Orge				0,15	
		Moutarde blanche		1,89			
		Fenugrec		2,27			
		Féverole	1,11	1,11		1,11	
		Avoine					
		Ray grass italie			1,7		
		Sorgho			2,65		
		Millet			1,95		
		Phacélie			5,94		
		Pois	1		5,25	5,25	
		Seigle	1,14	1,14			
		Nyger	2,97				
Sorgho		1,85					
Tournesol	0,5						
Trèfle incarnat			2,84	2,84			
Vesce velue	3,26		3,26	3,26			
Produit phytosanitaire	Fongicide	AMISTAR			29,11		
		BALMORA			32		
		BISTRO	27,6				
		CARBOXAR	54				
		CINCH PRO				34,83	
		ELATUS ERA			61,25		
		KUBIC	36				
		LIBRAX			54,4		
		ORPIST	43,66				
		OVERDEX				48	
		PIANO				53,56	
		PICTOR PRO	73				
		PRIORI XTRA	44				
		PRO PLEX 450	10,35				
		PROSARO	50	50			
		SPORTAK HF			13		
		ULYSSES	33				
		Herbicide	ADENGO		25,6		
			ADIAKAR	20			
			ALISEO GOLD SAFENEUR			18,27	
	ALLIE MAX SX					522	
	APICALE 400					47,7	
	AUXO					47,6	
	BANVEL 4 S				37		
	BARBARIAN XL					4,42	
	CALIBRA					14,42	
	CALLISTO		34				
	CAMIX				13,6		
	CARAT					40	
	CASPER			94,66			
	CHARDOL 600				6,9		
	CHLORTOCIDE EL				8		
	CLINIC MAX 360		3				
	COMPIL				61		
	CONQUERANT			67,5			
	CORUM		57,9			69,23	
	DIMBA 480 SL		17				
	ELUMIS			50			
	FORNET 45C					23,93	
	FREEWAY			5			
	GALLUP SPECIAL			4,32			
	GLYFOLASH	3					
	HURLER	12					
	ISARD		23,03				
	KOLOSS				31,36		
	MERCANTOR GOLD		20				
	MESOSTAR			40			
	NICOZEA	15					
	NOVALL		33				
	PAMPA	19,14	19,14	19,14			
	PULSAR 40	55,25	55,25				
	SPECTRUM				24,44		
STARTER WG				113,5			
STRATOS ULTRA		20,7					
TURBOPROPYZ	20,3						
U 46 D	6,23						
U 600 PRO			8,59				
VIAGLIF 360	3,74						
ALPHATAR	25						
Insecticide	CORAGEN			280			
	DAXOL			3,86			
	TRIKA EXPERT			5			
	LIMARION	2,24					
WARIOR EXTRA	2,4						

Annexe 4 : Prix de vente des cultures en €/t en fonction des exploitations

Cultures	Années	Polyculture élevage	Céréaliier sol profond	Maïs semence	Céréaliier sol superficiel
Blé d'hiver	2018	165	179	222	
	2020				272
Colza	2019	370	360		
Maïs	2016	110	157	744	
	2017			707	
	2018				160,5
	2019		157	927	155,7
	2020			1167	
Soja	2017	320	343		
	2019				391
	2020	370			
Méthaniseur		25		25	
Paille		25			25

Annexe 5 : Caractéristiques du matériel des exploitations

• Exploitation maïs semence

Système de culture	Matériel	Caractéristiques	ETA/CUMA/Propriété	Prix d'achat (€)	Débit de chantier (ha/h)	Coût d'entretien rép / Location (€/ha)
Agriculteur et innovant	1 Enjambeur caestreuse 80 ch CUMA	ENJAMBEUR 80 ch - Enj. Cab + Porte outil	CUMA			0
Agriculteur et innovant	1 Tracteur 110 ch CUMA	4 ROUES MOTRICES 106 à 115 ch CHASSIS FIXE -	CUMA			21
Agriculteur et innovant	1 Tracteur 110 ch ETA	4 ROUES MOTRICES 106 à 115 ch CHASSIS FIXE -	CUMA			0
Agriculteur et innovant	1 Tracteur 115 ch	4 ROUES MOTRICES 106 à 115 ch CHASSIS FIXE -	Propriété (100%)	75000		2.5
Agriculteur et innovant	1 Tracteur 140 ch CUMA	4 ROUES MOTRICES 136 à 145 ch CHASSIS FIXE -	CUMA			21
Agriculteur et innovant	1 Tracteur 170 ch CUMA	4 ROUES MOTRICES 166 à 190 ch CHASSIS FIXE -	CUMA			0
Agriculteur et innovant	1 Tracteur 170 cv ETA	4 ROUES MOTRICES 166 à 190 ch CHASSIS FIXE -	CUMA			0
Agriculteur et innovant	1 Tracteur 230 ch Location	4 ROUES MOTRICES 211 à 240 ch CHASSIS FIXE -	CUMA			32
Agriculteur et innovant	1 Tracteur 270 ch Location	4 ROUES MOTRICES 241 à 290 ch CHASSIS FIXE -	CUMA			0
Agriculteur	2 Andaineur Roc 3 m CUMA	Porté Simple 2.51 à 3.00 m Barres Parallèles	CUMA		3.5	18
Agriculteur	2 Faucheuse 6 m CUMA	Combinée Simple 6.51 à 7.00 m Disques	CUMA		5.3	30
Agriculteur et innovant	2 Moissonneuse Céréales ETA	CONVENTIONNELLE 5 SECOUEURS 301 ch et plus 6.00 à 7.50 m	ETA		3	108
Agriculteur et innovant	2 Moissonneuse Epis ETA	CONVENTIONNELLE 5 SECOUEURS 301 ch et plus 6.00 à 7.50 m	ETA		2.5	135
Agriculteur	2 Remorq autochargeuse 60 m3 CUMA	62.01 à 64.00 m3 PU 1.60 à 1.80 m 16-20 Couteaux -	CUMA		1	100
Agriculteur et innovant	2 Remorq 11 T CUMA	MONOCOQUE 1 ESSIEU 10.1 à 12.0 t -	CUMA			24.5
Agriculteur et innovant	2 Remorq 14 T	MONOCOQUE 2 ESSIEUX 12.1 à 14.0 t -	Propriété (100%)	8000		5.75
Agriculteur et innovant	2 Remorq 16 T CUMA	MONOCOQUE 2 ESSIEUX 14.1 à 16.0 t -	CUMA			54.8
Agriculteur et innovant	2 Remorq Epis Maïs ETA	MONOCOQUE 2 ESSIEUX 18.1 à 22.0 t -	CUMA		2.5	75
Agriculteur et innovant	3 Broyeur 1,8 m CUMA	AXE HORIZONTAL 1.60 à 1.90 m Arrière 1 Rotor	CUMA		0.90	30
Agriculteur et innovant	3 Broyeur 3 m CUMA	AXE HORIZONTAL 2.81 à 3.00 m Arrière 1 Rotor	CUMA			7.04
Agriculteur et innovant	3 Déchaumeur Terrano avec pattes d'oie 3 m CUMA	DENTS + DISQ NIVEL PORTE 2.51 à 3.00 m -	CUMA		2	25.39
Agriculteur et innovant	3 Epandeur de fumier 15 T CUMA	1 ESSIEU 14.1 à 16.0 t Table -	CUMA		1.5	25.02
Agriculteur et innovant	3 Epandeur de lisier 16,5 m3 ETA	Enfouisseurs 2 ESSIEUX 16001 à 18000 l -	CUMA		1.9	0
Agriculteur et innovant	4 Charrue 5 corps CUMA	Portée 5 Corps 16" Sécu Non Stop	CUMA		1.2	34.4
Agriculteur et innovant	4 Déchaumeur Terrano sans pattes d'oie 3 m CUMA	DENTS + DISQ NIVEL PORTE 2.51 à 3.00 m -	CUMA		2	19.39
Agriculteur et innovant	4 Déchaumeur à disques Joker 3 m CUMA	Porté Fixe Petits Disques 2.50 à 3.00 m -	CUMA		2	17.81
Agriculteur et innovant	4 Herse plate 5 m CUMA	GAMME LEGERE 4.51 à 5.00 m - -	CUMA		3	8.05
Agriculteur et innovant	4 Rouleaux Packer 6,3 m CUMA	Auto-Porté Cultipacker 6.01 à 6.50 m -	CUMA		3	6.55
Agriculteur et innovant	4 Semoir céréales SD Avatar 8 m CUMA	Disques + Dents 8.0 m Pneumatique Trainé	CUMA		4.8	70.94
Agriculteur et innovant	4 Semoir maïs femelle 7 rangs 4,8 m CUMA	Pneu Téles Simple 6 Rang Ecart 75 à 80 cm Double Disques	CUMA		2.0	27
Agriculteur et innovant	4 Semoir maïs mâle 2 rangs 4,8 m CUMA	Pneu Porté Simple 4 Rang Ecart 75 à 80 cm Double Disques	CUMA		1.4	47.18
Agriculteur et innovant	4 Vibroculteur 6 m CUMA	5 Rangées Dents Porté Repliable 5.51 à 6.00 m R.Barres	CUMA		3.5	14.52
Agriculteur et innovant	5 Broyeur pieds mâles (substitut)	Gyrobroyeur VE de 1 m à 1,25 m 0	CUMA		3.0	0
Agriculteur et innovant	5 Castreuse Maïs (substitut) CUMA	Ecimeuse rogneuse VL à lames 2 1/2 rangs	CUMA		1.1	28.34
Agriculteur et innovant	5 Enfouisseur solution azotée 5,4 m ETA	DENTS + FERTIL 12 RANGS Ecart 45 à 50 cm 6.00 m	ETA		2.7	35
Agriculteur et innovant	5 Epandeur d'engrais Geospread	PORTE CENTRIFUGE 24 m 1501 à 2000 l	CUMA		16.2	5
Agriculteur et innovant	5 Matériel irrigation 4 Enrouleurs + Tuyaux	110 mm 500 m	Propriété (100%)	100000	0	0
Agriculteur et innovant	5 Pulvé. Automoteur CUMA	AUTOMOTEUR 4500 litres 28 mètres -	CUMA		16	20.54

• Polyculture élevage

Système de culture	Matériel	Caractéristiques	ETA/CUMA/Propriété	Prix d'achat (€)	Débit de chantier (ha/h)	Coût d'entretien rép / Location (€/ha)
Agriculteur et Innovant	1 Tracteur JD 115 ch CUMA	4 ROUES MOTRICES 106 à 115 ch CHASSIS FIXE -	CUMA			21
Agriculteur et Innovant	1 Tracteur JD 230 ch	4 ROUES MOTRICES 211 à 240 ch CHASSIS FIXE -	Propriété (100%)	145000		3.1
Agriculteur et Innovant	1 Tracteur NH 140 ch	4 ROUES MOTRICES 136 à 145 ch CHASSIS FIXE -	Propriété (100%)	100000		2.9
Agriculteur	2 Andaineur Roc 3 m CUMA	Porté Simple 2.51 à 3.00 m Barres Parallèles	CUMA		3.5	18
Agriculteur	2 Faucheuse 6 m CUMA	Combinée Simple 6.51 à 7.00 m Disques	CUMA		5.5	28
Agriculteur et Innovant	2 Moissonneuse céréale ETA	CONVENTIONNELLE 5 SECOUEURS 301 ch et plus 6.00 à 7.50 m	ETA		1.5	100
Agriculteur et Innovant	2 Moissonneuse maïs ETA.	CONVENTIONNELLE 5 SECOUEURS 301 ch et plus 6.00 à 7.50 m	ETA		2.5	120
Agriculteur et Innovant	2 Presse paille	Haute Densité P up 2.11 à 2.30 m Canal 90x120 250 - 480 kg	CUMA		5	15
Agriculteur	2 Remorq autochargeuse 60 m3 CUMA	62.01 à 64.00 m3 PU 1.60 à 1.80 m 16-20 Couteaux -	CUMA		1	72
Agriculteur et Innovant	2 Remorq 16 T 1	MONOCOQUE 2 ESSIEUX 16.1 à 18.0 t -	Propriété (100%)	28000	1.5	0.15
Agriculteur et Innovant	2 Remorq 16 T 2	MONOCOQUE 2 ESSIEUX 16.1 à 18.0 t -	Propriété (100%)	28000	1.5	0.15
Agriculteur et Innovant	3 Décompacteur clas.	Droit Fixe Dents Obliques 7 Corps -	Propriété (40%)	12000	1.2	0
Agriculteur et Innovant	3 Epandeur de fumier 12 t	1 ESSIEU 10.1 à 12.0 t Hérissons -	Propriété (5%)	29947	1	0.5
Agriculteur et Innovant	3 Rouleaux	Auto-Porté Ondulé 6.01 à 6.50 m -	Propriété (100%)	8000	3.3	0.6
Agriculteur et Innovant	4 Semoir à céréale 8m	Disques + Dents 8.0 m Pneumatique Trainé	Propriété (90%)	130000	3	2
Agriculteur et Innovant	4 Semoir monograine 7 rangs CUMA	Pneu Téles Simple 7 Rang Ecart 55 à 60 cm Socs Disques	CUMA		1.7	32
Agriculteur et Innovant	4 Strip till	Porté Repliable 4.01 à 4.50 m 7 Rang à 55/60 -	CUMA		2.5	35
Agriculteur et Innovant	5 Distributeur engrais 24 m 2400 litre	PORTE CENTRIFUGE 24 m 1501 à 2000 l	Propriété (100%)	12000	15	0.4
Agriculteur et Innovant	5 Pulvérisateur 24 m 1800l	PORTE 1500 litres 24 mètres DPM/DPAE	Propriété (100%)	38000	12	1.1

- Céréalière avec un sol profond

Exploitation	Matériel	Caractéristiques	ETA/CUMA/Propriété	Prix d'achat (€)	Débit de chantier (ha/h)	Coût d'entretien rép / Location (€/ha)
Agriculteur et innovant	1 Tracteur	4 ROUES MOTRICES 146 à 155 ch CHASSIS FIXE -	Propriété (100%)	111091		2.9
Agriculteur et innovant	2 Moissonneuse bat. ETA	CONVENTIONNELLE 5 SECOUEURS 301 ch et plus 6.00 à 7.50 m	CUMA		3	123
Agriculteur et innovant	2 Remorque 12 T	MONOCOQUE 1 ESSIEU 10.1 à 12.0 t -	Propriété (100%)	14800		0.15
Innovant	3 Broyeur de résidu	AXE VERTICAL 2.81 à 3.00 m Arrière 2 Rotors	Propriété (100%)	4775	2	2
Agriculteur et innovant	3 Cover crop 3,5 m CUMA	Gamme Lourde En V 3.00 à 3.50 m -	CUMA		2	5.4
Innovant	3 Rouleaux faca CUMA	Tasse Avant Replia Squelette 3.01 à 3.50 m -	CUMA		2.099999905	3.6
Agriculteur et innovant	3 Vibroculteur	4 Rangées Dents Porté Repliable 6.01 à 6.50 m Herses	Propriété (100%)	7300	4.199999809	0.5
Agriculteur et innovant	4 Rouleaux crosskil CUMA	Auto-Porté Croskill 3.51 à 4.00 m -	CUMA		2	4.3
Innovant	4 Semis direct céréale CUMA	Disques 3.0 m Pneumatique Trainé	CUMA		1.799999952	19.1
Agriculteur et innovant	4 semoir céréale CUMA	Dist. Mécanique 3.00 m Porté Socs	CUMA		1.399999976	7.9
Agriculteur	4 Semoir monograine	Pneu Porté Simple 7 Rangés Ecart 75 à 80 cm Socs	Propriété (100%)	15541	2.299999952	1
Innovant	4 Semoir monograine 7 rang CUMA	Pneu Porté Simple 7 Rangés Ecart 75 à 80 cm Socs	CUMA		2.299999952	12.4
Innovant	4 Strip till CUMA 6 rang	Porté Fixe 5.51 à 6.00 m 6 Rangés à 70/80 -	CUMA		2	20
Agriculteur et innovant	5 Epandeur engrais	PORTE CENTRIFUGE 18 m 1001 à 1200 l	Propriété (100%)	4000	12.19999981	0.2
Agriculteur et innovant	5 Pulvérisateur	PORTE 1200 litres 18 mètres DPM/DPAE	Propriété (100%)	25000	9.399999619	0.8

- Céréalière avec un sol superficiel

Système de culture	Matériel	Caractéristiques	ETA/CUMA/Propriété	Prix d'achat (€)	Débit de chantier (ha/h)	Entretien rép / Location (€/ha)
Agriculteur et innovant	1 Tracteur 140 ch JD 6820	4 ROUES MOTRICES 136 à 145 ch CHASSIS FIXE -	Propriété (100%)	36684		2.9
Agriculteur et innovant	1 Tracteur 165 ch JD 7430	4 ROUES MOTRICES 156 à 165 ch CHASSIS FIXE -	Propriété (100%)	81087		3
Agriculteur et innovant	1 Tracteur 80 ch ETA	4 ROUES MOTRICES 76 à 85 ch CHASSIS FIXE -	CUMA			0
Agriculteur et innovant	2 Moissonneuse bat. ETA	CONVENTIONNELLE 5 SECOUEURS 301 ch et plus 6.00 à 7.50 m	ETA		3	123
Agriculteur et innovant	2 Presse paille ETA	Haute Densité P up 1.71 à 1.90 m Canal 60x90 100 - 260 kg	ETA		1.89999998	0
Agriculteur et innovant	2 Remorque 11 t	MONOCOQUE 2 ESSIEUX 10.1 à 12.0 t -	Propriété (100%)	6000		0.15
Agriculteur et innovant	2 Remorque 15 t	MONOCOQUE 2 ESSIEUX 14.1 à 16.0 t -	Propriété (100%)	12000		0.15
Agriculteur	3 Broyeur Devoys 2,8 m	AXE HORIZONTAL 2.61 à 2.80 m Arrière 1 Rotor	Propriété (100%)	2500		4
Agriculteur	3 Chisel Eurocult 4,3 m	Sécu Non Stop Porté Repliable 4.01 à 4.50 m -	Propriété (100%)	21000	2.5999999	3
Agriculteur	3 Cover crop 3,5 m CUMA	Gamme Lourde En V 3.00 à 3.50 m -	CUMA		2	5.4
Agriculteur et innovant	3 Déchaumeur à disques Carrier 5 m	Semi Porté Repliable Petits Disques 4.51 à 5.00 m R.Couronne Acier	Propriété (100%)	15000	3.5999999	2
Agriculteur et innovant	4 Rouleau Cambridge 6 m	Auto-Porté Cambridge 6.01 à 6.50 m -	Propriété (100%)	6000	3.29999995	0.6
Innovant	4 Semoir céréales SD 3 m	Disques 3.0 m Pneumatique Trainé	Propriété (100%)	24500	1.79999995	2
Agriculteur et innovant	4 Semoir monograine 6 rangs CUMA	Pneu Porté Simple 6 Rangés Ecart 75 à 80 cm Socs Disques	CUMA		2	14
Innovant	4 Strip till 4 rangs CREAS	Porté Fixe 3.01 à 3.50 m 4 Rangés à 70/80 -	CUMA		1.79999995	19.8
Agriculteur	4 Vibroculteur Einbock 6 m	4 Rangées Dents Porté Repliable 5.51 à 6.00 m R.Barres	Propriété (100%)	13700	3.9000001	0.5
Agriculteur	5 Epandeur engrais à rampe 12 m	PORTE PNEUMATIQUE 12 m 1001 à 1200 l	Propriété (100%)	800	8.10000038	0.5
Agriculteur et innovant	5 Epandeur engrais centrifuge 24 m	PORTE CENTRIFUGE 24 m 1501 à 2000 l	Propriété (100%)	6610	16.2000008	0.4
Agriculteur et innovant	5 Pulvérisateur 24 m	TRAINE 2500 litres 24 mètres DPAE	Propriété (100%)	20000	15.6000004	1.2

Annexes 6 : Caractéristiques des parcelles de l'expérimentation sur l'outil Iphy 3

Exploitation	Classe texture INDIGO	Classe Profondeur INDIGO	Classe MO INDIGO	Battance (oui/non)	Hydromorphie (oui/non)	Pente (%)	Distance point d'eau	Largeur des bandes enherbées	Vitesse avancement (km/h)	Hauteur de rampe (m)	Buse antidérive (oui/non)	Pression (bar)
PE	Sableux	Profond	< 3 %	non	oui	Moyenne (2-5%)	>10 m	<5 m	5.5	0.55	non	3
MS	Sableux	Moyen	3-5 %	non	non	Moyenne (2-5%)	>10 m	Aucune	5.5	0.55	non	3
CP	Limoneux	Profond	> 5 %	non	oui	Nulle (0%)	>10 m	<5 m	5.5	0.55	non	3
CP	Limoneux	Moyen	< 3 %	non	non	Nulle (0%)	>10 m	Aucune	5.5	0.55	non	3

SdC	Année et couple précédent-suivant	Récolte précédent	kgN/ha	Entrée hiver	kgN/ha	Sortie hiver	kgN/ha
AGRI	2017-2018 Mais semence-blé	Apport lisier Reliquat post-récolte Minéralisation sol	32 69 ?	N absorbé par le blé Reliquat entrée hiver N potentiellement lixiviable	5 60 41	N absorbé par le blé (février) Reliquat sortie hiver (février) N potentiellement lixiviable durant l'hiver	15 15 30
INNO V	2017-2018 Mais semence-blé	Apport lisier Reliquat post-récolte Minéralisation sol	32 82 ?	N absorbé par le blé Reliquat entrée hiver N potentiellement lixiviable	5 47 67	N absorbé par le blé (février) Reliquat sortie hiver (février) N potentiellement lixiviable durant l'hiver	15 22 10
AGRI	2018-2019 Blé - couvert avoine-sorgo	Apport lisier Reliquat post-récolte Minéralisation sol	25 30 ?	N absorbé par le couvert Reliquat entrée hiver N potentiellement lixiviable	64 45 0	N absorbé par le couvert (janv.) Reliquat sortie hiver (janvier) N potentiellement lixiviable durant l'hiver	0 20 25
INNO V	2018-2019 Blé - couvert phacélie+trèfle+mille t+vesce	Apport lisier Reliquat post-récolte Minéralisation sol	25 30 ?	N absorbé par le couvert Reliquat entrée hiver N potentiellement lixiviable	40 30 0	N absorbé par le couvert (janv.) Reliquat sortie hiver (janvier) N potentiellement lixiviable durant l'hiver	50 31 0
AGRI	2019-2020 Mais semence - couvert ray-grass et trèfle	Apport N post récolte Reliquat post-récolte Minéralisation sol	0 103 ?	N absorbé par le couvert Reliquat entrée hiver N potentiellement lixiviable	14 14 75	N absorbé par le couvert (janv.) Reliquat sortie hiver (janvier) N potentiellement lixiviable durant l'hiver	23 19 0
INNO V	2019-2020 Mais semence - couvert ray-grass + trèfle + vesce	Apport N post récolte Reliquat post-récolte Minéralisation sol	0 134 ?	N absorbé par le couvert Reliquat entrée hiver N potentiellement lixiviable	16 14 104	N absorbé par le couvert (janv.) Reliquat sortie hiver (janvier) N potentiellement lixiviable durant l'hiver	30 18 0
AGRI	2020-2021 Mais semence - couvert végétal	Apport N post récolte Reliquat récolte Minéralisation sol	0 118 ?	N absorbé par le couvert Reliquat entrée hiver N potentiellement lixiviable	30 26 62	N absorbé par le couvert (janv.) Reliquat sortie hiver (janvier) N potentiellement lixiviable durant l'hiver	? ? ?
INNO V	2020-2021 Mais semence - couvert végétal	Apport N post récolte Reliquat post-récolte Minéralisation sol	0 100 ?	N absorbé par le couvert Reliquat entrée hiver N potentiellement lixiviable	30 35 35	N absorbé par le couvert (janv.) Reliquat sortie hiver (janvier) N potentiellement lixiviable durant l'hiver	? ? ?

Annexe 8 : Sorties Syst’N® - moyennes issues des simulations sur 14 années climatiques

Tableau 1 : Sorties de la modélisation avec l’outil Syst’N® pour l’exploitation en polyculture-élevage.

			SdC Agri.	SdC Innov.
a	Entrées d'azote (kgN/ha/an)	a1 : Apport: fertilisation minérale	135	113
		a2 : Apport: fertilisation organique	40	40
		a3 : Fixation biologique d'azote	62	77
b	Sorties d'azote (kgN/ha/an)	b1 : Exportation par les récoltes	123	115
		b2 : Exportation par les résidus de cultures exportés de la parcelle	30	30
c	Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kgN/ha/an)		128	112
d	Pertes d'azote moyennes annuelles (kgN/ha/an)	d1 : Protoxyde d'azote (N ₂ O)	0,2	0,2
		d2 : Ammoniac (NH ₃)	3	3
		d3 : Nitrate lessivé (NO ₃ ⁻)	34	37
		d4 : Nitrate ruisselé (NO ₃ ⁻)	0	0
e	Lame d'eau drainante annuelle (mm d'eau/an)		132	148
a-b	Bilan apparent : Entrées – Sorties par exportation (kgN/ha/an)		84	85
a - (b+d)	Variation du stock d'azote total dans le sol (kgN/ha/an)		47	45
(d3*100)/e	Pertes d'azote par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgN/100 mm)		26	25
(d3*100*4.43)/e	Pertes de nitrates par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgNO ₃ ⁻ /100 mm) ou concentration moyenne en nitrate (NO ₃ ⁻) sous le profil (mgNO ₃ ⁻ /l)		114	111
d2/(a1+a2)	Pertes d'azote sous forme d'ammoniac (NH ₃) en % des apports totaux		0	0

Tableau 2 : Sorties de la modélisation avec l’outil Syst’N® pour l’exploitation céréalière sur sol profond.

			SdC Agri.	SdC Innov.
a	Entrées d'azote (kgN/ha/an)	a1 : Apport: fertilisation minérale	122	117
		a2 : Apport: fertilisation organique	0	0
		a3 : Fixation biologique d'azote	32	29
b	Sorties d'azote (kgN/ha/an)	b1 : Exportation par les récoltes	94	79
		b2 : Exportation par les résidus de cultures exportés de la parcelle	0	0
c	Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kgN/ha/an)		143	106
d	Pertes d'azote moyennes annuelles (kgN/ha/an)	d1 : Protoxyde d'azote (N ₂ O)	0,2	0,1
		d2 : Ammoniac (NH ₃)	10	5
		d3 : Nitrate lessivé (NO ₃ ⁻)	24	16
		d4 : Nitrate ruisselé (NO ₃ ⁻)	0	0
e	Lame d'eau drainante annuelle (mm d'eau/an)		140	140
a-b	Bilan apparent : Entrées – Sorties par exportation (kgN/ha/an)		60	67
a - (b+d)	Variation du stock d'azote total dans le sol (kgN/ha/an)		26	46
(d3*100)/e	Pertes d’azote par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgN/100 mm)		17	11
(d3*100*4.43)/e	Pertes de nitrates par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgNO ₃ ⁻ /100 mm) ou concentration moyenne en nitrate (NO ₃ ⁻) sous le profil (mgNO ₃ ⁻ /l)		76	51
d2/(a1+a2)	Pertes d’azote sous forme d'ammoniac (NH ₃) en % des apports totaux		0,1	0

Tableau 3 : Sorties de la modélisation avec l’outil Syst’N® pour l’exploitation céréalière sur sol superficiel.

			SdC Agri.	SdC Innov.
a	Entrées d'azote (kgN/ha/an)	a1 : Apport: fertilisation minérale	113	81
		a2 : Apport: fertilisation organique	0	0
		a3 : Fixation biologique d'azote	0	53
b	Sorties d'azote (kgN/ha/an)	b1 : Exportation par les récoltes	67	66
		b2 : Exportation par les résidus de cultures exportés de la parcelle	0	0
c		Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kgN/ha/an)	156	128
d	Pertes d'azote moyennes annuelles (kgN/ha/an)	d1 : Protoxyde d'azote (N ₂ O)	0,1	0,1
		d2 : Ammoniac (NH ₃)	1	1
		d3 : Nitrate lessivé (NO ₃ ⁻)	63	44
		d4 : Nitrate ruisselé (NO ₃ ⁻)	0	0
e		Lame d'eau drainante annuelle (mm d'eau/an)	231	229
a-b		Bilan apparent : Entrées – Sorties par exportation (kgN/ha/an)	46	68
a - (b+d)		Variation du stock d'azote total dans le sol (kgN/ha/an)	-18	23
(d3*100)/e		Pertes d’azote par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgN/100 mm)	27	19
(d3*100*4.43)/e		Pertes de nitrates par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgNO ₃ ⁻ /100 mm) ou concentration moyenne en nitrate (NO ₃ ⁻) sous le profil (mgNO ₃ ⁻ /l)	121	85
d2/(a1+a2)		Pertes d’azote sous forme d'ammoniac (NH ₃) en % des apports totaux	0	0

BENET, Guillem, 2017-2021, Effet de l'adoption de systèmes de culture inspirés de l'agriculture de conservation des sols sur les performances technico-économiques et environnementales de 4 exploitations du territoire de la Boucle du Rhône en Dauphiné, 37 pages, mémoire de fin d'études, Lempdes, 2021.

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES :

- ♦ Institut supérieur d'agriculture Rhône-Alpes (ISARA)

ENCADRANTS :

- ♦ Maître de stage : VIAN, Jean-François (ISARA)
- ♦ Tuteur pédagogique : VASSAL, Nathalie

OPTION : Concevoir et accompagner l'innov'action en agronomie

RESUMÉ

L'agriculture de conservation des sols (ACS) semble être un mode production intéressant pour répondre aux nouveaux enjeux de l'agriculture. Dans le cadre du collectif sol, 4 systèmes de culture (SdC) Innovants inspirés de l'ACS ont été expérimentés de 2016 à 2020 chez 4 agriculteurs pilotes du département de l'Isère. Les 4 SdC Innovants ont été conduits par les 4 agriculteurs pilotes et ont été comparés aux performances des SdC conduits classiquement par des agriculteurs pilotes, appelé SdC Agriculteur. L'objectif de ce travail est d'évaluer les effets des SdC Innovants sur les performances technico-économiques et environnementales des exploitations. Pour répondre à cet objectif, une évaluation multicritère a été effectuée. L'outil Systerre® a été utilisé pour évaluer les performances technico-économiques et environnementales. Les outils Phy 3 et Syst'N® ont été utilisées pour évaluer les pertes de pesticides et d'azote dans les eaux. Les performances des SdC Innovants ont été comparées à celle des SdC Agriculteurs. Les SdC Innovants affaiblissent les performances économiques des exploitations à cause d'une diminution des rendements, augmentation des charges en semences et un effet nul sur les charges de mécanisation. En cas de réussite, les SdC Innovant réduisent le temps de travail des agriculteurs. Dans certains SdC Innovant, la réduction des apports d'azote diminue les émissions de GES et la consommation d'énergie primaire. Les SdC Innovant ont peu d'effet sur le risque de perte de pesticides et d'azote dans les eaux.

Mots clés : Système de culture innovant, évaluation multicritère, agriculture de conservation, développement durable

ABSTRACT

Conservation agriculture (CA) seems to be an interesting production method for responding to the new challenges of agriculture. In the project "collectif sol", 4 innovative cropping systems (SdC) inspired by CA were tested from 2016 to 2020 on 4 pilot farmers in the Isère. The 4 Innovative SdC were conducted by the 4 pilot farmers and were compared to the performances of SdC conventionally conducted by pilot farmers, called Farmer SdC. The objective of this work is to evaluate the effects of the Innovative SdC on the technico-economic and environmental performance of the farms. To meet this objective, a multi-criteria evaluation was carried out. The Systerre® tool was used to evaluate the technico-economic and environmental performance. The IPhy 3 and Syst'N® tools were used to assess pesticide and nitrogen losses to water. The performance of the Innovative SdC was compared to that of the Farmer SdC. Innovative. The Innovative SdC decreases the economic performance of the farms due to lower yields, higher seed expenses and no effect on mechanisation expenses. If successful, Innovative SdC reduce farmers' working time. In some Innovative SdC, reduced nitrogen inputs reduce GHG emissions and primary energy consumption. Innovative SoCs have little effect on the risk of pesticide and nitrogen loss to water.

Keywords : Innovative cropping system, multi-criteria evaluation, conservation agriculture, sustainable development

