



HAL
open science

Semis direct sous couvert végétal sans herbicide : conception, expérimentation et évaluation conjointes d'itinéraires techniques entre praticiens et chercheurs

Laura Vincent-Caboud

► To cite this version:

Laura Vincent-Caboud. Semis direct sous couvert végétal sans herbicide : conception, expérimentation et évaluation conjointes d'itinéraires techniques entre praticiens et chercheurs. Sciences agricoles. Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France, 2020. Français. NNT : 2020IAVF0001 . tel-03402744

HAL Id: tel-03402744

<https://pastel.hal.science/tel-03402744v1>

Submitted on 25 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

NNT : 2020IAVF0001

THESE DE DOCTORAT

préparée à l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement
(AgroParisTech)

pour obtenir le grade de

**Docteur de l'Institut agronomique vétérinaire et forestier
de France**

Spécialité : Sciences agronomiques

École doctorale n° 581

Agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé (ABIES)

par

Laura VINCENT-CABOUD

**Semis direct sous couvert végétal sans herbicide :
conception, expérimentation et évaluation conjointes
d'itinéraires techniques entre praticiens et chercheurs**

Directeur de thèse : Christophe DAVID

Co-encadrement de la thèse : Joséphine PEIGNE

Thèse présentée et soutenue à Lyon, le 31 janvier 2020 :

Composition du jury :

M. Jean ROGER-ESTRADE, Professeur, AgroParisTech

Mme Mireille NAVARRETE, Directrice de recherche, INRA

M. Jean-Pierre SARTHOU, Professeur, INP-ENSAT

Mme Caroline HALDE, Professeur adjointe, Université de Laval, Québec

Mme Joséphine PEIGNE, Enseignante-chercheuse (HDR), ISARA

M. Christophe DAVID, Directeur délégué (HDR), ISARA

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examinatrice

Co-encadrante de thèse

Directeur de thèse

A mes grands-parents,

*« Nous n'héritons pas de la terre de nos ancêtres,
nous l'empruntons à nos enfants ».*

Antoine de Saint-Exupéry (1939)

Remerciements

En débutant l'écriture de cette page, je me rends compte qu'elle risque d'être longue ! Une expérience de thèse est un réel travail d'équipe, et cela tombe bien car c'était l'objectif de ma thèse, montrer qu'à plusieurs on peut toujours faire mieux !

Comment commencer ces remerciements sans penser en premier à mon encadrante, Joséphine Peigné, sans qui ce travail n'aurait jamais vu le jour. Merci Joséphine pour tout ce que tu m'as apporté pendant ces 3 ans (on pourrait même dire depuis 6 ans !). Tu m'as fait confiance depuis le début et tu m'as appris de réelles bases méthodologiques. Ce n'est pas sans émotion que je te remercie aujourd'hui pour ton soutien, tes conseils et tous les échanges que nous avons pu avoir. Merci de m'avoir aidée à construire cette thèse, de m'avoir motivée, rassurée et permis de repousser mes limites. J'ai beaucoup apprécié travailler avec toi !

Je tiens également à remercier Christophe David, mon directeur de thèse. Merci Christophe de m'avoir accompagnée au cours de ces trois ans et de m'avoir accordé ta confiance. Tu as su être présent lorsque j'en avais besoin, en m'apportant du soutien, des conseils et des idées. Je te remercie de m'avoir aidée à restructurer mes idées pour recentrer la thèse lorsque je partais dans diverses directions ! Merci pour le temps que tu as consacré à la relecture du manuscrit.

Je remercie Terra Isara et l'Agence de l'eau « Corse Méditerranée » pour avoir financé ce travail.

Je remercie les membres de mon comité de pilotage, Marion Casagrande, Jean-Marc Meynard, Eric Scopel, Andreas Fliessbach et Michel Roesch, pour leurs conseils avisés. Marion, je tiens à te remercier pour ta disponibilité et pour ta contribution à la mise en place de cette thèse lors de mon stage de fin d'études. Merci pour les échanges et les moments passés ensemble lors de colloques, ateliers de conception ou visites d'essais (avec de bons chocolats et fondues suisses en primes !).

Je remercie Mireille Navarrete et Jean-Pierre Sarthou pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Je remercie également les autres membres du jury, Caroline Halde et Jean Roger-Estrade, pour leur participation en tant qu'examineurs.

Je remercie Thomas Lhuillery, Adeline Cadiergues, Anthony Roume, Silvan Reynaud et Tom Gielly, pour leurs aides précieuses sur le terrain et au laboratoire. Merci Thomas pour ton soutien et ta disponibilité. Merci pour ton énergie, ta bonne humeur sur le terrain quel que soit le temps ! Merci de m'avoir aidée à gérer tous ces essais ! (« *10 essais ? ... mais oui ça va passer !* »). Adeline, outre ton travail rigoureux pour m'aider, je te remercie pour ta bonne humeur quotidienne communicatrice...même devant une pile d'échantillons de soja à trier ! Cela a été un réel plaisir de travailler avec toi.

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans la contribution des agriculteurs qui ont été impliqués de près ou de loin au projet. Je remercie les agriculteurs chez qui nous avons conduit des essais, pour leur confiance et tous les échanges : Claude Barbet, Claude Sérillon, Pauline Gay, Sébastien Galmiche, Stéphane et Sophie Jay, Patrick Vacher, Nicolas Traynard et Jacques Jury. Merci Claude B., pour ces 3 années au cours desquelles j'ai eu la chance d'apprendre beaucoup de ce partage d'expériences. Merci Claude S., pour votre disponibilité. Merci Sébastien, ton implication a été une aide précieuse ! Merci Pauline, pour ta gentillesse et le coup de main sur le terrain ! Nicolas, je te remercie pour le partage de tes connaissances sur l'AC. Merci Christophe, pour ton savoir-faire et le partage de ton expérience en SD. Merci Patrick, pour ces échanges de connaissances. Merci Jacques, pour le temps que tu as consacré au suivi de l'essai.

Merci aux 493 agriculteurs qui ont répondu à l'enquête pour partager leurs connaissances. Je remercie les agriculteurs avec lesquels j'ai pris plaisir à échanger au cours des ateliers et des visites d'essais. Votre soutien et l'intérêt porté sur l'objet de ma thèse m'ont permis de trouver une réelle motivation et un sens à ce que je faisais. Merci pour vos encouragements : Aubry Aubanel, Félix Noblia, Nicolas Roybet, Julien Follut, Vincent Chabroud, Philippe Vacher, Guillaume Robin, Patrick Faure, Philippe Nouvellon, Jean-Pierre Jaussi, Adrien Ramballand, Jérôme Commaret, Andy Cocup et Yves Flamand.

Je remercie Jean Pauget et Pascal Sylvestre avec qui j'ai pris plaisir de collaborer pour suivre les essais SD de la station expérimentale de St Ex Innov. Merci Anthony Gaillard pour ta motivation et toutes tes idées au cours des essais que nous avons mis en place au lycée agricole Sandar.

Merci aux étudiants de l'IUT mécanique de Lyon 1, ainsi qu'à leurs enseignants, pour la construction du rouleau. Je remercie en particulier Laurent Pezet, mon cousin, qui m'a apporté une aide précieuse en me proposant de monter ce projet de construction !

Je remercie Erin Silva et Léa Vereecke, pour leur accueil pendant mon séjour aux Etats-Unis et le travail réalisé ensemble. Merci Erin, pour le partage de ton expérience et ton aide dans la rédaction des publications. Un merci particulier à Léa, pour m'avoir fait découvrir un peu le Wisconsin, l'Iowa et l'Illinois ! Merci pour tous ces échanges toujours très enrichissants. J'ai apprécié travailler avec toi !

C'est avec émotion que je remercie tous les collègues de l'ISARA, qui m'ont épaulée au cours de ces 3 ans et qui ont contribué de près ou de loin à la construction du manuscrit : Jean-François Vian (le grand frère !), Florian Celette, Vincent Payet (merci pour ton aide précieuse en stats !), Mathieu Guérin (merci pour les chocolats pendant la rédaction !), Philippe Fleury, Aurélie Ferrer, Hager Cetin, Audrey Vincent, Benoît Sarrazin, Joël Robin, Alexander Wezel, Vincent Tolon, Thierry Joly, Oriane Debiez, Héléne Brives et David Sarneo. Merci pour votre soutien, vos conseils et votre bonne humeur !

Merci à la grande équipe de thésards, pour les moments partagés ensemble de stress, de joie, de peine mais aussi et surtout d'éclats de rire : Manon, Annabelle, Agathe, Olivier (tes chansons de Johnny au bureau vont me manquer !), Justine (et sans oublier Darwin et Crimper !), Julie, Damien, Coralie (A quand le retour de la chanson du lundi ?!), Alice (notre jeune recrue, coach des doctorants !...merci pour tes conseils !), Edouard, Mathilde, Eva, Sarah et Vincent. Annabelle, merci tes conseils sur la méthodologie de ma thèse. Je remercie aussi en particulier Julie, Justine et Damien avec qui j'ai partagé toutes les étapes de la thèse (biblio, terrain, copil, rédaction !). Julie, merci pour toutes tes idées visant à nous apporter de la bonne humeur au bureau ! (newsletter, olympiades ... et j'en passe !). Justine, ma voisine de bureau (la mam's des doctorants !), merci pour ces discussions, tes conseils, ton soutien pendant la rédaction et tes idées créatives pour faire de notre bureau un endroit agréable pour travailler !

Je tiens à remercier mes amis qui m'ont soutenue et encouragée au cours de cette thèse. Merci Marie-Astrid, Morane et Cynthia pour ces weekends de retrouvailles ! Ces moments passés ensemble ont toujours été revivifiants pour me sortir un peu de la thèse ! Merci MA (petit phoque vert !), pour ces soirées passées au téléphone à refaire le monde, se conseiller et se reconforter. Merci Morane pour ta gentillesse et ton soutien pendant les moments difficiles. Cyn, merci pour nos discussions, tes conseils et tes encouragements. Clément et Vincent, merci à tous les deux, pour votre soutien et vos encouragements pendant la rédaction ! Merci Camille, Monica, Julia et Danielle pour vos relectures d'anglais !

L'aboutissement de cette thèse, je le dois aussi à ma famille, qui a su m'entourer (et me supporter !). Je remercie mes parents, le SD n'a plus de secret pour vous ! Merci de m'avoir toujours soutenue dans mes choix et accompagnée pendant ce travail prenant. Merci pour ces heures de relectures ! Merci aussi à mes tantes pour le temps passé aux relectures et vos conseils avisés en orthographe : Sylvie, Pampoi, Tété. Merci à mes grands-parents de m'avoir encouragée, cela a été un réel moteur. Merci Mamie, pour ton énergie communicatrice. Merci Papy et JP, pour les discussions techniques sur ma thèse et vos conseils d'experts ! Merci à mon frère, mes cousins, mes cousines, mon parrain et ma marraine pour votre soutien. Merci Léa, ma petite cousine, pour tes encouragements et ton soutien tout au long de la thèse.

Enfin, mes derniers remerciements vont à Antoine, qui a su être si patient pendant cette thèse et présent malgré la distance. Tu as toujours su m'encourager et me motiver lorsque j'en avais besoin. Je n'aurai jamais trouvé la force de mener ce projet à bien si tu n'avais pas été là pour me soutenir. Je te remercie aussi pour tes relectures. Je termine avec émotion l'écriture de ce dernier chapitre de ma thèse pour en ouvrir un nouveau dans lequel nous serons enfin ensemble pour de nouveaux projets.

Table des matières

Introduction	1
Chapitre 1 : Contexte et problématique	3
<i>1. Le développement de l'agriculture de conservation : enjeux scientifiques et sociétaux</i>	<i>3</i>
1.1. L'agriculture de conservation : des techniques culturales prometteuses pour améliorer la fertilité des sols et réduire l'impact environnemental	3
1.1.1. Le développement de l'agriculture de conservation des sols	3
1.1.2. Les techniques culturales développées pour minimiser la perturbation du sol.....	5
1.1.3. L'intégration de couverts végétaux pour protéger et enrichir les sols	7
1.2. Une remise en cause de la durabilité des techniques développées en agriculture de conservation	9
<i>2. La pratique de l'agriculture de conservation sans herbicide : un enjeu majeur pour les agriculteurs</i>	<i>11</i>
2.1. Agriculture biologique : principes fondateurs et questionnements autour de la durabilité des pratiques actuelles	11
2.2. Production conventionnelle : Des débats contrastés autour du glyphosate	13
<i>3. Le semis direct sous couvert végétal : Une alternative viable et durable pour supprimer l'utilisation d'herbicide ?</i>	<i>14</i>
3.1. Combiner semis direct et couverts végétaux pour maîtriser les adventices	14
3.2. Les principaux défis d'une mise en pratique	15
<i>4. Problématique générale</i>	<i>35</i>
Chapitre 2 : Cadre méthodologique général	36
<i>1. La conception innovante pour favoriser des dynamiques de changement vers des systèmes intégrant du semis sous couvert sans herbicide</i>	<i>36</i>
1.1. Principaux concepts de la notion d'innovation	36
1.2. La conception innovante en agriculture : Principaux enjeux et méthodes	37
1.2.1. Qu'est-ce que la conception ?	37
1.2.2. Les méthodes de conception	38
<i>2. La recherche participative : Etat de l'art sur les méthodologies</i>	<i>40</i>
2.1. Les enjeux de l'implication d'acteurs dans un processus de recherche	40
2.2. Les recherches partenariales participatives (RPP) en agriculture	42
2.2.1. Les différentes familles de recherche partenariales participatives	43
2.2.2. Quels sont les enjeux de la recherche-action ?	46
2.2.3. L'expérimentation en milieu rural : les démarches développées.....	47
2.2.3.1. Les principales catégories d'expérimentations en milieu rural.....	48
2.2.3.2. L'expérimentation avec les agriculteurs : D'une implication consultative à une démarche collaborative d'accompagnement et d'apprentissage	49
2.2.3.3. L'agriculteur comme source de créativité et d'innovation.....	51
<i>3. Elaboration des hypothèses de recherche</i>	<i>54</i>

4. Cadre méthodologique général de la thèse.....	56
4.1. Recherche des connaissances existantes autour du semis direct sous couvert végétal sans herbicide.....	56
4.2. Mise en place d'une démarche de recherche – action collaborative	56
4.2.1. Conduite d'un processus de recherche conjoint : définition de la démarche.....	56
4.2.2. Choix des acteurs et de leurs degrés d'implication	57
4.2.3. Efficacité de la démarche	58
Chapitre 3 : Etat des lieux des connaissances	60
1 Contexte général.....	60
1.1 Etat de l'art sur les connaissances scientifiques et empiriques	60
1.1.1 Notion de connaissances.....	60
1.1.2 Les différentes catégories de connaissances	61
2 Les connaissances scientifiques existantes.....	63
2.1 Etude bibliographique.....	63
2.2 Contexte.....	63
2.2.1 Etat des lieux des travaux menés en recherche	63
2.2.2 Thématiques des connaissances scientifiques.....	65
2.3 Synthèse bibliographique : quelles sont les connaissances scientifiques ?	66
3 Etat des lieux des connaissances empiriques produites autour de la technique dans le contexte français	90
3.1 Enquête en ligne.....	90
3.1.1 Description de l'enquête : Questionnaire et sélection de la base de données	90
3.1.2 Méthode d'analyse de l'enquête	92
3.1.3 Caractéristiques des échantillons sélectionnés pour l'analyse des connaissances	92
3.2 Contexte des retours d'expériences : Domaine de validité des connaissances	93
3.3 Quelles sont les connaissances empiriques issues du retour d'expériences des praticiens français ?	97
3.3.1 Le couvert végétal perçu comme « la clé de voûte de la réussite du système ».....	97
3.3.2 La maîtrise des adventices : un challenge pour la faisabilité technique et économique	99
3.3.3 Le semis direct de la culture principale : une opération technique de mise en œuvre encore très aléatoire et pauvre en connaissances	102
3.3.3.1 Les principales combinaisons couverts/cultures	102
3.3.3.1.1 Les cultures d'hiver : Les céréales et le Colza.....	102
3.3.3.1.2 Les cultures de printemps	104
3.3.3.2 L'implantation des cultures.....	105
3.3.4 Une technique qui repose sur l'enrichissement et la valorisation du potentiel agronomique des sols..	105
3.3.5 Le matériel agricole : des performances très dépendantes du contexte pédoclimatique	106
3.3.6 Le semis sous couvert : un milieu favorable au développement des ravageurs des cultures	107
3.3.7 La gestion de la rotation culturale.....	108
3.3.8 Transition vers du semis sous couvert sans herbicide : un processus d'apprentissage à différents niveaux d'organisation.....	108
4 Discussion.....	109
4.1 De plus en plus d'intérêts sur le semis direct sous couvert sans herbicide.....	109
4.2 Domaine de validité des connaissances	110

4.3	Contenus des connaissances : des thématiques d'intérêts communs mais des logiques de construction différentes.....	110
4.4	Des connaissances de natures différentes	111
4.5	Le semis sous couvert sans herbicide : une faible articulation des connaissances scientifiques et empiriques.....	112

Chapitre 4 : Evaluation conjointe des performances des techniques innovantes

1.	<i>Conception, expérimentation et évaluation conjointe.....</i>	114
1.1.	Terrain d'étude : Mise en application de la démarche en Rhône-Alpes.....	114
1.2.	Identification des agriculteurs-expérimentateurs.....	115
1.3.	Phase exploratoire	118
1.4.	Formulations d'hypothèses de recherche communes.....	119
1.5.	Conception des dispositifs expérimentaux	121
1.5.1.	Définition des dispositifs.....	121
1.5.2.	Description des sites.....	122
1.6.	Protocoles de suivi et d'évaluation des performances	124
1.6.1.	Evaluation réalisée par les chercheurs.....	125
1.6.1.1.	Données collectées pour le suivi agronomique.....	125
1.6.1.2.	Analyse statistique	127
1.6.1.3.	Performances économiques, organisationnelles et environnementales.....	128
1.6.2.	Evaluation des performances réalisée par les praticiens.....	128
2.	<i>Evaluation conjointe des performances agronomiques, économiques, organisationnelles et environnementales.....</i>	129
2.1.	Performances agronomiques	129
2.1.1.	Optimiser l'implantation et le développement des couverts végétaux	129
2.1.2.	Maîtriser les adventices.....	133
2.1.3.	Amélioration de la maîtrise du couvert végétal.....	136
2.1.4.	Performance du soja au cours des itinéraires techniques innovants	138
2.1.4.1.	Levée de la culture	138
2.1.4.2.	Récolte de la culture	140
2.2.	Performances économiques, organisationnelles et environnementales	141
2.2.1.	L'implantation du couvert végétal et de la culture	142
2.2.2.	Le mode de gestion du couvert végétal	143
3.	<i>Discussion.....</i>	145
3.1.	Les combinaisons techniques innovantes conçues	146
3.2.	Les performances des techniques innovantes expérimentées et les enjeux pour la recherche	148
3.2.1.	L'implantation du couvert végétal	148
3.2.2.	La maîtrise du couvert sans herbicide ni travail du sol et l'implantation du soja.....	149
3.3.	Méthodes d'expérimentation et de suivi : des apports complémentaires des praticiens et des chercheurs.....	150

Chapitre 5 : Conception conjointe pour innover et développer le semis direct sans herbicide	153
1. Objectifs et démarche méthodologique.....	153
1.1. Critères d'évaluation retenus pour analyser la démarche.....	153
1.1.1. La production de connaissances	154
1.1.1.1. Mode de suivi des connaissances au sein de la démarche.....	154
1.1.1.2. Méthode d'analyse des connaissances	155
1.1.2. L'enrôlement des acteurs	156
1.1.3. L'innovation et la créativité	157
1.1.4. L'apprentissage des acteurs.....	157
1.2. Présentation du dispositif.....	159
1.2.1. Caractérisation du profil des agriculteurs-expérimentateurs	159
1.2.2. Déroulement de la démarche.....	160
2. Efficience de la démarche de recherche conjointe chercheurs – praticiens	161
2.1. La production de connaissances au cours du processus.....	161
2.2. L'enrôlement des acteurs.....	163
2.3. Une activité de conception et d'évaluation collective pour renforcer la créativité et la capacité à innover	166
2.3.1. Bandes test	166
2.3.2. Initiatives d'essais	169
2.3.3. Co-construction de rouleaux cranteurs	169
2.4. L'apprentissage des acteurs.....	171
2.4.1. Les apprentissages de la recherche.....	171
2.4.2. Les apprentissages des praticiens	172
3. Discussion : une démarche de recherche conjointe entre praticiens et chercheurs de la conception à l'évaluation	179
3.1. Quels apports de la démarche ?	179
3.1.1. La production de connaissances pour développer des techniques innovantes et performantes	179
3.1.2. Un apprentissage des acteurs.....	180
3.1.3. L'implication des praticiens favorisée par les échanges collectifs autour des essais	181
3.2. Les limites de la démarche.....	182
3.2.1. Valorisation scientifique et fiabilité des résultats.....	182
3.2.2. Des manques de connaissances demeurent présents	183
3.2.3. Un processus de recherche itératif long et coûteux	184
3.2.4. Changements et adoption du SDSC sans herbicide.....	185
Conclusion.....	188
1. Retour sur la problématique de la thèse	188
2. Perspectives.....	190
Références.....	193
Annexes.....	211

Introduction

L'histoire de l'agriculture a principalement été façonnée par les avancées techniques et scientifiques, l'économie mondiale et l'environnement (révolution agricole, révolution industrielle, révolution verte, etc.) (Flamant, 2010; Malassis, 1988). Son évolution a joué un rôle capital vis-à-vis de la gestion des ressources de l'écosystème. Au début du XXI^{ème} siècle, des mouvements écologistes dénoncent le déséquilibre des systèmes de production agricoles. Les pratiques intensives développées pour produire plus ont permis de relancer l'économie mondiale mais elles ont épuisé en parallèle les ressources de l'écosystème (dégradations des sols, émissions de gaz à effet de serre, pollutions des nappes phréatiques, etc.) (Griffon, 2014; Mazoyer and Roudart, 2017). De cette prise de conscience environnementale, résulte alors le développement de nouvelles pratiques prônant le respect des ressources (ex : agriculture raisonnée, agriculture biologique, agriculture de conservation, agriculture biodynamique, agriculture intégrée, etc.).

En parallèle de cet effort pour la recherche continue de pratiques alternatives plus durables pour la dimension environnementale, l'agriculture doit faire face à un contexte changeant et incertain d'un point de vue économique, climatique et sociétal (Gérard et al., 2008; Reynaud, 2008). L'évolution des marchés et la fluctuation des prix exercent un rôle majeur dans la viabilité des systèmes de production et ainsi dans la capacité des praticiens à investir dans de nouvelles pratiques (Boussard, 2010; Mitra and Boussard, 2011). L'agriculture doit également s'adapter au réchauffement climatique qui est amené à faire évoluer les assolements et les techniques culturales (ex : couverture végétale pour préserver l'humidité des sols et limiter les phénomènes d'érosion accentués par l'intensification des périodes de sécheresse) pour développer des pratiques plus résilientes et pertinentes vis-à-vis du climat (Humblot, 2016; Maton, 2010). Enfin, le lien entre les praticiens et la société soulève des préoccupations. Les conflits sociétaux liés aux pratiques agricoles sont nombreux et les exigences des consommateurs sont de plus en plus importantes vis-à-vis de la qualité des produits (débat autour de l'utilisation du glyphosate et des résidus chimiques présents dans les aliments, de l'effet des pratiques agricoles sur le changement climatique, etc.) (Kaffo and Fongang, 2009; Mesnage et al., 2012). Ces polémiques créent une réelle distorsion dans la société et accentuent le système de contraintes auquel les praticiens doivent faire face, tout en conciliant la production afin de répondre aux besoins alimentaires et assurer un revenu.

Face à ce contexte incertain et évolutif, il convient de repositionner les praticiens au cœur du système pour accompagner leurs transitions vers des pratiques alternatives plus durables, tout en cohérence avec l'ensemble des contraintes qu'ils rencontrent. En recherche, de plus en plus de travaux impliquent les praticiens dans l'objectif de développer des techniques innovantes résilientes vis-à-vis des enjeux du XXI^{ème} siècle (Lacombe et al., 2018; Lefèvre et al., 2013; Navarrete et al., 2018; Triomphe et al., 2008). Cette thèse s'inscrit dans ce type d'approche complexe, alliant production de

connaissances agro-écologiques et méthodes participatives entre plusieurs types d'acteurs. Cette thèse vise à étudier un processus de recherches conjoint entre des praticiens et des chercheurs, en étudiant le cas précis du semis direct sous couvert végétal (SDSC) sans utilisation d'herbicide. Cette technique innovante, tente de concilier des principes de l'agriculture de conservation et de l'agriculture biologique. Elle représente un enjeu majeur pour répondre aux problématiques agronomiques, environnementales, économiques mais aussi organisationnelles des praticiens.

Ce travail s'articule autour de 5 chapitres. Le premier présente le contexte dans lequel s'inscrit notre objet d'étude. Le deuxième chapitre présente une analyse bibliographique de démarches partenariales participatives permettant de concevoir de nouvelles techniques en agriculture. Dans le chapitre 3, nous avons capitalisé les connaissances existantes sur le SDSC sans herbicide. Le chapitre 4 évalue des techniques innovantes conçues conjointement entre des praticiens et des chercheurs. Enfin, dans le chapitre 5, nous nous attacherons à discuter de l'efficacité de notre processus de recherches conjoint.

Chapitre 1

Contexte et problématique

Chapitre 1 : Contexte et problématique

1. Le développement de l'agriculture de conservation : enjeux scientifiques et sociétaux

1.1. L'agriculture de conservation : des techniques culturelles prometteuses pour améliorer la fertilité des sols et réduire l'impact environnemental

1.1.1. Le développement de l'agriculture de conservation des sols

Au lendemain de la seconde guerre mondiale, l'agriculture européenne doit faire face à de nouveaux enjeux pour répondre aux besoins alimentaires de la population (Allaire, 1988; Gerboux and Muller, 1984). Afin d'augmenter la productivité, les agriculteurs modernisent les équipements, améliorent la génétique du matériel végétal et animal, et intensifient leurs pratiques de mécanisation et de traitements chimiques. Ce modèle productiviste conduit à une augmentation significative du niveau de production en réponse aux besoins croissants de la population et relance l'économie au cours des années 1960 et 1970 (Banks and Marsden, 2000; Robinson and Sutherland, 2002).

A l'inverse, des limites apparaissent avec des problèmes agronomiques, environnementaux et économiques (Mabit et al., 2002; Mader, 2002; Mollard et al., 2003). Des préoccupations émergent vis-à-vis de l'impact de ces pratiques sur la qualité des aliments et de l'environnement et soulèvent des interrogations sur la « durabilité » des systèmes de production agricole (Bonneuil, 2004). De nombreux auteurs remettent alors en cause la durabilité de ce modèle « productiviste » et « intensif » développé dans le contexte de l'après-guerre (Laurent, 2006; Mahé and Rainelli, 1987). Des questions apparaissent autour de la consommation d'énergies fossiles non renouvelables et des pollutions diffuses et ponctuelles des eaux et des sols générées par l'utilisation massive de produits chimiques de synthèse (engrais, pesticides). L'intensification de la mécanisation, notamment, via le recours à des labours successifs dans la rotation, conduit dans certaines situations à l'appauvrissement des sols et à leur dégradation physique (ex : érosion, ruissellement) (Dufour et al., 1990; Mäder and Berner, 2012).

Le labour traditionnel, largement utilisé dans les pratiques ancestrales, apparaît comme une technique efficace à court terme pour préparer le lit de semence, en réchauffant et en aérant le sol, incorporer les intrants, gérer les adventices et détruire les cultures intermédiaires (Knittel, 2005; Lal et al., 2007). Le labour se définit par un retournement de la couche superficielle du sol d'épaisseur variable (20-40 cm) et par un mélange des horizons du sol afin d'accélérer la minéralisation de la matière organique (MO) et le réchauffement du sol (Labreuche et al., 2007). En fonction des outils utilisés (ex : charrue à versoir, déchaumeuse à versoir, présence de rasettes ou non, etc.), la profondeur de travail du sol peut varier mais les objectifs restent les mêmes : fragmenter le sol et enfouir les résidus de cultures, de couverts, d'adventices et de fertilisants dans le sol pour limiter leur présence en surface et faciliter le

contact sol-graine. Cependant, sur le long terme, cette technique est de plus en plus remise en cause en raison des problèmes agronomiques et environnementaux qu'elle génère (Derpsch et *al.*, 1986; Smith et *al.*, 2011; Stockfish et *al.*, 1999). La dégradation des sols s'observe via des phénomènes d'érosion, de tassement, de déshydratation, de ruissellement et d'appauvrissement des sols en éléments nutritifs (Luna et *al.*, 2012; Soane et *al.*, 2012). De plus, des auteurs montrent que le travail du sol impacte la biodiversité du sol en perturbant l'activité des macro-organismes et des micro-organismes (Chan, 2001; De Tourdonnet, 2007). Des enjeux économiques et organisationnels sont aussi exposés dans la littérature avec l'augmentation du besoin en main-œuvre ou du carburant consommé lors d'un labour (Triomphe et *al.*, 2006).

La nécessité de développer des systèmes de production alternatifs durables, conciliant productivité et intégrité des écosystèmes, mise en avant lors du « *Millenium Ecosystem Assessment* » réalisé en 2005 par les Nations Unies, devient une priorité (Corvalán et *al.*, 2005; Triomphe et *al.*, 2006). L'agriculture de conservation (AC) des sols constitue l'une des alternatives de plus en plus pratiquée dans les exploitations agricoles et étudiée en recherche. D'après Triomphe et *al.* (2006), les principales motivations des agriculteurs pour une transition du labour vers le non-labour, reposent sur la recherche d'une gestion plus durable des ressources (eau, sol) ainsi que l'augmentation de la productivité, tout en limitant les charges et la pénibilité du travail.

L'AC des sols a été initiée dans les années 1930 aux Etats-Unis suite à une catastrophe écologique, le « *Dust Bowl* » (Cook et *al.*, 2009; Holland, 2004; Schubert et *al.*, 2004). « *Dust bowl* » ou « bassin de poussières » a été le nom donné à une plaine céréalière située entre l'Oklahoma, le Texas et le Kansas, qui a connu une série de phénomènes d'érosions éoliennes et hydriques causée par d'intenses périodes de sécheresses et de tempêtes entraînant des pertes massives de surfaces agricoles cultivables (Borchert, 1971; Hornbeck, 2012; Lockeretz, 1978). En moyenne, 1186 t.ha⁻¹ de sol de la couche arable ont été emportés suite à cet épisode, qualifié de désastre écologique : « *Not even the Depression was more devastating, economically...in the decade of the 1930s the dust storms of the plains were an unqualified disaster* » (Hansen and Libecap, 2003; Worster, 2010). Plus de 65 % des surfaces des grandes plaines céréalières ont été affectées par l'érosion éolienne en 1934. Selon des estimations, ces pertes de sol ont conduit à des réductions de productivité atteignant 400 millions de dollars par an (Hansen and Libecap, 2003).

Pour protéger les sols, les agriculteurs nord-américains développent alors de nouvelles techniques connues sous le terme générique d'« agriculture de conservation (AC) des sols ». De nombreux travaux vont rapidement se développer pour mettre en avant les bénéfices apportés par l'AC sur la durabilité des systèmes de production (Samiee and Rezaei-Moghaddam, 2018). L'AC repose sur trois

principes, définis par l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture¹ (Dumanski, 2006; FAO, 2003; Farooq and Siddique, 2015; Hobbs et al., 2008) : (1) une perturbation minimale du sol, (2) une couverture végétale permanente afin d'assurer une protection du sol contre les aléas climatiques, augmenter la MO et favoriser la vie des sols et (3) des rotations culturales diversifiées avec des associations culturales pour structurer le sol et contrôler les bio-agresseurs.

1.1.2. Les techniques culturales développées pour minimiser la perturbation du sol

Afin de minimiser les perturbations du sol, des techniques culturales sans labour (TCSL) ont été développées en agriculture conventionnelle (Reicosky, 2015). L'AC regroupe une diversité de techniques allant d'un pseudo-labour sans retournement du sol au semis direct où le sol est perturbé uniquement sur la ligne de semis (Figure 1).

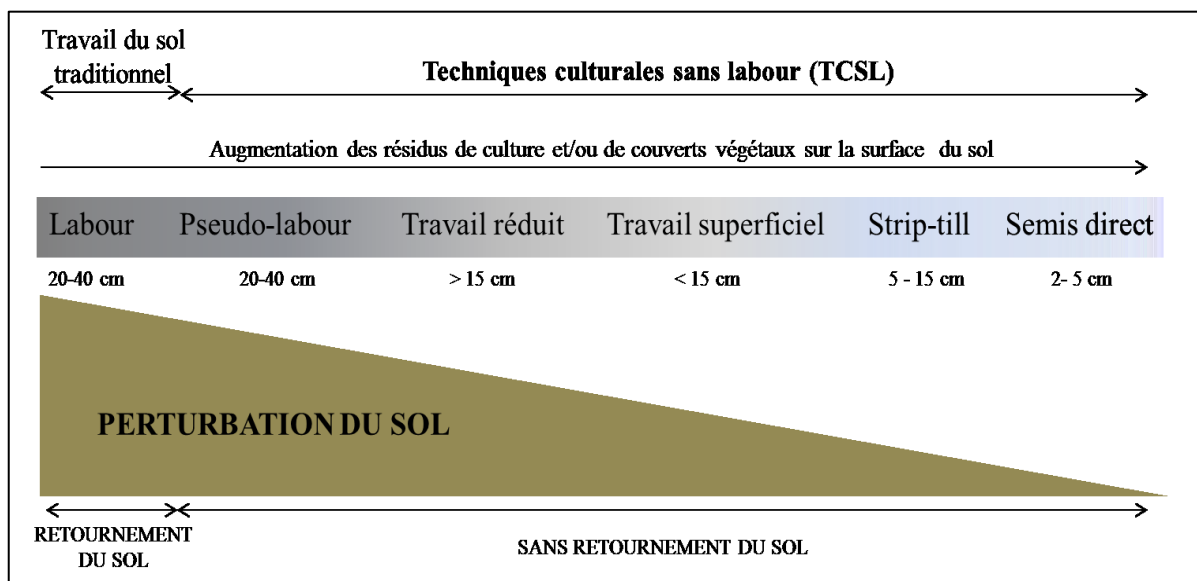


Figure 1: Schéma des différentes techniques culturales sans labour développées en agriculture de conservation (d'après Reicosky, 2015)

Les TCSL peuvent se distinguer en cinq familles (Figure 1) (Baker et al., 2007; CTIC, 2011; Labreuche et al., 2007; Mitchell et al., 2009; Reicosky, 2015; Titi, 2002; USDA, 2005):

- **Le pseudo-labour²** : Il est en général réalisé à partir d'un cultivateur lourd. La profondeur de travail du sol est importante et proche de celle d'un travail du sol traditionnel (20-40 cm) mais le sol n'est pas retourné. Cette technique se traduit par un mélange des horizons mais elle laisse quelques résidus sur la surface du sol.
- **Le travail du sol réduit³** : La profondeur de travail du sol est comprise entre 15 et 30 cm. Cette technique n'entraîne pas de mélange des horizons ni de retournement du sol. Elle est réalisée à

¹ FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations, www.fao.org

² En Europe, le pseudo-labour se distingue du labour par l'absence de retournement du sol. Cependant, en Amérique du Nord, l'USDA ne considère pas que cette technique fasse partie de l'AC du fait de sa profondeur de travail du sol qui peut rester comparable à celle d'un labour traditionnel. Les objectifs d'un pseudo-labour restent proches de ceux d'un labour, le taux de couverture du sol est inférieur à 15 % (Labreuche et al., 2007).

³ En anglais, la traduction littérale « *reduced tillage* » fait référence à l'ensemble des TCSL et reste très vague sur le mode de conduite réalisée lorsque celui-ci est employé. En 1985, l'USDA-NRCS a défini le terme de « *conservation tillage* », comme

partir d'outils de type chisel ou cover crop moins exigeants en force de traction qu'une charrue à versoirs.

- **Travail du sol superficiel :** Le travail du sol se situe entre 5 et 15 cm de profondeur sans retournement du sol. Les résidus de culture sur la surface du sol sont plus importants. Différents outils peuvent être mobilisés : herse rotative, chisel, vibroculteur etc.
- **Travail du sol localisé sur la bande de semis ou strip-till :** Le travail du sol est réalisé uniquement sur la bande de semis qui peut être large de 15 cm. La profondeur de travail du sol peut être toutefois plus ou moins importante.
- **Travail du sol localisé sur la ligne de semis ou semis direct :** Le travail du sol est conduit sur la ligne de semis sur 2 à 5 cm de profondeur. Le semis direct peut être effectué soit sous les résidus de la culture précédente soit sous un couvert végétal. Cette technique qui implique une importante quantité de résidus laissés au niveau de la surface du sol nécessite l'utilisation de semoirs spécifiques adaptés (souvent des semoirs à disques).

Parmi l'ensemble des TCSL, le semis direct (SD), inspiré par les pratiques brésiliennes, suscite de plus en plus d'intérêt auprès des praticiens et des chercheurs (Triplett and Dick, 2008). De nombreux auteurs montrent les bénéfices apportés par cette technique sur la fertilité du sol, le temps de travail et l'environnement (ex. : Réduction du lessivage, diminution de l'érosion des sols, augmentation de la MO en surface, etc.) (Dube et al., 2012; Farooq and Siddique, 2015; Friedrich et al., 2014; Gadermaier et al., 2012; Kassam et al., 2009; Reicosky and Saxton, 2006). Le SD repose sur l'implantation d'une culture sans travailler le sol (Baker et al., 2007; Derpsch et al., 2010; Horowitz, 2011; USDA, 2005). Un travail du sol est seulement présent sur 2 à 3 cm de profondeur sur la ligne de semis. Depuis l'émergence et le développement de cette technique au Brésil, aux Etats-Unis puis en Europe, dans les années 1970, une diversité de techniques de SD s'est développée, se distinguant par leur mode de conduite (sous résidus de culture ou sous couvert végétal) et par le degré de perturbation du sol (fonction de l'équipement) (Gohlke et al., 2000; Reicosky, 2015) (Figure 2). Par exemple dans une note technique, l'USDA-NRCS définit et distingue le terme « *no-tillage* », développé en Amérique du Nord, du terme « *direct seeding* », apparu en Europe. Même si, pour ces deux notions, l'objectif reste similaire (minimiser la perturbation du sol et laisser un maximum de résidus sur le sol), le terme « *no-tillage* » renvoie à une perturbation du sol par le semoir SD, moins importante au niveau de la ligne de semis que le « *direct seeding* » où le semoir sera composé d'éléments ouvreurs qui perturberont davantage les résidus présents sur le sol. En fonction du type de semoir et des éléments associés (dents, disques, largeurs des éléments, etc.), Gohlke et al. (2000) vont jusqu'à différencier le « *Low-Disturbance direct seeding* » et le « *High-Disturbance direct seeding* ». Les différentes terminologies utilisées dans la littérature dont les plus courantes sont « *no-tillage* », « *direct seeding* », « *zero-tillage* », ne prennent souvent pas en compte ces distinctions et sont utilisées comme synonymes.

toutes techniques permettant de garantir au moins 30 % de recouvrement du sol par des résidus de cultures ou de couverts végétaux pour protéger le sol (Mitchell et al., 2009).

Dans la suite du manuscrit, nous considérons ces termes comme synonymes et nous distinguons les techniques de SD uniquement selon les modes de conduites, présentés sur la Figure 2, différenciant le SD sous résidus de cultures du SD sous couvert végétal (vivant ou mort).

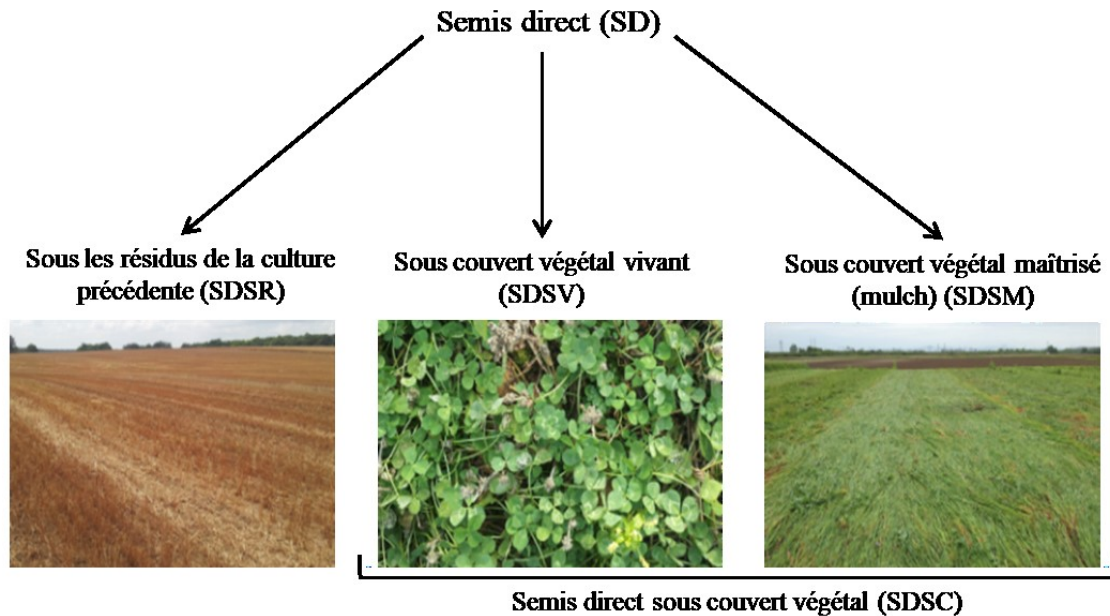


Figure 2: Techniques de semis direct (SD)

Parmi les techniques de SD, le SD sous couvert végétal (SDSC) permet de combiner les bénéfices apportés par l'absence de perturbation du sol et ceux produits par l'intégration de couverts (Balota et al., 2014; Sapkota et al., 2012; Triplett and Dick, 2008; Wells et al., 2014). Le SDSC peut être réalisé sous un couvert vivant (SDSV) ou mort (SDSM), lorsque celui-ci est maîtrisé (mécaniquement, chimiquement ou par gel) avant de semer la culture pour limiter la compétition exercée par le couvert vis-à-vis des ressources hydriques du sol et des nutriments (Mirsky et al., 2012; Soane et al., 2012).

1.1.3.L'intégration de couverts végétaux pour protéger et enrichir les sols

En tant que pilier de l'AC, le recours aux couverts végétaux a été largement reconnu comme un facteur fondamental de la qualité des sols pour assurer la réussite des techniques développées en AC (Balkcom, 2007; Reinbott et al., 2004; Sarrantonio and Gallandt, 2003). Plusieurs travaux montrent les bénéfices agronomiques (ex. : fertilité du sol, gestion des adventices, etc.) et environnementaux (ex. : réduction du lessivage, de l'érosion, etc.) apportés par l'intégration de couverts au sein des systèmes de production (Dabney et al., 2001; Hartwig and Ammon, 2002; Justes et al., 2012; Reeves et al., 2009; Teasdale, 1996).

Des études menées à long-terme, portant sur l'insertion de couverts dans la rotation, montrent la création de macroporosités dans le sol grâce au système racinaire du couvert améliorant progressivement l'état structural du sol (Çerçioğlu et al., 2019; García-González et al., 2018a).

Haruna *et al.* (2018) observent 24 % de plus de macropores sous couvert comparé au témoin sans couverture végétale. Les couverts permettent d'améliorer la stabilité structurale du sol et la capacité de rétention en eau (García-González *et al.*, 2018b). Par ailleurs, le recouvrement du sol le protège contre les aléas climatiques et les phénomènes d'érosion et de ruissellement (Gallien *et al.*, 1995; Korucu *et al.*, 2018; Pierce, 1998). D'après Ouattara *et al.* (2018), le SDSC a permis une réduction de 76 à 90 % des pertes de surfaces agricoles par rapport au labour, en accélérant la vitesse d'infiltration de l'eau. Dans cette étude menée au Burkina Faso, les auteurs montrent que la présence de 2 t.ha⁻¹ de paillage sur le sol a permis de réduire significativement le ruissellement et l'érosion.

L'apport de MO par l'introduction de couverts dans les pratiques, constitue également un enjeu majeur pour améliorer la qualité des sols et limiter la dépendance à l'utilisation d'intrants extérieurs (Büchi *et al.*, 2018a; Nouri *et al.*, 2019). De nombreux scientifiques montrent l'enrichissement du sol grâce à l'utilisation de couverts qui, selon leur composition, permet de capter, de stocker sous forme organique et de recycler les nutriments du sol en restituant notamment de l'azote facilement assimilable par les cultures (Muhammad *et al.*, 2019). Cependant, la qualification et la quantification exacte de ces services en fonction du type de sol et du climat restent encore très discutées (Muhammad *et al.*, 2019). Veloso *et al.* (2018) observent en 30 ans un stockage de carbone plus important dans un système de SD associé à un couvert de légumineuse avec une quantité de carbone qui augmente de 1.15 Mg.ha⁻¹.an⁻¹, comparé à un témoin travail du sol sans couvert sur l'ensemble du profil étudié (0-100 cm). Pour les auteurs, les résultats sont liés à une augmentation du stockage de carbone au niveau des couches plus profondes du sol (30-100 cm) alors que le taux de carbone en surface (0-30 cm) tend à diminuer au cours du temps. L'augmentation du stockage de carbone dans le sol via l'utilisation de couverts est d'autant plus importante lorsque le couvert est combiné à la réduction du travail du sol (Ding *et al.*, 2006; García-González *et al.*, 2018a; Liu *et al.*, 2005; Motta *et al.*, 2007).

La mise en place de couverts constitue un atout permettant de **préserver la biodiversité** des sols. Les couverts favorisent le développement des micro-organismes et des macro-organismes des sols et les phénomènes de régulation biologique (Motta *et al.*, 2007; Sapkota *et al.*, 2012). En effet, l'implantation de couverts permet de créer des habitats propices au développement des auxiliaires des cultures comme les carabes (Buchanan and Hooks, 2018; Kahl *et al.*, 2018). Ce développement d'insectes auxiliaires des cultures apparaît d'autant plus important lorsque le recours aux couverts est associé à un travail du sol minimum tel que le SD grâce à la préservation des habitats, moins impactés par les interventions mécaniques de travail du sol (Rivers *et al.*, 2018; Rosario-Lebron *et al.*, 2018).

Le couvert assure aussi un rôle de **maintien de l'humidité du sol** et constitue un enjeu fort au regard du changement climatique conduisant à de plus en plus de déficit hydrique (Ouattara *et al.*, 2018). La présence de résidus de cultures ou de couverts au niveau de la surface du sol réduit le phénomène d'évapotranspiration (Duval *et al.*, 2016; Qi and Helmers, 2010). La conservation d'humidité par le

couvert peut ainsi constituer un avantage dans les régions arides où la fréquence des épisodes de sécheresse est amenée à augmenter (Basche et *al.*, 2016; Soane et *al.*, 2012).

Le rôle des couverts végétaux sur la protection de la **qualité des eaux** fait aussi l'objet de nombreux travaux de recherche explorant des alternatives durables pour limiter les pollutions d'origine agricole (Gabriel et *al.*, 2013). Des auteurs montrent notamment la réduction de la lixiviation des nitrates dans les sols grâce à la présence de couverts (Dabney et *al.*, 2001; García-González et *al.*, 2018b; Hanrahan et *al.*, 2018; Qi and Helmers, 2010; Thom et *al.*, 2018; Villamil et *al.*, 2006; Walmsley et *al.*, 2018).

Enfin, des enjeux environnementaux sont observés autour des **gaz à effet de serre émis** par les systèmes de production. Une méta-analyse réalisée par Muhammad et al. (2019) montre que les couverts augmentent les émissions de CO₂ mais réduisent les émissions de N₂O comparés à l'absence de couverts sur le sol. Les émissions de CO₂ et N₂O diminuent avec l'augmentation du ratio C/N du couvert. Par ailleurs, un couvert laissé sur la surface du sol limite les émissions de CO₂ et de N₂O par rapport à une situation dans laquelle le couvert serait incorporé au sol (Muhammad et *al.*, 2019).

Pour conclure, l'intégration de couverts renvoie à des enjeux majeurs qu'ils soient agronomiques (qualité des sols, biodiversité, etc.), environnementaux (réduction de l'érosion, des pollutions des sols et des eaux, etc.) voire économiques et organisationnels. En effet, l'insertion de couverts fait souvent appel à la nécessité de repenser les rotations culturales, définir des stratégies d'interventions, d'équipements, de variétés et d'organisation du travail nécessaire pour la gestion du couvert qui concurrence souvent celle de la gestion des cultures (Roesch-McNally et *al.*, 2017).

1.2. Une remise en cause de la durabilité des techniques développées en agriculture de conservation

L'AC suscite **de plus en plus d'intérêt** à travers le monde et chaque année les surfaces agricoles utiles (SAU) allouées à ces pratiques augmentent jusqu'à plus de 180 millions d'hectares (ha) en 2016 soit plus de 12.5 % de la SAU (Derpsch et *al.*, 2010; Friedrich et *al.*, 2014; Kassam et *al.*, 2019; Soane et *al.*, 2012). D'après Kassam et *al.* (2019), les pays où l'AC a été la plus adoptée sont dans l'ordre décroissant ceux d'Amérique du Sud et du Nord, suivis par l'Australie et la Nouvelle Zélande, l'Asie, la Russie, l'Ukraine, l'Europe et l'Afrique. En France, les surfaces orientées en AC sont aussi en croissance, en particulier en grandes cultures et dans les grandes exploitations de plus de 300 ha (Laurent, 2015; Lucas et *al.*, 2018). En 2001, la part des grandes cultures en AC était de 21 % contre 34 % en 2006 soit 1/3 des cultures annuelles (Chapelle-Barry, 2008).

Cependant, malgré l'amélioration de la fertilité des sols par les TCSL, ces techniques sont souvent accompagnées d'un **recours important aux produits chimiques** de synthèse qui se heurte à des questions environnementales et sociétales (Goulet, 2012; Johnsen et *al.*, 2016; Triplett and Dick, 2008;

Uri, 2000). Différents auteurs discutent de l'émergence de ces techniques, indexées à celle des produits chimiques, rendant dépendante l'AC d'intrants extérieurs (Giller et al., 2009). Il existe de nombreuses études sur des modes de production en AC basés sur une utilisation d'herbicides mais les débats restent très controversés (Fernandez-Cornejo et al., 2012; Friedrich and Kassam, 2012).

D'après Chauhan et al. (2012) et Nichols et al. (2015), la **gestion des adventices** en AC constitue un enjeu plus important que dans les pratiques traditionnelles. Tout d'abord, l'AC change la composition des adventices et la dynamique de leurs interactions avec la culture, nécessitant la recherche de nouvelles stratégies de gestion mécanique, biologique ou chimique (Nichols et al., 2015). Les espèces pérennes sont particulièrement difficiles à gérer en AC. Du fait de l'absence d'enfouissement des graines des adventices dans le sol, un stock semencier conséquent est présent au niveau de la surface du sol où l'émergence des graines est facilitée par des conditions propices (lumière, température) (Chauhan et al., 2012). Par ailleurs, bien que des auteurs montrent l'efficacité et l'importance des herbicides en AC pour assurer les rendements (Jat et al., 2019; Muoni et al., 2014; Zahan et al., 2018), Chauhan et al. (2012) expliquent que l'usage d'herbicides en AC est moins efficace que dans des systèmes de production traditionnels. Les herbicides présents sur le sol ne sont pas incorporés au sol, réduisant leurs effets sur la viabilité du stock semencier. De plus, lors de l'application d'herbicide, les résidus présents sur le sol en AC peuvent intercepter une partie du produit et limiter l'efficacité des matières actives (Chauhan et al., 2012; Selim et al., 2003). Enfin, la préoccupation autour de phénomènes de résistance¹ des adventices demeure présente et constitue « une menace » pour la durabilité de systèmes de production en AC (Van Deynze et al., 2018). Par exemple, Price et al. (2012) étudient les résistances présentes chez l'Amarrante (*Palmer amaranth, Amaranthus palmeri* S. Wats.) et testent des alternatives basées sur l'utilisation de couverts à forte production de biomasse pour gérer cette adventice. Van Deynze et al. (2018) montrent que le phénomène de résistance des adventices aux herbicides sur plus de 8 espèces génère un abandon de l'AC pour environ 6 % des agriculteurs. Ce chiffre est de 9 % dans le cas spécifique du SD. Lorsque le phénomène de résistance ne concerne que 2 espèces, le taux d'adoption des techniques de l'AC n'est pas impacté.

Dans la littérature, des chercheurs remettent en question l'arrêt du travail du sol lorsque celui-ci induit une augmentation de pesticides qui pourrait **affecter la biodiversité** (Sánchez-Moreno et al., 2015; Sharma et al., 2018). Par exemple, Barré et al. (2018) montrent un effet des produits chimiques sur la diminution des populations d'oiseaux comparée à un témoin travail du sol (labour) ou encore Yusraini et al. (2018) illustrent une diminution des populations de vers de terre dans le sol suite à l'application d'herbicides en comparaison aux parcelles sans traitement.

¹ Une espèce donnée devient résistante à un herbicide lorsque celle-ci n'est plus contrôlée par l'herbicide et que la plante peut produire une descendance viable. Deux mécanismes de résistance principaux existent (Délye et al., 2009): (1) **résistance par mutation liée à la cible** où le gène codant pour la protéine cible de l'herbicide mute et devient inaccessible à la molécule active (récepteurs non reconnus) et (2) **résistance non liée à la cible (par détoxification)**. Dans ce deuxième cas, différents processus peuvent intervenir comme la production d'enzymes par la plante qui dégraderont la molécule active de l'herbicide pour la rendre inactive et donc inefficace.

Enfin, la majorité des TCSL développées en AC reposent sur un travail du sol peu profond (Figure 1). Dans le cas d'une volonté de réduire ou supprimer l'usage d'herbicides, les pratiques consistant à limiter la profondeur de travail du sol, et non à le supprimer, nécessitent souvent de **multiplier les interventions mécaniques** pour gérer les germinations d'adventices causées par un travail du sol superficiel (Barré et *al.*, 2018; Jat et *al.*, 2019; Nichols et *al.*, 2015). Ce type de techniques peut alors remettre en question les bénéfices recherchés vis-à-vis d'une seule intervention en labour sur le plan économique (consommation énergétique, temps de travail), environnemental (consommation en carburant) et agronomique (diminution des rendements, développement des adventices) (Peigné, 2018). Dans leurs travaux, Nyamangara et *al.* (2014) et Teklewold et *al.* (2013) montrent notamment que des techniques de travail du sol à profondeur réduite ont induit un temps de travail plus élevé pour gérer les adventices que dans le système conventionnel témoin.

L'AC, développée pour préserver les potentiels agronomiques et environnementaux des sols, est à l'origine de controverses sur l'impact des pratiques chimiques pour gérer les adventices (résistances aux herbicides, efficacité des produits en présence de résidus, etc.). Associé à la pression des adventices souvent plus présentes en AC, les potentiels de rendement limités par rapport à une pratique traditionnelle sont aussi très discutés (Giller et *al.*, 2015; Pittelkow et *al.*, 2015b, 2015a). Malgré les bénéfices que peuvent apporter les TCSL et les couverts, ces controverses ralentissent la transition des exploitations vers ces systèmes de production et affectent sur le long terme l'adoption de l'AC. L'ensemble de ces questionnements autour de la qualité des eaux et des sols, de la maîtrise des adventices, de la santé publique, de la biodiversité et de la viabilité économique, encourage fortement les chercheurs et les praticiens à explorer des alternatives plus durables.

2. La pratique de l'agriculture de conservation sans herbicide : un enjeu majeur pour les agriculteurs

2.1. Agriculture biologique : principes fondateurs et questionnements autour de la durabilité des pratiques actuelles

En agriculture biologique (AB), les praticiens dépendent souvent **d'un labour fréquent** pour préparer le lit de semence, gérer les adventices et incorporer les résidus de culture dans le sol (Bàrberi, 2002; Mäder and Berner, 2012; Watson et *al.*, 2002). Au cours du développement de la culture, le désherbage est réalisé à partir d'outils associés à des interventions multiples (ex : bineuse, herse étrille, houe rotative) (Bàrberi, 2002; Bond and Grundy, 2001; Lockeretz, 2007). Le règlement européen du Conseil n°2092/91 interdit l'utilisation de produits phytosanitaires de synthèse, d'OGM et limite l'usage d'intrants (Leroux, 2015). Les pratiques de lutte contre les adventices reposent aussi sur des méthodes de régulation biologique via la diversification des rotations culturales et l'intégration de couverts végétaux (Bàrberi, 2002; Bond and Grundy, 2001; Liebman et *al.*, 2009; Turner et *al.*, 2007).

Les **surfaces agricoles mondiales cultivées en AB sont en croissance** et atteignent 70 millions d'hectares en 2017 (FiBL and IFOAM, 2019). L'Océanie et l'Europe sont les deux continents possédant la part de SAU en AB la plus importante avec respectivement 5.4 % et 2.5 % de leur SAU totale. Fin 2017, l'Union Européenne (UE) compte plus de 14.6 millions d'hectares en AB (contre 11 millions d'hectares en 2015) (Willer et *al.*, 2018). Avec plus de 1.7 millions d'hectares de SAU en AB, la France est le 3^{ième} pays européen au niveau des surfaces AB avec 5,7 % de la SAU totale du territoire derrière l'Espagne et l'Italie. Fin 2017, les grandes cultures AB en Europe représentaient plus de 6.8 millions d'hectares. Les 4 premiers pays de l'UE producteurs de céréales AB sont l'Italie, la France, l'Allemagne et l'Espagne. La France compte 392 844 ha de surfaces AB en grandes cultures en 2017 (14 % des surfaces en AB de l'UE) et atteint la première place de l'UE pour les productions en AB de blé tendre, d'épeautre, de maïs, d'oléagineux, de soja et de lin (Agence Bio, 2017).

Les grandes cultures constituent un enjeu pour la diffusion de l'AB grâce aux débouchés croissants en alimentation humaine et animale (ITAB, 2011). Cependant, les exploitants sont confrontés à des **problèmes de gestion d'adventices**, de maladies et de ravageurs qui les rendent dépendant du labour (Delate et *al.*, 2012b; Mirsky et *al.*, 2012; Peigné et *al.*, 2007). Bien que l'AB se soit développée comme un levier pour améliorer la fertilité des sols et réduire les pollutions chimiques, les fréquentes interventions mécaniques impactent le potentiel agronomique des sols et suscitent de nombreux débats sur les effets environnementaux (érosion des sols, biodiversité, appauvrissement des sols, consommation de carburant, etc.) et les conséquences économiques (réduction des marges) (Hole et *al.*, 2005; Mäder and Berner, 2012; Peigné et *al.*, 2007). Pour limiter les pertes de surfaces et prévenir les risques de dégradations des sols, l'IFOAM et la FAO encouragent les agriculteurs en AB à adopter des techniques de l'AC (FiBL and IFOAM, 2019; Gadermaier et *al.*, 2012).

L'opportunité de gérer les adventices à partir d'un recouvrement du sol comme le permettent les techniques de l'AC en assurant la présence de résidus sur la surface du sol constitue un moyen de limiter le recours au travail du sol et protéger le sol (Mirsky et *al.*, 2012; Moyer, 2011). La **conciliation de l'AB et de l'AC** représente un enjeu important pour bénéficier de services supplémentaires permettant de développer des alternatives durables en limitant les effets controversés de l'AB et de l'AC lorsqu'elles sont pratiquées seules. Les références sur le sujet sont peu nombreuses mais des chercheurs discutent des bénéfices que pourraient apporter la technique du SDSC en AB sur la gestion des adventices, l'enrichissement des sols en MO et la simplification des itinéraires techniques (ITK) (Bernstein et *al.*, 2011; Moyer, 2011; Wallace et *al.*, 2017). Cependant, la mise en pratique d'une telle technique en AB soulève de multiples questions de faisabilité vis-à-vis de la maîtrise des adventices pérennes sur le long terme (Armengot et *al.*, 2014).

2.2. Production conventionnelle : Des débats contrastés autour du glyphosate

Bien que la pratique de l'AC soit en croissance dans le monde, de vives controverses sont présentes autour de l'utilisation du glyphosate, perçue comme « *une menace* » pour l'AC et susceptible de freiner les adoptions (Kassam et al., 2019; Van Deynze et al., 2018).

Le glyphosate, commercialisé depuis 1974, est devenu l'un des herbicides les plus utilisés dans le monde (Benbrook, 2016; Malone and Foster, 2019). Il est actuellement homologué dans tous les pays de l'UE. Depuis la commercialisation, plus de 1.6 milliards de kilogrammes (kg) de glyphosate ont été épandus aux USA (Benbrook, 2016). L'emploi de la molécule ne cesse d'augmenter puisque les 2/3 de la quantité de glyphosate utilisée aux USA entre 1974 et 2014 représentent celle utilisée ces 10 dernières années (Malone and Foster, 2019). D'après Malone and Foster (2019), cette forte augmentation est liée au développement de l'AC et en particulier du SD.

Les débats, très actifs depuis 2015, sur la question du glyphosate restent d'actualité et n'ont pas permis d'aboutir à un consensus de tous les acteurs. De nombreuses études montrent des effets néfastes du glyphosate sur l'intégrité des écosystèmes et sur la santé humaine soulevant des préoccupations vis-à-vis des consommateurs et des praticiens (Battaglin et al., 2014, 2009; Grandjean and Landrigan, 2014; Mesnage et al., 2015, 2012; Myers et al., 2016; Relyea, 2005; Schinasi and Leon, 2014).

A l'inverse, d'autres travaux scientifiques montrent l'absence de lien direct de cause à effet entre le glyphosate et le développement de tumeurs (Andreotti et al., 2018; Chang and Delzell, 2016; Vazquez et al., 2017). Dans une méta-analyse, Chang and Delzell (2016) discutent les limites méthodologiques fréquentes des publications établissant un lien direct entre le développement de cancers ou d'effets néfastes sur l'environnement et l'usage de glyphosate : “*The methodological weaknesses of the small number of existing studies and an overall body of literature that is not strong, consistent, temporally unambiguous [...]*”. Pour les auteurs, les nombreux biais méthodologiques des études concluant à la nocivité du glyphosate, limitent la robustesse de leurs résultats (faible puissance des tests statistiques liée au faible nombre d'échantillons, exposition possible à d'autres substances, etc.) et ne justifient pas les liens faits entre des toxicités et la matière active.

Bien que l'organisation mondiale de la santé (OMS) ait classé en 2015 le glyphosate comme étant « *probablement cancérigène* » pour l'homme, l'autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) a, quant à elle, déclaré qu'il était « *improbable que le glyphosate fasse courir aux humains un danger cancérigène* » (Portier et al., 2016). Ces deux évaluations contradictoires ont rapidement suscité de vives réactions des communautés scientifique, agricole, publique et politique, soulevant des débats sur l'intégrité scientifique autour de l'utilisation du glyphosate (Hassan et al., 2017; Morini, 2018).

Dans la continuité de ces débats menés aux échelles mondiale et européenne, en France, de vives discussions persistent autour d'une possible interdiction du glyphosate dans les 5 ans à venir, malgré

les faibles efforts des pouvoirs publics, soulignés par Lucas et *al.* (2018), pour rechercher des alternatives afin d'assurer la productivité et la viabilité des exploitations. Goulet (2017) et Landel (2015) présentent quelques travaux de groupes d'agriculteurs expérimentant des conduites techniques sans herbicide tout en exposant le manque de soutien et d'accompagnement.

L'ensemble de ces débats crée un climat incertain pour l'évolution des pratiques, en particulier pour l'AC, qui nécessiterait de repenser les systèmes de production. La perspective de la mise en place de l'AC sans herbicide représente donc un enjeu majeur en agriculture conventionnelle, pour les producteurs déjà engagés en AC, pour répondre aux pressions sociétales et économiques croissantes liées à l'usage du glyphosate.

Pour conclure, des enjeux nouveaux apparaissent et rapprochent les intérêts des producteurs en AB et en agriculture conventionnelle autour de la recherche d'une alternative durable permettant de concilier l'AC et l'absence d'herbicide. L'objectif commun recherché étant de réduire la perturbation du sol et d'optimiser son recouvrement pour protéger les sols contre les aléas climatiques, tout en assurant la gestion des adventices et le maintien, voire l'augmentation, des rendements.

3. Le semis direct sous couvert végétal : Une alternative viable et durable pour supprimer l'utilisation d'herbicide ?

3.1. Combiner semis direct et couverts végétaux pour maîtriser les adventices

Des acteurs du monde agricole pensent que le SDSC est une alternative pour limiter, voire remplacer, l'utilisation d'herbicides. La présence du couvert constitue un levier pour gérer les adventices par régulation biologique (effet allélopathique, compétition pour les ressources azotées et hydriques du sol, etc.) (Teasdale et *al.*, 2007; Yenish et *al.*, 1996). Dans le cas du SDSM, la destruction du couvert à partir d'un rouleau représente un enjeu fort pour optimiser la lutte contre les adventices via la barrière physique créée par le mulch sur la surface du sol (interception de la lumière) mais également pour limiter la compétition du couvert avec la culture (Mirsky et *al.*, 2013; Moyer, 2011).

Le SDSC est une technique innovante conciliant un travail du sol minimum (localisé au niveau de la ligne de semis) avec une couverture végétale. Dans un contexte de production sans herbicide, la matière sèche produite par le couvert végétal constitue un outil indispensable pour gérer les adventices (Büchi et *al.*, 2018a). D'après des travaux de modélisation, Colbach and Cordeau (2018) montrent que la réduction des herbicides ne permet pas forcément de conduire à plus de pertes de rendement, car d'autres pratiques de gestion du système de production ont aussi des impacts directs sur la gestion des adventices et le rendement de la culture (ex : Fréquence des couverts, rotation diversifiée, etc.). Schmidt et *al.* (2019) illustrent notamment que l'utilisation de paillage de couverts végétaux et de

compost dans une rotation culturale sans herbicide en TCSL (5-15 cm) constitue une stratégie efficace pour limiter le stock semencier des adventices comparé à un travail du sol traditionnel (25 cm).

En agriculture conventionnelle, des auteurs qualifient le SDSC de technique « en rupture » avec les pratiques traditionnelles, nécessitant de repenser l'ensemble du système de production, l'organisation, le matériel et le processus de prise de décision dans le pilotage des pratiques (Dugue et *al.*, 2015; Scopel et *al.*, 2004; Triomphe et *al.*, 2008, 2006). Afin de concilier ces changements avec les objectifs et les contraintes des producteurs, quelques travaux participatifs ont été menés avec des praticiens locaux aux Etats-Unis, au Burkina Faso, au Laos et au Brésil pour améliorer l'adoption et la diffusion de la technique (Bouahom et *al.*, 2005; DeWalt, 1994; Lenne et *al.*, 2007; Petersen et *al.*, 1999; Scopel et *al.*, 2004; Triomphe et *al.*, 2008). Ces études montrent que l'approche participative permet d'améliorer l'adaptation de techniques innovantes au contexte local.

3.2. Les principaux défis d'une mise en pratique

En Europe, le SDSC suscite aussi de plus en plus d'intérêt chez les agriculteurs qui cherchent à améliorer la fertilité des sols, limiter leur impact environnemental et réduire les coûts (Casagrande et *al.*, 2015; Soane et *al.*, 2012). Toutefois, une enquête menée en 2012 auprès de 159 agriculteurs européens intégrant des pratiques de l'AC en AB montre que ces producteurs se tournent majoritairement vers l'intégration de couverts végétaux dans leur pratique et une réduction de la profondeur de travail du sol sans aller jusqu'au SD. Seulement 27 % de l'échantillon pratiquent du SD (toute pratique confondue : SD sous des résidus de cultures, sous couverts).

De même, les travaux européens menés sur le non labour sans herbicide portent en majorité sur un travail du sol réduit (« *conservation tillage* ») plutôt que sur le semis direct (« *no tillage* »). Des limites méthodologiques apparaissent dans ces études qui reposent souvent sur une comparaison du SDSC à d'autres techniques culturales tels que le labour ou le travail du sol superficiel limitant ainsi la compréhension et la production de connaissances sur le SDSC.

La revue bibliographique « *Overview of Organic Cover Crop-Based No-tillage Technique in Europe : Farmers' Practices and Research Challenges* » publiée en 2017 dans *Agriculture* discute des limites méthodologiques des travaux européens dans la promotion de la technique du SDSC sans herbicide et présente les pratiques et les challenges rencontrés par les agriculteurs européens.

Overview of organic cover crop – based no tillage technique in Europe: Farmers' practices and research challenges

Laura Vincent-Caboud^{1*}, Joséphine Peigné¹, Marion Casagrande^{1,2}, and Erin M. Silva³

¹ Department of Agroecology and Environment, ISARA Lyon (member of the University of Lyon), 23 rue Jean Baldassini, 69364 Lyon cedex 07, France; jpeigne@isara.fr

² ITAB, Quartier Marcellas, F-26800 Etoile sur Rhône; marion.casagrande@itab.asso.fr

³ Department of Agronomy, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, USA ; emsilva@wisc.edu

*Correspondence: lavincent-caboud@isara.fr

Abstract: Cover crop mulch-based no tillage (MBNT) production is emerging as an innovative alternative production practice in organic farming (OF) to reduce intensive soil tillage. Although European organic farmers are motivated to implement MBNT to improve soil fertility and achieve further management benefits (e.g. labor and costs savings), low MBNT practice is reported in Europe. Thus, this paper aims to understand challenges of both farmers and researchers limiting the further adoption of MBNT in organic farming in temperate climates. The primary no tillage (NT) practices of organic European farmers and findings of organic MBNT studies conducted in Europe are reviewed, focusing on living or mulch cover crop-based NT (LBNT or MBNT) for arable crop production. Major conclusions drawn from this review indicate consistent weed control and establishment of best practices for cover crop management as the two main overarching challenges limiting adoption. In view of substantial gaps of knowledge on these issues, additional research should focus on cover crop selection and management (species, date sowing) to increase cover crop biomass, particularly in warmer climates. Lastly, further research is needed to optimize cover crop termination to prevent competition for water and nutrients with cash crops, particularly in wetter northern conditions which promote vigorous cover crop growth.

Keywords: no tillage; cover crops; organic farming; roller crimper; conservation tillage

1. Introduction

Conservation agriculture (CA) has been developed in conventional farming to minimize and prevent soil erosion, reduce labour and energy inputs, and preserve soil fertility (Altieri *et al.*, 2011; Hobbs *et al.*, 2008; Kassam *et al.*, 2009; Masutti, 2007). The Food and Agriculture Organization (FAO) has defined conservation agriculture as a range of practices based on three main principles: (1) minimum soil disturbance obtained using reduced tillage (RT) or no-tillage (NT), (2) a permanent soil cover via living or dead (mulch) cover crops and (3) diversified crop rotations (Hobbs *et al.*, 2008). NT involves production practices with which cash crop is sown into soil that has not been tilled since the previous harvest (Horowitz, 2011) (Figure 1). As highlighted by several authors, NT may also be referred to as direct seeding or direct drilling, terms that are often employed in European publications (Cannell and Hawes, 1994; Kassam *et al.*, 2009), although some North American researchers have stressed differences in soil disturbance between NT and direct drilling (Gohlke *et al.*, 2000). Typically, with the use of NT practices, the soil surface is only disturbed down to three to five centimeters depth on the seeding row, with significant amounts of crops or cover crop residues is maintained on the soil surface to preserve soil quality and suppress weeds (Soane *et al.*, 2012).

The specific integration of cover crops into NT practices is an innovative alternative recently developed to mitigate environmental pollution such as nitrate leaching, reduce inputs (fertilization, herbicides) and suppress weeds via cover crop competition for nutrient and water resources (Teasdale *et al.*, 2007; Triplett and Dick, 2008) (Figure 1). Cover crop mulch-based NT (MBNT) and living cover crop-based NT (LBNT) have gained increasing attention as methods to further enhance the agroecosystem services of NT systems, particularly in organic agriculture. Depending on the cover crop species used in the system, weed control is achieved through physical suppression preventing access to light, reducing soil temperatures, competition with nutrient resources, and allelopathic interactions (Favarato *et al.*, 2014). Cover crop-based NT (CCNT) techniques, i.e. MBNT and LBNT, consists of sowing the main crop into a living cover crop, frost-killed cover crop or cover crop terminated either mechanically (roller crimper, mower) or with a synthetic herbicide, or both in combination (Figure 1). These strategies, in addition to limiting soil disturbance and suppressing weeds, also provide an opportunity to address another principle of conservation agriculture by improving living soil cover. Although CCNT is employed in conventional agriculture to promote soil fertility, control weeds, increase water infiltration and preserve soil moisture (Carrera *et al.*, 2004), these systems often integrate the use of herbicides to manage weeds and/or terminate the cover crop, thereby raising environmental sustainability issues (Mäder and Berner, 2012; Soane *et al.*, 2012).

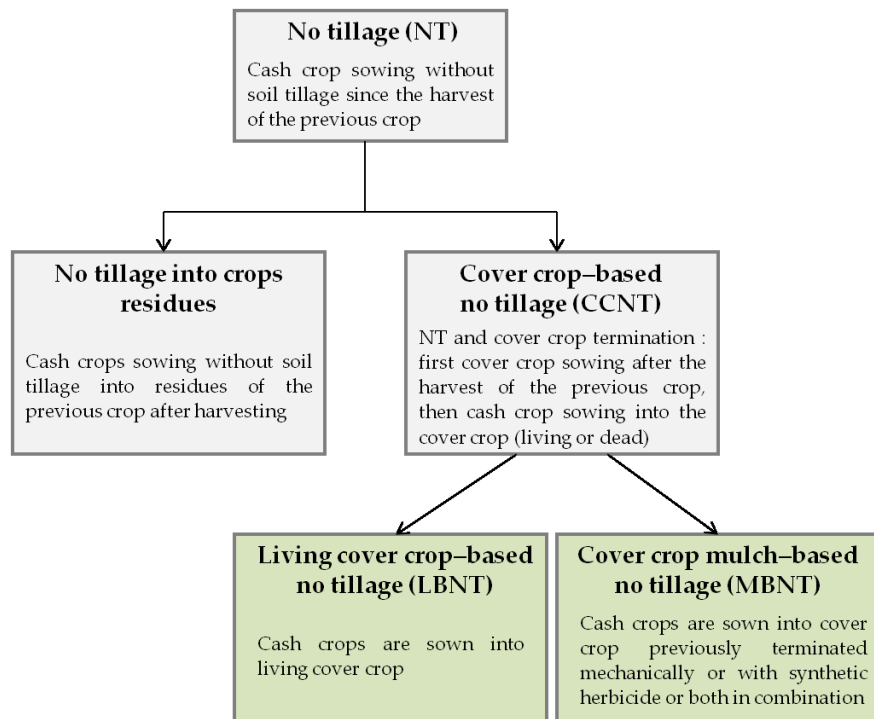


Figure 1: Diagram of different techniques of no tillage and cover crop management

Organic agriculture (OF) has also emerged as an alternative for maintaining soil fertility and reducing the harmful environmental impacts of agriculture. The European standard No. 834/2007 bans the use of chemical synthetics (pesticides and fertilizers) and limits off-farm and synthetic inputs in OF. Current organic practices use crop rotation as a foundational practice to provide nutrient recycling and

control weeds, pests and diseases (Watson *et al.*, 2002). Theoretically, OF offers many advantages in the shift toward sustainable agricultural systems via the increase of soil organic matter and biodiversity. In reality, however, without use of synthetic herbicides, farmers often depend on intensive tillage to manage weeds (Peigné *et al.*, 2015b; Shirliffe and Johnson, 2012). This can result in soil degradation: decreases in biological activity and biodiversity, increases in soil erosion, losses in organic matter content, and destruction of soil physical structure due to frequent machine traffic and tillage activities on the field (Gadermaier *et al.*, 2012; Peigné *et al.*, 2007). Organic NT represents an opportunity to mitigate these drawbacks, improve soil fertility components and provide further benefits regarding European farmers' working conditions (labor savings, energy consumption reduction etc.) (Mäder and Berner, 2012).

Despite the potential benefits of integrating NT practices into organic cropping systems (including, but not limited to, MBNT and LBNT) which have been reported by researchers, and the interest shown by European farmers, NT has not been widely implemented in Europe and few research studies have been conducted investigating this technique (Casagrande *et al.*, 2015; Peigné *et al.*, 2015a). The trials that have been carried out in Europe and interviews with farmers using organic conservation tillage including MBNT bring to light the typical practices, motivations and challenges related to conservation techniques (Casagrande *et al.*, 2015; Peigné *et al.*, 2015a). This paper aims to synthesize knowledge and conclusions drawn from previous European research projects to identify the overarching challenges facing research in Europe in the promotion of organic MBNT in arable crops.

Based on literature review and interviews of European organic farmers, we first explain the methodology selected to address the goal of this paper. Then, we present a broad overview of organic farmers' NT and cover crop practices in Europe and identify their main challenges. Next, we examine in detail the knowledge drawn from European research to address the organic farmers' difficulties. Lastly, we discuss the primary future research challenges to improve our understanding on organic MBNT under a temperate climate.

2. Methodology

Large number of papers has been published in North America on organic MBNT, summarizing the results of research trials based on cover crop species (Delate *et al.*, 2012a; Halde and Entz, 2016; Halde *et al.*, 2014; Moyer, 2011; Parr *et al.*, 2012; Silva, 2014), cover crop termination methods and timing (Davis, 2010; Kornecki *et al.*, 2012; Kornecki *et al.*, 2010; Mirsky *et al.*, 2011; Mischler *et al.*, 2010; Moyer, 2011; Parr *et al.*, 2014; Vaisman *et al.*, 2011), weed suppression (Bernstein *et al.*, 2014; Carr *et al.*, 2013; Carr *et al.*, 2012; Luna *et al.*, 2012; Mirsky *et al.*, 2012b; Mirsky *et al.*, 2013; Wells *et al.*, 2015; Wells *et al.*, 2014) and cash crop sowing (fertilization strategies, row spacing, seeding rate) (Bernstein *et al.*, 2011; Moyer, 2011; Ryan *et al.*, 2011). Nevertheless, in Europe, very few studies exist that focus on organic MBNT, raising questions of the effectiveness and appropriateness of this technique to enhance the sustainability of European organic farms (Cooper *et al.*, 2016). Concerns related to the implementation of organic MBNT in Europe must be more discussed to

identify future research specifically addressing the implementation of MBNT on European farms. Indeed, despite the robust discussion of the challenges related to MBNT by American researchers (Carr *et al.*, 2013; Carr *et al.*, 2012; Mirsky *et al.*, 2013; Shirtliffe and Johnson, 2012), these challenges may differ in Europe due to its unique agricultural context (e.g. climate, information or equipment access, organic seeds availability etc.).

In Europe, although range of studies and review articles have been carried out on NT in conventional farming (Baker and Saxton, 2007; Derpsch *et al.*, 2010; Soane *et al.*, 2012), these papers did not specifically address MBNT, leaving a dearth of information on MBNT, particularly regarding its unique integration into organic production. In Europe, published papers dealing with tillage issue in OF are focused on RT, and it appears uneasy to discern knowledge about NT (Armengot *et al.*, 2014; Cooper *et al.*, 2016; Emmerling, 2007; Gadermaier *et al.*, 2012; Krauss *et al.*, 2010; Mäder and Berner, 2012; Peigné *et al.*, 2015a; Peigné *et al.*, 2015b). While some references refer to organic MBNT in arable crops but this technique, data analysis is presented in the context of a comparison with traditional ploughing and RT (Bilalis *et al.*, 2012a; Bilalis *et al.*, 2012b; Bilalis *et al.*, 2011; Peigné *et al.*, 2015a; Peigné *et al.*, 2015b). This research strategy limits the generation of data which could contribute to the refinement of MBNT technique and the development of best management practices, while diluting access of MBNT information.

In order to address this resource gap, this review paper focuses solely on organic MBNT, identifying challenges specific to the MBNT technique on organic European farms. The review is organized into four sections: the first two sections summarize MBNT and LBNT practices and challenges on European organic farms, considering separately two distinct climatic regions in Europe: the northern region ($> 45^{\circ}\text{N}$) and the southern region ($\leq 45^{\circ}\text{N}$). These sections are informed by two surveys conducted in Europe and in France, which aimed to identify conservation practices of organic farmers focusing on NT, RT and green manure techniques (Casagrande *et al.*, 2015; Lefèvre *et al.*, 2012; Peigné *et al.*, 2015a). Green manure, also called cover crop, is referred to any crops implemented with the aim of soil fertility preservation and improvement. While certain aspects of this surveys data has been published in other contexts, we will employ a unique approach focusing solely on the farmer-reported practices and perceptions regarding NT and cover crop management, and place the survey information against the backdrop of the European literature on conservation agricultural practices in both organic and conventional systems, creating a framework upon which to overview knowledge and challenges specific to the organic MBNT in Europe (Gadermaier *et al.*, 2012; Mäder and Berner, 2012; Peigné *et al.*, 2007; Peigné *et al.*, 2009; Pelosi *et al.*, 2009). In particular, review papers focused on the implementation of NT practices within the European biological, physical, and chemical contexts are used to describe the pedo-climatic effects on MBNT implementation in Europe (Derpsch *et al.*, 2010; Friedrich *et al.*, 2014; Kassam *et al.*, 2009; Soane *et al.*, 2012). In the third section, we summarize research focused on organic CCNT in Europe, which further informs the fourth section, to identify remaining gaps in the understanding of MBNT in Europe needed to promote farmer adoption and success with techniques combining NT with intensive cover cropping.

3. European organic farmers' no tillage and cover crop practices

Existing published literature describing the results of controlled NT research studies, do not necessarily report on the specific attitudes and practices employed by European farmers' using MBNT or LBNT practices. Within the literature that does describe farmer implementation of MBNT practices, farmers report low adoption of organic MBNT and LBNT techniques, in part due to challenges with consistent termination of cover crops without the use of synthetic herbicides (Armengot *et al.*, 2014; Mäder and Berner, 2012). A recent European survey carried out in 2012 with 159 organic farmers who are applying conservation principles (i.e. at least one of the following practices: reduced tillage, cover crop, no tillage) (Peigné *et al.*, 2015a), revealed that even within this progressive cohort of farmers utilizing sustainable RT and cover crop practice, only 27 % of interviewed farmers used NT techniques (Peigné *et al.*, 2015a). This mirrored the results of an earlier 2010 French survey interviewing 24 producers which also confirmed that very few farmers had experimented MBNT (Lefèvre *et al.*, 2012).

3.1. Organic no tillage and cover crop practices in Europe

Organic NT approaches vary across Europe, largely due to differences in climate, national cultures and/or information access (Peigné *et al.*, 2015a). Much of Europe experiences a temperate climate, with consistent humid and cool conditions, as compared to other regions of the globe with higher seasonal rainfall and/or drought periods, as encountered in North America (Basch *et al.*, 2008). However, warmer and drier climates can be found in southern Europe, with these types of environments expected to expand with global warming, increasing the risk of soil degradation (Soane *et al.*, 2012). With these changes in climatic conditions, interest in organic NT is expected to increase as additional production strategies are sought to reduce soil erosion and preserve soil moisture in the face of increasing extreme weather events. In this section, we will discuss the main practices and challenges in two European areas: the northern region ($> 45^{\circ}\text{N}$), where 109 organic farmers were interviewed in 2012, and the southern region ($\leq 45^{\circ}\text{N}$), with 50 interviewed farmers in 2012. Conservation practices implemented by these farmers may cover a range of techniques (Peigné *et al.*, 2015a), but we focus in this paper on NT (including MBNT and LBNT), in tandem with the cover crop information drawn from these surveys.

As reported in the 2012 aforementioned survey of organic farmers using progressive, sustainable practices, in the northern part of Europe, only 23% of the 109 interviewed farmers used NT, while 93% of farmers implemented a cover crop in their crop rotation to increase soil N supply to the subsequent crop (Peigné *et al.*, 2015a). Mäder and Berner (2012) have shown that the humid and cool conditions experienced in northern climates increases the difficulty of implementing NT. Researchers have recognized the role of tillage in managing weeds and accelerating soil warming to foster crop emergence, which otherwise could be delayed by large quantities of mulch left on the soil surface (Table 1). Furthermore, humid conditions enable cover crops to be established rapidly, thus influencing northern farmers' focus on cover crop practices rather than NT (Peigné *et al.*, 2015a).

Conversely, in the southern part of Europe, 34% of the 50 interviewed farmers use NT, with only 48% implementing a cover crop (Peigné *et al.*, 2015a). NT is more widespread among southern farmers, likely due to soil degradation and soil water loss caused by intensive tillage under warm and dry conditions where soil is more exposed to water and wind erosion (Basch *et al.*, 2008). Moreover, higher temperatures accelerate soil warming, promoting crop emergence and contributing to the success of NT (Table 1). However, while implementation NT practices were greater among the southern farmers, this group demonstrated a decreased use of cover crops as compared with northern European farmers. This illustrates the trade-offs regarding sustainable practices which exist in the south; while cover crops are difficult to establish in the water-limited southern climate, this same condition promotes an alternative sustainable practices, the adoption of intensive non-inversion tillage strategies to manage weeds, maintain yields, and incorporate fertilizers to limit ammoniac volatilization (Peigné *et al.*, 2015a). Due to these trade-offs, the integration of multiple practices integrating NT principles, i.e. including LBNT and MBNT, represents a real challenge.

3.2. Cover crop management

The majority of the 159 interviewed farmers implemented cover crops in their crop rotation strategies, but only 19% of them combined NT with a cover crop (Peigné *et al.*, 2015a), likely due to the limited termination methods for cover crops in OF which relies exclusively either on a mechanical solution or frost (Peigné *et al.*, 2007). Cover crop regrowth due to inconsistent or incomplete termination may compete with the cash crop for nutrients and water resources. Detailed management descriptions of the winter cropping practices of 68 farmers applying cover crops, showed that most terminated the cover crop by undercutting or mowing, but only 2% of them by rolling (Peigné *et al.*, 2015a). Thus, the cover crop often remained a living cover when combined with MBNT. Moreover, organic farmers recognized the critical trade-offs between the management of the cover and cash crops, including the impacts on (i) managing weeds with the use of a false seed-bed or (ii) incorporating a cover crop to provide nitrogen (N) to the subsequent crops (Bàrberi, 2002). Such practices do not appear to be aligning cover crop management and MBNT principles. Thus, alternatives are needed to help organic farmers manage weeds and allow for the incorporation of N-rich cover crops without tilling.

3.3. Application in crop rotations

NT primarily integrates the use of winter cereal crops such as wheat (*Triticum durum*), barley (*Hordeum vulgare*), or triticale (*x Triticosecale* Wittmack) seeded into a living cover crop or by direct sowing following the harvest of the previous main crop. Only 2.5% of the 40 interviewed farmers using NT in Europe sowed spring crops (e.g. soybean (*Glycine max*) or corn (*Zea mays* L.)) using NT practices (Peigné *et al.*, 2015a), with the practice only implemented where conditions are ideal (e.g. low weed pressure, good climate conditions etc.).

The length of crop rotations in which NT crops are included averaged seven years (Peigné *et al.*, 2015a). Diversified crop rotations are typically used, including cereals, legumes and other species such as Brassicaceae. Among the 40 farmers using NT, crop rotations are mainly based on alternating spring

and winter crops to manage weeds, and include an average of 25% spring crops, 35% winter crops, 10% other legume crops, and 30% cover crops used to increase soil N supply to the subsequent crop. Tillage is generally not completely absent from crop rotations, and occasional ploughing is performed at some stages (e.g. before spring sowing, or to incorporate cover crops). Farmers limit the application of NT on specific crops in crop rotation (e.g. wheat, barley etc.) with occasional ploughing at a mean frequency of 0.6 times over 10 years among the interviewed farmers (Peigné *et al.*, 2015a).

3.4. Farmers’ experience in no tillage production

The European survey showed that organic farmers lack experience in NT, with only 5 years of practice compared with an average of 16 years with the use of cover crops (Peigné *et al.*, 2015a). Results indicated that only 10% of 40 organic farmers using NT applied this technique without adopting RT practices, with farmers using NT averaging 12 years experience in RT and 13 years in cover crops. This latter finding suggests that farmers using NT are not the most experienced in CA, confirming what has also been observed in the French survey (Lefèvre *et al.*, 2012). Organic farmers’ progress in NT techniques occurs through exploring solutions on a farm-by-farm basis, integrating the unique objectives and constraints of their farm organization.

The situation across northern Europe contrasts with southern farmers who have slightly greater experience in NT, with an average of 7 years practice as opposed to 5 years in northern areas among the 40 interviewed farmers applying NT (Peigné *et al.*, 2015a). These differences in farmers’ practices and experiences using NT highlight the need for better understanding of the main challenges unique to their regions and farming systems if relevant solutions are to be provided in a broader European context.

This overview of NT and cover crop practices in Europe reveals the obstacles facing organic farmers to combine both techniques in accordance with the pedo-climatic context (Table 1).

Table 1. Opportunities and challenges for organic MBNT adoption in the European context

European regions	Opportunities	Challenges	References
Northern areas (> 45°N)	High cover crop biomass potential Large number of farmers with experience of cover crop practices Soil preservation to cope with climate change	Slow soil warming Moisture conditions foster rapid weed development and degradation of cover crop residues Cover crop management/termination difficulties Low NT adoption Fewer experienced farmers in CA	(Basch <i>et al.</i> , 2008; Casagrande <i>et al.</i> , 2015; Mäder and Berner, 2012; Peigné <i>et al.</i> , 2015a; Soane <i>et al.</i> , 2012)
Southern areas (≤ 45°N)	Fast soil warming Reduce soil erosion and maintain soil moisture to face climate change More experienced farmers in NT	Water and nutrient deficiencies for the cash crop (more irrigation required) Less application of cover crops in the crop rotation Cover crop establishment difficulties (under warm and dry conditions) Fewer farmers experienced in cover crop practices	

NT = no tillage; CA = Conservation agriculture

4. The challenges of living or killed (mulch) cover crop-based no tillage in European organic farming

4.1. Weed management

European researchers indicated insufficient weed suppression and resulting high weed pressures as the main reason for low adoption organic NT practices in Europe (Emmerling, 2007; Emmerling, 2001; Krauss *et al.*, 2010; Sans *et al.*, 2011). For some farmers, CCNT practices (MBNT and LBNT) offer a means of suppressing weeds without mechanical methods; however, maintaining weed suppression throughout the entire cash crop production season from crop sowing through to the harvest was cited as a major difficulty raised by farmers (Figure 2) (Casagrande *et al.*, 2015). Lefèvre *et al.* (2012) also stressed weed suppression as a primary concern of interviewed French farmers. Indeed, the possible need to intensify mechanical weed control during a crop rotation including NT due to inadequate weed management in the NT phase may lead to additional issues at the rotational scale (e.g. soil erosion, increase in labour and investment, etc.). This problem is illustrated by current farmer practices where tillage is not entirely removed from the crop rotation (Peigné *et al.*, 2015a); weed management concerns appear more important for northern farmers who are slower to adopt NT practices (Figure 2). In northern environments, humid conditions promote weed development throughout the cash crop production season, including in CCNT if the residue biomass is inadequate to provide season-long weed suppression; with significant cover crop residue on the soil surface, CCNT limits the ability of farmers to employ mechanical methods of weed management.

4.2. Inadequacy of available NT equipment and low technical skills and information

European farmers reported an inability to access information related to the organic NT technique to guide their management decision (Casagrande *et al.*, 2015). More specifically, Peigné *et al.* (2015a) found that southern farmers have less access to NT information resources than northern farmers, despite the higher number of NT practitioners observed in South Europe. According to Lefèvre *et al.* (2012), the shortage of technical guidelines leads farmers to explore solutions independently on their own farms. For example, lack of knowledge as to the best practices for seeding cash crops into a flattened cover crop is an overarching challenge which is consistent with the low level of NT experience observed in Europe (Peigné *et al.*, 2015a).

Additionally, the high cost and the low availability of NT equipment is a limiting factor in the farmers' ability to invest in effective machinery, with the resulting lack of adequate equipment reducing NT success (Basch *et al.*, 2008). Indeed, Peigné *et al.* (2007) have demonstrated the importance of specific machines needed for MBNT production (e.g. roller crimper, NT seeder), which remain very scarce on European organic farms with only few interviewed farmers rolling the cover crop for termination. Equipment must be designed, manufactured, and/or modified to be more adapted to MBNT (Peigné *et al.*, 2015b). European researchers in conventional farming also presented the small quantity of NT equipment manufactured in Europe as a main challenge (Basch *et al.*, 2008; Soane *et al.*, 2012). Above all, according to Derpsch *et al.* (2010) and Friedrich *et al.* (2014), European farmers who want

to use specific and efficient machinery in CA must import the equipment from America. The authors explain that while efficient equipment exists in Europe, the lack of technical support for farmers could explain some of the failures observed in NT on European farms. Thus, supporting farmers to build and/or modify NT equipment, or invest in the purchase of NT equipment with other farmers, could generate more appropriate machines to specific soil and climate conditions and reduce costs.

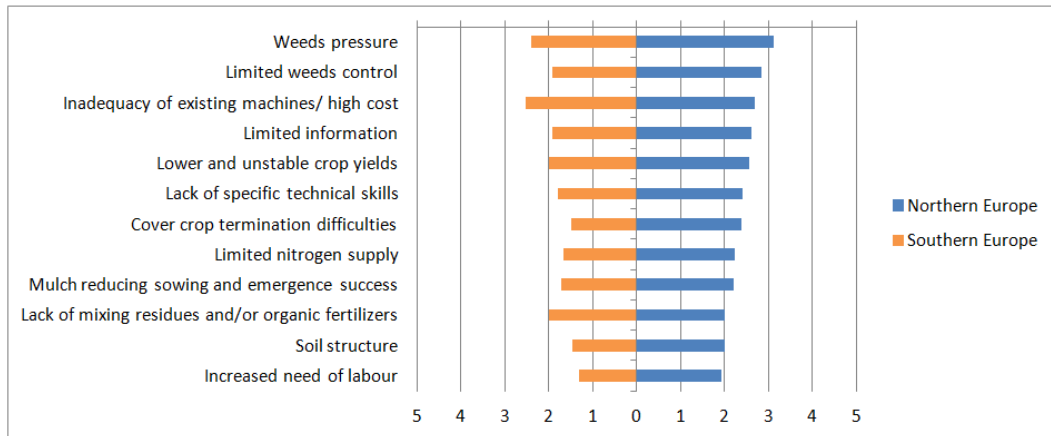


Figure 2. The challenges of no tillage for 159 European organic farmers (according to (Casagrande et al., 2015)). Means of Likert scale values of the challenges facing organic farmers in Southern Europe (left) and Northern Europe (right) among the forty interviewed farmers practicing NT in Europe in 2012. Likert scale is based on five values: (1) not important, (2) low importance, (3) moderate importance, (4) very important, (5) highly important. (Number of interviewed farmers = respectively 25 and 15 in northern and southern areas)

4.3. Unstable crop yields

Lower yields in NT compared with traditional tillage yields illustrates the effect of weeds and cover crop competition for water and nutrient resources, which may lead to a lower net returns as evidenced by French farmers (Lefèvre et al., 2012). Furthermore, inconsistent crop yields may be exacerbated by climate change, which may be even more profound using NT practices (Soane et al., 2012). Under humid and cool conditions, cash crop yields experience greater instability if the cover crop is not successfully managed, leading to insufficient weed control and competition from the cover crop. In southern parts of Europe, the occurrence of summer drought in relation to cash crop planting and establishment may lead to significant yield losses if irrigation is not available, as illustrated by Delate et al. (2012a) in Iowa. As such, farmers who do implement NT in southern regions tend to more frequently use the technique only on winter crops without a cover crop to limit competition with the main crop.

4.4. Cover crop termination

MBNT and LBNT are challenging for farmers with respect to issues that arise with cover crop termination without the use of synthetic pesticides, relying instead on mechanical methods or termination of the cover crop at frost (Casagrande et al., 2015; Peigné et al., 2007). Although farmers tend to use frost sensitive cover crop species (e.g. certain clover species, common vetch (*Vicia sativa*),

etc.), a winter-killed cover crop may not allow for adequate maintenance of residue on the soil surface after the winter and through the cash crop growing season, which is essential to ensure weed suppression until crop harvest, with biomass limited by either fall growth of the cover crop or decomposition of residues. Cover crop termination remains an even greater concern for northern farmers, as wet and cool spring conditions can create an environment fostering strong cover crop growth while soil conditions limit field operations, creating difficulties with management (Figure 2). Additionally, the French survey also indicated additional issues with cover crop management, including the high cost of seed purchasing, greater labor needs, and difficulties related to cover crop establishment (unevenly spread, lack of N availability) (Lefèvre *et al.*, 2012).

4.5. Crop emergence

In the case of MBNT, technical and mechanical issues related to direct seeding into a flattened cover crop may limit the seed-to-soil contact and contribute to farmers' concerns regarding crop emergence (Figure 2). This is of particular concern for northern farmers, who must grapple with the challenge of planting through thick cover crop biomass (Peigné *et al.*, 2015b). Moreover, Morris *et al.* (2010) and Soane *et al.* (2012) have highlighted that in conventional farming systems, soil temperatures are lower under large amounts of residue on the soil surface, delaying crop emergence. Additionally, concerns exist related to limited N supply to the subsequent cash crops, with slower mineralization rates resulting from cooler soil temperatures and significant soil carbon additions. The challenge regarding N availability, also noted by Cooper *et al.* (2016), is of even greater importance for northern farmers experiencing lower spring temperatures, thus aggravating the delay in N supply.

4.6. Soil structure

Improving soil properties is often a primary motivator for farmers interested in adopting CA (Ball *et al.*, 1996; Casagrande *et al.*, 2015; Soane *et al.*, 2012). Maintaining soil structure, however, may represent a challenge in NT due to the heavy required equipment (e.g. direct seeder, roller crimper) (Casagrande *et al.*, 2015). In particular, topsoil compaction may begin as quickly as five years after the implementation of NT practices in conventional agriculture and seems strongly dependent on soil type and climate (Cannell and Hawes, 1994; Munkholm *et al.*, 2003; Soane *et al.*, 2012). Unstable soil with low organic matter content and greater soil moisture may increase soil compaction, possibly leading to the greater emphasis on soil structure issues cited by northern organic farmers (Soane *et al.*, 2012). In Finland, Alakukku *et al.* (2009) cited in Soane *et al.* (2012) observed similar yields in NT soil as a ploughing treatment on silty clay, whereas lower yields were obtained in NT on clay soil under similar conditions. Soane *et al.* (2012) highlighted that soil compaction also is associated with previous crop harvest and the lack of tillage prior to sowing subsequent crops. Consequently, the short timeframe between cash crop harvest and cover or cash crop planting in NT does not allow for improved soil structural formation through biological activity.

4.7. Increased labor requirements

Potential savings in labor is a primary farmer motivation when deciding to adopt NT as documented by European researchers, as significant labor is required for soil tillage (Canali *et al.*, 2015; Hobbs *et al.*, 2008; Lefèvre *et al.*, 2012). However, farmers' concerns about increased labor requirements related to the implementation of a cover crop phase may explain why relatively few farmers combine NT and cover crops, as perceptions exist that the time required for cover crop management will negatively impact the expected labor saving benefits of NT.

5. Overview of living or killed (mulch) cover crop-based no tillage organic research in Europe

A recent meta-analysis on shallow non-inversion tillage in OF showed that impacts of NT management on farming system characteristics are poorly documented in Europe (Cooper *et al.*, 2016). While a significant body of North American research is concentrated on organic NT, European studies are focused on RT and are mainly carried out in Germany, France, Switzerland, Greece, Italy, Slovakia and the Netherlands (Armengot *et al.*, 2014; Berner *et al.*, 2008; Lehocká *et al.*, 2009; Mäder and Berner, 2012; Peigné *et al.*, 2009; Sans *et al.*, 2011). Therefore, relatively little knowledge has been provided on organic MBNT or LBNT, despite the recognition by international researchers that this innovation may help to manage weeds and decrease soil disturbance while maintaining biodiversity (Gadermaier *et al.*, 2012; Triplett and Dick, 2008). The meta-analysis presented by Cooper *et al.* (2016) indicates that while promising prospects exist related to the improvement of soil quality, substantial yield losses due to perennial weed pressure and the delay in N supply remain concerns, as evidenced by European organic farmers' challenges outlined in the preceding sections (Casagrande *et al.*, 2015).

In Europe, trials including organic NT have been established in Greece, Switzerland and France (Table 2). These studies have been carried out on NT without the integration of cover crops (Bilalis *et al.*, 2012a; Hiltbrunner *et al.*, 2005), or on CCNT (Hiltbrunner *et al.*, 2007a; Hiltbrunner *et al.*, 2007b; Peigné *et al.*, 2015b) (Figure 1). In this latter case, most trials have concentrated on using a living cover crop with winter wheat, flax or quinoa crops (Bilalis *et al.*, 2011; Hiltbrunner *et al.*, 2007a; Hiltbrunner *et al.*, 2007b). Only two studies have been conducted on MBNT in France, in 2005 (corn crop) and 2008 (soybean crop) (Peigné *et al.*, 2015b). Mäder and Berner (2012) highlighted that additional NT trials have been led in Europe such as in Germany, but little feedback on scientific knowledge is easily available within the scientific community because of the different national languages in which these trials were reported.

5.1. Living cover crop-based no tillage (LBNT) production

LBNT assessed in Europe is often compared to other tillage techniques mostly relying on traditional tillage (20-25 cm) and RT (5-10 cm) (Bilalis *et al.*, 2012b). These studies have documented soil fertility improvement in LBNT with higher macroporosity, more organic matter and higher soil N content due to benefits provided by the cover crop (biological activity, soil structuration etc.) (Bilalis

et al., 2012a; Bilalis et al., 2012b; Bilalis et al., 2011; Bilalis and Karamanos, 2010). Researchers have also reported the major challenge of identifying the best cover crop species which ensure weed suppression without affecting cash crop yield and quality. For instance, studies conducted in Switzerland on the direct seeding of wheat into a living cover crop demonstrated competition of the cover crop with the main crop (Hiltbrunner et al., 2007b). According to Den Hollander et al. (2007), clovers, while providing soil fertility benefits, had limited utility for weeds control and high competition with the main crop. However, Hiltbrunner et al. (2007a); Hiltbrunner et al. (2007b) observed improved weed control with white clover (*Trifolium repens*) and submediterranean clovers (*Trifolium lappaceum* L.) as compared to alfalfa (*Medicago sativa*), with increased wheat seeding rates potentially improving yield. Across living cover crops trials overall, researchers have identified white clover as the legume species providing the best compromise between competing with weeds while limiting the competition for light with the wheat crop (Den Hollander et al., 2007; Hiltbrunner et al., 2007b; Hollander, 2012). The use of a living cover crop is still debated regarding its potential competition with cash crops and related cash crop yield losses.

Table 2. Published experimental trials including organic no tillage techniques in Europe

Country	Soil type	Year	Cash crop	Cover crop	References
France	Cambisol (silty)	2003	corn	clover (living)	Peigné et al., 2009;
	Fluvisol (sandy loam)	2005	corn	alfalfa (mulch*)	Peigné et al., 2015b;
		2008	soybean	rye (mulch*)	Vian et al., 2009)
Greece	Tagnic Eutric	2007	corn	/	(Bilalis et al., 2012a;
	Cambisol (clay loam)	2008	winter wheat	vetch sativa (living)	Bilalis et al., 2012b;
		2010	flax	vetch, fababeans	Bilalis et al., 2011;
		2011	quinoa	(living)	Bilalis and Karamanos, 2010)
Switzerland	Partial gleyic Cambisol	2002	winter wheat	birdsfoot white clover,	(Hiltbrunner et al., 2007a; Hiltbrunner et
	Orthic Luvisol	2004	winter wheat	subclover	al., 2005; Hiltbrunner
		2005	Winter wheat	spined (living)	et al., 2007b)

*direct seeding of cash crop into mulch cover crop terminated with roller crimper

5.2. Cover crop mulch-based no tillage (MBNT) techniques

In France where MBNT was tested (Figure 1), four tillage treatments were compared: (1) traditional ploughing (30 cm depth), (2) shallow ploughing (18 cm depth), (3) RT (12-15 cm depth), and (4) MBNT (Peigné et al., 2015b). For this latter treatment, cash crops were sown into a cover crop terminated with roller crimper 1.7 m wide with steel blades welded onto a cylinder. This equipment was built following the design model of Brazilian rollers. In 2005, corn was sown into alfalfa mulch and soybean was planted under rye (*Secale cereale* L.) mulch in 2008. Results showed significantly more earthworms in MBNT with the cover crop biomass left on the soil surface providing food resources which foster biological activity (Peigné et al., 2009). This finding has been confirmed by several authors in conventional farming who underscore the role of high biological activity in

generating resilient organic systems (Cannell and Hawes, 1994; Emmerling, 2001). Vian *et al.* (2009) showed higher microbial carbon content, organic carbon activity and N mineralization in MBNT from 0 to 30 cm soil depth. These findings are consistent with conventional studies where more soil C and N content are observed after longer term trials, although additional fertilization is often required during the first 3 years of NT adoption (Soane *et al.*, 2012; Teasdale *et al.*, 2007).

Yield losses were also observed in the two French trials, with 25% soybean yield reduction in MBNT treatments in 2008 compared to ploughing, and as much as 75% corn yield reduction under MBNT in 2005 (Peigné *et al.*, 2015b). Crop failures have been attributed to two main factors: (1) weed infestation and (2) cover crop regrowth competition with main crops.

In 2005, alfalfa mulch was unevenly distributed on the soil surface and did not ensure sufficient weed control. More than 100 weeds/m² infested the MBNT plots on average, while only one weed/m² were observed after ploughing at corn emergence stage (Peigné *et al.*, 2015b). In North America, studies also indicate contrasting results in maintaining corn yield due to competition by both weeds and the cover crop (Delate *et al.*, 2012a; Delate *et al.*, 2012b). Indeed, although the Rodale Institute (Pennsylvania, USA) achieved as much as 10.25 t/ha corn yield in 2007 with a hairy vetch (*Vicia villosa*) cover crop (Moyer, 2011), substantial yield losses have also been reported in Iowa due to drought conditions (Delate *et al.*, 2012a). While legume cover crops increase N supply to the subsequent corn crop, legume species are also more difficult to terminate through rolling and experience less effective weed control due to their faster residue degradation rate (low C:N rate) and lower biomass production as compared to cereal species. This lack of cover crop biomass on soil surface throughout corn production season could explain the failure observed in the French trial with alfalfa (Peigné *et al.*, 2015b), as well as the interest of some North American researchers to use cover crop mixtures composed of both legume and cereal species prior to corn MBNT (Parr *et al.*, 2011). Cereal species could reduce the amount of N supplied to corn; however, this hypothesis must be further tested to obtain a better understanding of N dynamics in MBNT production.

In France in 2008, cereal rye demonstrated a greater ability to suppress weeds on soybean MBNT, but did not provide enough biomass to ensure weed control throughout the season (Peigné *et al.*, 2015b). Weed density was more abundant at the end of the cash crop season due to unusually wet conditions. Cereal rye has been the most researched cover crop in North America prior to soybean MBNT and has led to the most promising results regarding the range of benefits conferred (e.g. allelopathic effect, high biomass, early flowering, flexibility of sowing date, kill by rolling etc.) (Bernstein *et al.*, 2011; Mirsky *et al.*, 2009; Mirsky *et al.*, 2013; Silva, 2014). Researchers also extolled the benefits of other cereal cover crops (e.g. triticale, barley etc.) related to their longer persistence on the soil surface (high C:N rate) and greater biomass production. Above all other factors related to cover crop management, according to Mirsky *et al.* (Mirsky *et al.*, 2012a), the cover crop must reach more than 8 000 kg/ha to lead to satisfactory weed control (Smith *et al.*, 2011). This biomass level was likely not obtained in the European studies.

In France, despite weed infestation, Peigné *et al.* (2015b) reported greater soybean populations in MBNT compared with ploughing. The researchers explained that seed predation by pigeons occurring on the trial affected more plants on the ploughed plots because of the lack of mulch cover, which protected the soybean seed and seedlings in the MBNT plots. In North America, Delate *et al.* (2012a) and Lefebvre *et al.* (2011) also tend to observe higher soybean populations in MBNT in the United States and in Canada due to efficient weed control at soybean early vegetative stage. In addition, the authors indicated that rotary hoeing on ploughed plots likely decreased soybean stands. Based on the French results, we could expect additional benefits from MBNT to ensure crops and soil protection regarding both the risks of pests and climate (storage, drought periods etc.). Substantial work is still required to obtain good weed suppression until crop harvest and maintain similar yields to those obtained in traditional tillage to fully address farmers' concerns (Casagrande *et al.*, 2015).

As underlined by a large number of authors, effective cover crop termination is essential to MBNT success (Mirsky *et al.*, 2012a). Nevertheless, French researchers have highlighted the difficulty of killing a cover crop with a roller crimper (Peigné *et al.*, 2015b). Indeed, some plots needed to be rolled more than once and cover crop regrowth occurred throughout the crop season, likely impacting cash crop yield (Peigné *et al.*, 2015b). According to North American researchers comparing various stages of cover crop growth and the related efficacy of termination, cover crops must reach at least the flowering growth stage to be successfully controlled (Mirsky *et al.*, 2012a; Mischler *et al.*, 2010; Moyer, 2011; Wells *et al.*, 2015). However, the French trial experienced difficulties in delaying the sowing of the cash crop due to climate conditions which led to the cover crop being terminated prior to flowering, contributing to the failure to control the cover crop (Peigné *et al.*, 2015b). In light of these problems, North American researchers have screened different cover crop species and cultivars to allow for earlier cover crop flowering the following spring.

6. European research challenges for the future

As evidenced by Freidrich *et al.* (2014) in conventional farming, this review of European organic NT trials indicates that projects often compare MBNT or LBNT with other tillage techniques, an experimental framework that does not focus on optimizing MBNT success. Thus considerable work should be carried out to compare several management systems under various pedo-climatic conditions to find the best strategies leading to the suppression of weeds until crop harvest, yield improvement and cover crop control.

This paper also indicates the potential soil fertility benefits which could be provided by the further implementation of organic MBNT in Europe (Cooper *et al.*, 2016; Peigné *et al.*, 2009) although there is still a poor understanding of the longer-term effects of MBNT production on soil quality. Furthermore, despite farmers' recognized interest in MBNT, European research has provided very little knowledge to address their concerns (effects on soil structure, NT viability, skills etc.), thus inhibiting the adoption of MBNT in organic farming. Two primary factors remain poorly researched in Europe, challenging the ability of farmers to maintain crop yields in organic MBNT production: (1)

cover crop management (species, cultivars, termination) and (2) reliable, consistent, and effective weed suppression. The following key agronomical issues should be addressed under temperate conditions to address these knowledge gaps :

- Choice of relevant cover crop species: In Europe, few cover crop species have been assessed for MBNT production, even though the appropriate choice of cover crop is essential for efficient weed control (Mirsky *et al.*, 2012a). Further screening of species and cultivars under temperate climate conditions is needed to identify optimal cover crop/cash crop combinations and support the decision making process of farmers. Other questions must also be addressed: Can cover crop species that have given promising results in North America (e.g. rye and triticale) lead to similar results on soybean MBNT in Europe? Which cover crop(s) lead to the best trade-off between weed suppression, crop yield and cover crop control ?

- Increasing cover crop biomass: As indicated by many researchers, adequate cover crop biomass is a key factor to ensure weed control in MBNT; however, doubts have been raised regarding the ability to achieve high levels of cover crop biomass (8 000-9000 kg/ha) determined to be optimal by North American researchers in Europe, particularly in southern areas. Thus, following questions must be addressed: What level of cover crop biomass must be reached to ensure satisfactory weed control? Which management strategies could optimize cover crop biomass and achieve a comparable degree of weed suppression as ploughing or chemical methods? How does cover crop biomass impact weeds development and crop yield? What are the weed control implications of earlier cover crop sowing?

- Improving cover crop termination: Improving cover crop termination by mechanical methods (e.g., rolling-crimping and mowing) leads to greater success in organic MBNT; however, consistent termination of the cover crop remains challenging using the current practices used by European farmers. Cover crop termination remains particularly challenging in Northern Europe, where a humid climate fosters vigorous cover crop development. While considerable efforts must be made to develop appropriate machinery adapted to work with the high biomass remaining on the soil surface, further refinement is needed as to optimal cover crop termination practices (number of rollings, date of rolling etc.), with the aim of improving mulch distribution, prolonging its persistence on the ground until crop harvest, and enhancing the quality of crop sowing (seeds/soil contact). In particular, additional studies are required to quantify the effect of cover crop rolling on mulch degradation rate until crop harvest under a temperate climate and the effectiveness of the roller crimper on legume species termination.

- Designing crop rotation: Integrating MBNT into organic crop rotations in accordance with organic farmers' challenges (e.g. weed management at rotational scale, maintaining crop yields etc.) while incorporating both production and economic limitations remains a major issue.

Acknowledgments : We acknowledge Paul Mäder (FiBL), F.Xavier Sans (UB), José Manuel Blanco-Moreno (UB), Daniele Antichi (CiRAA), Paolo Bàrberi (SSSA), Annelies Beeckman (INAGRO, department of organic crop production), Federica Bigongiali (SSSA), Julia Cooper (UNEW, NEFG),

Hansueli Dierauer (FiBL), Kate Gascoyne (UNEW, NEFG), Meike Grosse (University of Kassel), Juergen Heß (University of Kassel), Andreas Kranzler (FiBL), Anne Luik (EULS), Elen Peetsmann (EULS), Andreas Surböck (FiBL), Koen Willekens (ILVO), who carried out the European survey within the frame of TILMAN-ORG (www.tilman-org.net) supported by CORE Organic.

Author Contributions: L. Vincent-Caboud reviewed the literature and wrote the initial draft of the paper with assistance from J. Peigné. L. Vincent-Caboud, J. Peigné, M. Casagrande and E. M. Silva contributed to revise the manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Alakukku, L., R. Uusitalo, A. Särkelä, K. Lahti, P. Valkama, P. Valpasvuo-Jaatinen and A.-M. Ventelä,** 2009. Phosphorus stratification in the Ap horizon of ploughed and no-till soils and its effect on P forms in surface runoff. In Phosphorus stratification in the Ap horizon of ploughed and no-till soils and its effect on P forms in surface runoff, Proceedings of ISTRO 18th Triennial conference sustainable agriculture, June 15-19, 2009, Izmir, Turkey, CD-ROM. T6-004-1-T6-004-6: tr.
- Altieri, M. A., M. A. Lana, H. V. Bittencourt, A. S. Kieling, J. J. Comin and P. E. Lovato,** 2011. Enhancing Crop Productivity via Weed Suppression in Organic No-Till Cropping Systems in Santa Catarina, Brazil. *Journal of Sustainable Agriculture* 35: 855-869.
- Armengot, L., A. Berner, J. M. Blanco-Moreno, P. Mäder and F. X. Sans,** 2014. Long-term feasibility of reduced tillage in organic farming. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 339-346.
- Baker, C. J. and K. E. Saxton,** 2007. No-tillage Seeding in Conservation Agriculture: CABI.
- Ball, B. C., M. V. Cheshire, E. A. G. Robertson and E. A. Hunter,** 1996. Carbohydrate composition in relation to structural stability, compactibility and plasticity of two soils in a long-term experiment. *Soil and Tillage Research* 39: 143-160.
- Bàrberi, P.,** 2002. Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Research* 42: 177-193.
- Basch, G., J. Geraghty, B. Streit and W. Sturny,** 2008. No-Tillage in Europe-State of the Art: Constraints and Perspectives.
- Berner, A., I. Hildermann, A. Fliesbach, L. Pfiffner, U. Niggli and P. Mader,** 2008. Crop yield and soil fertility response to reduced tillage under organic management. *Soil and Tillage Research* 101: 89-96.
- Bernstein, E. R., J. L. Posner, D. E. Stoltenberg and J. L. Hedtcke,** 2011. Organically Managed No-Tillage Rye-Soybean Systems: Agronomic, Economic, and Environmental Assessment. *Agronomy Journal* 103: 1169.
- Bernstein, E. R., D. E. Stoltenberg, J. L. Posner and J. L. Hedtcke,** 2014. Weed Community Dynamics and Suppression in Tilled and No-Tillage Transitional Organic Winter Rye-Soybean Systems. *Weed Science*.
- Bilalis, D., I. Kakabouki, A. Karkanis, I. Travlos, V. Triantafyllidis and H. Dimitra,** 2012a. Seed and saponin production of organic quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) for different tillage and fertilization. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 40: 42.
- Bilalis, D., A. Karkanis, A. Pantelia, S. Patsiali, A. Konstantas and A. Efthimiadou,** 2012b. Weed populations are affected by tillage systems and fertilization practices in organic flax (*Linum usitatissimum* L.) crop. *Australian Journal of Crop Science* 6: 157.
- Bilalis, D., A. Karkanis, S. Patsiali, M. Agriogianni, A. Konstantas and V. Triantafyllidis,** 2011. Performance of wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) under conservation tillage practices in organic agriculture. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 39: 28.
- Bilalis, D. J. and A. J. Karamanos,** 2010. Organic Maize Growth and Mycorrhizal Root Colonization Response to Tillage and Organic Fertilization. *Journal of Sustainable Agriculture* 34: 836-849.
- Canali, S., M. Diacono, G. Campanelli and F. Montemurro,** 2015. Organic No-Till with Roller Crimpers: Agro-ecosystem Services and Applications in Organic Mediterranean Vegetable Productions. *Sustainable Agriculture Research* 4: 70.
- Cannell, R. Q. and J. D. Hawes,** 1994. Trends in tillage practices in relation to sustainable crop production with special reference to temperate climates. *Soil and Tillage Research* 30: 245-282.
- Carr, P., G. Gramig and M. Liebig,** 2013. Impacts of Organic Zero Tillage Systems on Crops, Weeds, and Soil Quality. *Sustainability* 5: 3172-3201.
- Carr, P. M., R. L. Anderson, Y. E. Lawley, P. R. Miller and S. F. Zwinger,** 2012. Organic zero-till in the northern US Great Plains Region: Opportunities and obstacles. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27: 12-20.

- Carrera, L. M., A. A. Abdul-Baki and J. R. Teasdale**, 2004. Cover Crop Management and Weed Suppression in No-tillage Sweet Corn Production. *HortScience* 39: 1262-1266.
- Casagrande, M., J. Peigné, V. Payet, P. Mäder, F. X. Sans, J. M. Blanco-Moreno, D. Antichi, P. Bàrberi, A. Beeckman, F. Bigongiali, J. Cooper, H. Dierauer, K. Gascoyne, M. Grosse, J. Heß, A. Kranzler, A. Luik, E. Peetsmann, A. Surböck, K. Willekens and C. David**, 2015. Organic farmers' motivations and challenges for adopting conservation agriculture in Europe. *Organic Agriculture*: 1-15.
- Cooper, J., M. Baranski, G. Stewart, M. Nobel-de Lange, P. Bàrberi, A. Fließbach, J. Peigné, A. Berner, C. Brock, M. Casagrande, O. Crowley, C. David, A. De Vliegheer, T. F. Döring, A. Dupont, M. Entz, M. Grosse, T. Haase, C. Halde, V. Hammerl, H. Huiting, G. Leithold, M. Messmer, M. Schloter, W. Sukkel, M. G. A. van der Heijden, K. Willekens, R. Wittwer and P. Mäder**, 2016. Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 36.
- Davis, A. S.**, 2010. Cover-Crop Roller-Crimper Contributes to Weed Management in No-Till Soybean. *Weed Science* 58: 300-309.
- Delate, K., D. Cwach and C. Chase**, 2012a. Organic no-tillage system effects on soybean, corn and irrigated tomato production and economic performance in Iowa, USA. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27: 49-59.
- Delate, K., D. Cwach and M. Fiscus**, 2012b. Evaluation of an Organic No-Till System for Organic Corn and Soybean Production—Agronomy Farm Trial, 2011. Organic Ag Program Webpage, Iowa State University, Ames, IA.
- Den Hollander, N. G., L. Bastiaans and M. J. Kropff**, 2007. Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design: I. Characteristics of several clover species. *European Journal of Agronomy* 26: 92-103.
- Derpsch, R., T. Friedrich, A. Kassam and H. Li**, 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 3: 1-25.
- Emmerling, C.**, 2007. Reduced and Conservation Tillage Effects on Soil Ecological Properties in an Organic Farming System. *Biological Agriculture & Horticulture* 24: 363-377. doi: 10.1080/01448765.2007.9755033
- Emmerling, C.**, 2001. Response of earthworm communities to different types of soil tillage. *Applied Soil Ecology* 17: 91-96.
- Favarato, L., J. Galvão, J. Souza, R. Guarçoni, C. Souza and D. Cunha**, 2014. Population density and weed infestation in organic no-tillage corn cropping system under different soil covers. *Planta Daninha* 32: 739-746.
- Friedrich, T., A. Kassam, S. Corsi, R. A. Jat, K. L. Sahrawat and A. H. Kassam**, 2014. Conservation agriculture in Europe. In *Conservation agriculture in Europe, Conservation agriculture: global prospects and challenges*, 127-170: CABI.
- Gadermaier, F., A. Berner, A. Fließbach, J. K. Friedel and P. Mäder**, 2012. Impact of reduced tillage on soil organic carbon and nutrient budgets under organic farming. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27: 68-80.
- Gohlke, T., T. Ingersoll, R. D. Roe, N. Oregon and W. N. Pullman**, 2000. Soil disturbance in no-till and direct seed planting systems. *Natural Resources Conservation Service, Agronomy, Technical Note*: 1-6.
- Halde, C. and M. H. Entz**, 2016. Plant species and mulch application rate affected decomposition of cover crop mulches used in organic rotational no-till systems. *Canadian Journal of Plant Science* 96: 59-71.
- Halde, C., R. H. Gulden and M. H. Entz**, 2014. Selecting Cover Crop Mulches for Organic Rotational No-Till Systems in Manitoba, Canada. *Agronomy Journal* 106: 1193.
- Hiltbrunner, J., M. Liedgens, L. Bloch, P. Stamp and B. Streit**, 2007a. Legume cover crops as living mulches for winter wheat: Components of biomass and the control of weeds. *European Journal of Agronomy* 26: 21-29.
- Hiltbrunner, J., M. Liedgens, P. Stamp and B. Streit**, 2005. Effects of row spacing and liquid manure on directly drilled winter wheat in organic farming. *European Journal of Agronomy* 22: 441-447.
- Hiltbrunner, J., B. Streit and M. Liedgens**, 2007b. Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? *Field Crops Research* 102: 163-171.
- Hobbs, P. R., K. Sayre and R. Gupta**, 2008. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363: 543-555.
- Hollander, N. G. d.**, 2012. Growth characteristics of several clover species and their suitability for weed suppression in a mixed cropping design, s.n.].
- Horowitz, J.**, 2011. *No-till Farming Is a Growing Practice*: DIANE Publishing.
- Kassam, A., T. Friedrich, F. Shaxson and J. Pretty**, 2009. The spread of Conservation Agriculture: justification, sustainability and uptake<math>\lt;math>/math>. *International Journal of Agricultural Sustainability* 7: 292-320.

- Kornecki, T. S., F. J. Arriaga and A. J. Price**, 2012. Roller Type and Operating Speed Effects on Rye Termination Rates, Soil Moisture, and Yield of Sweet Corn in a No-till System. *HortScience* 47: 217-223.
- Kornecki, T. S., A. J. Price and others**, 2010. Effects of different roller/crimper designs and rolling speed on rye cover crop termination and seed cotton yield in a no-till system. *J. Cotton Sci* 14: 212-220.
- Krauss, M., A. Berner, D. Burger, A. Wiemken, U. Niggli and P. Mäder**, 2010. Reduced tillage in temperate organic farming: implications for crop management and forage production. *Soil Use and Management* 26: 12-20.
- Lefebvre, M., M. Leblanc, P.-A. Gilbert, B. Estevez, M. Grenier and L. Belzile**, 2011. Semis direct sur paillis de seigle roulé en régie biologique. In *Semis direct sur paillis de seigle roulé en régie biologique*, 36. Québec: Institut de recherche et de développement en agroenvironnement.
- Lefèvre, V., M. Capitaine, J. Peigné and J. Roger-Estrade**, 2012. Soil conservation practices in organic farming: overview of French farmers' experiences and contribution to future cropping systems design.
- Lehocká, Z., M. Klimeková, M. Bieliková, L. Mendel and others**, 2009. The effect of different tillage systems under organic management on soil quality indicators. *Agronomy Research* 7: 369-373.
- Luna, J. M., J. P. Mitchell and A. Shrestha**, 2012. Conservation tillage for organic agriculture: Evolution toward hybrid systems in the western USA. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27: 21-30.
- Mäder, P. and A. Berner**, 2012. Development of reduced tillage systems in organic farming in Europe. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27: 7-11.
- Masutti**, 2007. Action publique et expertise dans la conservation des ressources agricoles aux États-Unis dans les années 1930. *Ruralia*: 25.
- Mirsky, S. B., W. S. Curran, D. A. Mortensen, M. R. Ryan and D. L. Shumway**, 2009. Control of Cereal Rye with a Roller/Crimper as Influenced by Cover Crop Phenology. *Agronomy Journal* 101: 1589.
- Mirsky, S. B., W. S. Curran, D. M. Mortensen, M. R. Ryany and D. L. Shumway**, 2011. Timing of Cover-Crop Management Effects on Weed Suppression in No-Till Planted Soybean using a Roller-Crimper. *Weed Science* 59: 380-389.
- Mirsky, S. B., M. R. Ryan, W. S. Curran, J. R. Teasdale, J. Maul, J. T. Spargo, J. Moyer, A. M. Grantham, D. Weber, T. R. Way and G. G. Camargo**, 2012a. Conservation tillage issues: Cover crop-based organic rotational no-till grain production in the mid-Atlantic region, USA. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27: 31-40.
- Mirsky, S. B., M. R. Ryan, W. S. Curran, J. R. Teasdale, J. Maul, J. T. Spargo, J. Moyer, A. M. Grantham, D. Weber, T. R. Way and G. G. Camargo**, 2012b. Conservation tillage issues: Cover crop-based organic rotational no-till grain production in the mid-Atlantic region, USA. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27: 31-40.
- Mirsky, S. B., M. R. Ryan, J. R. Teasdale, W. S. Curran, C. S. Reberg-Horton, J. T. Spargo, M. S. Wells, C. L. Keene and J. W. Moyer**, 2013. Overcoming Weed Management Challenges in Cover Crop-Based Organic Rotational No-Till Soybean Production in the Eastern United States. *Weed Technology* 27: 193-203.
- Mischler, R., S. W. Duiker, W. S. Curran and D. Wilson**, 2010. Hairy Vetch Management for no-till organic corn production. *Agronomy Journal* 102: pp.-355-362.
- Morris, N. L., P. C. H. Miller, J.H.Orson and R. J. Froud-Williams**, 2010. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment—A review. *Soil and Tillage Research* 108: 1-15.
- Moyer, J.**, 2011. *Organic no-till farming. Advancing no-till agriculture. Crops, soil, equipment.* Acres U.S.A., Austin, Texas: Copyright.
- Munkholm, L. J., P. Schjøning, K. J. Rasmussen and K. Tanderup**, 2003. Spatial and temporal effects of direct drilling on soil structure in the seedling environment. *Soil and Tillage Research* 71: 163-173.
- Parr, M., J. M. Grossman, S. C. Reberg-Horton, C. Brinton and C. Crozier**, 2012. Nitrogen delivery from legume cover crops in no-till organic corn production. *Crops and soil magazine - American society of agronomy*: 38-42.
- Parr, M., J. M. Grossman, S. C. Reberg-Horton, C. Brinton and C. Crozier**, 2011. Nitrogen Delivery from Legume Cover Crops in No-Till Organic Corn Production. *Agronomy Journal* 103: 1578.
- Parr, M., J. M. Grossman, S. C. Reberg-Horton, C. Brinton and C. Crozier**, 2014. Roller-Crimper Termination for Legume Cover Crops in North Carolina: Impacts on Nutrient Availability to a Succeeding Corn Crop. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 45: 1106-1119.
- Peigné, J., B. C. Ball, J. Roger-Estrade and C. David**, 2007. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management* 23: 129-144.
- Peigné, J., M. Cannavaciolo, Y. Gautronneau, A. Aveline, J. L. Giteau and D. Cluzeau**, 2009. Earthworm populations under different tillage systems in organic farming. *Soil and Tillage Research* 104: 207-214.
- Peigné, J., M. Casagrande, V. Payet, C. David, F. X. Sans, J. M. Blanco-Moreno, J. Cooper, K. Gascoyne, D. Antichi, P. Barberi, F. Bigongiali, A. Surböck, A. Kranzler, A. Beekman, K. Willekens, A. Luik, D.**

- Matt, M. Grosse, J. Heß, M. Clerc, H. Dierauer and P. Mäder, 2015a.** How organic farmers practice conservation agriculture in Europe. *Renewable Agriculture and Food Systems* FirstView: 1-14.
- Peigné, J., V. Lefevre, J. F. Vian and P. Fleury, 2015b.** Conservation Agriculture in Organic Farming: Experiences, Challenges and Opportunities in Europe. In *Conservation Agriculture in Organic Farming: Experiences, Challenges and Opportunities in Europe*, eds. Muhammad Farooq and Kadambot H. M. Siddique, Conservation Agriculture, 559-578: Springer International Publishing.
- Pelosi, C., M. Bertrand and J. Roger-Estrade, 2009.** Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 287-295.
- Ryan, M. R., W. S. Curran, A. M. Grantham, L. K. Hunsberger, S. B. Mirsky, D. A. Mortensen, E. A. Nord and D. O. Wilson, 2011.** Effects of Seeding Rate and Poultry Litter on Weed Suppression from a Rolled Cereal Rye Cover Crop. *Weed Science* 59: 438-444.
- Sans, F. X., A. Berner, L. Armengot and P. Mäder, 2011.** Tillage effects on weed communities in an organic winter wheat–sunflower–spelt cropping sequence. *Weed Research* 51: 413-421.
- Shirliffe, S. J. and E. N. Johnson, 2012.** Progress towards no-till organic weed control in western Canada. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27: 60-67.
- Silva, E. M., 2014.** Screening Five Fall-Sown Cover Crops for Use in Organic No-Till Crop Production in the Upper Midwest. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 38: 748-763.
- Smith, A. N., S. C. Reberg-Horton, G. T. Place, A. D. Meijer, C. Arellano and J. P. Mueller, 2011.** Rolled Rye Mulch for Weed Suppression in Organic No-Tillage Soybeans. *Weed Science* 59: 224-231.
- Soane, B. D., B. C. Ball, J. Arvidsson, G. Basch, F. Moreno and J. Roger-Estrade, 2012.** No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research* 118: 66-87.
- Teasdale, J. R., C. B. Coffman and R. W. Mangum, 2007.** Potential long-term benefits of no-tillage and organic cropping systems for grain production and soil improvement. *Agronomy Journal* 99: 1297-1305.
- Triplett, G. B. and W. A. Dick, 2008.** No-Tillage Crop Production: A Revolution in Agriculture! *Agronomy Journal* 100: S-153.
- Vaisman, I., M. H. Entz, D. N. Flaten and R. H. Gulden, 2011.** Blade Roller–Green Manure Interactions on Nitrogen Dynamics, Weeds, and Organic Wheat. *Agronomy Journal* 103: 879-889.
- Vian, J. F., J. Peigne, R. Chaussod and J. Roger-Estrade, 2009.** Effects of four tillage systems on soil structure and soil microbial biomass in organic farming. *Soil Use and Management* 25: 1-10.
- Watson, C. A., D. Atkinson, P. Gosling, L. R. Jackson and F. W. Rayns, 2002.** Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management* 18: 239-247.
- Wells, M. S., C. M. Brinton and S. C. Reberg-Horton, 2015.** Weed suppression and soybean yield in a no-till cover-crop mulched system as influenced by six rye cultivars. *Renewable Agriculture and Food Systems*: 1-12.
- Wells, M. S., S. C. Reberg-Horton and S. B. Mirsky, 2014.** Cultural Strategies for Managing Weeds and Soil Moisture in Cover Crop Based No-Till Soybean Production. *Weed Science* 62: 501-511.

4. Problématique générale

Ce chapitre positionne le SDSC sans herbicide comme une alternative aux pratiques traditionnelles répondant aux enjeux sociétaux des praticiens en AB et en agriculture conventionnelle. Pourtant, cette technique innovante, en rupture avec les pratiques existantes, est peu développée en raison des difficultés d'ordre technique, agronomique, économique et organisationnel intervenant lors de sa mise en œuvre ainsi que du faible nombre de références produites en Europe (Mäder and Berner, 2012; Triplett and Dick, 2008; Vincent-Caboud et *al.*, 2017). La mise en place du SDSC sans herbicide dans le contexte français, soulève donc des défis majeurs (équipements, aléas climatiques, connaissances, etc.), limitant la conduite d'essais pour la production de nouvelles connaissances. Ces difficultés sont observées à la fois au niveau des essais menés par les scientifiques, mais aussi chez les praticiens qui rapportent des préoccupations les empêchant de pratiquer du SDSC (maîtrise des adventices, gestion du couvert, maintien des rendements etc.) (Casagrande et *al.*, 2015; Lucas et *al.*, 2018).

Au regard de ce chapitre, il apparaît essentiel de se questionner autour des difficultés constatées, d'une part, en recherche pour produire des connaissances sur la technique du SDSC sans herbicide et d'autre part, dans les exploitations pour adopter cette technique. Dans les travaux menés en conventionnel sur le SDSC en Amérique latine, la collaboration chercheurs – praticiens a conduit à des résultats positifs, en termes de dynamique de production de connaissances, d'adoption et de diffusion qui pourrait aussi représenter une approche efficace dans le cas du SDSC sans herbicide.

L'intérêt de combiner les connaissances des chercheurs et des praticiens apparaît fondamental pour inscrire les acteurs dans une démarche de progrès permettant de répondre aux difficultés qu'ils rencontrent en travaillant séparément. Dans le cadre de la mise en place du SDSC sans herbicide où peu de connaissances existent et où persistent des points de blocage, l'objet de la thèse repose sur le postulat que la collaboration entre chercheurs et praticiens sur une technique aussi innovante produit des connaissances nouvelles participant au développement de techniques innovantes performantes et adaptées au terrain. Cette dynamique de production de connaissances vise à alimenter l'avancée technique autour du SDSC sans herbicide qui apparaît insuffisante pour l'envisager aujourd'hui à grande échelle et la promouvoir.

L'objectif général de cette thèse est de **concevoir, expérimenter et évaluer avec les praticiens du semis direct sous couvert végétal sans herbicide, pour produire de nouvelles connaissances qui améliorent les performances (agronomiques, économiques, environnementales et organisationnelles) de la technique et sa diffusion.**

Chapitre 2

Cadre méthodologique général

Chapitre 2 : Cadre méthodologique général

1. La conception innovante pour favoriser des dynamiques de changement vers des systèmes intégrant du semis sous couvert sans herbicide

Le SDSC sans herbicide est une technique innovante car elle mobilise des principes en rupture avec les pratiques actuelles. Afin de concevoir des techniques performantes qui répondent à nos objectifs, il convient de s'intéresser d'abord à cette notion d'**innovation** puis aux différentes **méthodes de conception** disponibles.

1.1. Principaux concepts de la notion d'innovation

Une **innovation** fait référence à des pratiques, objets ou idées se distinguant de l'existant par leur caractère novateur (Forest et *al.*, 1997; Rogers, 2010). Elle émerge lors de l'identification d'un problème dans un système de production existant (Hauser et *al.*, 2010; Rogers, 2010). L'innovation intervient en réponse à un manque de connaissances sur un sujet qui constitue un frein dans la durabilité des pratiques d'un point de vue technique, agro-écologique, économique, et organisationnel (Clarke et *al.*, 2018; Hall et *al.*, 2010; Hauser et *al.*, 2010). Il existe quatre catégories principales d'innovation : (1) l'innovation de produit (bien ou service), (2) de procédé ou de méthode, (3) d'organisation, et (4) de commercialisation.

En agriculture, la FAO propose une définition qui reprend ces termes : « *L'innovation agricole est le processus par lequel des individus ou des organisations mettent en œuvre des **produits**¹, des **procédés**² ou des **modes d'organisation**³, nouveaux ou déjà existants, pour la première fois dans un contexte spécifique afin d'améliorer l'efficacité, la compétitivité, la résilience ou la durabilité environnementale, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire et à la nutrition, au développement économique et à la gestion durable des ressources naturelles* » (FAO, 2018). L'objet de cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une innovation de procédé (une technique culturale) et d'organisation (approche participative).

Une innovation peut se définir aussi comme le **produit d'un apprentissage social** faisant appel à une diversité d'acteurs pour répondre à un problème donné (Benouniche et *al.*, 2016; De Leener, 2001; Smits et *al.*, 2010). La manière dont les acteurs interagissent entre eux et produisent de nouvelles connaissances, oriente les résultats générés à l'issue d'un processus d'innovation (Delate et *al.*, 2016). D'après Sibelet (1995), elle se décompose en deux phases : (1) « *l'innovation chose* », qui renvoie à

¹ Exemples d'innovations de produits : une nouvelle variété ou un bilan économique réalisé par un prestataire (FAO, 2018)

² Exemples d'innovations de procédés : techniques culturales ou équipements permettant de développer un produit (FAO, 2018)

³ Exemples d'innovations d'organisation : méthode d'organisation du lieu de travail, introduction d'une approche participative (FAO, 2018)

une notion d'existence sans contexte spatial ou temporel défini, il s'agit d'une invention, et (2) « *l'innovation processus* », qui repose sur un processus actif d'appropriation permettant de convertir une invention en innovation en adaptant par exemple une technique au contexte de l'exploitation agricole (Bertheau and Garel, 2015). Le travail mené sur la technique du SDSC sans herbicide fait référence à cette deuxième phase visant à étudier des ITK innovants chez des praticiens afin d'identifier les adaptations les plus performantes dans le contexte local. Ce processus d'innovation résulte de la succession de 3 phases principales : l'initiation, le développement de la technique et le changement d'échelle pour une diffusion (Toillier et al., 2018).

Akrich et al. (1988) distinguent deux facteurs de succès d'une innovation reposant sur un modèle d'analyse. Le premier correspond aux propriétés de l'innovation. Dans ce cas, il s'agit d'un **modèle de diffusion** où l'innovation est acceptée ou refusée par les utilisateurs en fonction des avantages qu'ils observent. A l'inverse, le second correspond à la capacité de l'innovation à susciter l'adhésion de nombreux utilisateurs et repose sur le **modèle d'intéressement**, qui se base sur une compréhension du mécanisme d'adoption. Ce modèle s'inscrit plus dans une démarche incrémentale avec une idée de mouvement et de transformation progressive où la participation des acteurs et le collectif jouent un rôle majeur. D'après Akrich et al. (1988) « *Adopter une innovation c'est l'adapter* », « *elle doit être modifiée en fonction du site où elle est mise en œuvre* ».

1.2. La conception innovante en agriculture : Principaux enjeux et méthodes

1.2.1. Qu'est-ce que la conception ?

D'après la théorie C-K, **la conception est un « processus actif »** progressif et itératif générant, à partir de la mobilisation de concepts¹ (C) et de connaissances (K), des produits ou des technologies qui n'existent pas (Béguin et al., 2009; Meynard, 2008; Vall et al., 2019). La théorie C-K permet d'expliquer le raisonnement suivi par un concepteur lorsqu'il conçoit un objet nouveau et de surmonter les « blocages cognitifs » en augmentant la capacité des acteurs à innover (Hatchuel et al., 2003, 2002a; Le Masson and Weil, 2010; Masson et al., 2018). Cette théorie repose sur 2 espaces : (1) l'espace C permettant d'imaginer et d'explorer de nouveaux concepts via l'exploration d'une diversité d'idées, et (2) l'espace K, qui correspond à toutes les connaissances sur lesquelles le concepteur s'appuie ou dont il a besoin pour imaginer de nouveaux concepts (Bertheau and Garel, 2015; Masson and McMahon, 2016). Chaque ajout de connaissances dans l'espace K augmente les chances de générer de nouvelles idées. Le concepteur imagine quelque chose de nouveau, il génère alors de nouveaux concepts impliquant « une expansion de l'espace C », et il active de nouvelles connaissances, induisant une expansion de l'espace K. Ces deux expansions sont complémentaires : une nouvelle connaissance permet de générer de nouveaux concepts et un nouveau concept permet d'identifier de nouvelles connaissances à acquérir (Hatchuel et al., 2002b; Masson et al., 2018).

¹ Concept : Idée générale, représentation abstraite d'un objet ou d'un ensemble d'objets ayant des caractères communs.

Deux types de conception peuvent être distingués (Meynard, 2008; Meynard et *al.*, 2012). (1) La **conception réglée** repose sur la définition d'objectifs et le suivi d'une méthodologie standardisée afin d'atteindre les résultats attendus en améliorant progressivement l'existant. Des rôles distincts sont assignés aux acteurs (conception, évaluation, utilisation, diffusion) (Le Masson and Weil, 2010). Ce type de démarche suscite quelques critiques au regard de sa capacité à répondre à l'environnement incertain auquel les agriculteurs doivent faire face (crise économique, aléas climatiques, etc.). (2) La **conception innovante**, dans laquelle s'inscrit l'objet de cette thèse, remet en cause les systèmes existants pour répondre aux enjeux du XXIème siècle (Meynard et *al.*, 2012; Vall et *al.*, 2010). Dans le cas du SDSC sans herbicide, la remise en cause des pratiques existantes par les praticiens repose sur l'utilisation de travail du sol et l'application d'herbicides. La conception innovante s'attache à explorer de nouvelles solutions et se base sur une logique d'expansion de connaissances par une approche davantage pluridisciplinaire et participative (Andrieu et *al.*, 2018; Le Masson and Weil, 2010).

La conception innovante peut résulter de deux démarches pouvant être appropriées à plusieurs échelles. (i) La démarche « **pas à pas** » consiste à développer une solution en partant de systèmes existants et en les modifiant pour atteindre les objectifs définis. Cette démarche s'inscrit dans un processus d'amélioration continu en alternant des phases de conception et d'évaluation (Coquil et *al.*, 2009). L'agriculteur rentre dans une logique d'apprentissage (Dedieu et *al.*, 2011; Meynard, 2012, 2008; Pretty, 1995; Vall et *al.*, 2016). (ii) La démarche **de novo**, quant à elle, aboutit à des innovations par rupture aux systèmes existants sans considérer les contraintes locales. Elle permet « *d'ouvrir le champ des possibles* » en explorant une diversité de solutions possibles et en s'appuyant fortement sur la production de nouvelles connaissances (Meynard et *al.*, 2012). L'abstraction du contexte dans ce type de démarche peut néanmoins conduire à des écarts avec le terrain entraînant des difficultés d'adoption par les agriculteurs (Barcellini et *al.*, 2015; Blazy et *al.*, 2009; Sterk et *al.*, 2007). Il convient alors d'identifier avec les praticiens les solutions les plus performantes à expérimenter en conditions réelles pour limiter ce phénomène.

1.2.2. Les méthodes de conception

D'après Vall et *al.* (2019), un processus de conception repose sur trois phases : l'exploration de nouvelles connaissances, la mise en œuvre du changement et l'évaluation. Différentes méthodologies de conception existent dans la littérature et s'appuient sur ces phases (Lacombe et *al.*, 2018). Notamment, trois **méthodes de conception** peuvent être définies : (1) la modélisation informatique, (2) le prototypage, et (3) l'approche participative. Ces démarches peuvent s'appuyer sur la mobilisation de plusieurs outils dont les principaux sont la modélisation, l'expérimentation et le « *renforcement de la capacité des acteurs* » (Novak, 2008).

Tout d'abord, la **modélisation informatique** (ou conception *in silico*) permet de considérer une multitude de facteurs (Andrieu et *al.*, 2018; Novak, 2008; Rakotovololona, 2018). Des règles sont

définies dans un modèle, puis un grand nombre de combinaisons est généré (Penot et *al.*, 2018). Par exemple, l'outil ROTAT, développé en agronomie, propose des rotations à partir de principes fixés par l'utilisateur (ex : degré de mécanisation, perte de rendement acceptée, etc.) (Dogliotti et *al.*, 2005). En revanche, les modèles informatisés sont parfois critiqués pour la distance qu'ils créent entre les agronomes et les agriculteurs vis-à-vis des réalités du terrain et du temps nécessaire pour mettre en œuvre de tels modèles, notamment dans le cas du SD qui fait intervenir une multitude de paramètres à prendre en compte (Goulet, 2008; Sterk et *al.*, 2007).

Ensuite, le **prototypage à dire d'experts** mobilise la notion d'« *empowerment* » ou d'émancipation des acteurs et l'expérimentation. Cette démarche peut s'appuyer sur plusieurs types d'experts (chercheurs, techniciens, conseillers, etc.). Le prototypage se définit comme la génération d'un système optimisé différent de celui piloté par l'agriculteur (Lefèvre et *al.*, 2013). La méthode, formalisée par Vereijken (1997), repose sur 5 étapes (Figure 3). Lors des deux premières, les experts définissent et hiérarchisent les objectifs auxquels le prototype doit répondre avant d'élaborer des indicateurs qui permettront d'évaluer l'atteinte de ces objectifs. Par la suite, ils conçoivent le prototype avant de le tester en conditions réelles et éventuellement de le modifier, puis de le diffuser (Loyce and Wery, 2006; Navarrete et *al.*, 2017). Les prototypes peuvent en amont être évalués par des outils de modélisation permettant de tester de multiples combinaisons et simuler leur durabilité (Lançon et *al.*, 2008). Ainsi, seules les plus performantes seront expérimentées sur le terrain.

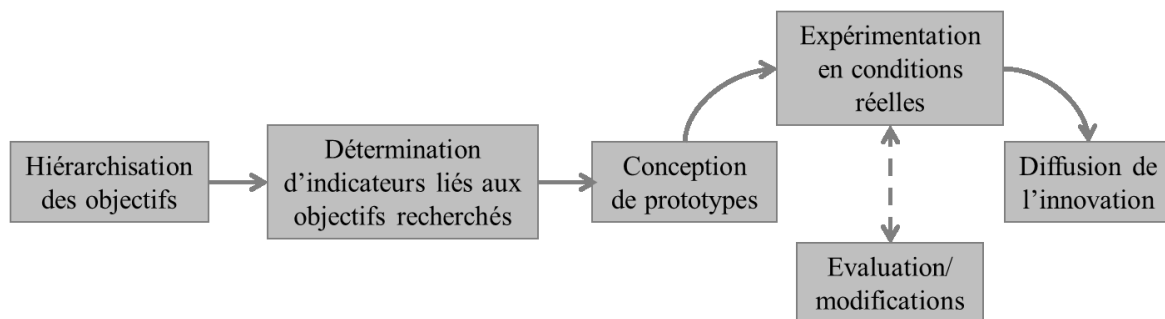


Figure 3: Principales étapes du prototypage d'après Vereijken (1997).

Enfin, l'**approche participative**, qui mobilise aussi l'« *empowerment* » des acteurs, favorise le retour d'expériences et les essais menés par des praticiens (Chauveau, 2018; Le Bellec et *al.*, 2012; Vall et *al.*, 2016). Elle est utilisée en général dans des démarches de conception « pas à pas » après un diagnostic du système actuel avant de le modifier progressivement pour répondre aux objectifs (Dicko et *al.*, 2018; Novak, 2008). La participation s'appuie souvent sur une contextualisation des solutions innovantes rendant l'échelle de leur diffusion limitée (McCrum et *al.*, 2009). Divers outils et méthodes peuvent être mobilisés selon le moment et le degré de participation des acteurs.

L'« *empowerment* » ou l'**émancipation des acteurs** est une notion de plus en plus employée dans la littérature qui représente pour Civera et *al.* (2019) une étape indispensable permettant de garantir

l'engagement des acteurs (Beyene *et al.*, 2018; Lacombe *et al.*, 2018). Elle renvoie souvent à une idée de « *transferts de connaissances et à la formation d'individus* » (FAO, 2010). Ce concept peut se définir comme un processus par lequel des individus développent des compétences leur permettant de gagner en autonomie (ex : **capacité à innover, à développer de nouvelles idées, à adapter**, etc.) (Civera *et al.*, 2019; FAO, 2010; Zimmerman, 1990). Pour Perkins and Zimmerman (1995), il s'agit de lier les compétences et les forces individuelles de chacun pour encourager les changements de pratiques. L'objectif est de permettre aux acteurs d'apprendre et développer par eux-mêmes des innovations durables pertinentes avec leurs objectifs et leurs contraintes en s'appuyant sur la participation d'autres acteurs (Lacombe *et al.*, 2018).

La technique du SDSC sans herbicide repose sur une innovation de procédé pour appliquer des principes en rupture avec les pratiques existantes : sans travail du sol et sans herbicide. Au regard de l'importance des changements qu'impliquerait l'application de ces principes, l'objet de cette thèse s'inscrit au sein d'un processus de conception *de novo* (en rupture par rapport à l'existant). Afin de réduire l'écart souvent observé dans la littérature entre des innovations *de novo* et la mise en pratique réelle par les praticiens, les innovations de type organisationnel apparaissent également pertinentes à mobiliser. En particulier, le développement d'approches participatives, intégrant les acteurs de terrain pour prendre en compte les objectifs et les contraintes locales, sont de plus en plus mises en avant dans la communauté scientifique comme des facteurs de succès d'un processus de recherche.

2. La recherche participative : Etat de l'art sur les méthodologies

2.1. Les enjeux de l'implication d'acteurs dans un processus de recherche

Une **approche participative** repose sur un **travail collectif itératif** impliquant plusieurs acteurs et regroupant les participants de diverses disciplines (Audoux and Gillet, 2015; Farrington and Martin, 1988b; Pretty, 1995). Cette méthode vise à adapter une innovation dans un contexte spécifique pour améliorer sa mise en pratique (Mubiru *et al.*, 2004). Plus précisément, la démarche participative consiste à intégrer dans le processus de recherche, au cours d'une ou plusieurs étapes, des acteurs concernés par les résultats attendus pour orienter les méthodes, la qualité des solutions générées et améliorer leur diffusion (Gouttenoire *et al.*, 2014). Pour de nombreux auteurs, cette approche constitue un enjeu fort pour construire des systèmes agricoles nécessitant d'importants changements par rapport à l'existant (Hauser *et al.*, 2010; Vall *et al.*, 2016).

La **participation des agriculteurs** en recherche est reconnue et utilisée pour identifier et valoriser des connaissances locales, considérées comme **source d'innovation** pour générer des techniques durables et performantes (Dulcire *et al.*, 2018; Girard, 2014; Probst *et al.*, 1994; Vall *et al.*, 2016). Cette approche consiste à améliorer la communication entre agriculteurs et chercheurs afin de valoriser des

connaissances accumulées sur plusieurs générations par divers acteurs (Delate et *al.*, 2016). L'implication des agriculteurs représente un levier pour développer des alternatives adaptées à leurs contraintes (économiques, organisationnelles, techniques) et faire évoluer leurs points de vue grâce à des interactions (Humphries et *al.*, 2015; Martin and Sherington, 1997; Richard, 2018; Roling and Wagemakers, 2000). Les producteurs sont alors intégrés dans une démarche d'apprentissage et sont encouragés à mettre en œuvre les innovations issues de la recherche à laquelle ils ont été impliqués (Le Bellec et *al.*, 2012; Mubiru et *al.*, 2004; Paturel, 2015; Vall et *al.*, 2016). Cette démarche permet aux agriculteurs de s'approprier l'innovation et d'améliorer sa diffusion (Akpo et *al.*, 2015; Hauser et *al.*, 2010; Hoffmann et *al.*, 2007; Toillier et *al.*, 2018).

Cependant, il existe **de nombreux défis** autour des démarches participatives pour **impliquer durablement** les acteurs mais également pour valoriser les résultats scientifiques (Crawford et *al.*, 2007; Knook et *al.*, 2018). Elles sont souvent critiquées pour leurs manques de méthodologie, de précision, de fiabilité et de validité au sein de la communauté scientifique (Hoffmann et *al.*, 2007; Humphries et *al.*, 2015; Vogl et *al.*, 2015). En particulier, peu d'outils sont disponibles pour analyser les connaissances locales issues de méthodes moins académiques (Lenne et *al.*, 2007; Martin and Sherington, 1997). Les résultats dépendent souvent d'un contexte local soulevant des questions quant à la **faible généralisation des solutions** (Martin and Sherington, 1997; Vall et *al.*, 2016). Les compromis et les coûts de telles démarches sont importants et représentent des limites pour les chercheurs au regard de ce processus incertain sur le type de résultats obtenus (démarche « à tâtonnement ») (Delate et *al.*, 2016; Neef and Neubert, 2011; Vall et *al.*, 2016). Des auteurs mettent en avant la difficulté de prédéfinir *a priori* **les ressources et le temps nécessaires** à la conduite d'une approche participative qui sont souvent sous-estimés (Bentley, 1994; Biggs and Smith, 1998; Martin and Sherington, 1997). La démarche participative peut se révéler difficile à cause de la **divergence d'intérêts entre les acteurs** (Akpo et *al.*, 2015; Gouttenoire et *al.*, 2014). Des compétences spécifiques sont à développer pour gérer les désaccords et trouver des compromis entre les acteurs.

Enfin, la mise en place d'une **relation de confiance** entre agriculteurs et scientifiques reste un défi majeur (Delate et *al.*, 2016; Mubiru et *al.*, 2004). En effet, l'intérêt des agriculteurs à faire évoluer leurs pratiques reposerait davantage sur le conseil de pairs que sur des solutions apportées par des acteurs « distants » des réalités du terrain. Plusieurs auteurs font référence à un clivage entre les chercheurs et les agriculteurs qui pourrait s'expliquer par différentes raisons (Hoffmann et *al.*, 2007; Soullignac et *al.*, 2011). Les agriculteurs cherchent à obtenir des solutions rapidement opérationnelles et performantes alors que les chercheurs sont inscrits dans une logique de développement durable où les bénéfices sont attendus à moyen ou long terme (Soullignac et *al.*, 2011). De plus, selon Hoffmann et *al.* (2007), chercheurs et agriculteurs évoluent dans un contexte de vie sociale et professionnelle différent. Les chercheurs se spécialisent par discipline alors que les agriculteurs ont une vision plus holistique de la complexité de leur système, ils vivent souvent dans leur exploitation et ne présentent

pas de distinction nette entre vie professionnelle et vie privée. La question de la communication est aussi primordiale. Un langage commun, compréhensible par tous, est à construire pour faciliter la réussite de travaux participatifs (Akpo et al., 2015; Delate et al., 2016; Orabi, 2017).

2.2. Les recherches partenariales participatives (RPP) en agriculture

Face à la faible adoption des innovations développées en recherche, on assiste **depuis les années 1970** à des changements d'approches méthodologiques avec le passage d'un système linéaire unilatéral (du chercheur à l'utilisateur) à des processus itératifs d'interactions entre acteurs (Bonny, 2015; Chambers, 1994; Farrington and Martin, 1988b; Lacombe et al., 2018; Martin and Sherington, 1997). L'objectif est de développer de nouvelles démarches permettant de connecter la pertinence des résultats avec les contraintes des **agriculteurs** en les plaçant comme « **co-concepteur** » d'innovations (Bhargava and Srivastava, 2019; Hauser et al., 2010; Mubiru et al., 2004; Probst et al., 1994). Pour cela, de plus en plus de partenariats sont créés entre les scientifiques et les praticiens afin de produire de nouvelles connaissances à partir d'un échange d'expériences (ex : conseillers, agents de développement, techniciens, etc.) (Delate et al., 2016; Drain, 2019; Stoate et al., 2019).

Plusieurs auteurs suggèrent des **critères d'évaluation** de ce type de démarche (Biggs, 1989; Cerf and Taverne, 2012; Gouttenoire et al., 2014; Neef and Neubert, 2011; Stoate et al., 2019). L'une des plus connues en agriculture est une classification selon 4 modes de participation : contractuel, consultatif, collaboratif et collégial (Biggs, 1989; Orabi, 2017). Les types contractuels et consultatifs s'appuient sur une faible participation des praticiens, sollicités lors des dernières étapes de la démarche pour tester les prototypes, alors que les méthodes collaboratives et collégiales les impliquent dès les premières étapes, via l'organisation par exemple d'ateliers de conception (Reau et al., 2012). Par ailleurs, plusieurs formes de participation existent et conduisent à des interactions différentes : individuelles, collectives en groupe homogène ou hétérogène (Barreteau et al., 2010).

Ces différents degrés d'implication des praticiens peuvent se retrouver au cours de l'évolution des démarches depuis les années 1970. Au départ, leur implication reposait surtout sur un mode consultatif (Sands, 1986). **Dans le milieu des années 1980**, des travaux ont émergé visant à améliorer la compréhension des ressources et des contraintes des exploitations et à tester les solutions innovantes (Chambers, 1994; Pretty, 1995; Roling and Wagemakers, 2000). Trois étapes sont souvent identifiées (Mubiru et al., 2004) : (i) le diagnostic de la situation initiale pour appréhender la complexité du système incluant les objectifs et les contraintes des praticiens (ex : entretiens, questionnaires, etc.), (ii) la mise en place d'essais conçus par la recherche et gérés avec les praticiens et (iii) l'évaluation de la technique testée. Une diversité de termes est employée dans la littérature pour mettre en avant le rôle essentiel de l'agriculteur : « *Farmer first* », « *on-farm research* », « *beyond farmers first* », « *farmer back to farmer* », « *farmers first revisited* », « *farmer first and last* », « *farmer participatory*

research » « *participatory technology development* » (Chambers, 1994; Chambers and Ghildyal, 1985; Farrington and Martin, 1988a; Rhoades and Booth, 1982; Scoones and Thompson, 2009, 1994).

Dans les années 1990, les travaux se tournent davantage sur des méthodes d'accompagnement des agriculteurs afin d'améliorer leur capacité à faire évoluer leurs pratiques. Les démarches portent sur un apprentissage collectif visant à encourager les producteurs à initier leurs propres expérimentations, à produire des connaissances et à améliorer la diffusion des technologies innovantes (Béguin et al., 2009; Lyon, 1996; Martini et al., 2016; Moschitz and Home, 2012; Sabourin et al., 2004). En particulier, des auteurs concluent sur la nécessité d'impliquer les praticiens dès les premières étapes de conception, justifiant l'utilisation récente des termes de « *co-conception* » ou de « *co-production* » souvent employés dans les études (Marin et al., 2016; Vall et al., 2016; Vogl et al., 2015).

De nombreux travaux s'appuient sur des approches participatives qui peuvent mobiliser une diversité d'outils permettant d'impliquer les agriculteurs (questionnaires, entretiens semi-directifs, ateliers de co-conception, visites d'essais, expérimentations collectives, formations etc.). Alors que dans les années 1970-80, ces démarches reposaient sur de faibles échanges avec les producteurs, elles s'inscrivent aujourd'hui de plus en plus dans le cadre de travaux collaboratifs entre agriculteurs et scientifiques à plusieurs étapes du processus de conception. L'apprentissage collectif vise à renforcer la capacité des acteurs à produire de nouvelles connaissances pour faire face aux défis du XXI^{ème} siècle. Parmi ces études, plusieurs critères sont jugés essentiels pour privilégier une méthode en cohérence avec les objectifs de la conception : le type d'acteurs, leur degré d'implication, la nature de leur participation et leurs attentes, leur créativité, l'apprentissage des acteurs et la performance des solutions générées (Gouttenoire et al., 2014; Probst et al., 1994; Reed, 2008).

2.2.1. Les différentes familles de recherche partenariales participatives

La partie précédente démontre l'existence d'une multitude de méthodes participatives et d'outils à adapter en fonction des objectifs de conception (Biggs and Smith, 1998; Orabi, 2017; Probst et al., 1994). L'appellation « *démarche participative* » a été largement employée dans la littérature, mais Martin and Sherington (1997) ; Vall et al. (2016); Deléage (2010) soulignent le manque de précision qu'elle génère sur le degré d'implication des acteurs. Nous assistons aussi à l'utilisation d'une diversité de termes qui renvoient à cette notion de participation (Bussièrès, 2018; Bussièrès and Fontan, 2011; Lardon et al., 2015, 2010; Lyet, 2014; Soulière and Fontan, 2018) : « *recherche collaborative* », « *recherche coopérative* », « *recherche-action* » « *recherche-action collaborative* », « *recherche avec* », « *recherche conjointe* », « *recherche partenariale* » « *recherche collective* » etc.. Bonny (2015) propose le terme de « *recherche partenariale participative (RPP)* » pour faire référence à l'ensemble de ces appellations. Différents auteurs proposent la définition de plusieurs familles de RPP en fonction du type d'implication des praticiens, du moment de l'implication et de l'objectif visé (Audoux and Gillet, 2015, 2011; Gonzalez-Laporte, 2014) (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractérisation des objectifs et du degré d'implication des chercheurs et des praticiens dans les différents types de recherche partenariale participative (RPP) (d'après Bonny, 2015 ; Audoux and Gillet, 2015 ; Gonzalez-Laporte, 2014)

Types de RPP	Objet de la recherche et problématisation profane	Définition (problématique, hypothèse, conception, protocole, méthode d'analyse)	Réalisation, action	Récolte des données	Evaluation	Diffusion des résultats, formation, accompagnement	Objectifs principaux recherchés
Recherche participative	Chercheur	Chercheur	chercheur	chercheur, praticien	chercheur	Chercheur	- Réflexion cognitive - Emanciper les acteurs - Valoriser les apports du collectif
Recherche collaborative ¹	chercheur, praticien	Chercheur	chercheur	chercheur	chercheur	chercheur, praticien	- Créer une dynamique collective de production de connaissances - Formation pour comprendre le développement
Recherche-action collaborative ²	chercheur, praticien	chercheur, praticien	chercheur, praticien	chercheur, praticien	chercheur, praticien	chercheur, praticien	- Construction de connaissances via une dynamique collective - Construction de l'action - Enrichir les compétences des partenaires par la réflexivité et le partage - Comprendre le développement à partir de la formation
Recherche-action participative	chercheur, praticien	chercheur, praticien	chercheur, praticien	chercheur, praticien	chercheur, praticien	chercheur, praticien	- Valoriser les apports du collectif - Emanciper les acteurs - Construction de l'action
Recherche intervention ³	Chercheur	Chercheur	chercheur	chercheur	chercheur	Chercheur	- Formalisation du changement par le chercheur - Conception d'outils pour accompagner
Recherche-action coopérative ⁴	chercheur, praticien	chercheur, praticien	chercheur, praticien	chercheur, praticien	chercheur, praticien	chercheur, praticien	- Reconnaître la capacité de théorisation, conceptualisation, réflexivité et de mise en action de chacun - Se concentrer sur le sens de l'action

¹ les praticiens ne sont pas co-chercheurs mais contribuent de façon plus ou moins active selon les étapes du processus, ils interviennent davantage en amont et en aval du cœur de la recherche.

² les praticiens sont considérés ici comme des collaborateurs actifs des chercheurs tout au long du processus (mais pas définis comme co-chercheurs).

³ l'implication d'autres acteurs au cours du processus est indirect car dans cette démarche le savoir apporté par le scientifique est considéré comme supérieur.

⁴ les praticiens sont considérés comme des co-chercheurs.

Les étapes correspondant au cœur de la recherche sont représentées en vert dans le tableau.

- **Recherche participative (RP)**

La majorité des études en RP fait intervenir des acteurs à un moment précis du processus, correspondant souvent à la collecte de données que les chercheurs seuls n'auraient pas pu se procurer (Tableau 1). Le protocole est établi sans eux en amont et la problématique est déclinée uniquement par les chercheurs. L'objectif premier de ce type de recherche repose sur la réflexion cognitive (Audoux and Gillet, 2011).

- **Recherche collaborative (RC)**

La recherche collaborative met en avant, comme premier objectif, la création d'une dynamique collective de production de connaissances (Desgagné et *al.*, 2001; Gonzalez-Laporte, 2014; Toillier et *al.*, 2018). Les praticiens ne sont pas considérés comme des «co-chercheurs», mais ils participent activement au niveau de deux étapes : en amont et après le cœur de la recherche (Tableau 1). La RC possède une double finalité avec la production de connaissances et la formation des acteurs. La RC repose sur l'idée qu'il est indispensable d'intégrer le point de vue des praticiens en recherche (Morrissette, 2013). Cependant, cette démarche présume que chacun possède son rôle. Dans le domaine didactique ou en sciences sociales, la recherche collaborative est souvent définie comme un « *processus conjoint de construction* » ou « *une démarche de réflexions conjointes* » (Bussièrès, 2018; Desgagné, 1997; Desgagné et *al.*, 2001; Lopez, 2015; Soulière and Fontan, 2018). Différents termes sont utilisés dans la littérature autour de cette notion, « *actions conjointes* », « *élaborations conjointes de scénarios* » ou « *recherches conjointes* », entre chercheurs et praticiens. Ces termes renvoient à la co-construction d'un dispositif autour duquel ces acteurs confrontent leurs analyses pour atteindre leurs objectifs respectifs (Lyet, 2016; Portelance and Giroux, 2009; Santini and Sensevy, 2012; Sensevy, 2011, 2008). Cross (2010) met en avant la notion de « jeux d'apprentissage » s'opérant entre les 2 types d'acteurs de manière conjointe. D'après Desgagné (1997), une action conjointe a une triple finalité : (1) la production de connaissances, (2) le renouvellement des pratiques, et (3) la mise en place d'un processus de changement.

- **Recherche-action collaborative (RAC)**

La RAC correspond à une démarche où les acteurs sont directement impliqués dans le cœur du dispositif de recherche (Lyet, 2014; Morrissette, 2013; Rullac, 2018) (Tableau 1). Il s'agit d'une pratique de recherche, associant les chercheurs et les praticiens, concernés par la problématique de l'étude, afin de développer des connaissances à partir du croisement de leurs expériences respectives (Gonzalez-Laporte, 2014). L'objectif est d'expérimenter et d'évaluer de nouveaux modes de production pour améliorer la compréhension de l'objet d'étude. La RAC s'attache à enrichir les compétences des partenaires, grâce à la réflexivité¹ et à la mise en commun structurée des expériences de recherche et d'intervention. Il existe plusieurs types de RAC allant de celles mettant l'accent sur

¹ La réflexivité suppose la mise en place d'un processus d'apprentissage qui permet d'attribuer le contrôle des connaissances pour la conduite du changement et sa diffusion (Gonzalez-Laporte, 2014)

une approche scientifique à celles privilégiant le développement de la réflexivité des praticiens. Dans ce dernier cas, les praticiens sont considérés comme des collaborateurs actifs des chercheurs, tout au long du processus. Lyet (2014) expose deux objectifs majeurs de ces RAC, i) la construction de connaissances et ii) la construction d'action. En fonction des formes de RAC, celles-ci vont s'appuyer en priorité sur l'une ou l'autre de ces finalités. Certaines démarches en RAC tentent « d'hybrider » ces deux finalités en essayant d'articuler connaissances et actions.

- **Recherche-action participative (RAP)**

La RAP est une démarche issue de la recherche-action (RA) qui poursuit un double objectif : la production de connaissances, ainsi que l'éducation et le développement pour l'action. La RAP se définit par un engagement fort des participants en vue de changements pour répondre à un problème identifié. Les participants sont considérés comme des co-chercheurs et pas seulement des partenaires du processus de production de connaissances pour l'action (Gonzalez-Laporte, 2014) (Tableau 1). La réussite de ce type de démarche ne dépend pas seulement de la capacité des acteurs à suivre les étapes, mais aussi de l'appropriation des connaissances mobilisées pour modifier les pratiques, leur compréhension et leur environnement.

- **Recherche intervention (RI)**

Dans une recherche intervention, la contribution à l'analyse et à la transformation d'un système proposé par les chercheurs est placée au premier plan (Bonny, 2015; Gonzalez-Laporte, 2014). La connaissance produite par le chercheur est considérée ici supérieure. Contrairement à la recherche action où le chercheur part d'une situation initiale perçue par l'observation ou la représentation des données par les acteurs, en RI, le chercheur propose et formalise un changement. Il conçoit des outils pour aider à mettre en place le changement.

- **Recherche-action coopérative**

Les agriculteurs sont considérés comme des « co-chercheurs » pendant le processus. Les praticiens et les chercheurs ont une position équitable tout au long de la démarche (Gillet and Tremblay, 2017; Soulard et *al.*, 2007). Cette méthode vise à remettre en question le cloisonnement existant entre les praticiens (action) et les chercheurs (théorisation et conceptualisation). Il s'agit de reconnaître la capacité de chaque type d'acteur à la théorisation, la conceptualisation, la réflexivité et à la mise en place pour l'action (Bonny, 2015).

2.2.2. Quels sont les enjeux de la recherche-action ?

La recherche-action (RA) est une démarche scientifique qui poursuit un objectif de changement, tout en faisant avancer les connaissances fondamentales scientifiques (Audoux and Gillet, 2011). Elle s'appuie sur un travail « *conjoint* » entre praticiens et chercheurs en tentant d'**articuler la recherche**¹,

¹ Recherche : riche en savoirs théoriques, modèles, méthodes et analyses.

l'action¹ et la participation. Le partenariat peut aller de la coopération jusqu'à l'action collective. Une RA émerge suite au constat de problèmes pour lesquels chacun des acteurs ne trouve pas de solution et qu'ils sont prêts à consacrer des ressources en commun pour étudier les solutions possibles et s'engager dans leur mise en œuvre (Bonny, 2015). Les chercheurs considèrent le problème comme un questionnement de recherche et s'engagent dans l'attente d'enrichir les connaissances scientifiques (Gillet and Tremblay, 2017). Il s'agira de vérifier ou réfuter des hypothèses par l'expérimentation en conditions réelles. La RA est un processus destiné à produire des connaissances théoriques et appliquées via la mise en relation de l'action et de la réflexion. Allard-Poesi and Perret (2003) indiquent que la production de connaissances en RA est « *le fruit d'une élaboration conjointe, d'un apprentissage mutuel entre chercheurs et acteurs de terrain* ». La RA est aussi un cycle comprenant plusieurs phases : (1) diagnostic de la situation initiale ; (2) identification d'un problème ; (3) planification et recueil d'informations ; (4) actions ; (5) évaluations des résultats et (5) redéfinition de nouvelles actions. Une caractéristique clé d'une RA est d'être guidée par l'action tout en contribuant à la recherche. La RA repose sur une dynamique collective de construction à partir de la mise en équivalence des connaissances (Liu, 1997). Elle permet de conduire à plusieurs résultats (Liu, 1997) : la résolution de problèmes, la validation de connaissances par l'expérience, la formation d'une communauté, la formulation de questionnements nouveaux pour de prochaines actions.

Parmi la diversité des démarches participatives existantes, il est nécessaire de choisir la plus adaptée en fonction des objectifs de l'étude. De nombreux auteurs mettent en avant l'intérêt de conduire des expérimentations directement chez les agriculteurs pour étudier la mise en pratique des solutions innovantes au regard des contraintes rencontrées sur le terrain. Parmi les démarches disponibles dans la littérature, bien que le projet soit souvent initié et porté par la recherche, la **recherche-action collaborative** permet de tendre vers un équilibre dans la contribution et le rôle de chaque acteur tout au long du processus. Ce type de démarche s'inscrit dans un processus de production de connaissances en liant la pensée et l'action par une dynamique collective et d'« *empowerment* » des acteurs. Ce mode de **collaboration praticiens-chercheurs** pourrait constituer un outil pertinent à mobiliser, dans le cadre d'un processus de recherche innovant mené sur la technique du SDSC sans herbicide, afin de concilier des changements importants à entreprendre avec les objectifs et les contraintes des praticiens.

2.2.3.L'expérimentation en milieu rural : les démarches développées

Le développement d'une technique en recherche n'a pas lieu d'exister si elle ne trouve pas d'application en conditions réelles (Blanchard et al., 2010; Triomphe, 1988). Pour une bonne prise en compte des contraintes des agriculteurs, plusieurs démarches menées en RPP proposent la mise en

¹ Action : nature participative dans la mesure où l'objectif est de modifier la situation initiale d'un groupe vers un stade de liberté, ouvrir les espaces de réflexion et de création (forme d'appropriation de la construction).

place d'expérimentations directement dans les exploitations agricoles (Sabourin et al., 2004). Ce n'est alors plus la station expérimentale qui figure au centre de la recherche mais l'exploitation.

Dans le contexte de travaux menés en milieu rural, l'expérimentation peut se définir par l'étude de l'intégration de pratiques partiellement ou totalement nouvelles dans une exploitation qui sont ensuite évaluées et comparées aux pratiques existantes afin de caractériser les facteurs de réussite et d'échec (Kummer et al., 2012). Les concepts d'expérimentation et d'innovation diffèrent mais sont complémentaires, puisqu'une innovation, c'est-à-dire « *une idée, une pratique, une méthode ou un objet considérés comme nouvelles/nouveaux par un individu ou groupe d'individus dans un contexte donné* », peut émerger à la suite ou au cours d'un essai (Leitgeb et al., 2014). L'objectif de ces essais, repose souvent sur **l'amélioration de la durabilité** des pratiques ou la **réponse à un problème** rencontré (Rhoades and Bebbington, 1991). Plus récemment, la notion d'expérimentation a été associée à un processus d'apprentissage dans lequel les producteurs s'inscrivent en « *mettant à l'épreuve de nouvelles pratiques* » dans leur propre contexte ; via l'étude d'hypothèses en lien avec leur mise en œuvre et les composantes agro-écologiques (Catalogna and Navarrete, 2016).

2.2.3.1. *Les principales catégories d'expérimentations en milieu rural*

L'expérimentation en conditions réelles, « *en milieu rural* », « *en milieu paysan* », ou « *on-farm research* » fait référence à un processus de recherche qui se déroule dans les contraintes des praticiens (Faure et al., 2010; Hocde, 1998). L'objectif est **d'évaluer les conséquences provoquées par l'introduction de techniques** ayant pour but d'améliorer les modes de production. L'expérimentation en milieu rural (EMR) est un processus et non une action ponctuelle (Sibelet, 1995; Triomphe, 1988). Le type de conduite en EMR peut se distinguer selon la place et le rôle du praticien et du chercheur au sein des prises de décisions réalisées au cours de l'essai (formalisation de la problématique, mise en œuvre du dispositif, etc.) (Hocde, 1998; Triomphe, 1988):

- **expérimentation scientifique en milieu agricole** : La problématique, le protocole et le dispositif expérimental sont fixés par les chercheurs sans concertation approfondie avec les praticiens. L'évaluation est réalisée par les chercheurs. Il s'agit ici souvent de vérifier des hypothèses testées en station expérimentale chez les praticiens,
- **expérimentation consultative** : La problématique et le protocole sont également formalisés par le chercheur mais les praticiens sont consultés, particulièrement au moment de l'évaluation des résultats des essais,
- **expérimentation collégiale ou collaborative** : La problématique et le protocole expérimental sont définis conjointement par les chercheurs et praticiens. L'évaluation est également conjointe,

- **expérimentation paysanne** : Le thème et le protocole sont définis par les praticiens avec un appui technique de la part des chercheurs. Les critères d'évaluation principaux sont ceux définis par les praticiens.

Le choix du type de conduite en EMR dépend des objectifs visés (ex : appropriation d'une innovation, renforcement du dialogue entre chercheurs et praticiens, validation des résultats proposés par la recherche, mise au point d'un référentiel technique, identification des facteurs limitant, etc.).

2.2.3.2. *L'expérimentation avec les agriculteurs : D'une implication consultative à une démarche collaborative d'accompagnement et d'apprentissage*

Avec l'évolution des démarches en recherche depuis les années 1970, l'expérimentation en agronomie a connu de profondes transformations. Alors qu'initialement, les résultats produits par la recherche reposaient principalement sur des essais menés en stations expérimentales, l'importance de tester les prototypes en conditions réelles est apparue essentielle (Pretty, 1995; Probst et al., 1994; Rhoades and Bebbington, 1991; Rhoades and Booth, 1982). En effet, l'approche unilatérale jusqu'alors privilégiée a atteint rapidement ses limites avec le développement de technologies au domaine de validité¹ restreint et donc peu diffusées (Delate and DeWitt, 2004; Hauser et al., 2010; Mubiru et al., 2004). Dans les années 1970, un premier changement apparaît dans les travaux scientifiques, le mouvement « *Farming system approach* » qui commence à impliquer les agriculteurs à titre consultatif afin de mieux appréhender la complexité des exploitations (objectifs et contraintes) par des enquêtes de terrain en particulier (Merrill-Sands and Collion, 1994; Sands, 1986) (Figure 4).

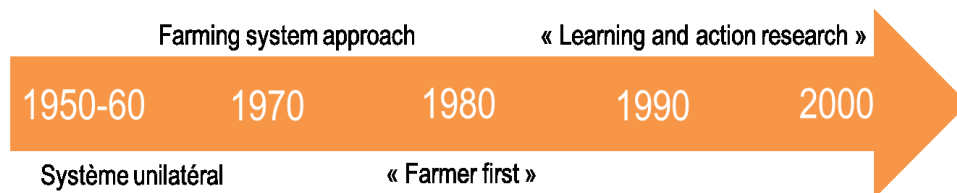


Figure 4 : Schéma des grandes évolutions historiques des démarches méthodologiques en recherche (Chambers and Ghildyal, 1985; Farrington and Martin, 1988a; Scoones and Thompson, 2009).

A partir des années 1980, le mouvement « *Farmer first* » marque un tournant dans les pratiques expérimentales (Chambers, 1994; Chambers and Ghildyal, 1985). Ce mouvement repose sur la mise en place d'essais factoriels scientifiques directement dans les exploitations, afin de compléter ou valider les résultats observés en stations expérimentales et ainsi tenir compte des contraintes locales. Il s'agit alors d'un mode de partenariat entre chercheurs et praticiens consultatif et informatif en intégrant une notion d'accompagnement. De nombreux travaux se sont développés pendant cette

¹ Le domaine de validité fait référence, ici, aux conditions spécifiques dans lesquelles une connaissance ou plusieurs connaissances, actionnées pour appliquer une technique, se vérifient.

période autour du mouvement « *Farmer First* » (Chambers and Ghildyal, 1985; Farrington and Martin, 1988b; Scoones and Thompson, 2009, 1994).

A partir des années 1985-1990, la notion de « *learning and action-research* » se répand progressivement par laquelle les chercheurs impliquent davantage les praticiens dans le processus en tant qu'acteurs actifs (Béguin et al., 2009; Gouttenoire et al., 2014; Probst et al., 1994) (Figure 4). Les objectifs visés par ces « expérimentations avec » les agriculteurs reposent plus sur le développement de leur capacité à innover par eux-mêmes en les inscrivant dans un processus d'apprentissage par de **l'expérimentation conjointe avec la recherche**. Ce type de démarches relève alors plus de méthodes d'expérimentations collaboratives en milieu paysan.

D'après Kolb (1984), l'expérimentation conduite avec les producteurs favorise l'évaluation de techniques dans des contextes locaux, mais aussi l'apprentissage par l'expérience des nouvelles techniques de production. Quelques dispositifs relevant d'une expérimentation en milieu paysan ont été développés dans cet objectif : les « *Farmer Field Schools* » (FFS) (champs-écoles pour les agriculteurs), les « *Participatory learning and action research* » (PLAR), les CIAL (**comité local de recherche agricole**), ou encore la **plateforme d'apprentissage Pachamama Raymi** (Ashby and Braun, 2000; Cabero and van Immerzeel, 2007a; Defoer et al., 2000; Feder et al., 2004).

Les FFS, développées en Indonésie, ont pour objectif d'intégrer les praticiens dans un processus d'apprentissage et de les former à l'expérimentation pour favoriser la production d'innovations locales (Braun et al., 2006; Braun and Duveskog, 2008; David, 2007; Feder et al., 2004; Guo et al., 2015; Okoth et al., 2006; Quizon et al., 2001). L'apprentissage se fait par l'expérimentation collective sur la ou les parcelles de volontaires, sur lesquelles les producteurs se regroupent pour observer, échanger, apprendre, évaluer et décider des opérations culturales à entreprendre, avec l'aide d'un facilitateur possédant déjà les connaissances sur l'objet étudié. Ce type de dispositif permet de valoriser les connaissances des praticiens dans une démarche scientifique et d'innover en cohérence avec le contexte local (Fliert and Braun, 2016, 1999). Les travaux menés montrent que les FFS encouragent les producteurs à mettre en place par la suite les nouvelles techniques dans leur exploitation (Resosudarmo and Yamazaki, 2011; van den Berg and Knols, 2006).

Les PLAR consistent à associer l'approche « *on-farm trial* », dans un objectif d'amélioration de la compréhension du système, avec les FFS, afin de replacer le praticien au cœur de la démarche (Defoer et al., 2000; Mapfumo et al., 2013; Reardon, 1998). Ce sont les praticiens eux-mêmes qui sont à l'origine de la conception et de la gestion de l'expérimentation qu'ils conduisent (Defoer et al., 2000). Ils imaginent collectivement des solutions, puis chacun choisit sa propre solution et l'expérimente chez lui. Ce dispositif encourage la créativité et le développement d'innovations par les praticiens eux-mêmes (Esilaba et al., 2001).

Les **CIAL** combinent les principes des FFS et des PLAR. Les agriculteurs conçoivent eux-mêmes les dispositifs (choix de l'objet des expérimentations) puis mettent en place collectivement des essais factoriels chez des volontaires avec l'aide d'un facilitateur (Ashby and Braun, 2000; Braun et al., 2000; Dalton et al., 2007; Humphries et al., 2015; Torres et al., 2004). La démarche se décompose en 3 phases : (1) l'expérimentation d'une diversité de solutions à titre exploratoire sur de petites surfaces, (2) la sélection des solutions les plus prometteuses pour les remettre en expérimentation sur de plus larges surfaces et (3) la répétition de l'étape précédente (Braun et al., 2000).

Enfin, dans le cas de la **plateforme d'apprentissage Raymi**, les participants mènent chacun leurs propres expérimentations et évaluent celles des autres dans l'optique de gagner un prix si elles sont élues comme étant les plus respectueuses de l'environnement (Cabero and van Immerzeel, 2007a; Hellin, 2013). Cette méthodologie, initiée en 1986, a été utilisée dans de nombreux projets menés au Pérou, en Bolivie, au Chili et au Guatemala. Ce type de démarche a permis d'améliorer l'apprentissage des praticiens, la valorisation de leurs connaissances et leurs capacités à innover et à identifier des solutions adaptées à leur contexte (Cabero and van Immerzeel, 2007a). Les auteurs montrent que l'apprentissage se poursuit au-delà de la fin du projet, puisque certains participants mettent en place de nouveaux essais sur leur ferme et échangent avec d'autres praticiens qui n'avaient pas forcément été impliqués dans le projet initial.

2.2.3.3. *L'agriculteur comme source de créativité et d'innovation*

L'intérêt de collaborer avec les praticiens est aujourd'hui largement reconnu par la communauté scientifique (Delate et al., 2016; Hauser et al., 2010; Probst et al., 1994; Salembier et al., 2016). Les agriculteurs sont des « *expérimentateurs-chercheurs* » dans leurs pratiques quotidiennes et ils sont à l'origine de la génération de nouvelles idées. Les connaissances¹ générées par les agriculteurs leurs permettent d'être force de proposition sur de nouvelles techniques, méthodes ou adaptations plus appropriées au contexte local (Goulet, 2008; Röling, 2009). Les **agriculteurs sont « source d'innovation »** (Hoffmann et al., 2007). Les praticiens innovent par le résultat de différentes méthodes (Lyon, 1996; Rhoades and Bebbington, 1991; Salembier et al., 2016) :

- (1) la conduite continue d'essais sur leur exploitation selon leur propre processus de réflexion (ex : nouvelles espèces, variétés, techniques culturales, etc.) qui les mène à observer et à évaluer les interactions entre les cultures (levée, rendement, qualité, etc.), le sol (teneur en MO des sols, pH, etc.), les adventices, les auxiliaires, les ravageurs et le climat.
- (2) l'observation holistique des pratiques quotidiennes dans l'objectif d'inscrire l'exploitation dans une logique d'amélioration continue.

¹ La définition et la caractérisation des différentes connaissances selon la communauté scientifique sont présentées dans le Chapitre 2 du manuscrit.

- (3) la mise en place d'expérimentations influencées par la communauté scientifique (supports, internet, échanges avec des chercheurs, etc.).

Différents travaux se sont intéressés aux expérimentations conduites par les praticiens (sujets, dispositifs, modes de suivis) (Leitgeb et *al.*, 2014, 2011; Rhoades and Bebbington, 1991; Vogl et *al.*, 2015). D'après Kummer et *al.* (2012), l'expérimentation est une activité courante de la vie quotidienne des praticiens. Ils **essaient, évaluent, génèrent, adaptent et adoptent continuellement** de nouvelles pratiques pour s'adapter au contexte changeant et incertain (ex : changements climatiques, économiques, évolutions de la demande alimentaire, etc.) (Kummer et *al.*, 2012, 2008; Lyon, 1996). Pour répondre à leurs objectifs et contraintes, ils explorent de nouvelles idées et les combinent aux pratiques existantes. Kummer et *al.* (2012); Rhoades and Bebbington (1991) montrent que les motivations des praticiens à expérimenter reposent sur l'amélioration des performances techniques ou économiques, la curiosité associée aux défis de réussir à adopter de nouvelles techniques et la démonstration des bénéfices d'une technique auprès de leurs réseaux professionnels. Les praticiens expérimentent pour vérifier des hypothèses ou encore atteindre des objectifs précis telles que la résolution d'un problème ou l'augmentation des rendements (Catalogna and Navarrete, 2016).

D'après Bentley (2006), les praticiens conduisent et évaluent des expérimentations selon des méthodes qui leurs sont propres, différentes des méthodes scientifiques formalisées. Elles sont adaptées aux contraintes de leur exploitation et aux objectifs qu'ils recherchent. Les expérimentations menées en milieu rural sont conduites sur **de petites surfaces pour limiter la prise de risques** et se caractérisent souvent par une multiplication de petits essais sur des aspects techniques (ex : densité de semis, écartements, variétés, type de fertilisation, etc.) (Kummer et *al.*, 2012; Sumberg and Okali, 1988; Toffolini, 2016)

Le suivi des expérimentations repose sur l'observation des parcelles d'essais pour évaluer les performances et les comparer à d'autres parcelles témoins ou à un référentiel historique des pratiques de l'exploitation (Leitgeb et *al.*, 2014, 2011; Vogl et *al.*, 2015). Des auteurs soulèvent la nécessité d'améliorer la formalisation de ces essais (ex : répétitions, quantifications, etc.) pour une meilleure valorisation scientifique (Wilbois et *al.*, 2004). Cependant, cette formalisation impliquerait des coûts et du temps de travail plus importants, associés à une prise de risques plus élevée (Sumberg and Okali, 1997). De plus en plus d'auteurs reconnaissent que les expérimentations réalisées par les praticiens permettent de générer des connaissances différentes de celles produites par les scientifiques mais indispensables au développement de pratiques durables (Hoffmann et *al.*, 2007; Kummer et *al.*, 2017). Les résultats produits par les agriculteurs seraient source d'inspiration pour les chercheurs et réciproquement, les producteurs s'inspirent des travaux formalisés, sans chercher à mettre en place des dispositifs méthodologiques similaires.

Les essais des praticiens et les observations qui en résultent sont influencés par un ensemble de facteurs externes tels que les conditions environnantes aux essais, la dynamique sociale réalisée (échanges avec des voisins, scientifiques, conseillers, etc.) et les perceptions propres à l'agriculteur (Leitgeb et *al.*, 2014). Pour Kummer et *al.* (2017), les essais conduits en milieu rural par les praticiens aboutissent à 4 résultats : (1) adaptation de nouvelles techniques ou méthodes, (2) innovation locale, (3) invention, (4) échec de l'insertion de la nouvelle idée (non satisfaisant vis-à-vis des objectifs recherchés, conduisant à un abandon et/ou une non adoption). Avant d'adopter des changements à l'échelle de l'exploitation, les expérimentations sont souvent reconduites plusieurs années sur de faibles surfaces afin de mieux appréhender les changements engendrés (Leitgeb et *al.*, 2014).

Plus récemment, plusieurs travaux de doctorats ont cherché à établir des liens étroits entre l'**expérimentation** des praticiens et la **production de connaissances** au sein d'un processus d'**apprentissage** continu (Catalogna, 2018; Chantre, 2011; Cristofari, 2018; Toffolini, 2016). Catalogna (2018) étudie l'activité d'expérimentation des praticiens au niveau de deux notions distinctes : la situation d'expérimentation et l'itinéraire d'expérimentations. Dans le premier cas, la situation d'expérimentation renvoie à des connaissances produites sur un court terme à l'échelle annuelle et dans le second, sur du long terme à l'échelle pluriannuelle. C'est alors, l'ensemble des apprentissages issus de ces itinéraires d'expérimentations qui justifient les acquis des praticiens et leurs adaptations afin d'améliorer la durabilité de leurs pratiques. Chantre (2011) caractérise finement les différents styles d'apprentissage pouvant s'opérer, en retraçant une diversité de trajectoires de changements et d'apprentissages au niveau de plusieurs exploitations. Cristofari, (2018) s'intéresse également au processus d'apprentissage des praticiens dans le cas spécifique de l'évolution des pratiques vers l'AC. L'auteur montre qu'au-delà des bénéfices agro-écologiques, propres à l'adoption de techniques de l'AC, le processus d'apprentissage dans lequel s'inscrivent les praticiens pour intégrer les changements dans leurs pratiques, renforce leurs capacités à piloter leurs systèmes de production et redonne du sens à leur métier. Cette réappropriation du métier d'agriculteur favorise leurs motivations à s'impliquer avec d'autres acteurs dans la recherche de techniques culturelles durables qui répondent à leurs attentes. Toffolini (2016) étudie plus spécifiquement les dynamiques de mobilisation et de construction des connaissances chez les agriculteurs afin de comprendre comment ils se les approprient dans leur contexte pour adapter et faire évoluer leurs pratiques. L'ensemble de ces travaux met en avant les connaissances produites par les praticiens comme des produits au service de l'amélioration des systèmes de production actuels conciliant productivité, intégrité des écosystèmes et de la santé humaine. Ces études permettent de repositionner l'agriculteur au cœur des processus de recherche, permettant de faire évoluer les pratiques productives vers des pratiques agro-écologiques davantage constructives et multi-disciplinaires (Cristofari, 2018)

Dans le cas du développement de techniques innovantes, la littérature met en avant l'enjeu de mettre en place des essais directement dans les exploitations agricoles pour valoriser les connaissances empiriques et prendre en compte les contraintes locales. Une diversité de méthodes d'expérimentations en milieu rural existe, allant d'essais simplement conçus par les scientifiques puis testés chez les praticiens aux essais conçus par les praticiens eux-mêmes et testés individuellement ou collectivement dans leur contexte.

Dans le cadre du SDSC sans herbicide, où peu de connaissances sont disponibles, il est important que la démarche s'appuie sur une participation conjointe équilibrée des praticiens et des chercheurs au cours du processus de conception (état des lieux et exploration de connaissances, conception, expérimentation, évaluation). En particulier, la flexibilité et le caractère itératif d'une démarche sont favorables à la valorisation des connaissances des praticiens. Pour conserver la richesse de leurs connaissances, ils ne doivent pas nécessairement être formés à une méthodologie d'expérimentation académique mais s'attacher à leurs propres modes de raisonnement et de protocoles opératoires.

3. Elaboration des hypothèses de recherche

L'objectif général de cette thèse est de **concevoir, expérimenter et évaluer avec les praticiens du semis direct sous couvert végétal sans herbicide pour produire de nouvelles connaissances qui améliorent les performances (agronomiques, économiques, environnementales et organisationnelles) de la technique et sa diffusion.**

L'état de l'art mené autour de l'innovation, de la conception et des RPP, montre que la notion de connaissances est indissociable de ces termes avec des processus de coproduction des connaissances entre les participants pour répondre à des problèmes. Dans la littérature, les processus de conception amènent à s'interroger sur les connaissances existantes autour de l'objet visé (Audoux and Gillet, 2011; Gillet and Tremblay, 2017). Nous avons vu dans le chapitre 1 que la technique du SDSC est peu étudiée en recherche comparativement aux autres techniques de travail du sol. D'après des enquêtes menées auprès des praticiens européens pratiquant l'AC en AB, le SDSC est également peu présent dans les pratiques (Mäder and Berner, 2012; Peigné et al., 2016). Toutefois, ces enquêtes montrent un réel intérêt de la part des agriculteurs pour améliorer la fertilité du sol, limiter le temps de travail, réduire la mécanisation ou par défi technique (Casagrande et al., 2015). Goulet (2008); Landel (2015) montrent également que quelques groupes d'agriculteurs tentent de réaliser des expérimentations en SDSC sans herbicide, mais le faible soutien et accompagnement les freinent à poursuivre ces essais. Ainsi, nous posons l'hypothèse que les agriculteurs expérimentent aussi la technique de leur côté et produisent des connaissances empiriques sur ce sujet. Cependant, il existe peu d'études ayant permis de les valoriser et de les diffuser. Nous formulons donc l'hypothèse suivante :

Hypothèse 1 (H1) : Il existe des connaissances scientifiques et empiriques sur la technique mais celles-ci sont de natures différentes et insuffisantes à elles seules. Combiner ces deux formes de connaissances constitue un levier pour faciliter la mise en pratique.

L'hypothèse est étudiée dans le chapitre 3 dans lequel nous nous interrogeons sur (1) les types et les contenus des connaissances existantes sur le SDSC sans herbicide, (2) l'origine de ces connaissances ainsi que (3) les complémentarités et les contrastes présents entre les différentes connaissances.

Si l'hypothèse 1 est vérifiée, les praticiens et les chercheurs possèdent quelques connaissances sur le sujet, mais aussi des compétences et des logiques de raisonnement différentes qui peuvent se compléter (Hoffmann et al., 2007; Vall et al., 2010). En travaillant ensemble, ces acteurs pourraient atteindre de meilleurs résultats en répondant à leurs problèmes respectifs et ainsi enclencher le processus d'extension des connaissances (Akpo et al., 2015; Audoux and Gillet, 2011; Berthet et al., 2016; Giacomoni and Jardat, 2014; Gonzalez-Laporte, 2014). En alliant l'action et la pensée, chercheurs et praticiens pourraient répondre aux problématiques qu'ils se posent respectivement en travaillant seuls tout en permettant :

(1) la production de connaissances mobilisables pour concevoir des innovations pertinentes avec les réalités du terrain.

(2) la réussite de la mise en place de la technique tout en limitant la prise de risques des praticiens.

Afin de répondre à l'objectif de la thèse, nous formulons les hypothèses 2 et 3 suivantes :

Hypothèse 2 : Un processus de recherche conjoint entre praticiens et chercheurs de la conception à l'évaluation permet d'identifier des combinaisons techniques innovantes multi-performantes

Pour répondre à cette hypothèse, le chapitre 4 se centre sur (1) les types de techniques innovantes qui sont produits à partir d'un processus de recherche conjoint entre praticiens et chercheurs, (2) les performances de ces essais sur le plan agronomique, économique, organisationnel et environnemental, et (3) les complémentarités apportées par l'évaluation conjointe entre les chercheurs et les praticiens.

Hypothèse 3 : Un processus de recherche conjoint entre praticiens et chercheurs constitue une démarche efficace qui améliore la combinaison des connaissances pour en produire de nouvelles et promouvoir le SDSC sans herbicide.

Cette hypothèse est étudiée dans le chapitre 5 où plusieurs sous-questions ont été posées : (1) Quelle production de connaissances au cours du processus ? ; (2) Quel enrôlement des acteurs ? ; (3) Quelles créativité et capacités à innover ? et (4) Quels apprentissages ?

4. Cadre méthodologique général de la thèse

Cette partie apporte une description générale des principaux choix méthodologiques privilégiés pour vérifier les hypothèses. Le schéma présenté sur la Figure 5, résume les étapes de la démarche ainsi que les principaux outils mobilisés. Le protocole détaillé mis en place pour vérifier nos hypothèses sera, quant à lui, explicité au sein de chaque chapitre correspondant à ces hypothèses (Figure 5).

4.1. Recherche des connaissances existantes autour du semis direct sous couvert végétal sans herbicide

Pour répondre à l'objectif, la première étape a été de s'interroger sur les connaissances existantes sur le SDSC sans herbicide afin de servir de support de base à la construction de notre processus de recherche conjoint. Deux méthodes différentes ont été mises en place pour répondre à cette question : (1) une étude bibliographique et (2) une enquête en ligne auprès des producteurs (Figure 5).

L'étude bibliographique a permis de capitaliser les connaissances scientifiques produites à l'échelle internationale. Ce travail a donné lieu à la publication d'une revue bibliographique intitulée « *Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production. A review* » publiée en 2019 dans *Agronomy for Sustainable Development*. Celle-ci est présentée dans le chapitre 3.

Nous avons aussi mis en place une méthode de recherche des connaissances produites par les praticiens. Les praticiens produisent des connaissances différentes de celles des scientifiques et leurs complémentarités permet de développer des pratiques durables (Hoffmann et al., 2007; Leitgeb et al., 2011; Lyon, 1996; Rhoades and Bebbington, 1991). C'est dans cet objectif que nous avons mis en place une enquête en ligne auprès de praticiens pour capitaliser leurs connaissances. Par ailleurs, nous avons vu au travers d'enquêtes européennes que les praticiens devaient faire face à des enjeux importants vis-à-vis de leur contexte pour pouvoir envisager la technique du SD (Vincent-Caboud et al., 2017). Nous avons donc centré notre enquête sur l'échelle nationale pour mieux prendre en compte les contraintes spécifiques à l'agriculture française (ex : climat, machinisme, débouchés, etc.).

4.2. Mise en place d'une démarche de recherche – action collaborative

4.2.1. Conduite d'un processus de recherche conjoint : définition de la démarche

Nous avons vu que le caractère particulièrement novateur de la technique du SDSC sans herbicide, c'est-à-dire sans travail du sol ni herbicide, freine son avancée en matière de recherche et de pratique dans les exploitations agricoles (Vincent-Caboud et al., 2017).

D'après la littérature, impliquer les praticiens dans les processus de recherche, permet de créer une complémentarité des connaissances pour en produire de nouvelles, en créant « un effet synergique » (Hoffmann et al., 2007; Probst et al., 1994; Vogl et al., 2015). Nous avons posé comme première

hypothèse qu'il existe quelques connaissances sur la technique, aussi bien dans la communauté scientifique que dans celle des praticiens mais que celles-ci ne permettent pas encore d'insérer la technique dans les pratiques. Si l'hypothèse 1 est vérifiée, la mise en place d'un processus entre les praticiens et les chercheurs pourrait améliorer la combinaison des connaissances existantes entre elles, pour en produire de nouvelles qui répondent aux enjeux du SDSC et des acteurs.

Ainsi, nous avons mis en place une démarche de type **recherche – action collaborative** au cours de laquelle, chercheurs et praticiens ont un rôle actif majeur. Ces acteurs, travaillent ensemble mais sans confondre leur identité. En d'autres termes, chacun conserve son rôle, sa méthode de suivi et d'évaluation des essais. Les praticiens et les chercheurs conçoivent ensemble des techniques, suivent et échangent autour du même dispositif d'essai, mais chacun conduit parallèlement sa propre observation avant de la partager. L'objectif n'est donc pas de former les praticiens à une démarche expérimentale formalisée, mais de mettre en place un processus issu d'un compromis entre les acteurs et suffisamment flexible pour leur permettre de le modifier. En effet, dans la littérature les travaux montrent que les praticiens, lorsqu'ils expérimentent, ont tendance à mettre en place une multitude de petits essais selon l'avancée de leurs réflexions et de leurs observations sur l'essai en cours (Rhoades and Bebbington, 1991; Toffolini, 2016). Pour mettre en avant ce concept, « *travailler ensemble mais poursuivre chacun sa méthode et ses objectifs propres* », nous utiliserons dans le manuscrit le terme de « *recherche conjointe* » entre les praticiens et les chercheurs qui qualifiera notre démarche de RAC.

En effet, la notion de « recherche conjointe » renvoie à un processus de co-construction d'un dispositif autour duquel, des acteurs confrontent leurs analyses et leurs points de vue pour atteindre leurs objectifs respectifs. C'est dans ce cadre d'analyse précis que notre démarche s'inscrit, afin de valoriser et combiner les connaissances à la fois des praticiens et des chercheurs via une conception, une mise en action, un suivi et une évaluation conjointe de combinaisons techniques.

4.2.2. Choix des acteurs et de leurs degrés d'implication

Le noyau actif de la démarche repose sur le partenariat praticien – chercheur. Les praticiens de ce partenariat, c'est-à-dire avec qui et chez qui des essais ont été construits, sont nommés dans ce manuscrit « agriculteurs-expérimentateurs » ou AE.

La recherche de praticiens volontaires pour s'impliquer dans notre démarche, a été réalisée à partir d'une enquête, menée en Rhône-Alpes en 2015-2016. Cette enquête a été effectuée par téléphone et par la rencontre sur l'exploitation de praticiens pour établir un état des lieux de leur perception vis-à-vis du SDSC sans herbicide, dans le contexte local et pour identifier de potentiels producteurs intéressés pour mener des essais en partenariat (Travail engagé préalablement à la thèse) (Vincent-Caboud, 2015, 2016). Par la suite, l'objectif de la mise en place d'une dynamique collective d'échanges et de communications au sein même de la démarche vise à faciliter le repérage d'AE.

La sélection des AE a été définie selon plusieurs critères :

- intérêt marqué pour le SDSC sans herbicide : Le praticien partage avec la recherche les objectifs suivants : (1) utiliser un couvert végétal, (2) semer la culture sans aucun travail du sol, et (3) ne pas utiliser d'herbicide,
- en accord avec le principe de mettre à disposition une parcelle de son exploitation pour mener chez lui un essai,
- prêt à s'impliquer dans le projet pendant 1 an (temps de travail, d'échanges, de moyens matériels, d'implications dans des rencontres avec d'autres acteurs),
- solutions disponibles à proximité vis-à-vis du matériel : semoir SD, rouleau (prêt et capacité à se déplacer pour la logistique du matériel d'une exploitation à l'autre).

Chaque partenariat 'praticien-chercheur' a conçu, expérimenté et évalué des combinaisons techniques qui seront développées et discutées dans le chapitre 4 (Figure 5).

D'autres acteurs locaux (conseillers, techniciens, machinistes, agriculteurs, chercheurs) ont aussi été impliqués lors d'une seule étape du processus : l'évaluation (Figure 5). Des temps d'échanges, autour des essais ont été organisés pour inscrire les partenaires 'praticien-chercheur' dans une dynamique d'apprentissage social. Des acteurs locaux sont impliqués à cette étape à titre consultatif. Cette dynamique collective a une double finalité puisqu'elle a aussi pour objectif de faciliter l'identification de producteurs volontaires pour s'inscrire dans notre processus de recherche conjoint.

4.2.3. Efficacité de la démarche

Outre l'évaluation des performances de techniques produites à l'issue d'une démarche, ou le taux d'adoption par les praticiens, nous avons retenu 4 critères supplémentaires dans la littérature pour évaluer l'efficacité de notre démarche : la production de connaissances, la créativité et la capacité à innover, l'enrôlement des praticiens et l'apprentissage des acteurs (Figure 5). Ces critères d'évaluation sont présentés plus en détail dans le chapitre 5. Pour évaluer ces critères nous avons suivi au cours de la démarche, les échanges réalisés au sein des partenariats 'praticien-chercheur' et lors des rencontres collectives. Le protocole de ces suivis est présenté dans le chapitre 5 (Figure 5).

L'application de la technique n'a pas été évaluée selon le nombre d'adoptions mais elle sera discutée en fonction des initiatives d'essais encouragées par la démarche et l'évolution des points de vue des acteurs. En effet, dans le cadre de la thèse, l'évaluation de la mise en pratique d'une technique en rupture aux pratiques traditionnelles paraît peu pertinente au vu du faible nombre de connaissances disponibles et de l'importance des changements qui nécessiterait une échelle de temps plus longue. Si l'hypothèse 1 est vérifiée, les quelques connaissances existantes sur le SDSC sans herbicide ne permettraient pas encore une mise en pratique sur de plus larges échelles. Il serait alors prématuré d'évaluer la qualité d'adoption de la technique par les praticiens.

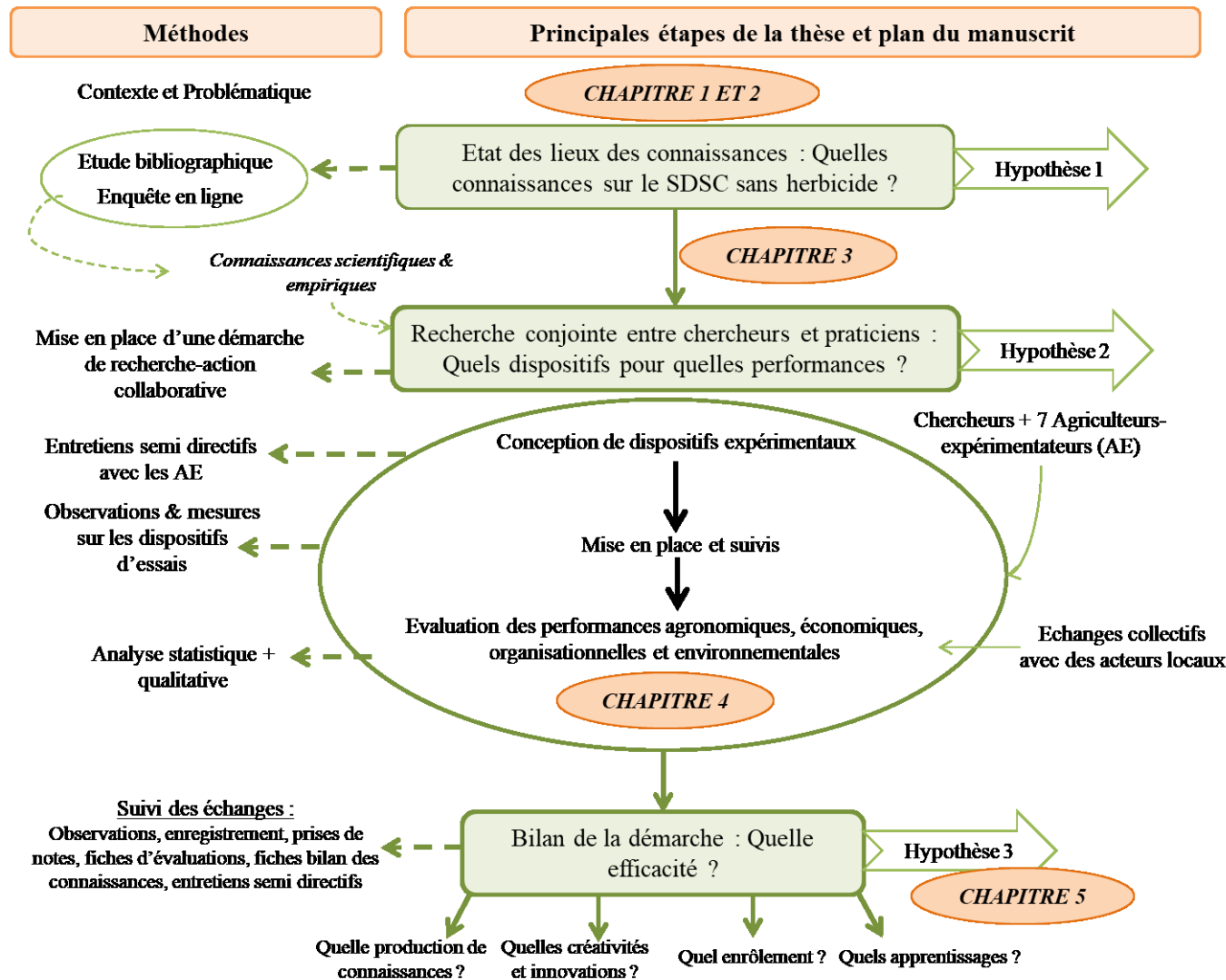


Figure 5: Schéma de la démarche générale de la thèse.

Chapitre 3

Etat des lieux des connaissances

Chapitre 3 : Etat des lieux des connaissances

1 Contexte général

Ce chapitre correspond à l'hypothèse 1 stipulant qu'il **existe des connaissances scientifiques et empiriques sur la technique, de natures différentes et insuffisantes à elles seules. Combiner ces deux formes de connaissances constituerait un levier pour faciliter la mise en pratique.** Les processus de recherche basés sur des méthodes de co-conception sont intimement liés à la notion de connaissances qui sont différentes selon les acteurs (Audoux and Gillet, 2011; Gillet and Tremblay, 2017). Afin de développer des modes de pratiques intégrant des techniques aussi innovantes que le SDSC sans herbicide, il convient d'abord de réaliser un état des lieux des connaissances existantes, afin d'orienter notre démarche en mobilisant ces connaissances comme base de construction.

1.1 Etat de l'art sur les connaissances scientifiques et empiriques

Les recherches partenariales participatives (RPP) permettent de combiner différents types de connaissances, celles provenant de la recherche et celles produites par les praticiens. Dans la littérature, une diversité de termes est utilisée pour définir ces formes de connaissances (ex : *théoriques et pratiques, scientifiques et empiriques, formelles et informelles, explicites et tacites*, etc.).

1.1.1 Notion de connaissances

Dans le domaine didactique, « *une connaissance est ce qui réalise l'équilibre entre un sujet et le milieu* » dans une situation sur laquelle il investit (Margolinas, 2014). Il s'agit d'un concept comprenant des connaissances mémorisées, de l'action ou de l'interaction (Laparra and Margolinas, 2010). Une **connaissance vit dans une situation**, elle est en lien avec un contexte et dépend d'un individu (Figure 6). Les connaissances sont matérialisées par des informations qui sont synthétisées et systématisées. D'après Brousseau (2011), « *elles n'existent et n'ont de sens chez un sujet que parce qu'elles représentent une solution optimale dans un système de contraintes* ». La production de connaissances est un **processus dynamique qui évolue** (Brousseau, 2011; Margolinas, 2004). Ce qui est valable à un temps « t » ne le sera pas à « t+1 ».

La notion de connaissances se distingue d'un savoir faisant référence à une construction sociale et culturelle qui vit dans une institution (Douglas, 2004; Margolinas, 2012). Le savoir est dépersonnalisé, décontextualisé et dé-temporalisé. Pour Douglas (2004), « *si un savoir existe c'est qu'il a été rencontré comme une connaissance en situation puis reconnu comme utile, formulé, formalisé, validé, mémorisé et qu'il a acquis un statut institutionnel* » (Figure 6). Pour retrouver les connaissances et les situations qui donnent sens, il faut déconstruire des savoirs (processus de dévolution) (Figure 6).

Pour conclure, un savoir est générique et composé de différentes connaissances spécialisées et formalisées, le plus souvent scientifiques. Pour faire référence aux connaissances en situation produites par les praticiens, Jaime *et al.* (2004) distinguent le savoir de la notion de savoir-faire qui fait référence à la somme de connaissances dites « locales » c'est-à-dire produites par la pratique et le plus souvent transmises oralement (Figure 6).

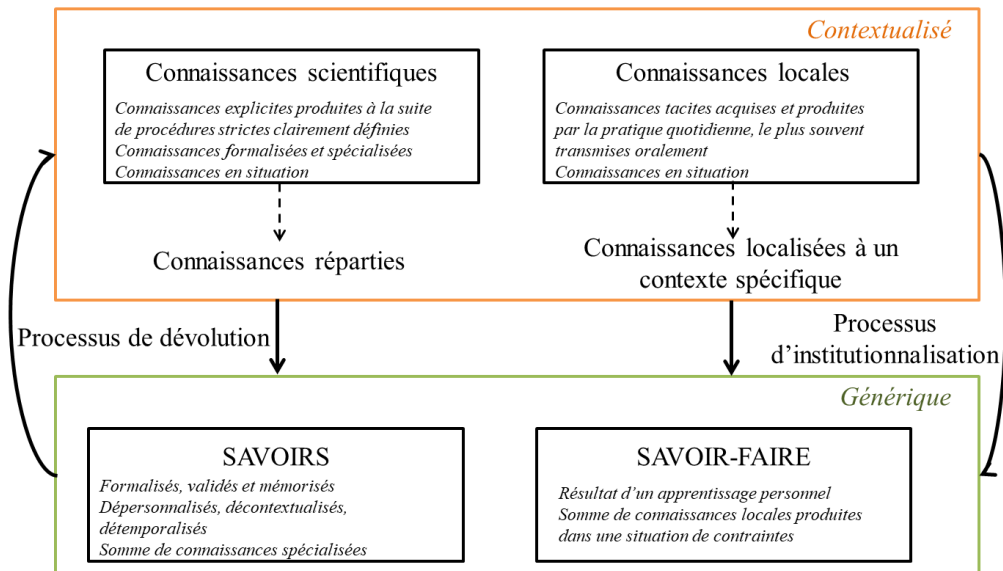


Figure 6 : Représentation schématique de la distinction entre connaissances et savoirs

Dans le cadre de cette thèse, nous nous focalisons sur les connaissances « en situation » puisque si l'hypothèse H1 est vérifiée, il existe peu de connaissances pour discuter de connaissances formalisées et validées universellement. Afin de comprendre plus finement les distinctions des différentes formes de connaissances, il faut s'interroger sur la manière dont celles-ci sont produites.

1.1.2 Les différentes catégories de connaissances

En agriculture, les chercheurs définissent une connaissance comme « *une combinaison d'expériences, de valeurs, de formations, d'échanges et d'idées qui apporte un cadre pour évaluer et intégrer de nouvelles expériences et informations* » (Grossman, 2003; Moschitz and Home, 2012). Différentes formes de connaissances, interagissant entre elles, peuvent être impliquées dans une RPP.

Raymond *et al.* (2010) reportent une diversité de définitions et de termes rencontrés dans la littérature relatifs aux types de connaissances qui conduisent rapidement à des confusions sur leur classification. Les auteurs identifient néanmoins trois grandes catégories :

- **Les connaissances localisées/empiriques :** Différentes connaissances empiriques existent selon la méthode par laquelle elles sont produites. Elles sont issues de la « *recherche informelle* » et s'appuient sur l'expérience des acteurs. Les praticiens accordent du temps à l'observation car ils vivent sur l'exploitation et acquièrent des connaissances qu'il est difficile d'acquérir pour le chercheur

(Hoffmann et *al.*, 2007; Lyon, 1996). Ces connaissances sont primordiales dans le développement de nouvelles technologies (Delate et *al.*, 2016; Hauser et *al.*, 2010). Cependant, d'après Humphries et *al.* (2015), l'échelle de temps est une contrainte pour leurs valorisations car leur processus d'intégration en recherche est long pour qu'elles soient reconnues. Par ailleurs, ces connaissances peuvent reposer sur des pratiques transmises de génération en génération ou sur un objectif opérationnel à court terme qui ne conduit pas toujours à des solutions durables. Par exemple, le labour est efficace pour détruire les adventices et réchauffer le sol avant un semis. A l'inverse, sur le long terme, cette technique dégrade la vie du sol et enfouie les graines des adventices dans le sol. Celles-ci restent viables et émergeront lorsque les prochains labours les ramèneront au niveau de la surface du sol.

- **Les connaissances scientifiques :** Ces connaissances sont issues de méthodologies formalisées, codifiées et sont universellement acceptées et accessibles dans la communauté scientifique (Raymond et *al.*, 2010). En revanche, cette définition est parfois remise en cause car ces connaissances sont à l'origine d'une confrontation d'un ensemble de connaissances, d'expériences et d'opinions personnelles du scientifique qui oriente l'interprétation des connaissances qu'il reporte dans la littérature (Raymond et *al.*, 2010). Ces connaissances ne sont pas toujours facilement accessibles aux agriculteurs et rencontrent parfois des limites quant à leur validité dans des contextes locaux (ex : aléas climatiques, crises économiques, etc.) (Berthet et *al.*, 2016).

- **Les connaissances hybridées :** Les deux formes de connaissances précédentes sont souvent en opposition et ne répondent pas toujours aux besoins des acteurs (Bentley, 1994; Lyon, 1996; Scoones and Thompson, 2009; Soullignac et *al.*, 2011). Ainsi, une nouvelle forme de connaissances a émergé suite à un processus qualifié « *d'hybridation* » entre les connaissances scientifiques et empiriques (Raymond et *al.*, 2010). Ces connaissances permettent de rendre les pratiques locales plus pertinentes et durables mais elles posent des questions quant aux outils disponibles pour les combiner afin d'en générer de nouvelles, reconnues en recherche (Scoones and Thompson, 2009; Vall et *al.*, 2016). En particulier, l'externalisation des savoirs locaux, c'est-à-dire le processus permettant de convertir ces savoirs en connaissances scientifiques, est long et coûteux (Hoffmann et *al.*, 2007).

Nous venons de discuter de deux principales familles de connaissances : scientifiques et empiriques. Dans la suite de ce chapitre, nous nous intéressons à ces connaissances dans le cas précis du SDSC sans herbicide. Nous avons conscience que la distinction entre ces deux familles de connaissances n'est dans la pratique pas aussi marquée puisqu'il existe toujours une certaine forme d'« *hybridation* » de connaissances lorsque des acteurs échangent ou se documentent. Les connaissances s'alimentent naturellement entre elles dans la mesure où les agriculteurs s'inspirent de travaux scientifiques dans leurs pratiques et à l'inverse, les chercheurs s'inspirent des pratiques des agriculteurs pour orienter leurs questions de recherche (Hoffmann et *al.*, 2007; Kummer et *al.*, 2017).

2 Les connaissances scientifiques existantes

2.1 Etude bibliographique

Les connaissances scientifiques ont été analysées à partir d'une étude bibliographique des travaux internationaux. L'objet de cette recherche a été centré sur la thématique du SDSC sans herbicide à partir de divers mots-clés (cover crops, organic no tillage, roller-crimper, cover crop-based no tillage, without herbicide, direct seeding, rolled cover crop, mowed cover crop, mulch-based production, no tillage herbicide free, cover crop-based organic rotational no-till, cover crop termination, conservation tillage, soybean, maize, wheat, cover crop mulch, weed suppression, residue decomposition).

Une soixantaine de publications a pu être identifiée dont la majorité a été menée en AB. La sélection des publications a reposé sur deux critères combinés :

- L'absence d'herbicide pendant toute la conduite culturale (du semis du couvert à la récolte).
- L'absence de travail du sol pour l'implantation de la culture (pas d'incorporation du couvert végétal dans le sol avant le semis).

Pour discuter du domaine de validité des connaissances, un travail descriptif et d'analyse thématique des études a été réalisé permettant de comprendre le contexte dans lequel ces connaissances ont été produites. Ce travail s'est construit à partir de l'élaboration (1) d'une grille descriptive (facteurs étudiés, sol, localisation, années, couverts et cultures concernées, échelle de l'étude, paramètres mesurés) et (2) d'une grille d'analyse reposant sur plusieurs thématiques identifiées dans les références : couvert, machinisme, adventices, ravageurs, disponibilité de l'azote, sol, culture, rendement, rotation culturale et dimension socio-économique (Annexes 1 et 2).

2.2 Contexte

2.2.1 Etat des lieux des travaux menés en recherche

Au total, 65 publications ont été identifiées sur la technique du SDSC sans herbicide (Annexe 1). Cette **thématique de recherche est récente** puisque les premiers travaux publiés apparaissent dans les années 2000 (Figure 7). De ce fait, **peu de références** sont disponibles bien qu'une accélération soit observée à partir de 2010. Les années 2007/2008 ont été marquées par de nombreux débats internationaux sur l'environnement et le changement climatique conduisant à repenser les modes de production agricoles (conférence de l'ONU sur le climat à Bali, Conférence de Poznan, débats sur les OGM, débats sur l'érosion des sols, rapport de la FAO sur « *la situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture*¹ »). En 2015, de vifs débats débutent aussi autour du glyphosate et ceux-ci ont

¹ Ce rapport ouvre le débat sur la contribution des praticiens aux services de la protection de l'environnement et sur la nécessité de rechercher des alternatives en réponse aux enjeux de production, de l'intégrité des écosystèmes et de la santé.

encouragé le montage de projets de recherche axés sur du SDSC en AB, avec le développement de nouvelles connaissances observées à partir de 2009/2010 puis en 2015/2016.

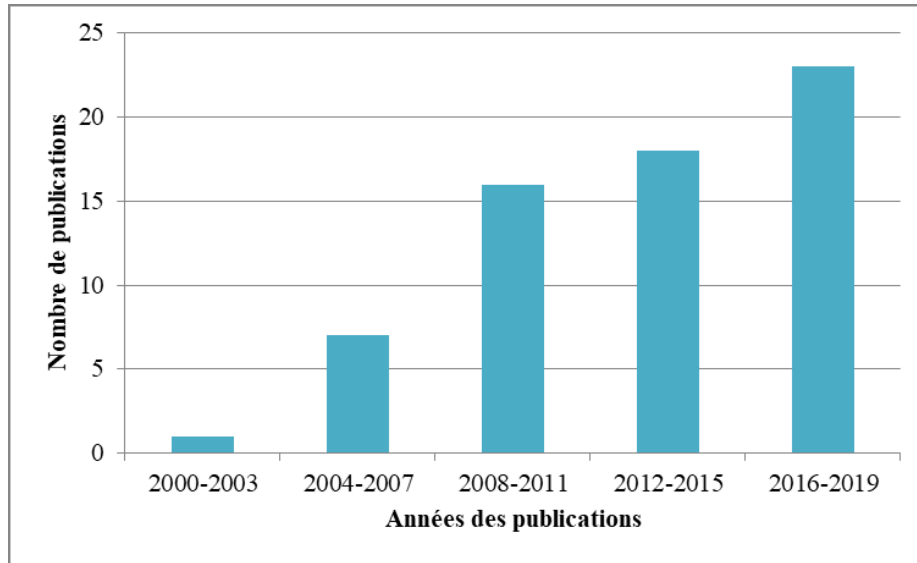


Figure 7: Evolution du nombre de publications depuis les années 2000

Les études identifiées, proviennent majoritairement d'Amérique du Nord et reposent sur la combinaison de SD et de couverts végétaux roulés, fauchés ou broyés et laissés en surface (Figure 8). Quelques références européennes sont apparues récemment en France, en Allemagne ou en Italie mais le nombre de publications reste faible (Figure 8). Les travaux européens conduits sans herbicide sont plus axés sur la réduction du travail (travail du sol sur 5 à 10 cm) et non sur une suppression totale telle que le SD (Vincent-Caboud et *al.*, 2017). Enfin, bien que l'Amérique du Sud soit connue comme un pionnier du SD, en particulier le Brésil, les publications sur du SDSC reposent sur l'utilisation intégrale d'herbicides et ne correspondent pas aux critères de notre étude.

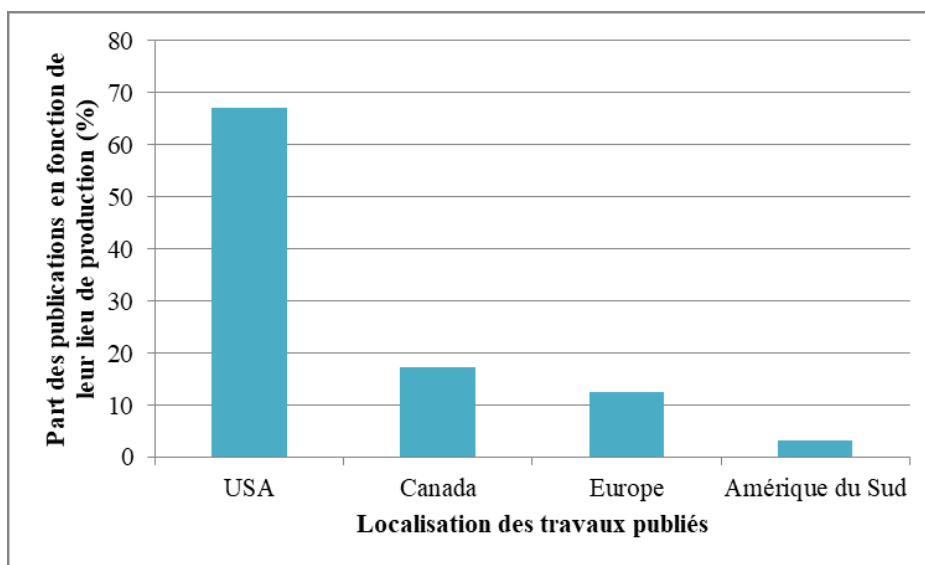


Figure 8: Localisation des travaux scientifiques identifiés pour l'analyse des connaissances

Les cultures de printemps sont les plus étudiées. L'analyse montre que 44 % des études portent sur la culture de soja et 33 % sur le maïs. Quelques rares travaux s'intéressent au blé d'hiver mobilisant des ITK de SD sous couvert vivant de légumineuses (Bilalis *et al.*, 2011; Hiltbrunner *et al.*, 2005; Hiltbrunner *et al.*, 2007; Hiltbrunner *et al.*, 2007). Cependant, ces études ne sont pas centrées sur la technique du SD mais reposent sur la comparaison de plusieurs techniques de travail du sol (le plus souvent : SD / travail du sol sur 5-10 cm / travail du sol traditionnel sur 30 cm de profondeur), limitant la dynamique de production de connaissances spécifiques sur le SD.

Les connaissances scientifiques sont à 45 % produites sur des sols limoneux fins en particulier pour les études conduites aux USA (Figure 9). Les travaux canadiens et européens ont été menés sur des sols limono-sableux ou sablo-limoneux, conduisant souvent à une compétition hydrique entre le couvert végétal et la culture lors de périodes sèches. Cette **faible diversité de contexte** pédologique limite la généralité des connaissances qui sont difficilement transposables (régions arides, régions tempérées, régions tropicales humides, etc.).

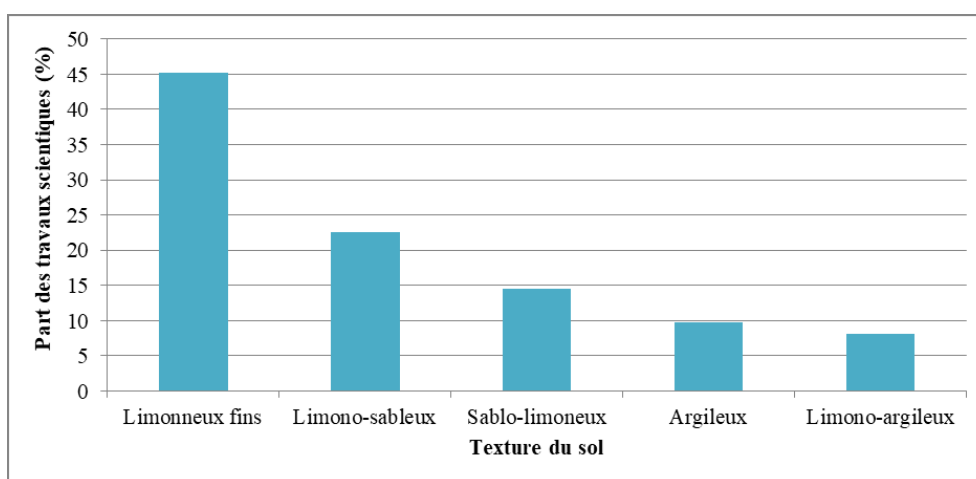


Figure 9: Contexte pédologique des connaissances scientifiques produites

2.2.2 Thématiques des connaissances scientifiques

Onze thématiques ont été identifiées parmi les connaissances existantes (Figure 10). La majorité de ces connaissances repose sur la relation « gestion du couvert – maîtrise des adventices – rendement de la culture de rente ». La thématique « **gestion du couvert** » fait référence à la fois à l'implantation du couvert et à sa maîtrise sans herbicide. Les connaissances s'appuient sur la comparaison de différents couverts, leurs performances en termes de production de biomasse pour maîtriser les adventices et leur capacité à être contrôlées afin de limiter la compétition avec la culture.

La Figure 10 montre que les connaissances relatives au semis de la culture de rente, au choix du matériel, au sol ou à la gestion de l'azote et des ravageurs sont très faibles. Ces dernières années, le nombre de travaux orientés sur le mécanisme pour maîtriser le couvert, semer en direct la culture ou développer des solutions de rattrapage (ex : « *high-residue cultivator* ») tend à augmenter.

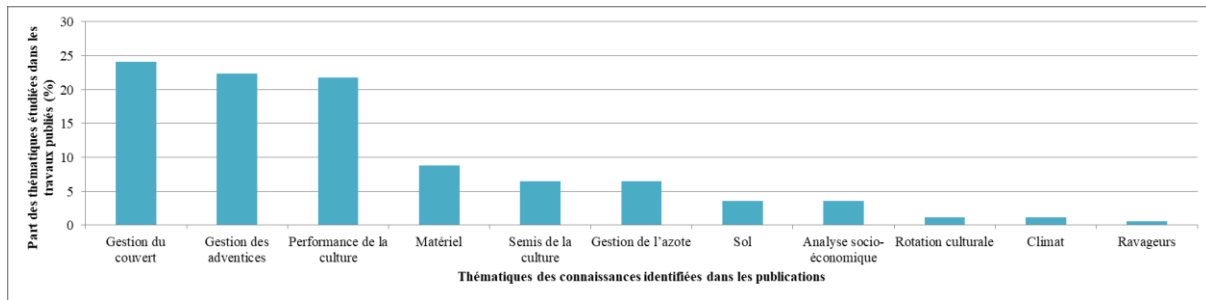


Figure 10: Thématiques principales des connaissances produites par les travaux scientifiques publiés (n=65)

Plus de 86 % des publications étudient les performances de la technique **sur l'année** alors qu'une minorité (14 %) cible la rotation. Depuis 3 ans, des travaux commencent néanmoins à se développer à l'échelle de la rotation et portent sur la présence de travail du sol stratégique dans la rotation (ex : avant de semer le couvert, en présence d'adventices pérennes, etc.) (Clark et al., 2007; Halde et al., 2015; Keene et al., 2017; Moyer, 2011; Wallace et al., 2017).

Les connaissances scientifiques, principalement produites sur des cultures de printemps, sont cumulées dans des contextes de production spécifiques (types de cultures, lieux et types de sols), limitant leur domaine de validité. Le faible nombre de publications relevé traduit de réelles difficultés de mise en œuvre de cette technique en rupture avec les pratiques traditionnelles : suppression combinée du travail du sol et des herbicides. Les travaux publiés sont récents (à partir des années 2000) ce qui explique le manque de références à l'échelle pluriannuelle sur la construction de rotations intégrant cette technique.

2.3 Synthèse bibliographique : quelles sont les connaissances scientifiques ?

Cette partie vise à présenter le contenu des connaissances scientifiques existantes sur la technique. Elle correspond à une revue bibliographique publiée dans le journal *Agronomy for Sustainable development* qui s'intitule : « *Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production. A review* ». Au regard d'une majorité de publications produites en AB sur le SDSC sans herbicide, ce papier est orienté en AB mais intègre en discussion les références produites en agriculture conventionnelle qui s'inscrivent dans un mode de production sans herbicide.

Les objectifs de la revue bibliographique sont :

- d'établir un état des lieux des travaux internationaux,
- d'identifier les principaux facteurs qui interviennent sur la réussite de la technique,
- de définir les axes prioritaires de la recherche pour développer des connaissances pertinentes avec les enjeux soulevés.

Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production. A review

Laura VINCENT-CABOUD^{1*}, Marion CASAGRANDE^{2,3}, Christophe DAVID¹, Matthew R. RYAN⁴, Erin M. SILVA⁵, Joséphine PEIGNE¹

¹ISARA, Department of Agroecology and Environment, 23 rue Jean Baldassini, 69364 Lyon, France

²ITAB, Quartier Marcellas, 26800 Etoile sur Rhône, France

³Ecodéveloppement, INRA, 84000, Avignon, France

⁴School of Integrative Plant Science, Cornell University, Ithaca, NY 14853, USA

⁵Department of Agronomy, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, USA

*Corresponding Author: e-mail: lavincent-caboud@isara.fr

Abstract: Sustainable cropping systems that balance agricultural productivity and ecological integrity are urgently needed. Overreliance on soil tillage and herbicides to manage weeds has resulted in a number of major environmental problems including soil erosion and degradation, biodiversity loss, and water quality impairment. Combining organic farming and conservation agriculture is a viable alternative to address these challenges. In particular, mulch-based no tillage systems can be used to reduce tillage in organic production, improving soil quality while decreasing labor and fuel requirements. This technique involves planting cash crops directly into terminated cover crops that remain on soil surface and serve as mulch to prevent weeds establishment and protect soil from erosion. Despite potential benefits, adoption of organic mulch-based no tillage is limited due to challenges with cover crop termination, weed suppression, and yields. Here we (i) review international research on organic mulch-based no tillage systems (soybean and maize), (ii) identify production issues that limit the success of this technique and (iii) outline research priorities. As result, organic mulch-based no tillage is knowledge intensive and requires advanced planning and careful management of the cover crop. Primary challenges include timely cover crop establishment and termination, nutrient management, reduced soil temperature and moisture at planting, and achieving adequate seed-to-soil contact when planting into thick mulch on soil surface. Long-term research is needed to better understand the effects of this technique production on soil health and on the broader environmental and economic impacts. To increase adoption of organic mulch-based no tillage, future research should focus on (i) screening species and cultivars to identify cover crop and crop combinations that optimize cropping system performance and (ii) developing equipment for improving cover crop termination and seed placement. Research conducted in partnership with farmers will be valuable for developing guidelines and increasing adoption of this technique.

Keywords: direct seeding, organic farming, residue, roller-crimper, weed management

Content:

1. Introduction
2. Scope of international research on mulch no tillage in organic farming
3. How can cover crop and cash crop management optimize organic mulch-based no tillage success?
4. Research agenda for the future
5. Conclusion

1. Introduction

Faced with the challenge of feeding a growing population, the need to develop sustainable agricultural systems that increase productivity and maintain ecological integrity is increasingly imperative. Organic farming (OF) and conservation agriculture (CA) are strategies to achieve these sustainability goals (FAO 2011). CA relies on three principles aimed at reducing soil erosion and improving soil fertility (Reicosky and Saxton 2006; Hobbs *et al.* 2008): (1) minimal soil disturbance, (2) permanent soil cover, and (3) crop rotation. A primary aim of CA includes the seeding of cash crops without soil disturbance after the previous cash crop harvest (Baker and Saxton 2007). Under the auspices of CA, a variety of reduced tillage (RT) techniques have been developed for arable crops, ranging from reducing tillage depth to modifying planting equipment with coulters to make a seed furrow with no further soil disturbance (Fig. 1). Production systems utilizing conservation tillage, no-till (NT), ridge-till and mulch-till techniques have increased dramatically in the U.S., with demonstrated soil benefits, reliable yields, and economically robust performance of field crops (Pittelkow *et al.* 2015). USDA’s Economic Research Service reported 36 million hectares—or about 40 percent of all U.S. planted cropland— implemented some form of NT management in 2010, including 34 percent of corn, 46 percent of soybean, 30 percent of cotton, and 48 percent of wheat areas within the contiguous 48 states (USDA-ERS 2015).

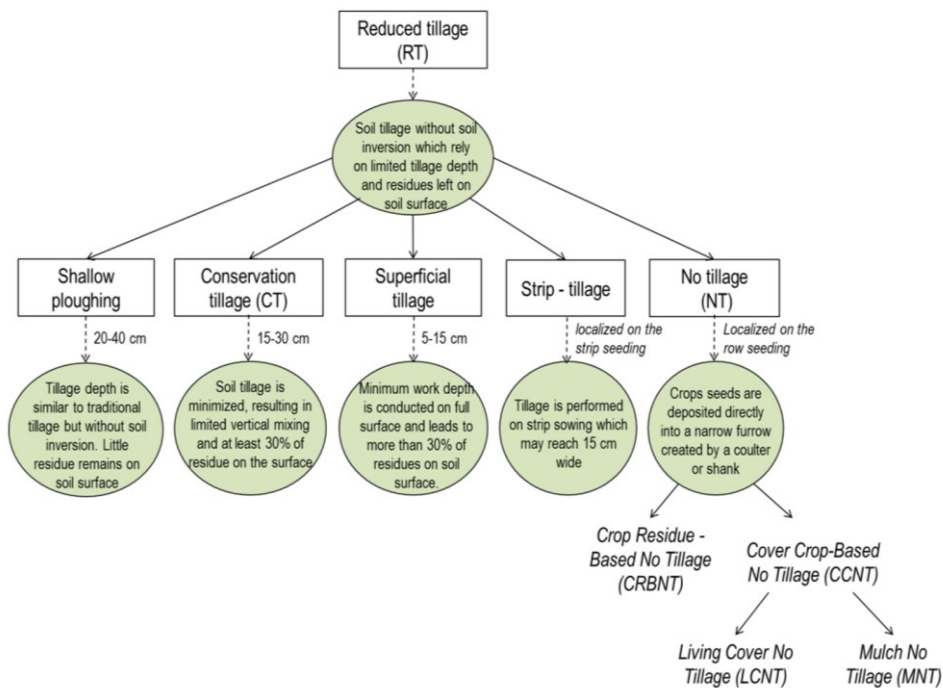


Fig. 1: Techniques for reducing tillage that have been developed in conservation agriculture.

However, increased use of NT practices has not been observed across OF, which has been criticized for excessive use of tillage for weed management, potentially compromising soil quality and health as well as increasing the risk of water and wind erosion (Carr, 2017). Despite the benefits arising from NT practices (e.g., reduced soil erosion, labor costs, and energy consumption) (Teasdale *et al.* 2007; Triplett and Dick 2008), NT adoption in OF remains limited, mainly due to inadequate weed

suppression. Although beneficial from a soil conservation perspective, the dependence of conventional NT on herbicides creates concerns regarding the development of herbicide-resistant weeds and negative environmental impacts, such as reduced water quality and non-target impacts on wildlife (USDA-ERS 2015; Uri 2000; Kniss 2017). These herbicide-related concerns, coupled with the demands of a rapidly growing organic crop production sector (Wyse 1994; Jackson 1997), has forced more farmers and researchers to examine alternative strategies of NT to improve soil health while maintaining high yields and achieving effective weed management (Moyer 2011; Silva and Delate 2017).

Cover crop–based no tillage (CCBNT) has emerged as a possible sustainable alternative to traditional herbicide-based NT practices. CCBNT involves no-till planting cash crops into a cover crop (Figs. 1 and 2) (Triplett and Dick 2008). CCBNT offers benefits of continued cover on soil health and weed suppression through physical barriers, light and nutrient competition, and allelopathic effects, which reduce or eliminate herbicide use (Teasdale *et al.* 2007). CCBNT encompasses two distinct approaches: living cover-based no tillage (LCNT), which involves the planting of cash crops into a growing cover crop, and mulch-based no tillage (MNT), which involves the planting of cash crops into a cover crop that is mechanically terminated by rolling or mowing to provide mulch (Fig. 1). In many circumstances, planting cash crops into a living cover has failed due to cover crop competition with the cash crop (Hiltbrunner *et al.* 2007a). As such, research efforts have turned to improving best management practices of MNT without herbicides, relying on the cover crop biomass to create mulch that serves as a physical barrier to protect the soil and suppress weeds (Fig. 2) (Teasdale *et al.* 2004; Carr *et al.* 2013).



Fig. 2: Soybean emergence through cover crop residue left on soil surface that provides physical barrier to prevent weeds development (pictures L. Vincent-Caboud).

While maintaining compliance with the principles and regulations of organic certification programs, MNT can provide an alternative approach to typical organic practices, which often include primary

tillage and multiple passes with cultivation equipment for weed management (Mäder and Berner 2012; Silva and Delate 2017). Although MNT is still only practiced on a limited number of farms, both organic and conventional farmers are interested in adopting this technique as a strategy to improve soil quality, reduce labor and fuel use, and decrease reliance on herbicides and mechanical cultivation (Ryan et al. 2003; Bernstein et al. 2011; Casagrande et al. 2015; Crowley 2017). Weed and cover crop management are major challenges for maintaining crop yield in organic MNT. These challenges are due to the lack of knowledge, skills, and equipment needed to optimize cover crop establishment, ensure effective cover crop termination, and successfully establish cash crops (Halde et al. 2017; Wallace et al. 2017; Zikeli and Gruber 2017).

In this paper, we review the international literature related to MNT in organic soybean and maize production, addressing the major issues impeding MNT success and identifying the ongoing challenges to integrating MNT into OF. First, we review studies investigating organic MNT, identifying the underlying principles that govern success. Second, we consider factors that can improve cover crop establishment and termination as well as cash crop planting. Lastly, we discuss the direction of international research and offer suggestions for future research that could facilitate farmer adoption of MNT in OF.

2. Scope of international research on mulch no tillage in organic farming

In Europe, MNT research in organic farming is limited, with most studies focusing on LCNT (Weber et al. 2017; Cooper et al. 2016; Mäder and Berner 2012; Vincent-Caboud et al. 2017). Research conducted on clay loam or silty soils has focused on the direct seeding of winter wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.), quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd), or flax (*Linum usitatissimum* L.) into living legumes (e.g., clovers species, alfalfa, etc.) which often results in unacceptable resource competition with cash crops (Bilalis et al. 2011, 2012; Hiltbrunner et al. 2007; Zikeli and Gruber 2017). For example, NT planting maize into alfalfa resulted in yield losses of 75% compared to maize that was planted into tilled soil ($p < 0.001$) in Southeastern France (Peigné et al. 2015). This is because alfalfa is a perennial and continued to grow even after a roller-crimper was used to limit competition between alfalfa and maize. In the same location, soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] that was NT planted into rolled cereal rye (*Secale cereale* L.) yielded only 25% lower compared with traditional plowing ($p < 0.05$) (Peigné et al. 2015).

Counter to the research trends in Europe, a fair number of MNT research trials have been conducted in the USA (largely on silty loam soils), primarily focused on soybean and maize (Ryan et al. 2011; Silva and Vereecke 2019; Parr et al. 2014; Mischler et al. 2010a; Wells et al. 2015). These studies included a wide range of production research questions, including screening cover crop species, describing the effects of the timing of cover crop rolling and crop seeding on crop performance, weed population and community dynamics, and estimating the energy use, greenhouse gas emissions, and profitability of MNT compared to traditional practices. Several of these studies have documented that no-till planted soybean into rolled cereal rye produces relatively high yields comparable with soybean planted into

tilled soil (Clark *et al.* 2017; Silva and Delate 2017; Wallace *et al.* 2017). The sowing of maize into terminated legume cover crops (e.g., hairy vetch, *Vicia villosa* Roth) has also been extensively studied. Results with maize are more variable compared to soybean depending on location and climate, ranging from significant losses over 90% to yields of approximately 9.0 t ha⁻¹, equal to traditional tillage-based production (Mischler *et al.* 2010b; Parr *et al.* 2011).

Organic MNT has also been studied in Canada and has been adapted to a shorter growth season and low temperatures (Beach *et al.* 2018). Canadian trials integrated MNT into the production of spring wheat, flax and soybean on sandy loam soil (Halde *et al.* 2017). Initial trials resulted in NT wheat and flax yields comparable or greater than the regional averages with traditional tillage (Halde *et al.* 2014; Halde and Entz 2014). However, one persistent challenge with using MNT for small grain production is to effectively suppress small seeded annual weeds without affecting small grain seedlings, which also have relatively small seeds compared to soybean and maize (Nichols *et al.* 2015). Organic MNT is also used in South America (Altieri *et al.* 2011), where MNT is widely applied in conventional farming (Derpsch 1998). Researchers have reported on studies related to fertilization strategies, cover crop species performance, and innovative solutions to suppress weeds using electrical current in MNT systems (Penha *et al.* 2012; Favarato *et al.* 2014; Landers *et al.* 2016).

Several studies on organic MNT have been conducted in vegetable production systems (Altieri *et al.* 2011; Canali *et al.* 2015; Robb *et al.* 2018). Compared with grain crops, important differences exist that are related to the shorter growing season of vegetable crops and the more complex crop rotations, which can facilitate organic MNT practices. One potential advantage of MNT in vegetable production is reduced incidence of soil-borne diseases. In this review, however, we focus on organic MNT issues related to grain crops, specifically soybean and maize.

Previous studies have demonstrated that cash crop establishment and resource competition from both surviving cover crops and weeds are primary challenges to achieving acceptable yields (Fig. 3). In light of these ongoing challenges, we address the following key questions regarding the sustainability and suitability of organic MNT:

- Which cover crop management practices optimize weed suppression?
- Which cover crop control strategy best mitigates cover crop competition with cash crops?
- Which cash crop management technique best maintains cash crop yields compared with traditional organic practices?
- Is MNT agronomically, economically, environmentally, and socially sustainable in OF?

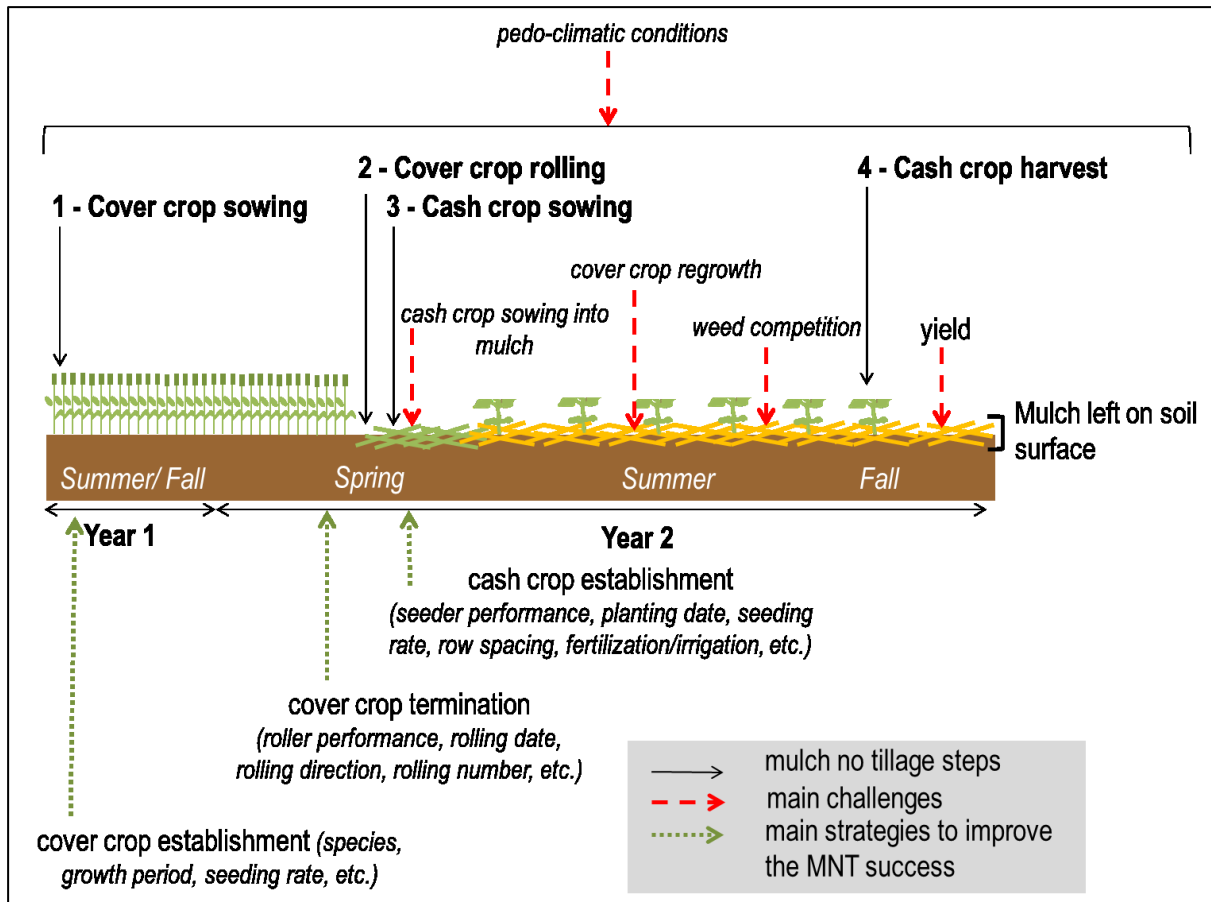


Fig. 3: Primary challenges of mulch cover no tillage under organic conditions.

3. How can cover crop and cash crop management optimize organic mulch-based no tillage success?

3.1. Cover crop management

To suppress weeds throughout the entire cash crop season, rapid cover establishment and high cover crop biomass are required (Reberg-Horton et al. 2012; Mirsky et al. 2013). Cover crop management, including cover crop selection, seeding date and rate, termination date, equipment, fertilization and irrigation, is critical to produce adequate biomass and achieve effective termination. Optimization of these factors can improve weed suppression, soil fertility, and cash crop performance (Mirsky et al. 2012; Schmidt et al. 2019).

3.1.1. Cover crop species

The selection of the cover crop species in a given region and crop rotation depends upon cash crop sequence and the lengths of time between cover crop planting, fall dormancy, and spring termination (Moyer 2011). Ideal cover crops for MNT must have certain key traits including adequate fall growth before entering the dormancy period, ability to overwinter, sufficient biomass at termination for weed suppression throughout the cash crop season, synchronicity of cover crop maturity for termination and

cash crop planting dates, and resistance to pests and diseases that could affect cash crops (Mischler et al. 2010a; Mirsky et al. 2012).

In MNT soybean production, small grain species [e.g., cereal rye, barley (*Hordeum vulgare L.*), triticale (*x Triticosecale Wittmack*), and oats (*Avena sativa L.*)] have been most extensively studied (Table 1). These species produce high amounts of biomass at the time of termination, with higher carbon-to-nitrogen (C:N) ratios which slow residue decay (Mirsky et al. 2012) and provide persistent soil coverage for weed suppression throughout the season. Cereal rye is the most common small grain cover crop evaluated for soybean MNT, as it is easily integrated into typical organic crop rotations with planting after the crop harvest in late summer or early fall, while providing the advantages of winter hardiness, high biomass, and consistent weed suppression (Smith et al. 2011; Clark et al. 2017). Cereal rye provides further benefits compared with other small grains including faster emergence, greater allelopathic effects, earlier flowering, and consistent cover crop termination by rolling-crimping, as well as producing the highest soybean yields across a variety of pedo-climatic conditions (Liebert et al. 2017; Silva and Delate 2017; Wallace et al. 2017; Vincent-Caboud et al. 2019) (Table 1). Beyond the physical impedance provided by the mulch, decomposition of cereal rye mulch can result in N immobilization, which further inhibits the germination and development of weeds (Reberg-Horton et al. 2012).

Table 1: Effect of cover crops tested in organic soybean and maize mulch-based no tillage system.

Cover crop	Advantages	Drawbacks	Location	References
Pure winter grain cover crop (Cereal rye, iticale, oat, barley)	Allelopathic effect, N immobilization, High C/N ratio, High biomass production, Height species, Slow decay, Terminated by rolling, Early flowering, Sowing date flexibility, Low sensibility to pest	N immobilization, Substantial needs of water and nutrients resources, Slow N release	-North America (Iowa, Pennsylvania, Wisconsin, North Carolina, Quebec) -South America (Brazil); -Europe (southern France)	(Altieri et al. 2008; Clark et al. 2017; Delate et al. 2012; Lefebvre et al. 2011; Liebert et al. 2017; Mirsky et al. 2012; Peigné et al. 2015; Silva 2014; Wallace et al. 2017; Wells et al. 2015; Zinati et al. 2017)
Species mixture (Cereal rye/barley; Cereal rye/hairy vetch; wheat/Austrian pea, hairy vetch/triticale)	High biomass production, High C/N ratio than pure legume, Compromise between N release and residue persistence	Slow N release, Lower biomass than pure rye, N provisioning reduced by high N immobilization by microorganisms during rye decay More difficulties in terminating cover with several species	-North America (New York) -North America (Iowa) -South America (Brazil)	(Altieri et al. 2008; Delate et al. 2012; Keene et al. 2017; Liebert et al. 2017)
Pure legume cover crop (Hairy vetch, Austrian winter pea)	Higher N production and restitution, High biomass production compared with other legumes	Fast decay, Excellent termination by rolling at early pod set stage, Lower biomass than grain species	-North America (Iowa, Wisconsin)	(Delate et al. 2012; Silva 2014; Parr et al. 2011)

In MNT organic maize production, several legume cover crop species have been studied which can supply a portion of the N requirements for maize (Table 1) (Mischler *et al.* 2010b; Parr *et al.* 2011). These legume cover crops include hairy vetch, winter pea, and crimson clover (*Trifolium incarnatum* L.). Hairy vetch has been the most frequently studied, as it can produce high levels of biomass and substantial N compared to other legume species and is winter-hardy across a wide range of geographic regions (Mirsky *et al.* 2012). Hairy vetch typically produces from 4 900 to 6 000 kg ha⁻¹ of biomass, providing 140 to 225 kg N ha⁻¹, which could theoretically meet the maize requirements for N (Table 1) (Mirsky *et al.* 2017). As such, hairy vetch has resulted in the highest maize yields among the cover crop screened (Table 2) (Parr *et al.* 2011). Species such as crimson clover, although able to provide substantial N credits when plowed under, are not adapted to organic MNT due to low biomass production leading to weed development (Parr *et al.* 2011; Peigné *et al.* 2015). While some studies focused on MNT maize production have included cereal grains either in a monoculture or in a mixture with a legume cover crop, the inclusion of cereal grains can increase N immobilization and increase insect pest issues, including true armyworm (*Pseudaletia unipuncta*), black cutworm (*Agrotis ipsilon*), and seed maize maggot (*Delia platura*) (Dunbar *et al.* 2016).

Research has also been conducted on mixtures of cover crop species in MNT which can provide benefits for weed suppression and hasten canopy cover prior to termination (Table 1) (Liebert *et al.* 2017). For instance, cereal rye combined with other species (e.g., triticale and barley) characterized by shorter height and wider leaves could increase light interception and shading. However, the use of multi-species mixtures can create additional management challenges due to the absence of synchronized maturity across species (Moyer 2011).

Cereal and legume mixtures can provide benefits to weed control and foster a balance between N availability, N immobilization, and cover crop decomposition (Altieri *et al.* 2008; Delate *et al.* 2012). Pure legume cover crops are characterized by a low C:N ratio (e.g., C:N of 11 for hairy vetch), which can lead to rapid residue decay, limiting the ability of mulch to ensure adequate weed suppression (Reberg-Horton *et al.* 2012). Legume/cereal grain mixtures can offer advantages in maize MNT systems by increasing the C:N ratio of the cover crop mulch, thus improving both the N availability and the mulch persistence on the soil surface (Parr *et al.* 2011). Across cereal grain/legume mixtures tested, the cereal rye/vetch mixture showed greater benefits with respect to soil fertility and beneficial insect populations compared with a winter wheat/Austrian winter pea (*Pisum sativum* L.) mixture (Delate *et al.* 2012).

3.1.2. Cover crop seeding

As referenced above, a large component of MNT success lies in the production of adequate cover crop biomass at termination, which has been estimated at 8 000 to 9 000 kg ha⁻¹ of dry cover crop biomass. Cover crop seeding date and rates have been shown to have a profound impact on cover crop biomass and weed suppression (Ryan *et al.* 2011; Reberg-Horton *et al.* 2012; Hayden *et al.* 2014). Studies also showed that earlier cover crop sowing during the late summer/early fall planting windows can increase

cover crop biomass production, thereby enhancing weed control (Mirsky *et al.* 2013; Moyer 2011). Similarly, the seeding rate of the cover crop influences final biomass which in turn decreases the potential for weeds to establish. Ryan *et al.* (2011) reported that 10 days after cover crop termination, a 31% decrease of weed density occurred with an increase in the cereal rye seeding rate from 90 to 210 kg ha⁻¹ ($p=0.018$). A similar conclusion was obtained with hairy vetch (Mirsky *et al.* 2017). The combination of a high seeding rate and an early planting with adequate fertility reduces weed establishment due to greater soil coverage both prior and subsequent to cover crop termination (Boyd *et al.* 2009; Brennan *et al.* 2009).

Seedbed preparation at cover crop planting can also impact the success of MNT systems. While tillage is eliminated with MNT during cash crop development, cover crop seeding is often performed in organic farming after soil tillage to manage existing perennial weeds and to allow for rapid cover emergence as soil temperatures begin to cool in the fall (Mirsky *et al.* 2013). A false seedbed before seeding the cover crop can further reduce weed populations by lowering the weed seedbank and preventing early emerging weeds from establishing through the mulch (Ryan *et al.* 2011).

3.1.3. Cover crop termination

As synthetic chemicals are prohibited in OF, termination typically relies on mechanical methods with a roller-crimper, mower, or chopper machine. Decisions on the cover crop control method should consider 1) sustained persistence of the mulch on the soil surface to maintain weed suppression, 2) labor and fuel used requirements, and 3) level of soil disturbance.

3.1.3.1. Effect of cover crop maturity on termination efficacy

To successfully terminate a cover crop without herbicides, the cover crop must be an annual species and reach the appropriate growth stage (Ashford and Reeves 2003). Typically, cover termination is improved by delaying until the reproductive stage (i.e., flowering stage) (Parr *et al.* 2014; Wells *et al.* 2014, 2015). Cover crop termination at 80%-100% flowering for winter annual cereal species has been reported to be most effective, with termination becoming increasingly effective as the cover crop matures to the soft dough stage (Moyer 2011). Winter annual legume species similarly must reach appropriate physiological maturity, with termination most effective when a minimum of 75% of plants have reached the end of the flowering or early pod stage (Cook *et al.* 2010; Légère *et al.* 2012). Mischler *et al.* (2010b) demonstrated excellent hairy vetch control with termination at the late pod stage compared to termination at less than 80% flowering because of a shorter height than winter cereal species and stems climbing and branching. Yield losses in maize are often attributed to insufficient termination of the cover crop, with hairy vetch regrowing during the cash crop establishment (Keene *et al.* 2017; Wallace *et al.* 2017). Additionally, soil N deficiency can result due to lack of synchronization between N release from the cover crop and cash crop N needs (Parr *et al.* 2014). These issues with using hairy vetch as the cover crop in maize MNT, have contributed to the

significant yield losses documented in many regions including Iowa (USA) and France (Delate et al. 2012; Peigné et al. 2015).

A longer period of cover crop growth results in a greater cover crop biomass, leading to thicker and more persistent mulch layers for effective weed suppression (Hartwig and Ammon 2002). However, synchronizing crop seeding with the appropriate stage of cover crop termination can result in delayed planting dates, compromising crop yields (Carr et al. 2013; Davis 2010). For example, in Pennsylvania, the pod set growth stage of hairy vetch occurs 4 to 6 weeks after the typical maize planting dates (Mischler et al. 2010b). Mirsky et al. (2012) suggested developing earlier-maturing cover crop cultivars adapted for rolling when maize is typically planted.

3.1.3.2. Mechanical strategies for cover crop termination

In organic MNT systems, mechanical strategies are the primary method of cover crop termination. Several techniques have been assessed, including types of roller-crimpers, sickle-bar mowers and flail choppers (Kornecki et al. 2010; Reberg-Horton et al. 2012).

Mowing has been evaluated for MNT, as many types of mowing and chopping equipment are available on farms (Smith et al. 2011; Vaisman et al. 2011). However, the smaller cover crop fragments created by the chopper accelerate residue decay, resulting in limited soil cover (Creamer and Dabney 2002). The flail chopper can also lead to an uneven distribution of mulch on the soil surface, allowing weeds to emerge. Compared to the flail chopper, the sickle bar mower minimizes these issues by creating a mulch of intact cereal grain stems laid down in a parallel arrangement, increasing persistence and easier planting through the residue (Smith et al. 2011). However, the sickle bar mower does not perform well in the termination of legume species due to cover crop entanglement with the cutter blade.

The roller-crimper, which originated in Brazil, has emerged as a particularly promising tool for organic MNT (Ashford and Reeves 2003; Mirsky et al. 2011). The roller-crimper crushes the stems of plants, damaging the vascular tissues without cutting the stems, thereby inhibiting the continued growth of the crop. Because the cover crop is anchored to the soil by the root, there is less potential for raking and dragging of the mulch when planting as well as movement of the mulch by wind and water later in the season. The maintenance of intact cover crop residue ensures longer mulch persistence, thereby improving weed control (Mirsky et al. 2012; Liebert et al. 2017). The roller-crimper also provides a more uniform mulch distribution and requires less labor and fuel compared to mowing (Mischler et al. 2010b; Mirsky et al. 2012). Greater weed suppression after cover crop termination with the roller-crimper compared with other mechanical strategies (i.e., a mower, sickle-bar mower and/or flail mower) was reported (Smith et al. 2011; Silva 2014).

Roller-crimpers for MNT are being developed with a wide variety of designs and widths (Kornecki et al. 2006; Kornecki et al. 2009), with sizes varying from 2 to 6 m wide. However, the availability of this equipment is limited in Europe, creating a barrier for development and limiting options for cover

crop management (Soane *et al.* 2012). Thus, farmers and researchers are compelled to build their own equipment, requiring skill in the design and fabrication of rollers adapted to MNT principles (e.g., minimal soil disturbance and damaging the cover crop without cutting the stems) (Peigné *et al.* 2015).

Improvements in roller-crimper performance have been proposed to increase the success of MNT based on equipment changes and the technical skills of the operator. The USDA-ARS has provided technical information comparing the effects of several roller designs on cover crop control, equipment vibration, rolling speed, and soil covering (Kornecki *et al.* 2010, 2012). The results showed that certain roller designs led to less vibration with higher rolling speeds; the excessive vibration associated with the first-generation designs of rollers had decreased their adoption. While reducing rolling speed can mitigate vibrations, a slower roller increases labor hours, which is a concern for farmers. Roller-crimper blades arranged in a chevron pattern on the cylinder reduce vibrations (Kornecki *et al.* 2005).

Minor technical and agronomic changes can enhance the efficacy of the roller-crimper. Additional weight may be added on the roller-crimper, with some designs allowing the roller-crimper to be filled with water (Delate *et al.* 2012). The direction of rolling can impact termination efficacy, with crimping at a diagonal angle (45 degrees) or at an angle of 90 degrees to the seeding direction of cover crop resulting mulch distribution (Kornecki *et al.* 2005; Mirsky *et al.* 2012) (Fig. 4). To improve and speed up the cover crop termination after cover crop rolling Frasconi *et al.* (2019) use a flame weeder after cover crop rolling. Flame weeders were also tested by other researchers as an alternative option to manage weeds in organic MNT production system but they explained that further studies are needed to optimizing the economic benefits regarding to the high operational cost required (Landers *et al.* 2016; Frasconi *et al.* 2019; Bavougian *et al.* 2019).



Fig. 4: (left) Illustration of cover crop control after rolling was performed in a similar direction to the cover crop sowing, (right) illustration of cover crop control after rolling was carried out in a perpendicular direction to the cover crop sowing. (pictures L. Vincent-Caboud)

3.2. Cash crop production

While the cover crop management factors related to the establishment of a thick persistent mulch are key aspects of MNT success, cash crop establishment is equally important. The presence of the mulch at cash crop planting can lead to several challenges, including cooler soil temperatures, excessively wet or dry soil moisture conditions, poor seed-to-soil contact, and difficulty applying starter fertilizers.

Obtaining target plant populations can be difficult in MNT. Recent studies have shown that higher soybean planting rates, compared to the standard regional recommendation, result in not only greater plant populations and yields, but also expedite soybean canopy closure resulting in greater weed suppression (Place *et al.* 2009; Liebert and Ryan 2017; Liebert *et al.* 2017). For example, in North Carolina (USA), researchers testing a range of planting rates to a maximum of 740,000 seeds ha⁻¹ found that increasing the standard soybean seeding rate by nearly 50% increased yields by approximately 15% with less weed pressure (Place *et al.* 2009). Increasing cash crop seeding rates can be particularly important to compensate when cover crop biomass is low (i.e., < 8,000 kg ha⁻¹) (Ryan *et al.* 2011).

Appropriate equipment for cash crop planting into the cover crop mulch is essential for the success of MNT systems (Wallace *et al.* 2017). A number of equipment companies manufacture heavy duty planters that are appropriate for MNT (Delate *et al.* 2012; Moyer 2011). Poor seed-to-soil contact may occur at planting due to the thick mulch layer on the soil surface (e.g., “hair-pinning” of the cover crop) and can impair seed placement at the 3 to 4 cm depth (Peigné *et al.* 2015). Thus, planter adjustments (e.g., addition of weight and row cleaners) are recommended for optimizing the performance of NT planters (Clark *et al.* 2017). Row cleaners have been adapted to planters used in the USA for organic MNT, assisting in the slicing of residues on the seeding row and improving seed placement and crop emergence through the mulch (Reberg-Horton *et al.* 2012). Additional weight on the unit planter can also improve seed-soil contact, with removal of coulters further increasing the overall weight on each individual planter unit (Moyer 2011; Clark *et al.* 2017).

The cooler soil temperatures present under the thick mulch layer can hinder cash crop establishment as well (Soane *et al.* 2012; Halde 2014; Mirsky *et al.* 2012; Dabney, Delgado, and Reeves 2001). This delay in cash crop growth can persist for a prolonged period, delaying canopy closure and allowing weeds to establish. Narrow row spacing has been proposed as a strategy for enhancing early soybean canopy closure (Bernstein *et al.* 2011; Lefebvre *et al.* 2011). Lefebvre *et al.* (2011) obtained improved soybean stand establishment but also soybean lodging with narrow row spacing (i.e., 2.10 t ha⁻¹ with 38 cm) compared with 76-cm row spacing conducting to 1.84 t ha⁻¹. Further research is needed, however, to understand the impact of narrow row spacing on yield and quality, particularly related to pest pressure and lodging.

3.3. Nutrient and water management

3.3.1. Soil fertility and nutrient management

Changes in the chemical, physical, and biological properties of soil have been reported with the use of organic MNT. Vian *et al.* (2009) and Peigné *et al.* (2009) reported an improvement of soil health indicators, with a greater abundance of earthworms and a higher organic carbon, N mineralization and microbial carbon concentration at 0-30 cm depth compared with traditional plowing. In conventional production systems, long-term studies have shown increased microbial biomass, soil N and organic

carbon storage with winter cover crop use (García-González *et al.* 2018; Liu, Ma, and Bomke 2005; Ding *et al.* 2006; Motta *et al.* 2007). Cover crop were also shown to have potential to improve water quality because of decreased NO₃- leaching (Qi and Helmers 2010; Dabney and *al.* 2001; Villamil *et al.* 2006). However, long-term research is needed in organic MNT systems to determine if results are similar to what has been observed in conventional systems.

Research has also shown that mulch on the soil surface change the mineralization dynamics and can have negative impacts on N availability for the cash crop (Bernstein *et al.* 2011; Halde *et al.*, 2014). For example, Bernstein *et al.* (2011) reported that the tissue N concentration of soybean grown under mowed rye was significantly lower than plowed soybean (i.e., respectively 41 g kg⁻¹ and 49 g kg⁻¹), potentially due to nutrient tie-up related to decomposition of the cereal rye mulch.

The importance of developing fertility management strategies in MNT is an emerging theme in research community. According to Clark *et al.* (2017), soil fertility is fundamental for supporting cover crop development and maintaining yields in MNT. With the cover crop remaining physiologically active for 3-6 weeks after rolling, solutions to manage cover crop competition with the cash crop at emergence must be considered (Delate *et al.* 2012; Légère *et al.* 2012). Delate *et al.* (2012) argued that the cover crop cannot be relied upon as the sole source of N for cash crops with high N needs such as maize. At the Rodale Institute in Pennsylvania, a high maize yield was obtained with sufficient N provided from compost that was applied before seeding hairy vetch in the fall in addition to the N from the rolled hairy vetch (Vann *et al.* 2017). Mirsky *et al.* (2012) suggested that a high rate of fertilizer applied to the planting row could support emergence and early growth of the cash crop. Fertility management can also contribute to ensuring adequate cover crop biomass. Ryan (2010) reported an increase in cereal rye biomass with the highest fertilizer rate applied in spring to cereal rye; however, the increased cover crop biomass did not translate into improved weed suppression.

3.3.2. Water and temperature conditions under mulch-based no tillage systems

The effect of MNT on soil moisture conservation and related water requirements remains unclear and is climate-dependent. Understanding these dynamics is essential for developing best management practices for establishing cash crops using NT (Pittelkow *et al.* 2015). In Wisconsin, a more humid climate, a greater conservation of soil water content was reported in MNT throughout the cash crop production season (Silva 2014; Lefebvre *et al.* 2011). However, in Canada, a lower soil water content was reported under cereal rye mulch, as the cover crop likely consumed significant water from the soil profile prior to termination (Lefebvre *et al.* 2011). In conventional production, researchers have observed that the depletion of soil water due transpiration from cover crops was offset by a lower soil water evaporation during the cash crop season (Qi and Helmers 2010; Duval *et al.* 2016). Moisture retention from mulch could be an important benefit in regions where short-term droughts during the midsummer are projected to increase in frequency (Basche *et al.* 2016). Cover crop species also affects the soil water content. For example, greater soil moisture was reported under mulch from

legume species compared with mulch from winter annual grain species (Silva 2014). In situations where the option is available, irrigation can be applied to offset any deficits created through transpiration from the cover crop (Delate et al. 2012).

Lower soil temperatures in MNT can affect weed growth, but also hinder the germination and emergence of cash crops, particularly those planted earlier in the spring (Soane et al. 2012; Halde et al. 2014). Teasdale and Mohler (1993) indicate that soil temperature was 3°C lower under cover crop than control treatment without cover crop at 5 cm. The authors explain that this temperature difference did not reduce weed emergence but delayed their development compared with the tillage plots. Regarding slower soil warming in MNT system compared with traditional practices without cover crop, delaying cash crop seeding resulted in planting into warmer soil, which hastened crop seedling emergence and limited pest insect damage at emergence. However, this change in cash crop planting date must be considered in tandem with the general optimization of crop management (Mirsky et al. 2012; Delate et al. 2012; Moyer 2011) (Table 2).

Despite some scattered references on nutrient and water management in organic MNT, the physical properties of soil in such systems have not yet been documented due to the short-term trials carried out with this technique. In conventional system production, researchers have shown that cover crop-based production systems improve soil aggregate due to higher binding agents (e.g., polysaccharides, water extractable carbohydrates, etc.) (Lal 2015; Liu, et al. 2005). Further studies are required under long-term organic MNT systems to better understanding the specific changes on soil properties.

3.4. Economic performance and social benefits

Although few references exist, several researchers have highlighted the economic and social benefits conferred through MNT systems (Bernstein et al. 2011; Delate et al. 2012; Singh et al. 2018). Economic benefits have been documented in the USA and Canada as a result of fewer field operations, resulting in decreased fuel, energy use, and labor costs (Moyer 2011; Silva and Delate 2017). Consequently, despite slightly reduced yields in MNT soybean, the return per ha is 25% greater in organic MNT compared to typical organic practices (Bernstein et al. 2011). Furthermore, MNT can improve the quality of life for farmers, reducing labor requirements, which allow for additional time to engage in other on- and off-farm activities that can improve overall gross margins. Fuel costs in organic MNT can be reduced by 50% compared with typical organic practices (Moyer 2011). Delate et al. (2012) found that MNT practices resulted in a 65% decrease in production costs compared to typical organic management; however, these Iowa-based trials also highlighted that the resulting yields greatly impacted the return to management for farmers. For example, the return to management was reduced by 93% in MNT for maize and by 67% for soybean compared to typical organic practices, in part, due to cover crop competition with the main crop under low precipitation. Long-term studies are needed to create reliable economic assessments at crop rotation levels that consider system-wide impacts on soil fertility and weed seedbanks.

4. Research agenda for the future

Current research demonstrates the potential of MNT as an organic management tool and highlights areas that could lead to significant advancements in the success and adoption of the organic MNT. The following sections discuss these ongoing challenges and future directions.

4.1. Optimizing organic cash crop planting

While cash crop planting in MNT typically occurs at cover crop termination, other timing strategies for cash crop planting and cover crop termination have recently emerged. Table 2 and Fig. 5 describe three practices for cash crop sowing according to cover crop rolling time: (1) cash crops are typically sown the same day as cover crop termination with a tractor-mounted roller-crimper (Delate *et al.* 2012) (Fig. 5a); (2) cash crop seeding several days or weeks after rolling the cover crop at anthesis, fostering quicker cash crop emergence due to warmer soil and synchronization with the beginning of N release from mulch decay (Fig. 5b) (Liebert *et al.* 2017); and (3) cash crop seeding prior to cover crop termination, overcoming difficulties faced when seeds are sown into the biomass and thereby improving seed-soil contact (Fig. 5c) (Porter *et al.* 2005; Bernstein *et al.* 2011). More research is needed to clarify the best combination of cash crop planting and cover crop termination practices across geographic regions and climatic conditions.

Table 2: Effect of different cash crop sowing periods in mulch no tillage production.

Cash crop sowing period	Advantages	Drawbacks/difficulties	References
Seeding 1-2 weeks after rolling	N supply, Soil warming, Second rolling possible	Cover crop regrowth, Risk of weed emergence before the main crop sowing, Technical problems with sowing into flattened cover crop (soil-seed contact), Shorter cover crop growth season	
Seeding same day of rolling	Minimal soil disturbance: rolling and sowing operation combination possible (fuel and labor savings), Longer cover crop growth season, Sowing into recent flattened cover crop (fewer technical issues)	Technical problems with seeding into thick mulch (seed-soil contact), Low N released, Lower soil temperature	(Delate <i>et al.</i> 2012; Mirsky <i>et al.</i> 2012; Reberg-Horton <i>et al.</i> 2012; Bernstein <i>et al.</i> 2011)
Seeding before the cover crop rolling	Potential lower hair-pinning problem, Potential better soil-seed contact Greater yield potential from longer cash crop growing season	Technical problems related to cover crop height, Lack of reference	

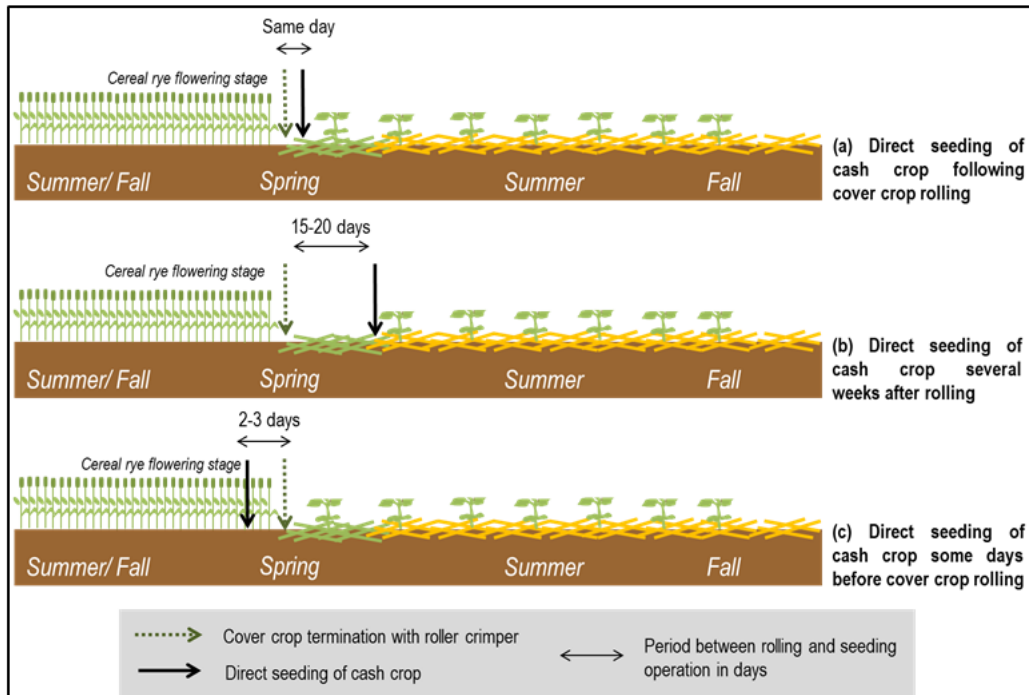


Fig. 5: Schema representing methods of cash crop sowing in organic mulch no tillage.

4.2. Cash crop variety selection and breeding for adaptation to organic mulch-based no tillage

There is limited information on the impact of cash crop cultivars on MNT success. In Canada, Lefebvre *et al.* (2011) compared three cultivars of soybean with early, mid-late and late maturity traits. Although weed biomass did not differ, higher soybean yield was obtained with the mid-late-maturing cultivar (i.e., 2.23 t ha⁻¹) compared with the early-maturing cultivar (i.e., 1.88 t ha⁻¹).

Further breeding and screening efforts could be increased to develop cash crop cultivars that are better adapted to MNT in OF. More competitive cultivars with greater N efficiency could contribute to the mitigation of the issue of N-immobilization in the system. Cultivars adapted to the challenges related to germination and stand establishment, including poor seeding conditions, cool soil temperatures, and emergence through the thick mulch, could provide significant benefits. Finally, early-maturing cultivars could help mitigate the issues with delayed cash crop planting caused by the need to synchronize seeding with the mechanical management of the cover crop. The seeding of Flex-Ear maize in MNT systems can be conducive to very good performance in both high and low populations.

4.3. Optimizing cover crop/cash crop combinations

Optimizing cover crop mixture and cover crop/cash crop combinations remains a major challenge in organic MNT success (Moyer 2011; Halde *et al.* 2017). Further research must be conducted to document the performance of cover crop mixture with respect to weed suppression and cover crop control under a wide diversity of temperate soil and climate. Many questions remain on the selection of the best cover crops for non-legume cash crop organic MNT production, where yields have been

documented to be extremely variable (Mischler *et al.* 2010b; Peigné *et al.* 2015). Compromises must be developed between two conflicting production goals: (1) increased C:N ratio of cover crop to manage weeds and (2) decreased C:N ratio to provide sufficient N availability ensuring the needs of the cash crop (Williams *et al.* 2018; Liebman *et al.* 2018). Further research is needed to optimize mechanical termination with diverse species that have different phenologies (Moyer 2011; Wallace *et al.* 2017; Tosti *et al.* 2012; Halde and Entz 2016; Jani *et al.* 2016).

Additionally, studies are required to screen a range of both pure stands and mixtures of cover crop under various pedo-climatic conditions to provide more flexible decision-support tools. As a result of this review, six primary factors can be incorporated into a decision support tool related to both cover crop and cash crop management in organic MNT: (i) critical cover crop biomass and height, (ii) appropriate C:N ratio, (iii) estimation of mulch decay rates, (iv) efficiency of cover crop termination, (v) cover crop maturity dates, and (vi) competition for and/or provision of nutrients and water resources with cash crops.

4.4. Roller-crimper and mulch-based no tillage planting equipment

While effective equipment has been designed for cover crop control, less emphasis has been placed on the modification of traditional NT equipment to allow the planter to perform in thick mulch (Kornecki *et al.* 2005; Kornecki *et al.* 2010; Reberg-Horton *et al.* 2012). Gaps in access, skills and knowledge regarding both roller-crimper and MNT planter optimization limit the success of MNT and its wide acceptance. Additional equipment and strategies should be identified to provide solutions to manage weeds and improve cover crop control while ensuring seed placement through the mulch (Zinati *et al.* 2017). However, as with the integration of any new tools, their impact on the goals of MNT (e.g., soil quality, fuel, energy and labor savings) must be considered. The inclusion of a diversity of regional stakeholders in a participatory research process would be a solution to provide appropriate equipment specific to the local conditions (e.g., farmers, manufacturers, and researchers).

In addition to planting equipment, researchers should consider different tools that can be used to control weeds after cash crops are planted in the MNT system. High-residue cultivation could be used for supplemental weed control in organic MNT soybean and maize production (Zinati *et al.* 2017). For example, crop yields increased by up to 35% when a multi-tactic weed management approach was used that included high residue cultivation and hand weeding (Zinati *et al.* 2017). Another option being explored for between-row weed management includes inter-row mowing equipment that could limit weed growth while avoiding soil disturbance.

4.5. Redesigning the organic cropping system

Implementing technical solutions requires substantial changes at several levels (e.g., altering planting dates at the field scale, designing crop rotations at the cropping system scale, prioritizing equipment at the farm scale, and others) (Moyer 2011). Long-term research has recently begun in North America at the crop rotation scale, but this approach needs to be applied to other regions to consider the specific

constraints of the current crop rotations practiced by local farmers and the diversity of farming systems encountered in specific regions (Teasdale *et al.* 2007; Anderson 2015; Wallace *et al.* 2018).

Research is needed on the effect of crop rotations for organic MNT and the impact of crop rotation on weed populations, weed communities, and crop yields. In some cases, crop rotations will need to be redesigned to accommodate early seeding of cover crops for the MNT system. To ensure alignment with farmers' objectives, a participatory approach is critical. Farmer-researcher partnerships create greater valorization of both scientific and local farmer knowledge and expedite the development of innovative and relevant solutions (Lefevre 2013). The development of sustainable cropping systems, including organic MNT, requires research and innovation across scales, including the field, cropping system and farm.

5. Conclusion

MNT can provide a number of benefits in organic cropping systems, addressing agroecological (e.g., improving soil fertility, reducing soil erosion, etc.), economic (e.g., limiting fuel and energy consumption) and social concerns (e.g., reducing labor, improving well-being, and others). In many regions, conditions required to optimize organic MNT performance remain poorly documented. The challenges that prevent expansion of organic MNT are related to the lack of knowledge and inclusion of strategies that work within farm constraints. In particular, a large knowledge gap exists with respect to soil changes (biological, chemical and physical properties) in organic MNT systems due, in large part, to the lack of long-term studies. Identification of the best cover crop/cash crop combinations remains a primary bottleneck that must be addressed to ensure weed suppression while maintaining crop yields, particularly as related to local environments. The combination of a cereal rye cover crop/soybean cash crop has produced consistently positive results; however, in organic MNT maize production, the choice of cover crop species to allow for adequate planting dates, season-long weed suppression, and N availability remains a major challenge. The broader integration of MNT into organic cropping systems will require technical and social changes, including redesigning crop rotations and developing viable solutions with consideration of soil properties to address organic farmers' objectives and local constraints at the farm level.

Acknowledgments: The authors acknowledge the financial support for this project provided by transnational funding bodies, including partners of the FP7 ERA-net project, CORE Organic Plus, and cofunds from the European Commission, the TERRA ISARA foundation, the United States Department of Agriculture, National Institute of Food and Agriculture, Organic Transitions Program (2014-51106-22080), and the French Water Agency 'Rhône Méditerranée Corse'. The text in this paper is the sole responsibility of the authors and does not necessarily reflect the views of the national and European funding bodies that financed this project.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Altieri, Miguel A., Paulo E. Lovato, Marcos A. Lana, and Henrique V. Bittencourt.** 2008. “Testing and Scaling-up Agroecologically Based Organic Conservation Tillage Systems for Family Farmers in Southern Brazil.” MyScienceWork, January. <https://www.mysciencework.com/publication/show/7f7069b1d43df576b07c6be367cd1c81>.
- Altieri, Miguel A., Marcos A. Lana, Henrique V. Bittencourt, André S. Kieling, Jucinei J. Comin, and Paulo E. Lovato.** 2011. “Enhancing Crop Productivity via Weed Suppression in Organic No-Till Cropping Systems in Santa Catarina, Brazil.” *Journal of Sustainable Agriculture* 35 (8): 855–69.
- Anderson, Randy L.** 2015. “Integrating a Complex Rotation with No-till Improves Weed Management in Organic Farming. A Review.” *Agronomy for Sustainable Development* 35 (3): 967–74.
- Ashford, Dana L., and D. Wayne Reeves.** 2003. “Use of a Mechanical Roller-Crimper as an Alternative Kill Method for Cover Crops.” *American Journal of Alternative Agriculture* 18 (1): 37–45.
- Baker, John C., and Keith E. Saxton.** 2007. *No-Tillage Seeding in Conservation Agriculture*. CABI.
- Basche, Andrea D., Thomas C. Kaspar, Sotirios V. Archontoulis, Dan B. Jaynes, Thomas J. Sauer, Timothy B. Parkin, and Fernando E. Miguez.** 2016. “Soil Water Improvements with the Long-Term Use of a Winter Rye Cover Crop.” *Agricultural Water Management* 172 (July): 40–50.
- Bavougian, Christina M., Elizabeth Sarno, Stevan Knezevic, and Charles A. Shapiro.** 2019. “Cover Crop Species and Termination Method Effects on Organic Maize and Soybean.” *Biological Agriculture & Horticulture* 35 (1): 1–20.
- Beach, Heather M., Ken W. Laing, Morris Van De Walle, and Ralph C. Martin.** 2018. “The Current State and Future Directions of Organic No-Till Farming with Cover Crops in Canada, with Case Study Support.” *Sustainability* 10 (2): 373.
- Bernstein, Emily R., Joshua L. Posner, David E. Stoltenberg, and Janet L. Hedtcke.** 2011. “Organically Managed No-Tillage Rye–Soybean Systems: Agronomic, Economic, and Environmental Assessment.” *Agronomy Journal* 103 (4): 1169.
- Bilalis, Dimitrios, Anestis Karkanis, Anastasia Pantelia, Sotiria Patsiali, Aristeidis Konstantas, and Aspasia Efthimiadou.** 2012. “Weed Populations Are Affected by Tillage Systems and Fertilization Practices in Organic Flax (*Linum Usitatissimum* L.) Crop.” *Australian Journal of Crop Science* 6 (1): 157.
- Bilalis, Dimitrios, Anestis Karkanis, Sotiria Patsiali, Maria Agriogianni, Aristeidis Konstantas, and Vassilios Triantafyllidis.** 2011. “Performance of Wheat Varieties (*Triticum Aestivum* L.) under Conservation Tillage Practices in Organic Agriculture.” *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 39 (2): 28.
- Blanchart, Eric, Martial Bernoux, Xavier Sarda, Marcos Siqueira Neto, Carlos C. Cerri, Marisa Piccolo, Jean-Marie Douzet, Eric Scopel, and Christian Feller.** 2007. “Effect of Direct Seeding Mulch-Based Systems on Soil Carbon Storage and Macrofauna in Central Brazil.” *Agriculturae Conspectus Scientificus (ACS)* 72 (1): 81–87.
- Bovenzi, Massimo.** 1996. “Low Back Pain Disorders and Exposure to Whole-Body Vibration in the Workplace.” *Seminars in Perinatology* 20 (1): 38–53.
- Boyd, Nathan S., Eric B. Brennan, Richard F. Smith, and Ron Yokota.** 2009. “Effect of Seeding Rate and Planting Arrangement on Rye Cover Crop and Weed Growth.” *Agronomy Journal* 101 (1): 47.
- Brennan, Eric B., Nathan S. Boyd, Richard F. Smith, and Phil Foster.** 2009. “Seeding Rate and Planting Arrangement Effects on Growth and Weed Suppression of a Legume-Oat Cover Crop for Organic Vegetable Systems.” *Agronomy Journal* 101 (4): 979–88.
- Canali, Stefano, Mariangela Diacono, Gabriele Campanelli, and Francesco Montemurro.** 2015. “Organic No-Till with Roller Crimpers: Agro-Ecosystem Services and Applications in Organic Mediterranean Vegetable Productions.” *Sustainable Agriculture Research* 4 (3): 70.
- Carr, Patrick.** 2017. “Guest Editorial: Conservation Tillage for Organic Farming.” *Agriculture* 7 (3): 19.
- Carr, Patrick, Greta Gramig, and Mark Liebig.** 2013. “Impacts of Organic Zero Tillage Systems on Crops, Weeds, and Soil Quality.” *Sustainability* 5 (7): 3172–3201.
- Casagrande, Marion, Joséphine Peigné, Vincent Payet, Paul Mäder, F. Xavier Sans, José Manuel Blanco-Moreno, Daniele Antichi, et al.** 2015. “Organic Farmers’ Motivations and Challenges for Adopting Conservation Agriculture in Europe.” *Organic Agriculture*, October, 1–15.
- Clark, Kerry M., Dara L. Boardman, Jill S. Staples, Steven Easterby, T. M. Reinbott, Robert J. Kremer, Newell R. Kitchen, and Kristen S. Veum.** 2017. “Crop Yield and Soil Organic Carbon in Conventional and No-till Organic Systems on a Claypan Soil.” *Agronomy Journal* 0 (0).
- Cook, Justine C., Robert S. Gallagher, Jason P. Kaye, Jonathan Lynch, and Brosi Bradley.** 2010. “Optimizing Vetch Nitrogen Production and Corn Nitrogen Accumulation under No-Till Management.” *Agronomy Journal* 102 (5): 1491.

- Cooper, Julia, Marcin Baranski, Gavin Stewart, Majimcha Nobel-de Lange, Paolo Bàrberi, Andreas Fließbach, Josephine Peigné, et al.** 2016. “Shallow Non-Inversion Tillage in Organic Farming Maintains Crop Yields and Increases Soil C Stocks: A Meta-Analysis.” *Agronomy for Sustainable Development* 36 (1).
- Creamer, Nancy G., and Seth M. Dabney.** 2002. “Killing Cover Crops Mechanically: Review of Recent Literature and Assessment of New Research Results.” *American Journal of Alternative Agriculture* 17 (1): 32–40.
- Crowley, Kiera A.** 2017. “Tradeoffs in cereal rye management strategies prior to organic soybean.” <https://ecommons.cornell.edu/handle/1813/51549>.
- Dabney, Seth M., Jorge A. Delgado, and David S. Reeves.** 2001. “Using winter cover crops to improve soil and water quality.” In . <https://doi.org/10.1081/CSS-100104110>.
- Davis, Adam S.** 2010. “Cover-Crop Roller-Crimper Contributes to Weed Management in No-Till Soybean.” *Weed Science* 58 (3): 300–309.
- Delate, Kathleen, Daniel Cwach, and Mike Fiscus.** 2012. “Evaluation of an Organic No-Till System for Organic Corn and Soybean Production—Agronomy Farm Trial, 2011.” Organic Ag Program Webpage, Iowa State University, Ames, IA. <http://extension.agron.iastate.edu/organicag/researchreports/nk11notill.pdf>.
- Delate, Kathleen, Daniel Cwach, and Craig Chase.** 2012. “Organic No-Tillage System Effects on Soybean, Corn and Irrigated Tomato Production and Economic Performance in Iowa, USA.” *Renewable Agriculture and Food Systems* 27 (Special Issue 01): 49–59.
- Derpsch, Rolf.** 1998. “Historical Review of No-Tillage Cultivation of Crops.” In FAO International Workshop, Conservation Tillage for Sustainable Agriculture, 205–218.
- Ding, Guangwei, Xiaobing Liu, Stephen Herbert, Jeffrey Novak, Dula Amarasiriwardena, and Baoshan Xing.** 2006. “Effect of Cover Crop Management on Soil Organic Matter.” *Geoderma* 130 (3): 229–39.
- Dunbar, Mike W., Matthew E. O’Neal, and Aaron J. Gassmann.** 2016. “Increased Risk of Insect Injury to Corn Following Rye Cover Crop.” *Journal of Economic Entomology* 109 (4): 1691–97.
- Duval, Matias E., Juan A. Galantini, Julia E. Capurro, and Juan M. Martinez.** 2016. “Winter Cover Crops in Soybean Monoculture: Effects on Soil Organic Carbon and Its Fractions.” *Soil and Tillage Research* 161 (August): 95–105.
- FAO.** n.d. “1. Introduction.” Accessed February 20, 2017. <http://www.fao.org/docrep/005/y2781f/y2781f03.htm>.
- Favarato, Luiz F., Cardoso C. Galvão, Leandro J. Souza, Rogério C. Guarçoni, Caetano M. Souza, and Darlan N. Cunha.** 2014. “Population Density and Weed Infestation in Organic No-Tillage Corn Cropping System under Different Soil Covers.” *Planta Daninha* 32 (4): 739–46.
- Frasconi, Christian, Luisa Martelloni, Daniele Antichi, Michele Raffaelli, Marco Fontanelli, Andrea Peruzzi, Paolo Benincasa, and Giacomo Tosti.** 2019. “Combining Roller Crimpers and Flaming for the Termination of Cover Crops in Herbicide-Free No-till Cropping Systems.” *PLOS ONE* 14 (2): e0211573.
- García-González, Irene, Chiquinquirá Hontoria, José Luis Gabriel, María Alonso-Ayuso, and Miguel Quemada.** 2018. “Data Supporting the Cover Crops Benefits Related to Soil Functionality in a 10-Year Cropping System.” *Data in Brief* 18 (June): 1327–33.
- Halde, Caroline.** 2014. “Organic Rotational No-till System Adapted for Manitoba, Canada.” University of Manitoba. https://www.researchgate.net/profile/Caroline_Halde/publication/264975100_Organic_Rotational_No-Till_System_Adapted_for_Manitoba_Canada/links/53f904550cf2c9c3309e2df2.pdf.
- Halde, Caroline, and Martin H. Entz.** 2014. “Flax (*Linum Usitatissimum* L.) Production System Performance under Organic Rotational No-till and Two Organic Tilled Systems in a Cool Subhumid Continental Climate.” *Soil and Tillage Research* 143 (November): 145–54.
- Halde, Caroline, and Martin H. Entz.** 2016. “Plant Species and Mulch Application Rate Affected Decomposition of Cover Crop Mulches Used in Organic Rotational No-till Systems.” *Canadian Journal of Plant Science* 96 (1): 59–71.
- Halde, Caroline, Samuel Gagné, Anaïs Charles, and Yvonne Lawley.** 2017. “Organic No-Till Systems in Eastern Canada: A Review.” *Agriculture* 7 (4): 36.
- Halde, Caroline, Robert H. Gulden, and Martin H. Entz.** 2014. “Selecting Cover Crop Mulches for Organic Rotational No-Till Systems in Manitoba, Canada.” *Agronomy Journal* 106 (4): 1193.
- Hartwig, Nathan L., and Hans Ulrich Ammon.** 2002. “Cover Crops and Living Mulches.” *Weed Science* 50 (6): 688–699.
- Hayden, Zachary D., Mathieu N. gouajio, and Daniel C. Brainard.** 2014. “Rye-Vetch Mixture Proportion Tradeoffs: Cover Crop Productivity, Nitrogen Accumulation, and Weed Suppression.” *Agronomy Journal* 106 (3): 904–914.
- Hiltbrunner, Jurg, Bernhard Streit, and Markus Liedgens.** 2007a. “Are Seeding Densities an Opportunity to Increase Grain Yield of Winter Wheat in a Living Mulch of White Clover?” *Field Crops Research* 102 (3): 163–71.

- Hiltbrunner, Jürg, Markus Liedgens, Lucia Bloch, Peter Stamp, and Bernhard Streit.** 2007b. “Legume Cover Crops as Living Mulches for Winter Wheat: Components of Biomass and the Control of Weeds.” *European Journal of Agronomy* 26 (1): 21–29.
- Hobbs, Peter R., Ken Sayre, and Raj Gupta.** 2008. “The Role of Conservation Agriculture in Sustainable Agriculture.” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363 (1491): 543–55.
- Jackson, Louise E.** 1997. *Ecology in Agriculture*. Academic Press.
- Jani, Arun D., Julie Grossman, Thomas J. Smyth, and Shuijin Hu.** 2016. “Winter Legume Cover-Crop Root Decomposition and N Release Dynamics under Disking and Roller-Crimping Termination Approaches.” *Renewable Agriculture and Food Systems* 31 (3): 214–29.
- Keene, Clair L., William S. Curran, John M. Wallace, Matthew R. Ryan, Steven B. Mirsky, Mark J. VanGessel, and Mary E. Barbercheck.** 2017. “Cover Crop Termination Timing Is Critical in Organic Rotational No-Till Systems.” *Agronomy Journal* 109 (1): 272–82.
- Kniss, Andrew R.** 2017. “Long-Term Trends in the Intensity and Relative Toxicity of Herbicide Use.” *Nature Communications* 8 (April): 14865.
- Kornecki, Ted S., Andrew J. Price, and Randy L. Raper,** 2006. “Performance of different roller designs in terminating rye cover crop and reducing vibration.” *Applied Engineering in Agriculture* 22 (5): 633–41.
- Kornecki, Ted S., Francisco J. Arriaga, and Andrew J. Price.** 2012. “Roller Type and Operating Speed Effects on Rye Termination Rates, Soil Moisture, and Yield of Sweet Corn in a No-till System.” *HortScience* 47 (2): 217–23.
- Kornecki, Ted S., Andrew J. Price, and others.** 2010. “Effects of Different Roller/Crimper Designs and Rolling Speed on Rye Cover Crop Termination and Seed Cotton Yield in a No-till System.” *J. Cotton Sci* 14 (4): 212–220.
- Kornecki, Ted S., Randy L. Raper, Francisco J. Arriaga, Kipling S. Balkcom, and Andrew J. Price.** 2005. “Effects of Rolling/Crimping Rye Direction and Different Row-Cleaning Attachments on Cotton Emergence and Yield.” In *Proc. Southern Conservation Tillage Conf.*, 27th. Florence, SC, 27–29.
- Kornecki, Ted S., Andrew J. Price, Randy L. Raper, and Francisco J. Arriaga.** 2009. “New Roller Crimper Concepts for Mechanical Termination of Cover Crops in Conservation Agriculture.” *Renewable Agriculture and Food Systems* 24 (03): 165–173.
- Lal, Rattan.** 2015. “Sequestering Carbon and Increasing Productivity by Conservation Agriculture.” *Journal of Soil and Water Conservation* 70 (3): 55A–62A.
- Landers, J. N., M. Challiol, L. Vilela, and S. Lanz.** 2016. “Case Study of Zero-Tillage Organic Soybean Production in Brazil.” *Soil Research* 54 (2): 166–72.
- Lefebvre, Maxime, Maryse Leblanc, Pierre-Antoine Gilbert, Bernard Estevez, Michèle Grenier, and Luc Belzile.** 2011. “Semis Direct Sur Paillis de Seigle Roulé En Régie Biologique.” Rapport final 08 BIO-24 (IRDA-400063). Québec : Institut de recherche et de développement en agroenvironnement.
- Lefevre, Vincent.** 2013. “Conception de Systèmes de Culture Innovants Pour Améliorer Le Fonctionnement Des Sols En Agriculture Biologique.” Thiverval-Grignon, France: L’institut des sciences et industries du vivant et de l’environnement (AgroParisTech).
- Légère, Anne, Steven J. Shirliffe, Anne Vanasse, and Robert H. Gulden.** 2012. “Extreme Grain-Based Cropping Systems: When Herbicide-Free Weed Management Meets Conservation Tillage in Northern Climates.” *Weed Technology* 27 (1): 204–11.
- Liebert, Jeffrey A., Antonio DiTommaso, and Matthew R. Ryan.** 2017. “Rolled Mixtures of Barley and Cereal Rye for Weed Suppression in Cover Crop–Based Organic No-Till Planted Soybean.” *Weed Science*, January, 1–14.
- Liebert, Jeffrey A., and Matthew R. Ryan.** 2017. “High Planting Rates Improve Weed Suppression, Yield, and Profitability in Organically-Managed No-till Planted Soybean.” *Weed Technology*.
- Liebman, Alexander M., Julie Grossman, Matthew Brown, M. Scott Wells, S. C. Reberg-Horton, and Wei Shi.** 2018. “Legume Cover Crops and Tillage Impact Nitrogen Dynamics in Organic Corn Production.” *Agronomy Journal* 110 (3): 1046–57.
- Liu, Aiguo, B. L. Ma, and Arthur A. Bomke.** 2005. “Effects of Cover Crops on Soil Aggregate Stability, Total Organic Carbon, and Polysaccharides.” *Soil Science Society of America Journal* 69 (6): 2041–48.
- Mäder, Paul, and Alfred Berner.** 2012. “Development of Reduced Tillage Systems in Organic Farming in Europe.” *Renewable Agriculture and Food Systems* 27 (Special Issue 01): 7–11.
- Mirsky, Steven B., William S Curran, David M Mortensen, Matthew R Ryan, and Durland L Shumway.** 2011. “Timing of Cover-Crop Management Effects on Weed Suppression in No-Till Planted Soybean Using a Roller-Crimper.” *Weed Science* 59 (3): 380–89.
- Mirsky, Steven B., Victoria J. Ackroyd, Stéphane Cordeau, William S. Curran, Masoud Hashemi, S Chris Reberg-Horton, Matthew R. Ryan, and John T. Spargo.** 2017. “Hairy Vetch Biomass across the Eastern United States: Effects of Latitude, Seeding Rate and Date, and Termination Timing.” *Agronomy Journal* 109 (January).

- Mirsky, Steven B., Matthew R. Ryan, William S. Curran, John R. Teasdale, Jude Maul, John T. Spargo, Jeff Moyer, et al.** 2012. “Conservation Tillage Issues: Cover Crop-Based Organic Rotational No-till Grain Production in the Mid-Atlantic Region, USA.” *Renewable Agriculture and Food Systems* 27 (Special Issue 01): 31–40.
- Mirsky, Steven B., Matthew R. Ryan, John R. Teasdale, William S. Curran, Chris S. Reberg-Horton, John T. Spargo, M. Scott Wells, Clair L. Keene, and Jeff W. Moyer.** 2013. “Overcoming Weed Management Challenges in Cover Crop-Based Organic Rotational No-Till Soybean Production in the Eastern United States.” *Weed Technology* 27 (1): 193–203.
- Mischler, Ruth A., William S. Curran, Sjoerd W. Duiker, and Jeffrey A. Hyde.** 2010a. “Use of a Rolled-Rye Cover Crop for Weed Suppression in No-Till Soybeans.” *Weed Technology* 24 (3): 253–61.
- Mischler, Ruth, Sjoerd W. Duiker, William S. Curran, and David Wilson.** 2010b. “Hairy Vetch Management for no-till organic corn production.” *Agronomy Journal* 102 (1): 355–62.
- Mohler, Charles L., and M. Brett Callaway.** 1995. “Effects of Tillage and Mulch on Weed Seed Production and Seed Banks in Sweet Corn.” *The Journal of Applied Ecology* 32 (3): 627.
- Motta, Antonio C., Wayne Reeves, Charles Burmester, and Yueha Feng.** 2007. “Conservation Tillage, Rotations, and Cover Crop Affecting Soil Quality in the Tennessee Valley: Particulate Organic Matter, Organic Matter, and Microbial Biomass.” *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38 (19–20): 2831–47.
- Moyer, Jeff.** 2011. *Organic no-till farming. Advancing no-till agriculture. Crops, soil, equipment.* Acres U.S.A., Austin, Texas: Copyright.
- Muzammil, Mohammad, Saad S. Siddiqui, and Faisal Hasan.** 2004. “Physiological Effect of Vibrations on Tractor Drivers under Variable Ploughing Conditions.” *Journal of Occupational Health* 46 (5): 403–9.
- Nichols, Virginia, Nele Verhulst, Rachael Cox, and Bram Govaerts.** 2015. “Weed Dynamics and Conservation Agriculture Principles: A Review.” *Field Crops Research* 183 (November): 56–68.
- Parr, Mary, Julie M. Grossman, Chris S. Reberg-Horton, Carrie Brinton, and Carl Crozier.** 2011. “Nitrogen Delivery from Legume Cover Crops in No-Till Organic Corn Production.” *Agronomy Journal* 103 (6): 1578.
- Parr, Mary, Julie M. Grossman, S. Chris Reberg-Horton, Carrie Brinton, and Carl Crozier.** 2014. “Roller-Crimper Termination for Legume Cover Crops in North Carolina: Impacts on Nutrient Availability to a Succeeding Corn Crop.” *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 45 (8): 1106–19. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.867061>.
- Peigné, Joséphine, Mario Cannavaciolo, Yvan Gautronneau, Anne Aveline, Jean L. Giteau, and Daniel Cluzeau.** 2009. “Earthworm Populations under Different Tillage Systems in Organic Farming.” *Soil and Tillage Research* 104 (2): 207–14.
- Peigné, Joséphine, Vincent Lefevre, Jean F. Vian, and Philippe Fleury.** 2015. “Conservation Agriculture in Organic Farming: Experiences, Challenges and Opportunities in Europe.” In *Conservation Agriculture*, edited by Muhammad Farooq and Kadambot H. M. Siddique, 559–78. Springer International Publishing.
- Penha, L. A. O., Carlos A. Khatounian, and I. C. B. Fonseca.** 2012. “Effects of Early Compost Application on No-till Organic Soybean.” *Planta Daninha* 30 (1): 1–8.
- Pittelkow, Cameron M., Bruce A. Linquist, Mark E. Lundy, Xinqiang Liang, Kees Jan van Groenigen, Juhwan Lee, Natasja van Gestel, Johan Six, Rodney T. Venterea, and Chris van Kessel.** 2015. “When Does No-till Yield More? A Global Meta-Analysis.” *Field Crops Research* 183 (Supplement C): 156–68.
- Place, George T., Samuel Chris Reberg-Horton, Jim E. Dunphy, and Adam N. Smith.** 2009. “Seeding Rate Effects on Weed Control and Yield For Organic Soybean Production.” *Weed Technology* 23 (4): 497–502.
- Porter, Paul, Gary Feyereisen, Jason De Bruin, and Gregg Johnson.** 2005. “No-till Organic Soybean Production Following a Fall-Planted Rye Cover Crop.” 2005. <http://www.systems-comparison.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1394-research-sustainable-systems.pdf>.
- Qi, Zhiming, and Matthew J. Helmers.** 2010. “Soil Water Dynamics under Winter Rye Cover Crop in Central Iowa.” *Vadose Zone Journal* 9 (1): 53–60.
- Reberg-Horton, S. Chris, Julie M. Grossman, Ted S. Kornecki, Alan D. Meijer, Andrew J. Price, George T. Place, and Theodore M. Webster.** 2012. “Utilizing Cover Crop Mulches to Reduce Tillage in Organic Systems in the Southeastern USA.” *Renewable Agriculture and Food Systems* 27 (Special Issue 01): 41–48.
- Reicosky, Don C., and Keith E. Saxton.** 2006. “Benefits of No-Tillage.” *No-Tillage Seeding in Conservation Agriculture / C.J. Baker ... [et Al.]*; Edited by C.J. Baker and K.E. Saxton. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201301937252>.
- Robb, David, Geoff Zehnder, Robin Kloot, William Bridges, and Dara Park.** 2018. “Weeds, Nitrogen and Yield: Measuring the Effectiveness of an Organic Cover Cropped Vegetable No-till System.” *Renewable Agriculture and Food Systems*, January, 1–8.

- Ryan, Matthew R.** 2010. “Energy Usage, Greenhouse Gases, and Multi-Tactical Weed Management in Organic Rotational No-till Cropping Systems.” The Pennsylvania State University. <https://etda.libraries.psu.edu/paper/11087/6783>.
- Ryan, Matthew R, William S Curran, Alison M Grantham, Laura K Hunsberger, Steven B Mirsky, David A Mortensen, Eric A Nord, and Dave O Wilson.** 2011. “Effects of Seeding Rate and Poultry Litter on Weed Suppression from a Rolled Cereal Rye Cover Crop.” *Weed Science* 59 (3): 438–44.
- Ryan, Robert L., Donna L. Erickson, and Raymond De Young.** 2003. “Farmers’ Motivations for Adopting Conservation Practices along Riparian Zones in a Mid-Western Agricultural Watershed.” *Journal of Environmental Planning and Management* 46 (1): 19–37.
- Schmidt, Jan H., Stephan Junge, and Maria R. Finckh.** 2019. “Cover Crops and Compost Prevent Weed Seed Bank Buildup in Herbicide-Free Wheat–Potato Rotations under Conservation Tillage.” *Ecology and Evolution* 9 (5): 2715–24.
- Silva, Erin, and Kathleen Delate.** 2017. “A Decade of Progress in Organic Cover Crop-Based Reduced Tillage Practices in the Upper Midwestern USA.” *Agriculture* 7 (5): 44.
- Silva, Erin Marie.** 2014. “Screening Five Fall-Sown Cover Crops for Use in Organic No-Till Crop Production in the Upper Midwest.” *Agroecology and Sustainable Food Systems* 38 (7): 748–63.
- Silva, Erin Marie, and Léa Vereecke.** 2019. “Optimizing Organic Cover Crop-Based Rotational Tillage Systems for Early Soybean Growth.” *Organic Agriculture*, February.
- Singh, Raghavendra, Subhash Babu, RK Avasthe, and GS Yadav.** 2018. “Integrating Conservation Agriculture in Organic Farming” 1: 16.
- Smith, Adam N, S. Chris Reberg-Horton, George T Place, Alan D Meijer, Consuelo Arellano, and J. Paul Mueller.** 2011. “Rolled Rye Mulch for Weed Suppression in Organic No-Tillage Soybeans.” *Weed Science* 59 (2): 224–31.
- Soane, Brennan D., Bruce C. Ball, Johan Arvidsson, Gottlieb Basch, Felix Moreno, and Jean Roger-Estrade.** 2012. “No-till in Northern, Western and South-Western Europe: A Review of Problems and Opportunities for Crop Production and the Environment.” *Soil and Tillage Research* 118 (January): 66–87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>.
- Teasdale, John R., and Charles L. Mohler.** 1993. “Light Transmittance, Soil Temperature, and Soil Moisture under Residue of Hairy Vetch and Rye.” *Agronomy Journal* 85 (3): 673–80.
- Teasdale, John R., Charles B. Coffman, and Ruth W. Mangum.** 2007. “Potential Long-Term Benefits of No-Tillage and Organic Cropping Systems for Grain Production and Soil Improvement.” *Agronomy Journal* 99 (5): 1297–1305.
- Teasdale, John R., Thomas E. Devine, Jorge A. Mosjidis, Robin R. Bellinder, and C. Edward Beste.** 2004. “Growth and Development of Hairy Vetch Cultivars in the Northeastern United States as Influenced by Planting and Harvesting Date.” *Agronomy Journal* 96 (5): 1266–1271.
- Tosti, Giacomo, Paolo Benincasa, Michela Farneselli, Roberta Pace, Francesco Tei, Marcello Guiducci, and Kristian Thorup-Kristensen.** 2012. “Green Manuring Effect of Pure and Mixed Barley – Hairy Vetch Winter Cover Crops on Maize and Processing Tomato N Nutrition.” *European Journal of Agronomy* 43 (November): 136–46.
- Triplett, Glover B., and Warren A. Dick.** 2008. “No-Tillage Crop Production: A Revolution in Agriculture!” *Agronomy Journal* 100 (Supplement_3): S-153.
- Uri, Noel D.** 2000. “Perceptions on the Use of No-till Farming in Production Agriculture in the United States: An Analysis of Survey Results.” *Agriculture, Ecosystems & Environment* 77 (3): 263–66.
- USDA-Economic Research Service (ERS).** 2015. Certified Organic Survey. Retrieve from <http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/nass/OrganicProduction//2010s/2016/OrganicProduction-09-15-2016.pdf>
- Vaisman, Iris, Martin H. Entz, Don N. Flaten, and Robert H. Gulden.** 2011. “Blade Roller–Green Manure Interactions on Nitrogen Dynamics, Weeds, and Organic Wheat.” *Agronomy Journal* 103 (3): 879–89.
- Vann, R. A., S. Chris Reberg-Horton, Hanna J. Poffenbarger, Gladis M. Zinati, Jeff B. Moyer, and Steven B. Mirsky.** 2017. “Starter Fertilizer for Managing Cover Crop-Based Organic Corn.” *Agronomy Journal* 109 (5): 2214–22.
- Vian, Jean F., Joséphine Peigne, Rémi Chaussod, and Jean Roger-Estrade.** 2009. “Effects of Four Tillage Systems on Soil Structure and Soil Microbial Biomass in Organic Farming.” *Soil Use and Management* 25 (1): 1–10.
- Villamil, Maria B., G. A. Bollero, Robert G. Darmody, William F. Simmons, and D. G. Bullock.** 2006. “No-Till Corn/Soybean Systems Including Winter Cover Crops.” *Soil Science Society of America Journal* 70 (6): 1936–44.
- Vincent-Caboud, Laura, Joséphine Peigné, Marion Casagrande, and Erin M. Silva.** 2017. “Overview of Organic Cover Crop-Based No-Tillage Technique in Europe: Farmers’ Practices and Research Challenges.” *Agriculture* 7 (5): 42.

- Vincent-Caboud, Laura, Léa Vereecke, Erin Silva, and Joséphine Peigné.** 2019. “Cover Crop Effectiveness Varies in Cover Crop-Based Rotational Tillage Organic Soybean Systems Depending on Species and Environment.” *Agronomy* 9 (6): 319.
- Wallace, John M., Clair L. Keene, William Curran, Steven Mirsky, Matthew R. Ryan, and Mark J. VanGessel.** 2018. “Integrated Weed Management Strategies in Cover Crop-Based, Organic Rotational No-Till Corn and Soybean in the Mid-Atlantic Region.” *Weed Science* 66 (1): 94–108.
- Wallace, John, Alwyn Williams, Jeffrey Liebert, Victoria Ackroyd, Rachel Vann, William Curran, Clair Keene, Mark VanGessel, Matthew Ryan, and Steven Mirsky.** 2017. “Cover Crop-Based, Organic Rotational No-Till Corn and Soybean Production Systems in the Mid-Atlantic United States.” *Agriculture* 7 (4): 34.
- Weber, Jonas, Christoph Kunz, Gerassimos Peteinatos, Sabine Zikeli, and Roland Gerhards.** 2017. “Weed Control Using Conventional Tillage, Reduced Tillage, No-Tillage, and Cover Crops in Organic Soybean.” *Agriculture* 7 (5): 43.
- Wells, Scott M., Carrie M. Brinton, and S. Chris Reberg-Horton.** 2015. “Weed Suppression and Soybean Yield in a No-till Cover-Crop Mulched System as Influenced by Six Rye Cultivars.” *Renewable Agriculture and Food Systems*, September, 1–12.
- Wells, M. Scott, S. Chris Reberg-Horton, and Steven B. Mirsky.** 2014. “Cultural Strategies for Managing Weeds and Soil Moisture in Cover Crop Based No-Till Soybean Production.” *Weed Science* 62 (3): 501–11.
- Williams, Alwyn, M. Scott Wells, David A. Dickey, Shuijin Hu, Jude Maul, Daniel T. Raskin, S. Chris Reberg-Horton, and Steven B. Mirsky.** 2018. “Establishing the Relationship of Soil Nitrogen Immobilization to Cereal Rye Residues in a Mulched System.” *Plant and Soil* 426 (1): 95–107.
- Wyse, Donald L.** 1994. “New Technologies and Approaches for Weed Management in Sustainable Agriculture Systems.” *Weed Technology* 8 (2): 403–7.
- Zikeli, Sabine, and Sabine Gruber.** 2017. “Reduced Tillage and No-Till in Organic Farming Systems, Germany—Status Quo, Potentials and Challenges.” *Agriculture* 7 (4): 35.
- Zinati, Gladis M., Rita Seidel, Alison Grantham, Jeff Moyer, Victoria J. Ackroyd, and Steven B. Mirsky.** 2017. “High-Residue Cultivation Timing Impact on Organic No-Till Soybean Weed Management.” *Weed Technology* 31 (2): 320–29.

Les connaissances scientifiques montrent l’enjeu clé lié à la combinaison couvert/culture pour maîtriser les adventices et assurer la performance de la culture de rente. Cependant, bien que les bénéfiques visés par le SDSC pour protéger les sols et améliorer leur fertilité soient reconnus, les résultats montrent aussi qu’il existe un **manque de connaissances** sur le choix des couverts associés aux modalités d’implantation (ex : date de semis, densité de semis), le matériel, la dynamique de l’azote, l’effet de la technique sur les composantes physiques, chimiques et biologiques du sol ou la performance économique d’une telle innovation.

3 Etat des lieux des connaissances empiriques produites autour de la technique dans le contexte français

3.1 Enquête en ligne

3.1.1 Description de l’enquête : Questionnaire et sélection de la base de données

La méthodologie retenue pour identifier les connaissances empiriques, a consisté à l’élaboration d’une enquête en ligne diffusable à grande échelle auprès d’agriculteurs français dans différents réseaux (AC, AB). L’enquête est restée ouverte pendant 6 mois (octobre 2017 - mars 2018) et visait à établir un inventaire des pratiques/essais réalisés par les praticiens sur la technique du SD.

Cette enquête, d’une durée de 10 minutes, était structurée en 4 parties :

- **description de l'exploitation** (Orientation technico-économique, mode de production, surfaces, types de sol, cultures, rotations types, pratiques de travail du sol),
- **motivations et moyens mobilisés pour mettre en place la technique** (documents ressources, personnes ressources, formations),
- **description des pratiques/essais conduits en SD** (fréquence du SD dans les rotations, cultures concernées, types de conduites, principaux résultats, matériels utilisés, difficultés),
- **principaux enseignements et perspectives** de la technique au sein de l'exploitation.

L'enquête a été diffusée à l'échelle nationale à partir de plusieurs méthodes :

- la mobilisation de différents réseaux : Agence Bio, Association BASE, Cerfrance, ITAB, chambres d'agriculture, GIEEs engagés sur des thématiques ABC, APAD, ADABIO, les bio du Gers (mise en ligne sur les sites internet ou diffusion du questionnaire par mail),
- la diffusion de mails à des listes de contacts ciblés à :
 - des producteurs céréaliers en AB (Agence Bio, forums, réseaux sociaux),
 - des groupes de producteurs orientés en AC (conseillers, forums, réseaux sociaux),
- « de bouche à oreille » lors de rencontres et d'échanges avec des producteurs (formations, visites d'essais, ateliers de conception),
- l'entretien téléphonique auprès de praticiens souhaitant décrire leur expérience avec cet outil.

Plusieurs critères ont été définis pour sélectionner la base de données, incluant des essais ou pratiques, passés ou actuels sans herbicide ou dans une logique de réduction d'herbicides, de :

- semis direct sous des résidus de cultures précédentes (SDSR),
- semis direct sous un couvert végétal vivant (SDSV),
- semis direct sous un couvert végétal broyé, roulé ou fauché (SDSM).

Toute présence d'intervention mécanique perturbant le sol entre la récolte précédente et le semis ou entre le couvert et le semis (ex : déchaumage, herse étrille, etc.) n'a pas été retenue. L'enquête repose sur un champ d'étude plus large que notre objet d'intérêt sur le SDSC puisqu'elle inclut également des techniques de semis dans les résidus de la culture précédente (sans couvert), afin de caractériser et comprendre dans quelle logique s'inscrivent les retours d'expériences par rapport aux différentes techniques de SD existantes. L'objectif était aussi d'identifier les connaissances mobilisées et produites par les praticiens qui parviendraient à gérer les adventices en SD sans couvert ni herbicide.

A partir de l'enquête, nous nous sommes intéressés à deux types de trajectoires des producteurs, ayant reporté une expérience sans herbicide, allant :

(1) d'un mode de production basé sur du travail du sol sans herbicide vers un souhait d'insertion de SD sans herbicide (en particulier des praticiens en AB ou en conversion) (**échantillon 1**),

(2) d'une production basée sur du SD à 100 % depuis 10-15 ans avec utilisation d'herbicides vers une volonté de poursuivre du SD en réduisant puis supprimant l'usage des herbicides. Ces praticiens sont appelés « agriculteurs en transition » dans la suite du manuscrit (**échantillon 2**).

Ces échantillons sont différenciés car le mode de gestion des pratiques/essais de SD sans herbicide, des praticiens en transition, repose sur une prise de risque plus faible puisqu'ils ne s'interdisent pas un rattrapage pour gérer des difficultés à contrôler les adventices (abandon de l'essai sans herbicide). Le cœur de l'analyse porte sur les connaissances produites par le premier échantillon, mais le regard apporté sur celles produites par le second, vise à valoriser l'expérience acquise sur plusieurs années qui, si l'hypothèse 1 est vérifiée, n'est pas disponible sans herbicide par manque de recul. Or, des auteurs montrent que la pratique du SD sur le long terme implique des changements profonds sur le sol, la gestion des adventices, ou même l'organisation du travail. Ainsi, l'analyse de l'échantillon (2) repose sur le postulat que des praticiens experts du SD depuis 10-15 ans apportent des connaissances utiles pour enrichir le capital de connaissances et développer des solutions sans herbicide pertinentes au-delà de leurs situations.

3.1.2 Méthode d'analyse de l'enquête

Deux types d'analyse ont été effectués à partir des retours d'expériences des praticiens :

- **une analyse quantitative descriptive** afin de caractériser précisément le domaine de validité des connaissances : localisation des exploitations agricoles, OTEX, types de sols, fréquence des essais et cultures étudiées.
- **une analyse qualitative pour répertorier les thématiques de connaissances** qui a permis :
 - d'identifier les thèmes les plus référencés et les manques de connaissances,
 - d'identifier les combinaisons couverts/cultures étudiées afin de caractériser les ITK ayant conduit à la production de connaissances. Les praticiens ont attribué une note de satisfaction des ITK testés allant de 1 à 5 (1 : « *les résultats ont été catastrophiques, je ne reconduirai pas cette technique* » ; 5 : « *les résultats ont été parfaits, je vais reconduire cette technique à l'identique* »).
 - D'analyser le contenu des connaissances par thématique et de dénombrer les plus citées afin de les confronter aux connaissances scientifiques et comprendre leurs rôles et leurs limites respectifs dans la mise en pratique de la technique.

3.1.3 Caractéristiques des échantillons sélectionnés pour l'analyse des connaissances

L'enquête en ligne a été un réel succès avec un **total de 493 réponses**. Parmi ces producteurs, 85 % sont orientés en AB, 8 % en agriculture conventionnelle et 7 % en cours de conversion biologique (Annexe 3). La SAU moyenne des exploitations est de 112 ha mais présente une forte variabilité (± 98 ha) et 84 % d'entre elles sont en système non irrigué. Parmi les praticiens orientés en agriculture

conventionnelle (échantillon 2), la majorité d'entre eux pratiquent du SDSC sur l'ensemble de leurs cultures depuis au moins 10 ans. Ils se permettent de réduire la quantité d'herbicides voire de supprimer ces derniers pour certaines cultures (céréales à paille d'hiver).

L'enquête montre que 59 % des praticiens sont orientés en polycultures-élevage (Figure 11). Ils souhaitent consacrer du temps aux autres activités de l'exploitation en libérant du temps passé sur les cultures. La prise de risque est moins importante pour la mise en œuvre d'un SDSC qui, en cas d'échec, pourra être valorisée en fourrage.

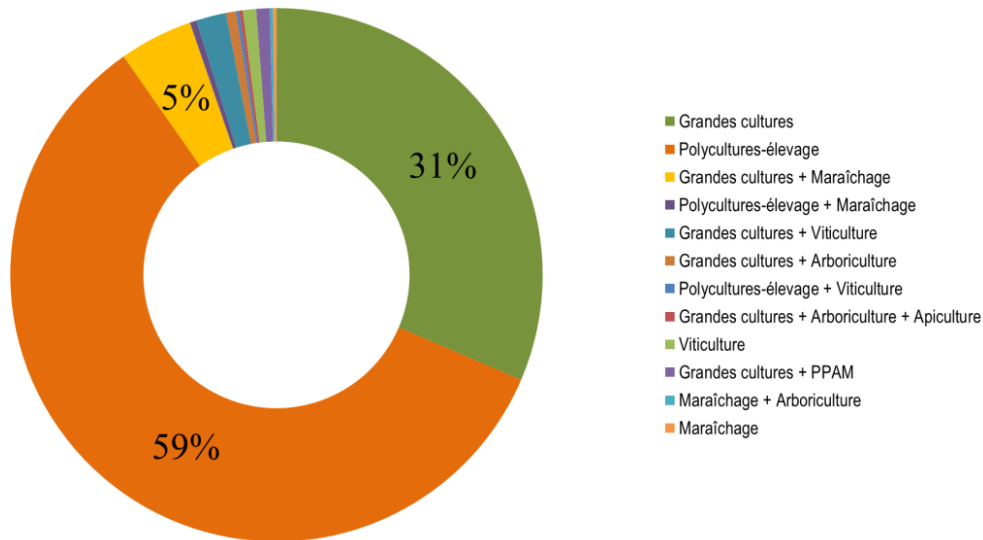


Figure 11: Orientation technico-économique des exploitations agricoles de l'enquête (n=493)

Dans l'enquête, 271/493 réponses ont été sélectionnées comme base de données pour l'analyse des connaissances. En effet, seulement 271/493 des participants avaient déjà fait au moins un essai de SD sans herbicide soit 55 % de l'échantillon total. Les réponses non retenues faisaient références à :

- des retours d'expériences sur des ITK comportant des déchaumages avant le semis, des techniques de travail du sol simplifiées sur l'ensemble de la surface du sol ou sur une bande de semis (ex : strip-till),
- des personnes intéressées pour tester la technique en recherche d'informations.

3.2 Contexte des retours d'expériences : Domaine de validité des connaissances

Les 271¹ réponses sélectionnées dans l'enquête sont composées en majorité de producteurs en AB qui ont engagé quelques essais sur la technique depuis 1-2 ans (50 %) et de producteurs en AB qui l'expérimentent depuis plusieurs années (> 3 ans) (27.5 %). L'échantillon est aussi composé de 8.5 % de producteurs en conversion AB qui débutent des essais (< 1-2 ans) et de 14 % de producteurs en agriculture conventionnelle qui pratiquent depuis 10-15 ans du SDSC.

¹ L'échantillon total : échantillon 1-sans herbicide (86 %) + échantillon 2-praticiens en transition (14 %).

La majorité des producteurs se situe dans le **sud de la France** en Occitanie (18.9 %), en Nouvelle-Aquitaine (16.2 %) et en Auvergne-Rhône-Alpes (15.2 %) (Annexe 3). Des températures élevées en été et de fortes pluviométries, comme en Nouvelle-Aquitaine, sont favorables au développement d'un couvert étouffant et à la bonne dégradation des résidus en surface. Toutefois, le réchauffement climatique suscite des inquiétudes, discutées par des praticiens du Gers, qui remettent en question l'avenir du SD lors de sécheresses qui affectent la productivité des couverts végétaux.

Les groupements de praticiens présents **en Occitanie et en Nouvelle-Aquitaine** autour du SDSC favorisent les échanges et peuvent expliquer les essais observés dans ces régions. En Occitanie, deux associations sont actives « Clé de sol » dans l'Aveyron et « Les Bios du Gers ». Clé de sol est membre de l'APAD et vise à encourager le partage d'expériences pour promouvoir l'AC. Le sol est repositionné au cœur des pratiques et l'intérêt de s'inscrire dans une démarche d'apprentissage est mis en avant. Les « Bios du Gers », quant à eux, encouragent une dynamique d'échanges autour des TCSL et de l'insertion de couverts en AB. En Nouvelle-Aquitaine, l'APAD centre-atlantique est présente dans le réseau des praticiens. Plusieurs GIEE, actifs sur des thématiques liées au SDSC, ont aussi été identifiés dans les Deux-Sèvres, la Creuse, la Corrèze, les Landes, les Pyrénées-Atlantiques et la Gironde (ex : GIEE Sol Vivant, GIEE Association Les Biaux Epis, etc.).

Enfin, **en Auvergne-Rhône-Alpes**, la forte dynamique régionale de production en AB peut expliquer les nombreuses initiatives des producteurs pour la recherche d'alternatives en SD sans herbicide pour faire face aux dégradations des sols qu'ils observent. Une diversité de structures encouragent les expérimentations sur la technique (ex : GEDA de l'Ozon, SMABB, ADABIO, BASE, ARDAB, etc.)

Les connaissances ont été produites sur **une diversité de types de sol**, dont les plus représentés sont les sols limono-argileux et argilo-calcaires (Figure 12). Ces résultats sont cohérents avec les travaux menés par Cavan et *al.* (2017) qui étudient les corrélations entre la texture de l'horizon travaillé du sol et la technique culturale (labour vs TCSL). Les auteurs montrent que les sols argilo-calcaires sont plus favorables aux TCSL. Ils observent aussi une corrélation entre des sols limono-argileux et un usage fréquent de TCSL. A l'opposé, les sols sableux et sablo-limoneux sont davantage utilisés en labour.

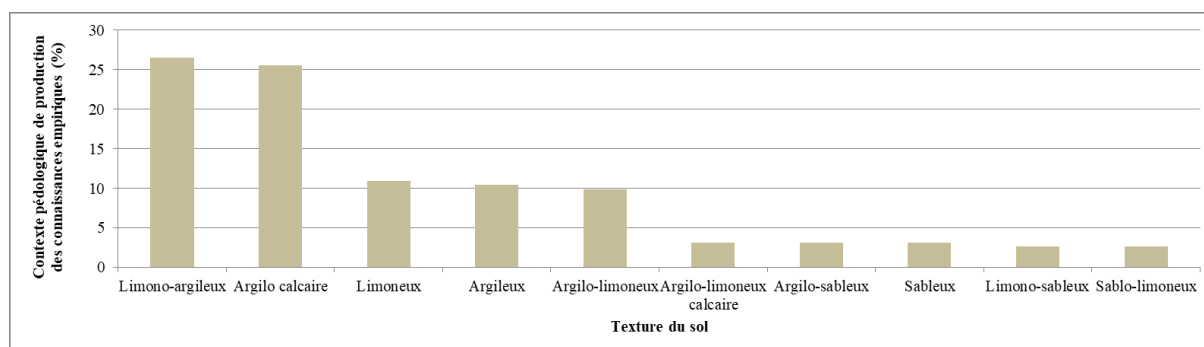


Figure 12 : Définition des différents types de sol sur lesquels ont été produites les connaissances empiriques

Les connaissances empiriques reposent plus sur de **petites expérimentations à l'échelle d'une parcelle** plutôt que sur des pratiques intégrées dans les exploitations (Figure 13). Les résultats montrent que 33 % des producteurs ont qualifié la fréquence de leurs pratiques en SD sans herbicide « *d'occasionnelle* » lorsqu'ils utilisent la technique sur certaines cultures et si les conditions optimales sont réunies en fonction du climat (ex : absence de sécheresse ou d'excès d'humidité), du sol (ex : sol ressuyé, sol argilo-calcaire), du niveau de pression des adventices et de l'état du couvert (ex : biomasse, homogénéité). Pour décrire le pilotage de leurs pratiques intégrant la technique, la plupart utilise le terme de « *gestion opportuniste* ». Les producteurs qui ont répondu « *régulièrement* » (17 %), pratiquent du SD sans herbicide sur une culture déterminée (ex : blé). La majorité de ces producteurs correspondent au sous-échantillon (2) (praticiens en transition). Ces praticiens pratiquent du SDSC en agriculture conventionnelle et parviennent à réaliser des impasses certaines années mais avec une solution de rattrapage possible à l'échelle de la rotation.

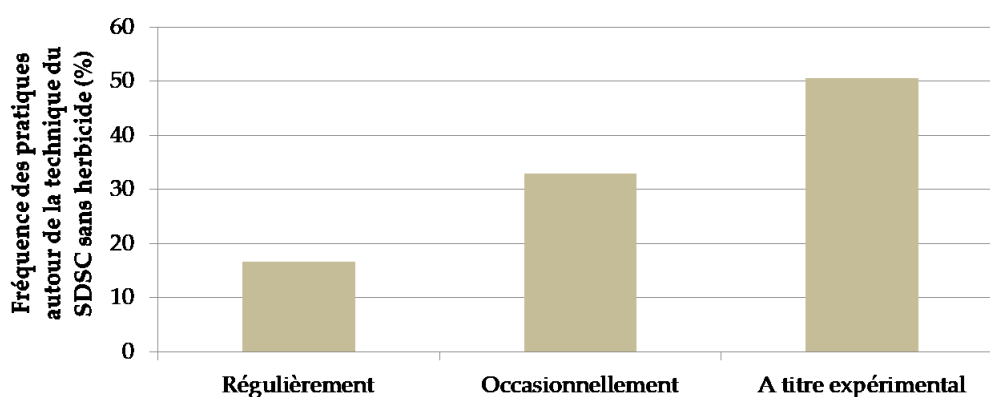


Figure 13 : Fréquence des pratiques réalisées par les producteurs de l'échantillon en semis direct sans herbicide (n=271)

Parmi les techniques de SD, les expériences reposent plus sur du **SD dans les résidus de la culture** précédente (SDSR) sans mobiliser de couverts (41 %) et de SD sous couverts vivants (39 %) que sur du SD sous un couvert maîtrisé (ex : roulage, broyage). Les praticiens reportent des difficultés à gérer des couverts sans travail du sol ni herbicide. Le SDSR est plus marqué dans le Sud-Est de la France où la sécheresse a été à l'origine de nombreux échecs dans l'implantation des couverts. Dans d'autres régions plus humides, telles que le sud-ouest de la France, les couverts sont davantage mobilisés mais c'est la difficulté à maîtriser un couvert vigoureux qui a été le plus mis en avant.

Les connaissances empiriques sont plus nombreuses sur **les cultures d'hiver**, en particulier les céréales à paille telles que le blé et le méteil, puisque respectivement plus de 50 et 40 agriculteurs ont reporté des expériences (Figure 14). Des semis de couverts, sans travail de sol, après la récolte ont aussi été répertoriés et reflètent plus de « *pratiques* » que d'essais. Les couverts et les prairies sont souvent semés en SD par manque de temps ou dans l'objectif de profiter de l'humidité du sol après la récolte.

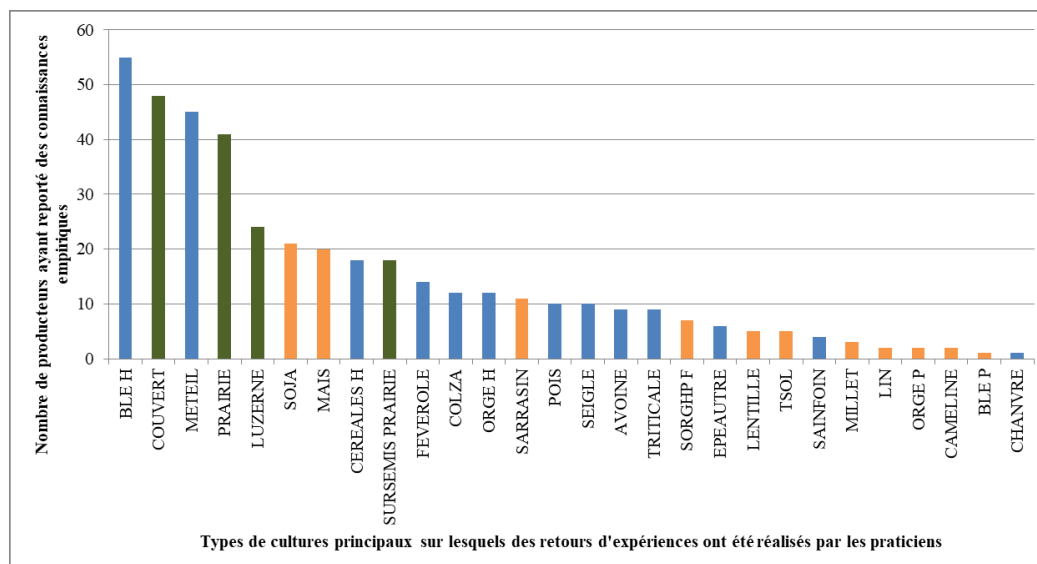


Figure 14: Nombre de retours d'expériences observé par culture dans l'échantillon 1 (N=233)

Les mêmes tendances sont observées pour les praticiens en transition. Le colza et le maïs sont cependant plus présents mais nécessitent souvent un rattrapage pour gérer le couvert et les adventices et donc un arrêt de l'essai conduit sans herbicide ni travail du sol. Ces cultures constituent une prise de risque élevée pour les praticiens orientés vers un mode de production sans herbicide et même si l'objectif est de pratiquer du SDSC sur ces cultures, peu le mettent en œuvre¹.

L'analyse montre que 93.5 % des connaissances de l'échantillon (1) correspond à l'échelle de l'ITK et seulement 6.5 % à des niveaux plus larges d'organisation de l'exploitation (ex : rotations culturales, débouchés, etc.). Les connaissances sont en majorité informelles. Elles s'appuient sur des observations réalisées sur des essais qui peuvent provenir de différentes expériences sans processus d'expérimentation structuré. Dans l'échantillon (2), les praticiens en transition ont plus effectué des retours d'expériences sur des échelles plus larges que l'ITK (18.6 %) mais les connaissances restent faibles. Pour ces praticiens, il s'agit de connaissances profanes, c'est-à-dire, issues des pratiques quotidiennes et d'une expertise acquise au cours de 10-15 ans de pratique en SDSC, en agriculture conventionnelle (connaissances plus développées sur les espèces du couvert, l'évolution du sol, etc.).

Les connaissances empiriques sont **nombreuses mais très éparses** et difficilement transposables en fonction du contexte pédoclimatique. Ces connaissances, s'appuient sur des itinéraires techniques conduits à titre expérimental et non sur des techniques inscrites dans les pratiques des producteurs. A l'inverse de la recherche, les connaissances empiriques sont en majorité produites au sein de techniques de semis de **cultures d'hiver** sous couvert vivant ou de semis de **couvert sous des résidus de cultures** précédentes. Pour **limiter la prise de risque**, de nombreux praticiens tentent de maîtriser la technicité du SD avec des couverts ou des prairies avant de le transposer à des cultures de rente.

¹ Parmi les producteurs non sélectionnés dans la base de données plus de 50 % d'entre eux ont pour projet d'expérimenter du semis de maïs ou soja sous couvert végétal roulé.

3.3 Quelles sont les connaissances empiriques issues du retour d'expériences des praticiens français ?

Les connaissances sont très éparpillées puisqu'elles sont liées à des contextes locaux spécifiques à un temps donné et ne sont pas reproduites aux mêmes endroits selon des modes opératoires similaires, rendant difficiles leur valorisation. Nous présentons dans cette partie un résumé des connaissances les plus citées par les praticiens.

3.3.1 Le couvert végétal perçu comme « la clé de voûte de la réussite du système »

Le couvert végétal a été l'une des thématiques les plus discutées et constitue l'un des premiers facteurs de réussite mais aussi d'échec de la technique (Tableau 2) (Annexe 4). Pour l'agriculteur id. 488, « *un couvert réussi garantit le résultat pour la suite. Sans couvert, le SD ne peut pas fonctionner, je suis convaincu de l'intérêt des couverts pour lutter contre les adventices, contribuer à une meilleure vie du sol, de sa fertilité et au final de sa résilience* ».

Tableau 2 : Fréquence des praticiens ayant reporté des connaissances sur les principales thématiques identifiées

Sous-échantillons	Couvert	Adventices	Sol	SD de la culture/levée	Rdt	Ravageurs	Matériel	Gestion de l'azote	Rotation	Organisation
-----%-----										
Sans herbicide	52.6	45.3	13.7	30.3	16.2	17.1	32.9	9.0	5.1	14.1
En transition	62.2	70.3	24.3	24.3	24.3	40.6	43.2	40.6	16.2	24.3

La pression des adventices sous le couvert doit être minimale dès le début de la conduite (Tableau 3). Pour cela, le **choix du type de couvert** est fondamental et la difficulté repose sur l'identification du couvert le plus adapté à une culture définie. L'enquête montre une diversité de couverts testés en fonction des cultures et inscrits dans des contextes pédoclimatiques différents complexifiant la généralisation de combinaisons couvert/culture (Annexe 5). L'enquête permet d'identifier 126 combinaisons couvert/culture pour les principales cultures (céréales à pailles, maïs, soja, tournesol et colza). Ces combinaisons sont difficilement comparables car les modes opératoires associés au contexte sont différents (gestion du couvert, outils, variétés, nombre d'espèces dans le couvert, etc.).

Les praticiens en transition mobilisent davantage le couvert que les producteurs inscrits dans des pratiques sans herbicide qui, par difficulté de maîtrise du couvert, se tournent plus vers du SD sous résidus de culture. Les praticiens en transition ont tendance à conduire des ITK sous des couverts multi-spécifiques vivants très diversifiés (ex. : pois, luzerne, trèfle blanc, vesce, radis chinois, lentilles, moutarde, sarrasin, sorgho, etc.). Ils ont développé depuis 10-15 ans des connaissances sur le comportement des espèces sous différentes conditions (sol, climat) leur permettant de valoriser les bénéfices qu'elles pourraient apporter en SDSC. Le choix des familles d'espèces repose souvent sur

des réflexions liées (1) à la restitution azotée des couverts, en intégrant des légumineuses, (2) à la structuration du sol, grâce au système racinaire du couvert de type Brassicacae (ex : moutarde, radis chinois), et (3) à l'effet allélopathique d'espèces (ex : seigle, sarrasin).

Les stratégies visées par les praticiens reposent sur la recherche d'« *une rapidité de levée, d'un maximum de carbone et de biomasse du couvert* » (id. 190) (Tableau 3) (Figure 15). Des producteurs ont observé qu'une fois couché sur le sol, le paillage doit avoir une épaisseur comprise entre 5 et 8 cm pour gérer les adventices. Pour atteindre une telle performance, « *il faut réussir l'implantation du couvert avec plus de soin que la culture elle-même* » (id. 3) et « *le couvert ne doit pas être la dernière roue du carrosse* » (id. 433). Le semis du couvert doit se faire dans de bonnes conditions (« *ni trop sec ni trop humide* » (id. 43)), avec des densités de semis plus élevées que les pratiques classiques et des dates de semis avancées. Pour le producteur id. 3, la biomasse du couvert visé est différente en fonction du couvert et de la culture. Par exemple, il cherche à obtenir 7 t.ha⁻¹ de MS pour un couvert de graminées avant un soja alors que dans le cas d'un couvert de légumineuses, il vise 9 t.ha⁻¹ de MS de couvert avant un maïs (Figure 16).



Figure 15: Couvert végétal composé d'un mélange de vesce et seigle, Ferme de Naroques, Gers (Photo: Andrew Cocup)



Figure 16: Couvert végétal "étouffant" de Sorgho fourrager, Ferme Larrous, Pays Basque (photo : Félix Noblia)

La difficulté d'implantation d'un couvert en période de sécheresse et de faibles fournitures du sol ont été discutées par plus de 56 % de l'échantillon (N=271) (Tableau 3). C'est pourquoi, des solutions basées sur de l'irrigation et/ou de la fertilisation du couvert sont souvent perçues comme des outils qui leurs permettraient de limiter la prise de risque et garantir un développement initial.

Enfin, plus de 51 % des praticiens ont souligné la variabilité de la maîtrise du couvert liée à sa forte dépendance aux conditions climatiques (Tableau 3). En condition humide, des pertes de rendements conséquentes sont reportées par les praticiens du fait de la vigueur du couvert non contrôlée. En l'absence de solution, beaucoup de praticiens préfèrent tester du SD sans couvert, même si la majorité montre que la présence du couvert est indispensable sans herbicide pour maîtriser les adventices.

3.3.2 La maîtrise des adventices : un challenge pour la faisabilité technique et économique

La maîtrise des adventices reste un challenge majeur de la réussite du SDSC sans herbicide. Elle est très discutée par les praticiens en lien avec la plus ou moins bonne efficacité du couvert à recouvrir le sol (Tableau 4). Les connaissances reportées font référence à la flore observée sur les parcelles (ex : vulpins, chiendents, rumex) et limitant la réussite de la technique. Les praticiens en transition observent des premières années difficiles pour gérer les adventices mais une amélioration progressive grâce à l'utilisation régulière de couverts comme l'illustrent les praticiens : « *J'ai l'impression qu'avec le temps on vide le stock de mauvaises herbes, on peut diviser par 2 l'herbicide voire faire des impasses* » (id. 168) ; « *côté glyphosate, voilà 2 ans que je m'en passe. Il est vrai qu'à part quelques ronds de chardons, je n'ai pas de gros problèmes de vivaces (chiendent ou liseron) car je travaille beaucoup avec les couverts mais, à suivre pendant des années plus difficiles au niveau climatique pour voir la résilience* » (id. 184). Les praticiens en transition expliquent que la flore adventice évolue et qu'il faut apprendre à gérer ces nouvelles espèces afin d'identifier un équilibre et limiter la compétition avec la culture. Cependant, hormis la recherche d'un couvert dense, les connaissances liées à des solutions de rattrapage permettant de gérer les adventices, sans herbicide ni travail du sol, sont faibles. Une infestation d'adventices jugée sévère par les praticiens aboutit souvent à l'abandon de l'essai avant la récolte (ex : broyage, fauchage, travail du sol, herbicide), limitant la production de connaissances sur l'ensemble d'un ITK.

Tableau 3: Connaissances empiriques relevées dans l'enquête en ligne relatives à la thématique des couverts végétaux¹

Connaissances sur les couverts végétaux	% des producteurs de l'enquête ayant explicité spontanément les connaissances
"La gestion du couvert dans des conditions humides est aléatoire (espèces comme le trèfle blanc difficiles à maîtriser, réchauffement du sol long, etc.) ce qui entraîne une prise de risque si tous les paramètres ne sont pas maîtrisés et notamment la période de floraison du couvert"	77.5
"Il faut identifier les espèces couvrantes qui apportent le plus de carbone et lèvent rapidement pour optimiser le recouvrement du sol et gérer les adventices"	73.8
"Le faible développement/l'hétérogénéité du couvert est lié à un manque d'azote et à la sécheresse (ex: la levée d'un couvert en été en périodes sèches est très aléatoire)"	56.5
"La maîtrise du couvert végétal n'est pas toujours efficace à cause des aléas (climat humide) et du faible accès aux équipements donc il faut apprendre à bien les gérer sans glyphosate et sans travail du sol"	51.7
"Semer plus dense le couvert permet de mieux maîtriser les adventices"	44.3
"Si le couvert est mal géré les repousses affectent le rendement"	34.3
"Dans le couvert végétal certaines espèces lèvent plus ou moins bien à cause de la sécheresse ce qui crée de mauvaises conditions de SD (plus d'adventices, moins d'humidité au sol, moins de biomasse restituée au sol)"	20.3
"Il faut semer les couverts plus tôt pour qu'il recouvre rapidement le sol"	19.6
"Si le couvert est propre avant le semis de la culture en SD, les résultats sont meilleurs, on démarre dans de bonnes conditions"	13.3
"Le prix et la disponibilité des semences en AB constituent un frein pour les producteurs pour atteindre des couverts performants"	7.7
"Un climat doux et humide est favorable à la vigueur du couvert mais entraîne des difficultés pour le maîtriser"	6.6
"La performance du couvert peut être stimulée par des apports organiques"	5.5
"La luzerne peut rapidement recouvrir le sol si elle est semée tôt en été et dense mais elle est difficile à maîtriser pour semer en direct une autre culture"	3.7
"Les couverts gélifs se salissent beaucoup plus facilement donc la prise de risque est plus élevée même si le roulage de couvert pendant les gelées peut s'avérer efficace"	3.0
"Une destruction trop tardive d'un couvert comme de l'avoine affecte le rendement de la culture suivante"	2.6
"Irriguer les couverts d'été après la moisson pour favoriser leur implantation et apporter une sécurité"	1.8
"En climat montagnard, il est difficile d'avoir des couverts étouffants comparé à un climat de plaine"	1.8
"Une pulvérisation de vinaigre peut aider à sécuriser le roulage ou il faudrait travailler sur un défoliant bio"	1.1
"Mettre en place un couvert estival si les conditions le permettent sinon conserver le couvert spontané"	1.1
"L'excès d'eau et/ou le froid à 1000 m d'altitude limitent le potentiel de productivité du couvert"	1.1
"Semer une espèce structurante comme un radis structurant au moment du semis d'un soja ou d'un maïs pour que le système racinaire suive le sillon du semis"	1.1

¹ Le manuscrit présente les tableaux des principales connaissances empiriques, reportées par les praticiens, uniquement pour les thématiques relatives aux couverts et aux adventices.

Tableau 4: Connaissances empiriques relevées dans l'enquête en ligne relatives à la thématique des adventices

Connaissances sur les adventices	% des producteurs de l'enquête ayant explicité spontanément les connaissances
"Trop d'adventices se sont développées et l'enherbement tardif affecte le rendement (vulpin, rumex, chiendent, chardon, renouée liseron, ambroisie, folle avoine, liseron des champs, panics, brome, rey grass, ravenelle)"	58.5
"Si le couvert est suffisamment dense et que le sol est bien recouvert, la pression des adventices peut être très limitée"	51.3
"La gestion des adventices est de plus en plus performante avec le temps (10-15 ans) car le stock semencier se vide avec le temps, en particulier les adventices annuelles ne sont pas problématiques"	15.9
"L'effet allélopathique du sarrasin et du seigle est intéressant pour gérer les adventices"	14.4
"La gestion des graminées en conditions humides est difficile"	8.9
"La présence de résidus sur le sol empêche la réalisation de rattrapage mécanique"	5.9
"La prise de risque est plus faible si le SD est réalisé sur des parcelles où le stock semencier d'adventices initial est faible, les résultats sont meilleurs"	5.2
"Un climat doux et humide est favorable à la prolifération des adventices"	3.3
"Si le salissement est trop élevé, si cela est possible, valoriser le couvert ou la culture via un élevage (fourrage ou différentes coupes) limite la prise de risque"	3.0
"Certains outils peuvent permettre d'intervenir en présence de résidus pour gérer les adventices (ex: étrille rotative)"	3.0
"Si le couvert une fois couché sur le sol est épais de 5-8 cm il y a très peu d'adventices"	3.0
"Si la présence de résidus sur le sol est faible, un passage de herse étrille, si nécessaire lors de la levée du couvert, améliore la maîtrise des adventices"	2.6
"Pour limiter la prolifération des adventices, il faut éviter de travailler le sol pour implanter le couvert"	2.2
"Si le SD génère trop de salissement, il peut être géré l'année suivante par un fauchage"	1.1
"Après un SD si cela est nécessaire (pression des adventices élevée) nettoyer la parcelle après la récolte avec le passage d'un outil peut aider à gérer ensuite le niveau de pression adventice sur la parcelle pour éviter de se laisser dépasser"	1.1

3.3.3 Le semis direct de la culture principale : une opération technique de mise en œuvre encore très aléatoire et pauvre en connaissances

3.3.3.1 Les principales combinaisons couverts/cultures

Les connaissances reposent en particulier sur des cultures d’hiver représentant 73 % des ITK reportés dans l’enquête (dont 75 % de céréales à pailles, 21 % de légumineuses et 4 % de crucifères). L’ensemble des ITK a été catégorisé en fonction des combinaisons couverts/cultures. Cette partie se centre sur les cultures les plus représentées dans l’enquête : les céréales d’hiver (blé, orge, méteil, triticale, épeautre, seigle), le colza d’hiver et les cultures de printemps (maïs, soja, tournesol) (Tableau 5). Pour ces cultures, 84 combinaisons couverts/cultures ont été reportées dans le sous-échantillon (1) sans herbicide et 42 dans le sous-échantillon (2) (Annexe 5).

Tableau 5 : Nombre de retours d'expériences en semis direct sans herbicide pour les cultures les plus représentées dans l'échantillon total (N=271)¹

Cultures	sous-échantillon (1) - sans herbicide (N=233)		sous-échantillon (2) - en transition (N=38)	
	Nb d'ITK identifiés	Satisfaction moyenne des praticiens (échelle de 1 à 5) ¹	Nb d'ITK identifiés	Satisfaction moyenne des praticiens (échelle de 1 à 5) ¹
Blé	51	2.9	41	3.9
Méteil	38	3.1	4	3.3
Céréales	15	2.3	5	3.4
Orge	10	3.4	21	3.5
Avoine	8	3	2	2.5
Triticale	8	3.4	2	3.5
Colza	8	2.1	20	3.2
Epeautre	6	2.8	/	/
Seigle	6	2.2	/	/
Maïs	23	2.4	14	3.5
Soja	17	2.8	11	4.1
Tournesol	3	1	4	2.5

¹ Moyenne de la note de satisfaction des praticiens sur une échelle allant de 1 à 5

3.3.3.1.1 Les cultures d’hiver : Les céréales et le Colza

Les ITK menés sur les céréales d’hiver conduisent aux résultats les plus satisfaisants avec une note² moyenne voisine de 3/5 (Tableau 5). Les essais réalisés sans herbicide sur les céréales à pailles reposent principalement sur des semis de blé sous couvert vivant de luzerne et trèfle ou dans des résidus de cultures. Le trèfle blanc nain n’apparaît pas comme un couvert adapté puisqu’il génère une compétition trop excessive avec la céréale dès la levée et en sortie d’hiver. Les producteurs apprécient la capacité de la luzerne à rapidement s’implanter en été pour occuper le sol, concurrencer les adventices et enrichir la fertilité du sol. Cependant, les levées du blé sont hétérogènes à cause de la

¹ Le détail des combinaisons couverts/cultures n’est pas présenté dans le manuscrit (Annexe 5).

² La note comprise entre 1 et 5 correspond au niveau de satisfaction des praticiens vis-à-vis des résultats obtenus avec les ITK explicités.

compétition qu'exerce la luzerne vis-à-vis de la lumière en recouvrant le sol et de la difficulté à gérer l'espèce sans travail du sol. De plus, des dégâts de limaces ont été relevés et la récolte de blé est souvent infestée d'adventices nécessitant un tri important. Les producteurs ayant testé des fauchages ou roulages sur l'espèce, avant le semis du blé, n'ont pas été satisfaits car les repousses ont affecté le rendement. Les praticiens en transition ont tendance à moins planter le blé dans la luzerne du fait de la difficulté à maîtriser cette espèce pérenne et se tournent plus sur des trèfles d'Alexandrie ou trèfle violet qui possèdent un potentiel de développement végétatif moins important. D'autres couverts plus spécifiques sont mobilisés par ces praticiens (ex : moha/féverole/trèfle d'Alexandrie ou pois fourrager/pois chiches/féverole/vesce/avoine/phacélie/radis fourrager/moutarde) permettant d'améliorer la densité du couvert et le recouvrement du sol. Ces couverts multi spécifiques peuvent néanmoins être plus difficiles à gérer en l'absence d'herbicides dans la rotation.

Les praticiens en transition sèment le blé davantage dans des couverts multi spécifiques composés d'espèces telles que du pois, de la féverole ou de la moutarde. Dans le cas où les couverts sont suffisamment épais, ils sont roulés et les producteurs se permettent de réduire, voire de se passer d'herbicide sur l'ensemble de l'ITK. Quelques difficultés résident toutefois selon la quantité de résidus présente sur le sol pour assurer le contact graine-sol, lors du semis de petites graines tel que le blé.

Les SD de blé dans les résidus de cultures conduisent à des résultats très variables en fonction des conditions. La présence de limaces, le manque d'azote et le développement d'adventices (ray grass, brome) sont les principaux facteurs d'échecs cités. Pour gérer les adventices, certains producteurs réalisent un désherbage mécanique mais l'efficacité de ces interventions reste très aléatoire à cause des résidus présents sur le sol.

Les expériences relevées sur le méteil ont été reportées par des éleveurs, avec une implantation dans des couverts pâturés, fauchés ou après enrubannage. Les éleveurs observent de bonnes levées du méteil, sauf en cas de sécheresse, où les levées peuvent être plus hétérogènes. Quels que soient les couverts utilisés (résidus de culture, trèfle, luzerne, repousses de sorgho, prairie pâturée ou broyée), les éleveurs sont satisfaits puisque les notes moyennes attribuées par combinaison couvert/culture sont toutes supérieures à 2.85/5. Ce résultat peut s'expliquer par une plus faible exigence de maîtrise des adventices des éleveurs. Ils économisent du temps de travail en SD pour le consacrer à l'élevage et ils observent une bonne qualité du méteil pour le fourrage. Par ailleurs, leur gestion du couvert leur permet aussi de le valoriser par l'élevage (ex. : pâturage ou fauche).

La plupart des retours sur le colza ont été apportés par les praticiens en transition. Les producteurs du sous-échantillon 1 qui l'ont testé ne sont pas satisfaits car le colza est rapidement dominé par le couvert non maîtrisé ou détruit par des ravageurs. Cependant, ces conclusions reposent sur un très faible nombre de références et l'utilisation de trèfle blanc en tant que couvert représente encore ici une forte source de concurrence hydrique avec le colza.

3.3.3.1.2 Les cultures de printemps

Peu d'expériences ont été relevées sur le maïs (23 retours d'expériences) (Tableau 5). Les ITK testés ont conduit à de nombreux abandons à cause du développement d'adventices jugé sévère, du faible réchauffement du sol sous la biomasse du couvert et d'une faible minéralisation de l'azote. Pour les praticiens en transition, il est plus difficile de supprimer le glyphosate sur le maïs en SD car il est plus sensible à la compétition des adventices, générant une variabilité importante des résultats. Différentes combinaisons couverts/cultures ont été testées, mais seulement par un ou deux producteurs, d'où une interprétation des phénomènes observés à nuancer. Les notes de satisfaction les plus élevées ont été attribuées à des couverts de pois fourrager ou de féverole roulés (4/5) par 2 producteurs. A l'inverse, un semis sous des couverts de phacélie, de radis, de graminées (avoine x seigle roulé), de prairie ou des mélanges d'espèces ont conduit à des notes inférieures à la moyenne car ils ont concurrencé le maïs et moins maîtrisé les adventices, affectant considérablement les rendements.

Les 28 retours d'expériences sur le soja reposent plus sur des SD sous couverts de céréales roulés que des couverts vivants (Figure 17). Les premiers résultats sont prometteurs dès que le SD est associé à un couvert épais permettant de gérer les adventices (satisfaction > 3.5/5). En revanche, les semis sous chaumes de céréales génèrent des levées plus aléatoires et plus d'enherbement en raison d'un recouvrement faible du sol (satisfaction < 2/5). Les rendements ont également été affectés avec des couverts de seigle et vesce en mélange, difficile à maîtriser (satisfaction = 2/5).



Figure 17 : Culture de soja semée sous un couvert végétal de seigle roulé, EARL Philippe Nouvellon, Tarn (Photo : Philippe Nouvellon)

Les producteurs ayant testé la culture de tournesol (sous trèfle blanc, couvert multispécifique vivant ou roulé), ont aussi très peu de recul (7 retours d'expériences) (Tableau 5). Sans herbicide, les dégâts de limaces et l'infestation d'adventices affectent les rendements. Les résultats ne sont pas concluants car la note moyenne de satisfaction est de 1/5 pour cette culture. Les essais menés par les praticiens en transition mettent en avant l'irrégularité des résultats selon les années et le lent réchauffement du sol affectant la levée. Un seul producteur souligne un résultat positif sur la maîtrise des adventices avec un

paillage épais obtenu à la suite du roulage d'un couvert d'avoine, bien que le rendement du tournesol ait été un peu réduit à cause du retard de destruction de l'avoine.

3.3.3.2 *L'implantation des cultures*

Les praticiens relèvent des levées lentes entre les stades 3 et 8 feuilles à cause du lent réchauffement du sol et de la barrière physique créée par le couvert. Le déficit hydrique est aussi un facteur limitant, discuté pour l'implantation du couvert à l'automne et de la culture au printemps, puisque 80 % des participants ne disposent pas d'un système d'irrigation. Ces difficultés sont à l'origine d'une variabilité sur la levée, se répercutant sur les rendements, souvent inférieurs aux pratiques traditionnelles. Les praticiens en transition montrent que dans leurs pratiques en agriculture conventionnelle, les rendements se stabilisent avec le temps en SDSC au bout de 10-15 ans. Pour eux, ce phénomène peut s'expliquer par le meilleur enracinement de la culture qu'ils observent, après plusieurs années, grâce à une structuration du sol, créée par les racines des couverts.

Les connaissances sur les modalités techniques d'implantation sont faibles (ex : inter-rang, fertilisation, matériel). Les producteurs expliquent que la culture doit être semée à plus forte densité en utilisant des variétés précoces. En effet, pour assurer le semis de la culture dans de bonnes conditions (sol réchauffé et ressuyé), le semis est souvent plus tardif du fait de la présence du couvert qui ralentit le réchauffement du sol. Par ailleurs, des stratégies de fertilisation localisée lors du semis pourraient accélérer la levée même si le matériel coûteux nécessaire limite cette solution.

Enfin, l'enquête met en avant l'absence de solution de rattrapage en cas de prolifération d'adventices ou de couverts non contrôlés, affectant les rendements. Ainsi, 20 % des producteurs ont mentionné tester/pratiquer du SDSC de manière opportuniste (lorsque toutes les conditions sont réunies : faible pression des adventices, potentiel agronomique du sol élevé, couvert développé et conditions climatiques idéales).

3.3.4 **Une technique qui repose sur l'enrichissement et la valorisation du potentiel agronomique des sols**

Plus de 51 % des producteurs de l'échantillon observent des effets du SDSC sur la vie du sol, notamment sur l'abondance des vers de terre grâce à l'intégration de couverts, comme l'illustre le producteur id. 119 « *mon sol vit et moi j'économise du fuel et des heures de tracteurs* ». Les connaissances sur le sol sont faibles mais celui-ci est souvent considéré, derrière les adventices et le couvert, comme un facteur explicatif des difficultés rencontrées (ex : mauvais contact graine-sol, type de sol hétérogène, faible teneur en MO, faible taux de minéralisation). Malgré les bénéfices observés sur le nombre de vers de terre ou l'enrichissement du sol en MO, la présence du couvert sur le sol ralentit le réchauffement du sol. Des producteurs indiquent aussi des phénomènes de tassement du sol lors des premières années, liés à l'absence de mécanisation. Les résultats permettent d'identifier des

contextes limitants pour la réussite de la technique : climat montagnard (températures basses et sols pauvres en MO), sols argilo-limoneux, sols humides et acides, sols sableux, sols argileux en conditions humides, parcelles hétérogènes. Pour les praticiens, la fenêtre d'implantation est réduite en SDSC car les conditions de semis optimales reposent sur des semis en périodes « *ni trop sèches, ni trop humides* », sur des terrains sans pente et pauvres en cailloux, et sur des sols riches en MO et meubles. L'action du climat sur l'activité biologique du sol, notamment en période de sécheresse, a été beaucoup rapportée. Par exemple, pour le praticien id. 79, « *la gestion du SD est difficile à cause des sécheresses persistantes imprévisibles, possibles à toutes périodes de l'année, bloquant l'activité du sol, suivi d'excès de précipitations (orages liés au climat montagnard et/ou des phénomènes cévenols liés au climat méditerranéen) entraînant le lessivage des éléments fertilisants et l'érosion des sols* ».

Les connaissances explicitées sur le sol par les praticiens en transition, montrent l'importance de mettre en place la technique sur un sol riche en activité biologique pour favoriser les interactions entre la culture, le couvert et les adventices. Pour le producteur id. 488 « *il est primordial de remettre le sol au cœur de la pratique* ». Cependant, la plupart des praticiens du sous-échantillon (1) sans herbicide mobilisent le SDSC dans l'objectif d'améliorer le potentiel de sols pauvres (ex : augmenter la MO, les microorganismes, etc.) expliquant les difficultés observées vis-à-vis de la faible disponibilité de l'azote. Pour le praticien id. 303, « *c'est une méthode qui, je pense, a de l'avenir mais il faut laisser le temps à la terre de retrouver un équilibre car on l'a épuisé avec les labours* ».

La gestion de l'azote est peu référencée dans les données de l'enquête. La majorité des connaissances repose sur le ralentissement de la minéralisation, causé par la biomasse du couvert présent sur le sol. D'après le praticien id. 141, « *il y a une limite au niveau de l'alimentation en azote. C'est vraiment le principal axe de travail pour du SD en AB* ». Des idées sont suggérées et testées par les praticiens telles que des apports organiques sur des couverts, la recherche d'engrais starter bio (ex : compost, thé de compost, etc.) ou la fertilisation localisée sur la ligne de semis. Cependant, ces solutions sont confrontées à des barrières réglementaires ou de contraintes matérielles limitant le champ d'applications de ces leviers quant à leur faisabilité.

3.3.5 Le matériel agricole : des performances très dépendantes du contexte pédoclimatique

La faible disponibilité de matériels, en particulier des semoirs SD, qui permettraient d'assurer le contact graine-sol en présence d'un couvert sur le sol, a été reportée à de nombreuses reprises (56.5 % de l'échantillon) (Figure 18). En l'absence de semoir SD, les praticiens utilisent le matériel classique dont ils disposent pour leurs essais ou font appel à des entrepreneurs, les rendant dépendant des dates de semis, malgré des fenêtres d'implantation optimales réduites en SDSC. Les semis en SDSC sans herbicide sont donc souvent conduits dans de mauvaises conditions pédoclimatiques. L'effet du choix du semoir apparaît aussi déterminant pour la réussite telles que l'illustrent ces citations : « *Je mise sur mon semoir pour concrétiser ma vision sur le SD* » (id. 190) ; « *Il me manque un semoir spécifique*

pour aller plus loin » (id. 38) ; « *il y a beaucoup de résidus de surface et je n'ai pas de semoir adapté donc la levée a été très moyenne et décevante* » (id. 430).



Figure 18 : Semis de féverole sous une importante biomasse du couvert (> 9 t/ha de MS), GAEC de Montoux, Ain (Photo : Jérôme Commaret)

Quelques connaissances portent sur des semoirs spécifiques mais elles sont très éparses. Pour les praticiens, les semoirs à disques semblent plus satisfaisants que des semoirs à dents ou à sabots, entraînant le bourrage des résidus en surface. Cependant, en fonction des conditions, des avis contrastés sont relevés. Par exemple, en conditions sèches dans un climat méditerranéen, un producteur évoque l'intérêt d'un outil à dent sur la ligne de semis pour créer de la terre fine sur le sol qui peut être dur et sec au printemps. Hormis le type de semoir SD, peu de connaissances sont notées sur les réglages à privilégier en fonction d'un contexte donné. Quelques producteurs soulignent l'importance de ralentir la vitesse de semis pour améliorer la qualité d'implantation des graines.

Pour la gestion du couvert, le rouleau et le broyeur ont été les plus présents mais peu de détails techniques sont explicités sur ces outils. Les rouleaux FACA ® sont perçus comme des outils permettant de gérer les couverts sans herbicide mais leurs coûts restent élevés et la solution d'auto-construction semble être privilégiée. L'un des praticiens s'est inspiré de travaux scientifiques pour construire son rouleau et il a observé des conditions de roulage plus favorables que d'autres. Par exemple, outre la période de roulage à réaliser lors de la floraison du couvert, il a aussi constaté une maîtrise des graminées plus efficace lorsque le roulage est réalisé après une fine pluie, lorsque le couvert est légèrement humide. Ce résultat est à coordonner avec la nécessité de réaliser le semis sur un sol suffisamment ressuyé pour éviter le tassement du sol et assurer la qualité du semis.

3.3.6 Le semis sous couvert : un milieu favorable au développement des ravageurs des cultures

La question des ravageurs est préoccupante pour 50.9 % de l'échantillon et ressort chez les praticiens en transition qui utilisent davantage les couverts dans leurs pratiques. Les ravageurs les plus cités sont les limaces et les rongeurs. Quelques solutions sont utilisées pour lutter contre les ravageurs telles que la mise en place de poteaux en pourtour de parcelles pour attirer les prédateurs des rongeurs (les

buses), l'utilisation d'anti limaces (SluXX), même si leur efficacité est contrastée selon les conditions. Sur le long terme, quelques praticiens en transition ont observé la construction de phénomènes de régulation biologique avec la réduction d'insecticides en travaillant sur la rotation et le choix d'espèces favorables aux auxiliaires des cultures (ex : phacélie, trèfle violet, etc.).

3.3.7 La gestion de la rotation culturale

Les connaissances sur la construction d'une rotation intégrant du SDSC sans herbicide ont été peu alimentées. Quelques praticiens en transition, précisent qu'il est nécessaire de repenser la place des cultures dans la rotation (ex : enlever la luzerne difficilement maîtrisable sans travail du sol ni herbicide, revoir la place du maïs, etc.). La maîtrise des graminées et des espèces pérennes est problématique à l'échelle de la rotation et peu de solutions sont disponibles (reportés par 17.6 % des praticiens). Des leviers agronomiques à mobiliser, ont été cités, en vue d'atteindre un équilibre entre le sol, les espèces cultivées, et la vie du sol pour gérer les adventices et contrôler les ravageurs : allongement des rotations, alternance des cultures de printemps et d'hiver, mobilisation de différents couverts pour chaque culture de la rotation ou intégration de couverts denses et étouffants.

3.3.8 Transition vers du semis sous couvert sans herbicide : un processus d'apprentissage à différents niveaux d'organisation

Les connaissances sont focalisées sur des combinaisons techniques à l'échelle annuelle et très peu portent sur de plus larges niveaux d'organisation de l'exploitation. Pour avancer sur cette technique, 10 % des praticiens soulignent la nécessité de mettre en place des groupes d'entraides et d'échanges en remettant l'élevage au centre des pratiques pour limiter la prise de risque. Les résultats montrent que 48 % des praticiens pensent que cette technique repose sur un apprentissage continu au regard de la complexité des interactions en constante évolution (compétitions entre le couvert, les adventices et la culture, influence du contexte pédoclimatique, etc.). Pour ces praticiens, l'insertion de la technique est un processus long car elle remet en cause une multitude de facteurs et fait appel à des connaissances et des compétences locales qui n'existent pas (ex : semis dans un sol couvert épais). Quelques citations illustrent les notions d'« *apprentissage* », de « *connaissances* » et de « *persévérance* » employées spontanément au moins une fois par la plupart des praticiens : « *C'est très prometteur, mais il faut comprendre ce que l'on fait, se former, sinon on peut se planter* » (id. 264) ; « *j'ai encore beaucoup à apprendre mais je reste optimiste* » (id. 461) ; « *je veux continuer mon apprentissage sur le moment le plus opportun pour le semis et sur le comportement des différentes espèces* » (id. 201) ; « *J'ai déjà participé à de nombreuses formations, visites 'bout de champ'. Ces échanges sont indispensables pour comprendre ce qui se passe dans nos parcelles, pour éviter de faire 2 fois de suite les mêmes erreurs et avancer sans perdre espoir* » (id. 184) ; « *il faut persévérer pour trouver un équilibre économique* » (id. 303) ; « *je vais essayer de persévérer dans ce système en AB* » (id. 322). D'après les praticiens en

transition, il faut dans un premier temps essayer de se passer d'herbicides en SD conventionnel plutôt que maîtriser un SD chimiquement puis passer en AB et vouloir intégrer du SD.

Pour les praticiens, **le couvert est l'un des principaux piliers de la réussite** du SDSC sans herbicide pour assurer la maîtrise des adventices. Les praticiens mobilisent différentes stratégies pour stimuler la production de MS des couverts (ex : couverts multi spécifiques, densité de semis, variétés, etc.). La maîtrise du couvert sans herbicide ni travail du sol constitue un frein encore important qui amènent souvent les praticiens à semer la culture soit, sous un couvert vivant soit, à préférer un SD sous des résidus de cultures. Enfin, **l'enjeu technique que représente l'implantation d'une culture sous une biomasse végétale élevée**, présente sur le sol, est souvent à l'origine d'échecs reportés par les praticiens en raison de l'absence d'accès à un semoir SD adapté. La prise de risque relative à l'investissement nécessaire pour l'acquisition d'un semoir SD est élevée pour expérimenter du SDSC sans herbicide qui n'est à ce jour pas inscrit dans les pratiques quotidiennes des praticiens. Lorsqu'ils n'ont pas l'opportunité d'emprunter un semoir SD à proximité, les praticiens utilisent leur propre matériel qu'ils ajustent en fonction de leurs observations (ex : ajout de chasses débris, ajout de dents pour créer plus de terres fines sur la ligne de semis en conditions sèches, etc.).

4 Discussion

4.1 De plus en plus d'intérêts sur le semis direct sous couvert sans herbicide

Les parties 2 et 3 montrent que les connaissances scientifiques et empiriques sur le SDSC sans herbicide sont récentes et possèdent donc peu de recul. Peu de publications scientifiques ont été identifiées et les connaissances empiriques sont issues d'essais exploratoires et « opportunistes » conduits sur de petites surfaces. Cependant, les résultats montrent des perspectives et **des intérêts croissants des acteurs** pour le développement de connaissances. En recherche, le nombre de publications a augmenté ces dernières années, encouragé par les enjeux présents autour de la dégradation des sols et de l'utilisation du glyphosate (Keene et al., 2017; Silva and Delate, 2017; Wallace et al., 2017, 2018). Chez les praticiens, le nombre élevé de participations à l'enquête confirme leurs intérêts et leurs motivations pour la technique, soulignés aussi dans la littérature (Casagrande et al., 2015; Crowley, 2017). Quelques citations de praticiens de l'enquête illustrent cette motivation :

-« C'est un vrai sujet, surtout en bio. Nous espérons beaucoup de vos travaux »

-« Je suis très intéressé par le SDSC mais pas encore expérimenté, j'attends d'avoir plus de références. »

-« Je souhaite m'investir dans cette technique, et j'ai beaucoup à apprendre »

-« Je pense que tout se fera en SD à l'avenir, je commence à chercher un ou des successeurs et tous veulent travailler ainsi »

-« Je suis heureux que vous cherchiez dans ce domaine qui est trop peu exploré et pourtant très prometteur pour faire face aux difficultés climatiques naissantes et au souhait de réduire les passages d'engins aux champs.

-« D'un point de vue vie du sol, fertilité et limitation du nombre de passages d'engins, je pense que le SDSC a de l'avenir mais je n'ai pas encore eu l'audace de l'essayer. Je suis très intéressé par le sujet. »

-« Je ne pratique pas, mais ça m'intéresserait beaucoup de le faire. Je serai très intéressée par votre étude ! »

-« C'est quelque chose qui m'intéresse et j'aimerais avoir connaissance de retours d'expériences à ce sujet. »

4.2 Domaine de validité des connaissances

Ce chapitre confirme notre hypothèse H1 qui stipule qu'il existe des connaissances empiriques et scientifiques **de natures différentes** mais celles-ci sont difficilement comparables. L'analyse de ces connaissances, remet en question les définitions qui leurs sont souvent attribuées dans la littérature vis-à-vis des caractéristiques « généralistes » des connaissances scientifiques et à l'inverse « locales » des connaissances empiriques.

Les connaissances scientifiques sont issues de processus formalisés produits en majorité dans un même contexte, rendant difficile la généralisation des résultats obtenus. Ces connaissances sont produites principalement en Amérique du Nord sur des sols limoneux fins ou sablo-limoneux. A l'opposé, les connaissances empiriques proviennent d'une diversité de contextes pédoclimatiques. Bien que celles-ci soient faibles, il existe des références sur de nombreux types de sols (11 types de sols) et de climats. Cette diversité pourrait permettre une meilleure généralisation des connaissances pour augmenter leur domaine de validité. Cependant, ces connaissances sont difficilement accessibles par la communauté scientifique car elles correspondent à des connaissances de types informelles, c'est-à-dire, issues de processus non formalisés (Leitgeb et *al.*, 2011; Raymond et *al.*, 2010; Vogl et *al.*, 2015; Wilbois et *al.*, 2004). Les connaissances empiriques existantes sur la technique sont peu valorisables en recherche et peu reproductibles par d'autres praticiens.

Par ailleurs, les connaissances scientifiques et empiriques **n'ont pas été produites sur les mêmes cultures**. La recherche concentre ses efforts sur deux cultures de printemps, le soja et le maïs, dominantes dans les assolements Nord-Américains. Le domaine de validité de ces connaissances est limité si l'objet d'étude s'inscrit au sein de systèmes de production plus diversifiés et d'autres climats comme en Europe (Bilalis et *al.*, 2012; Peigné et *al.*, 2015; Vincent-Caboud et *al.*, 2017). Même s'il s'agit d'un objectif pour les praticiens de pratiquer du SDSC sur des cultures de printemps pour réduire le coût des interventions (ex : faux semis, désherbages mécaniques, etc.), la prise de risque est plus élevée. Ainsi, les connaissances empiriques sont davantage issues de combinaisons techniques menées sur des céréales à paille d'hiver (blé, triticale, épeautre). Malgré un faible nombre de références par culture, il existe une diversité de cultures testées par les praticiens qui ne sont pas documentées en recherche (ex : colza, lentilles, avoine, seigle, cameline, chanvre, tournesol, etc.).

4.3 Contenus des connaissances : des thématiques d'intérêts communs mais des logiques de construction différentes

Les connaissances scientifiques et empiriques existantes sont plus élevées sur les couverts. Les chercheurs et les praticiens positionnent le couvert végétal comme le facteur clé commun de réussite permettant de protéger le sol et de supprimer l'usage d'herbicides. Le couvert est cependant à l'origine d'échecs liés au manque d'outils pour orienter le choix du type de couvert mais aussi pour le maîtriser.

Les résultats montrent **différents types de raisonnements dans le choix des couverts** puisque les critères des praticiens reposent sur la recherche d'un équilibre entre 4 propriétés : la capacité de restitution azotée du couvert au sol dans un objectif de pilotage systémique de la fertilisation, la production de biomasse élevée, l'effet allélopathique et la structuration du sol par le système racinaire. Pour atteindre cet objectif, ils mobilisent des couverts multi spécifiques afin de bénéficier des services apportés par les différentes espèces. A l'opposé, en recherche, le choix des couverts s'oriente davantage sur des couverts mono-spécifiques autour de deux critères (Keene et *al.*, 2017; Mirsky et *al.*, 2012; Silva, 2014) : la production de MS et la capacité à maîtriser le couvert par roulage.

Au regard du faible recul sur la technique, différentes thématiques demeurent très peu alimentées en connaissances : le machinisme, le sol, la gestion des ravageurs, la fertilisation et la construction de la rotation intégrant la technique. Pour les praticiens en transition, ces manques de connaissances constituent des facteurs limitants à approfondir pour gérer la complexité du SDSC sans herbicide et réduire la variabilité des résultats jugés encore inacceptables pour le mettre en pratique.

4.4 Des connaissances de natures différentes

Malgré le faible nombre de répétitions des ITK menés par les praticiens, les connaissances empiriques permettent des apports sur des **conditions optimales de réalisation des interventions techniques**, pour améliorer le domaine de validité des connaissances (ex : fenêtres d'implantation, conditions climatiques, modifications techniques du matériel, etc.). Par exemple, des producteurs observent que le roulage du couvert est plus efficace lorsque celui-ci est légèrement humide, que les sols argilo calcaires sont plus favorables à la technique ou encore que des stratégies de fertilisation « accentuées » sont à mettre en œuvre sur des sols sableux pour favoriser la levée de la culture. A l'inverse, ces conditions techniques sont faiblement documentées en recherche et constituent souvent l'origine de biais ou d'échecs conduisant à l'abandon des essais et à l'impossibilité de publier. Les connaissances scientifiques reposent, quant à elles, plus sur la compréhension des **interactions entre le couvert, les adventices et la culture** (ex : effet allélopathique, effet de la biomasse du couvert, etc.).

L'enquête montre également des parallèles fréquents entre les observations des praticiens et l'effet de périodes de sécheresse. Outre la majorité de l'échantillon ne possédant pas l'irrigation, l'enquête a été mise en ligne en automne 2017, caractérisé par de très faibles précipitations qui pourraient expliquer ces fortes préoccupations. Le lien étroit des connaissances empiriques avec le contexte climatique (humide ou sec en fonction des années) n'apparaît pas aussi marqué dans les connaissances scientifiques, même si cette préoccupation est amenée à s'accroître avec le réchauffement climatique. La majorité des travaux scientifiques a été conduit dans le Midwest ou Nord –Est des Etats-Unis, caractérisé par des conditions humides et de bonnes réserves utiles des sols (Silva, 2014; Wallace et *al.*, 2018). Ces conditions ne correspondent pas à celles rencontrées par la majorité des praticiens de l'enquête, situés au sud-ouest et sud-est de la France. En particulier, des épisodes de plus en plus

intenses de sécheresse impliquent des restrictions de l'utilisation de l'irrigation, soulevant des préoccupations quant à l'avenir de la technique face au réchauffement climatique. Ces inquiétudes sont confirmées par des chercheurs de l'Iowa qui ont mené quelques essais dans un contexte semi-aride. Les auteurs ont observé des pertes de rendement considérables en l'absence d'irrigation pendant des périodes comprenant de faibles pluviométries (Delate et *al.*, 2012b).

Les praticiens gèrent des variabilités plus ou moins importantes dans leur exploitation au quotidien (ex : différents types de sol, aléas climatiques, évolution des marchés, etc.) (Hoffmann et *al.*, 2007). Ils développent des capacités d'adaptation par des méthodes d'observation quotidiennes des parcelles leur permettant d'être **plus attentifs à l'effet du contexte environnant**. Cette compétence peut expliquer que dans notre étude, les connaissances reportées par les praticiens reposent beaucoup sur des conditions de réussites ou d'échecs, pour la mise en pratique de la technique, qui sont liées au milieu (sol, climat, température, etc.). Les chercheurs ne peuvent pas observer ce type de connaissances dans les processus formalisés qui s'appuient sur des mesures et prélèvements à des instants « t » définis.

4.5 Le semis sous couvert sans herbicide : une faible articulation des connaissances scientifiques et empiriques

La distinction entre les connaissances scientifiques et empiriques, souvent discutée dans la littérature (Kummer et *al.*, 2017), n'apparaît pas aussi marquée dans l'enquête. Une forme **d'hybridation des connaissances semble légèrement présente** et s'opère à partir des échanges des praticiens auprès de leur réseau professionnel, incluant des conseillers, des chercheurs ou des techniciens comme le montrent Hoffmann et *al.* (2007) dans leur étude. Dans notre enquête, l'analyse qualitative des données a permis de relever différentes illustrations de l'influence des connaissances provenant d'autres types d'acteurs dans les connaissances reportées par les praticiens ou dans le type d'essais mis en place. Par exemple, plusieurs praticiens ont pour projet d'expérimenter du soja sous seigle roulé sur des dispositifs très similaires aux ITK menés en recherche. Dans leur propos, les praticiens montrent qu'ils s'inspirent des travaux des chercheurs avec l'aide de leur conseiller, technicien ou groupe de producteurs. Leitgeb et *al.* (2014) soulignent aussi l'influence de la dynamique sociale dans laquelle sont inscrits les praticiens lors de la mise en place ou de l'interprétation des expérimentations. Toutefois, ces initiatives inspirées de travaux scientifiques restent faibles dans les résultats de l'enquête et se heurtent rapidement à des échecs ou à des problématiques de manque d'accessibilité aux matériels utilisés en recherche. Par exemple, le rouleau n'étant pas couramment présent dans les exploitations, la gestion des couverts est souvent réalisée à partir d'un broyage qui, d'après la littérature, n'a pas le même effet sur la maîtrise du couvert et des adventices (rapide décomposition du couvert, plus faible recouvrement du sol) (Reberg-Horton et *al.*, 2012).

En recherche, malgré quelques enquêtes sur les pratiques de producteurs au niveau de la thématique de l'AC en AB (Casagrande et *al.*, 2015; Peigné et *al.*, 2016), peu de liens directs avec les connaissances

des praticiens sur le SDSC sans herbicide sont identifiés. Les connaissances sont principalement produites au niveau de stations expérimentales sans prendre en compte les contraintes matérielles, d'hétérogénéité du sol ou les objectifs des praticiens reportés dans l'enquête.

Les résultats mettent en avant un **manque d'articulation entre les connaissances** scientifiques et empiriques sur le SDSC sans herbicide. Pourtant, selon plusieurs auteurs, ces connaissances peuvent être complémentaires et leurs combinaisons favoriseraient le développement de nouvelles connaissances, à l'origine de techniques plus résilientes (Delate et al., 2016; Hauser et al., 2010; Probst et al., 1994). Cette faible combinaison entre ces formes de connaissances est soulignée dans des travaux scientifiques concluant sur la nécessité de plus impliquer les praticiens dans les processus de recherche (Delate et al., 2016; Silva and Delate, 2017; Vincent-Caboud et al., 2017). Cet intérêt orienté vers des démarches participatives est commun avec les objectifs exprimés par les praticiens de l'enquête qui traduisent de réelles motivations pour le développement de projets collectifs comme l'illustrent quelques citations de praticiens. Certains praticiens ont spontanément employé le terme de travail « *conjoint* », utilisé dans la suite du manuscrit pour qualifier notre démarche :

-« Je suis agriculteur bio à Romans (01) et je suis particulièrement intéressé par la technique de SD. Je suis prêt à mettre à disposition des parcelles pour des essais expérimentaux. J'aimerais aussi travailler conjointement avec l'ISARA pour développer cette technique. Je reste à votre disposition pour tout renseignement complémentaire. Je suis inscrit à la réunion du 7 décembre à Pusignan »

-« Sans produit chimique c'est possible si tout le monde avance dans le même sens » (id. 71)

-« Ce qu'il manque c'est des groupes locaux d'entraides (matériels, engrais, etc.), entre agriculteurs mais pas que » (id. 4)

-« J'ai l'impression qu'on cherche à travailler sur le même sujet. Je suis disponible pour échanger avec vous et partager nos expériences pour avancer ensemble »

Il existe des connaissances scientifiques et empiriques sur la technique du SDSC sans herbicide mais elles sont encore insuffisantes pour justifier son insertion dans les pratiques des agriculteurs (ex : combinaison couvert/culture adaptée, sol, rotation, matériels, organisation, etc.). Dans le cas de techniques aussi innovantes et peu documentées, les caractéristiques « généralistes » des connaissances scientifiques et « localisées » des connaissances empiriques souvent attribuées dans la littérature ne sont pas vérifiées et apparaissent remises en question ici. Les résultats de ce chapitre montrent que la nature différente des connaissances scientifiques et empiriques pourrait se révéler complémentaire et utile au développement de nouvelles connaissances plus résilientes à la complexité de tels systèmes de production. **Une meilleure combinaison de ces formes de connaissances** permettrait d'articuler (1) des connaissances issues de processus formalisés, améliorant la compréhension des interactions qui agissent lors de la mise en pratique de la technique, et (2) des connaissances techniques sur les conditions de réalisation du SDSC en lien avec l'environnement local, basées sur des observations quotidiennes. Ces **bénéfices complémentaires** pourraient augmenter le domaine de validité des connaissances scientifiques et empiriques qui, prises séparément, paraissent difficilement transposables dans le cas de cette innovation.

Chapitre 4

Evaluation conjointe des performances techniques innovantes

Chapitre 4 : Evaluation conjointe des performances des techniques innovantes

1. Conception, expérimentation et évaluation conjointe

Une démarche de recherche conjointe entre praticiens et chercheurs a été mise en place dans l'objectif de vérifier la deuxième hypothèse : **Un processus de recherche conjoint entre praticiens et chercheurs de la conception à l'évaluation permet d'identifier des combinaisons techniques innovantes et multi-performantes.**

Nous nous sommes interrogés sur (1) les types de dispositifs expérimentaux produits à partir d'un processus de recherche conjoint entre praticiens et chercheurs, (2) les performances de ces essais sur le plan agronomique, économique, organisationnel et environnemental et (3) les complémentarités apportées par une évaluation conjointe

1.1. Terrain d'étude : Mise en application de la démarche en Rhône-Alpes

Avec plus de 250 000 ha de surfaces en AB (soit plus de 8.9 % de la SAU régionale en 2018), la région Auvergne-Rhône-Alpes (AURA) se positionne au 2^{ème} rang national. La région compte plus de 35 000 ha de grandes cultures AB, dont plus de 80 % sont des céréales. En région Rhône-Alpes (RA) (RA anciennement non rattachée à l'Auvergne), où notre étude a été conduite, les céréales s'inscrivent souvent au sein de deux types de rotations culturales dans lesquels ont été menés les itinéraires techniques (ITK) conçus dans notre démarche : une rotation courte de 3 ans dominée par des cultures de printemps en système irrigué (ex : maïs/soja/blé) et des rotations longues associant des céréales et des légumineuses fourragères (ex : luzerne (3 ans)/blé/blé/tournesol/blé/seigle/trèfle/blé/blé/triticale) sans irrigation (Fontaine et *al.*, 2012). Les grandes cultures constituent un enjeu pour la diffusion de l'AB, grâce aux débouchés croissants en alimentation humaine et animale (ITAB, 2011).

La démarche de recherche a été mise en place en RA. Les sites sont localisés dans 4 départements : Ain, Drôme, Isère, Rhône (Figure 19). Ces départements sont caractérisés par une forte dynamique de développement de l'AB et sont confrontés à une dégradation de la qualité des sols qui suscite de plus en plus d'inquiétude. Ce terrain d'étude a été privilégié sur la base de plusieurs critères :

- la présence de producteurs en demande de références et de création d'une dynamique d'apprentissage autour des techniques de l'AC (Vincent-Caboud, 2016),
- la proximité des départements : possibilités d'échanges facilités entre les praticiens,
- une part importante des surfaces cultivées en AB présente des risques d'érosion des sols. Les sols Rhône-alpins sont marqués par une dégradation croissante, causée par des phénomènes d'érosion et de perte de fertilité qui suscitent des préoccupations (Antoni et *al.*, 2011). Les sols sont affectés chaque année par de l'érosion liée aux pratiques répétées de travail du sol en AB

pour gérer les adventices (ex : faux semis, désherbages mécaniques) associées au changement climatique, qui accentue ce phénomène (intensification des périodes de sécheresses, de fortes pluviométries),

- des zones de captage prioritaires en eau potable dans lesquelles la question de la suppression du glyphosate deviendra, à terme, centrale,
- la présence de conseillers et d'animateurs de divers organismes encourageant les praticiens à innover sur le sujet.

Cette diversité d'acteurs et d'intérêts autour des objectifs de suppression (1) du glyphosate et (2) du travail du sol constitue un cadre favorable à la mise en place d'un processus de recherche conjoint et à l'identification de praticiens motivés pour expérimenter du SDSC sans herbicide.

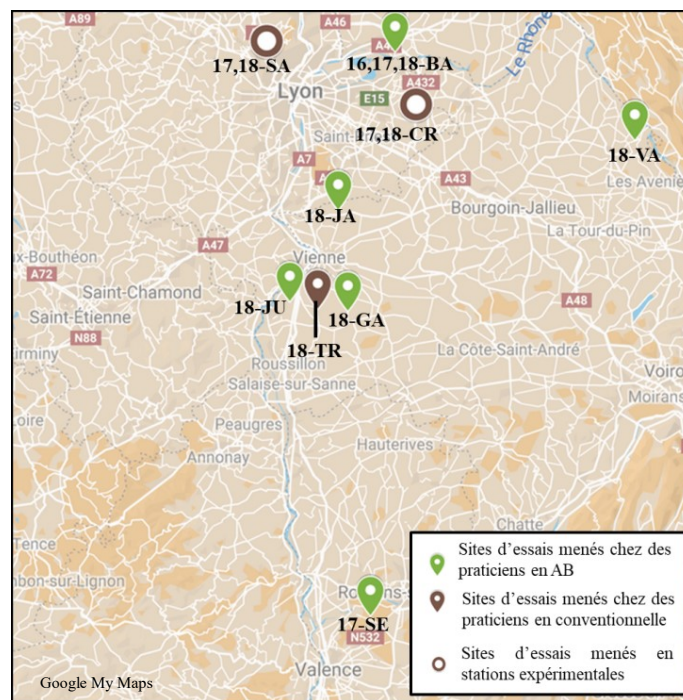


Figure 19: Localisation des essais menés entre 2016 et 2018. Les nombres correspondent aux années au cours desquelles les essais ont été menés chez les producteurs ou en station expérimentale, identifiés par les lettres. Les repères en vert font référence à des essais menés sur des parcelles conduites sous un mode de production biologique. Les repères en marron correspondent aux essais menés sur des parcelles cultivées en agriculture conventionnelle.

1.2. Identification des agriculteurs-expérimentateurs

L'identification d'agriculteurs-expérimentateurs (AE) a été initiée à partir d'enquêtes menées en RA dans le cadre d'un projet de fin d'études (Vincent-Caboud, 2016, 2015) (Figure 20). Au cours de ces travaux, des entretiens semi-directifs ont été conduits avec 33 producteurs de la région pour : (1) recueillir leurs perceptions vis-à-vis de la technique de SDSC sans herbicide, (2) comprendre les enjeux et les contraintes d'une mise en pratique, (3) identifier des praticiens prêts à expérimenter une telle innovation et (4) initier la production de nouvelles connaissances. Au cours de la démarche,

l'identification d'AE a aussi été réalisée à partir des rencontres collectives organisées lors de l'étape 5 pour évaluer les essais (ex : visites d'essais, ateliers de conception) (Figure 20).

Pour rappel, plusieurs critères ont permis la sélection des AE :

- intérêt marqué pour la technique. Le praticien partage les objectifs suivants : (1) utiliser un couvert, (2) semer la culture sans aucun travail du sol, et (3) ne pas utiliser d'herbicide,
- en accord avec le principe de mettre à disposition une parcelle pour mener un essai conjoint,
- prêt à s'impliquer dans le projet pendant 1 an,
- solutions disponibles à proximité vis-à-vis du matériel : semoir SD, rouleau.

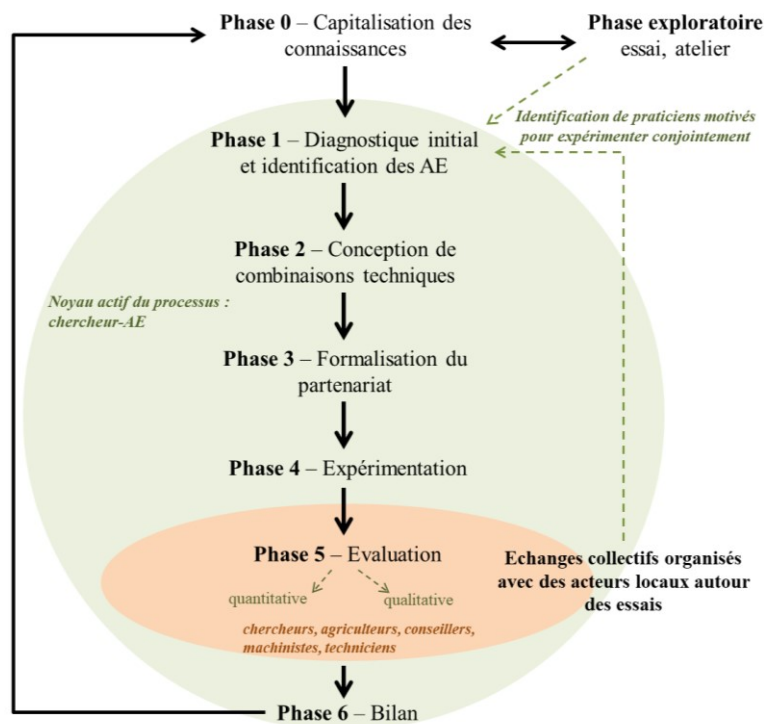


Figure 20: Schéma des principales étapes de la démarche. AE : Agriculteurs – Expérimentateurs.

Au cours de la démarche, quatre essais ont été menés en station expérimentale¹ et huit chez des praticiens. Entre 2016 et 2018, sept praticiens ont été sélectionnés pour expérimenter conjointement des techniques innovantes en SDSC sans herbicide.

Le Tableau 6 présente les principales caractéristiques des 7 AE céréaliers ou polyculteurs-éleveurs. La majorité de ces praticiens sont en production AB dont trois depuis plus de 10 ans et deux praticiens terminent leur conversion. La recherche de profils diversifiés (ex : SAU, expérience en AC ou en AB, types de sol, rotations culturales, objectifs) vise à enrichir le processus de production de connaissances afin de favoriser la généralisation des connaissances produites.

¹ Les essais menés en stations expérimentales visent à répéter les dispositifs testés chez les praticiens. Nous nous focalisons dans ce manuscrit sur les essais conduits chez les praticiens.

Tableau 6: Caractéristiques principales des exploitations agricoles des agriculteurs-expérimentateurs (AE) sélectionnés dans la démarche

AE	Années des essais	Localisation	Installation	Mode de production	SAU (ha)	UTH	OTEX	Type de sol dominant	Assolement	Rotations culturales types	Irrigation
TR	2018	ISERE	2003	Conv	140	1	PE	Limono-sableux	45 ha de prairie , 45 ha de B, O, et Tr., 20 ha de Tsol, 20-25 ha de M, 2-3 ha de S, 3 ha de gel	Tsol/céréales à paille/Tsol/B/M/ O de printemps	non
GA	2018	ISERE	2017	AB	100	2	PE	Argileux	57 ha de prairies permanentes, 43 ha de GC : B, méteil (Tr./pois), M, S, T, Colza	En cours de construction : →alternance de cultures de printemps et hiver : M ou Tsol ou S/ suivie de 2 céréales à paille d'hiver →intégration de couvert →opportunisme	non
BA	2016 2017 2018	AIN	1981	AB	160	1	GC	Sableux	M, S, B, Oh, Tr., luz.	B/M/S	oui
SE	2017	DROME	1990	AB	13,5	1	GC	Sableux, argile	B, M, S, luz., Tr./pois, lentille, épeautre, sarrasin, seigle	B/O/S/M/Luz (4/5ans)/ M/B	oui
JA	2018	ISERE	2006	AB	162	3	GC	Limoneux-argileux	B, O, lentille, S, C, Tsol, M, cultures dérobées en sarrasin	Tsol/B/Tsol/O sur les coteaux séchantes et S/M/lentille/B sur les plaines + couverts dans les rotations : avoine et moutarde de printemps, féverole	non
JU	2018	ISERE	1984	AB	80	1	GC	Limono-sableux; Limono-argileux	25 ha de B, 25 ha d'O, 4 ha de Tsol, 7 ha de S, 2 ha d'avoine, 5 ha de M, 5 ha de pois, 5 ha de féverole, 2 ha de lentille, 1ha de C	B/O/fév. ou pois/Tsol/B ou couvert après O et semis Tsol en dérobée ou couvert fév. + avoine/M/S/B (sur terres séchantes avec beaucoup de cailloux où il évite de mettre le M)	possibilité mais très peu
VA	2018	ISERE	1987	AB	105	4,5	PE, maraîchage	Limono-argileux; Argilo-limoneux; Alluvions du Rhône	M, S, B, Tsol, C, Tr., 25 ha de prairie permanente, légumes (30 espèces différentes)	M/S/B (semis de légumineuses luz. dans le B parfois)/C/B/M ou M/S/B/Tsol ou M/S/B/C avec S en dérobée	15 ha irrigable

AE : Agriculteur-Expérimentateur ; Conv : agriculture conventionnelle ; AB : Agriculture Biologique ; Tsol : Tournesol ; B : Blé ; M : Maïs ; S : Soja ; O : Orge ; C : Colza ; luz : Luzerne ; SAU : Surface agricole utile ; OTEX : Organisation technico-économique ; ha : hectare ; UTH : Unité de travail humain ; Tr : Triticale ; fév : féverole

1.3. Phase exploratoire¹

En 2016, un essai et un atelier de conception exploratoires, menés respectivement dans l’Ain et dans la Drôme, ont permis d’initier la démarche. Cette phase exploratoire fait référence à un projet de fin d’études ingénieur mené à l’ISARA. Ce travail a produit les premiers enseignements qui ont servi de base de construction à notre démarche de recherche conjointe.

L’atelier, impliquant 5 praticiens drômois et 3 chercheurs, a permis de confronter les connaissances scientifiques et empiriques sur la technique, afin de discuter des objectifs et des contraintes locales. Cet atelier a permis de préciser, avec les praticiens, la pertinence du dispositif planifié pour l’essai exploratoire et de relever les principaux points de débats qui ont été pris en compte lors des essais mis en place au début de la thèse (ex : difficulté d’accès à des semences de seigle, accès au matériel, etc.).

L’essai exploratoire a été conduit avec et chez un praticien. Cet essai a été construit à partir de la littérature scientifique, des échanges de connaissances issues de l’atelier et des connaissances du praticien, impliqué depuis 15 ans dans une démarche collaborative sur les TCSL en AB. Les enseignements de ce premier essai dans le contexte local ont permis d’initier le processus expérimental en orientant les choix techniques pris en 2017 et en 2018, pour piloter les essais de notre démarche. Cet essai exploratoire reposait sur le semis d’un couvert multispécifique² (5 espèces), ensuite roulé en parallèle au sens de son semis, avant de semer en direct le soja. Plusieurs modes de roulages avaient été étudiés pour analyser l’effet de la période du roulage [précoce³ (P) ou tardive (T)] et du nombre de roulages sur la maîtrise du couvert (Figure 21 et Figure 22). Le roulage était réalisé à partir d’un rouleau de 1,7 m de large et de 60 cm de diamètre auto-construit en 2005.

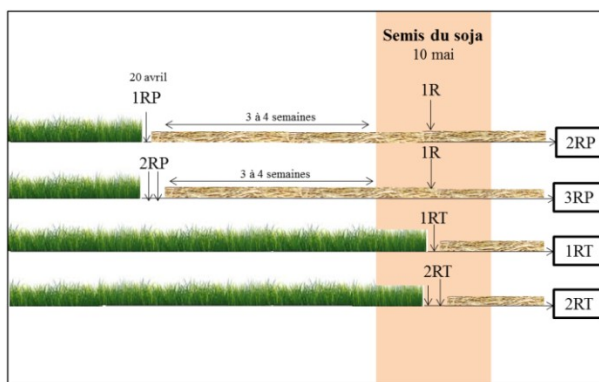


Figure 21: Schéma des modalités testées au cours de l’essai exploratoire ayant initié le processus expérimental en 2016 (d’après Vincent-Caboud, 2016).



Figure 22: Test de modalités de roulage du couvert végétal lors de l’essai exploratoire mené en 2016 avec l’agriculteur - expérimentateur BA.

¹ Cette sous-partie résume les principaux résultats issus d’un travail réalisé au préalable dans le cadre d’un projet de fin d’étude qui a influencé la construction des essais mis en place avec les praticiens au début de la thèse.

² Le couvert multispécifique était composé de vesce commune (*Vicia sativa*), d’avoine noire brésilienne (*Avena sativa* L.), de phacélie (*Phacelia tanacetifolia*), de trèfle d’Alexandrie (*Trifolium alexandrinum*) et de pois fourrager de printemps (*Pisum sativum*).

³ Précoce : avant la floraison du couvert (mi-avril) ; Tardif : lors de la floraison du couvert (début mai)

Les résultats ont montré que la période du roulage lors de la floraison des espèces du couvert (début à mi-mai) était indispensable pour garantir sa maîtrise (Vincent-Caboud, 2016). Cependant, des difficultés ont été observées dans le roulage du couvert composé de 5 espèces, avec des relevés. De plus, le rouleau utilisé manquait de poids et d'agressivité pour blesser efficacement le couvert.

Ainsi, les choix techniques privilégiés et discutés avec les praticiens lors de la mise en place des essais reposaient sur :

- le roulage du couvert végétal perpendiculaire au sens de son semis pour améliorer l'efficacité du roulage et la répartition du mulch sur le sol (Kornecki et *al.*, 2005),
- l'utilisation d'un rouleau cranteur plus adapté (auto-construction d'un rouleau de 3 m de large et de 1.4T, présence de lames fixées sur des cornières pour améliorer l'agressivité du rouleau),
- le semis d'un couvert composé de peu d'espèces (< 5) pour faciliter la maîtrise par roulage.

Les enseignements produits par cette phase exploratoire ont permis de rédiger un compte-rendu d'essais (et une vidéo) ainsi qu'une brochure (résultats de l'atelier) (Annexe 6). Ces supports ont été utilisés par la suite dans le cadre de la thèse pour échanger ces premiers enseignements avec les AE, au cours de la conception des ITK.

1.4. Formulations d'hypothèses de recherche communes

Les échanges avec les AE autour des connaissances scientifiques et empiriques ont permis d'identifier quatre questions clés dont trois concernent la gestion des couverts (Figure 23) (1) Quel couvert ? (2) Comment l'implanter ? et (3) Comment le maîtriser ? La 4^{ème} question a été rajoutée en 2018 et fait référence à la méthode d'implantation de la culture.

La formulation des hypothèses et la conception des ITK ont été élaborées, à partir des connaissances existantes (chapitre 2), des premiers enseignements issus de la démarche elle-même et enfin, à l'issue d'un compromis entre AE et chercheurs intégrant leurs objectifs et leurs contraintes respectifs (Annexe 6 et 7). Par exemple, pour les praticiens, la présence de triticale dans les couverts est intéressante car l'espèce est plus facile d'accès dans la région que le seigle, qui constitue pour la recherche un couvert prometteur pour la production d'une forte biomasse et la gestion des adventices grâce à l'effet allélopathique (Vincent-Caboud, 2016).

A partir des différents échanges avec chacun des praticiens, plusieurs hypothèses ont été formulées pour vérifier les 4 sous questions (Figure 23) :

- **hypothèse A « type couvert »** : la présence du seigle dans le couvert végétal, *notamment du seigle fourrager*¹, permet de conduire à de meilleures performances agronomiques (plus de biomasse

¹ Les parties en italiques au sein des hypothèses ont été orientées par les connaissances empiriques. Dans le cas contraire, la formulation de l'hypothèse a été construite sous l'influence des connaissances scientifiques.

du couvert, moins d'adventices, plus de rendement) et environnementales quelle que soit la culture considérée (soja, maïs). *Cependant, le triticale permet de limiter les charges (semences moins chères et plus faciles d'accès) améliorant les résultats économiques.*

- **hypothèse B « couvert implantation »** : un semis précoce du couvert végétal et l'augmentation de la densité de semis du couvert sont des facteurs clés pour mieux gérer les adventices et conduire ainsi aux meilleures performances.

- **hypothèse C1 « couvert maîtrise 1 »** : augmenter le nombre de roulages du couvert affecte les bénéfices liés à la réduction du temps de travail et à l'environnement *mais permet de limiter la compétition du couvert vis-à-vis de la culture et de conduire à un résultat économique plus élevé.*

- **hypothèse C2 « couvert maîtrise 2 »** : le roulage du couvert laissé sur la surface du sol produit une barrière physique pour maîtriser les adventices permettant de supprimer les interventions mécaniques et/ou chimiques (moins de temps de travail et de consommation de carburant) tout en maintenant la performance de la culture (levée et rendement).

- **hypothèse D « culture implantation »** : *l'implantation de la culture avec des inter-rangs plus étroits que dans des pratiques traditionnelles (<30 cm) limitent la compétition des adventices en assurant un meilleur recouvrement du sol par la culture et en améliorant les performances agronomiques, économiques, organisationnelles et environnementales.*

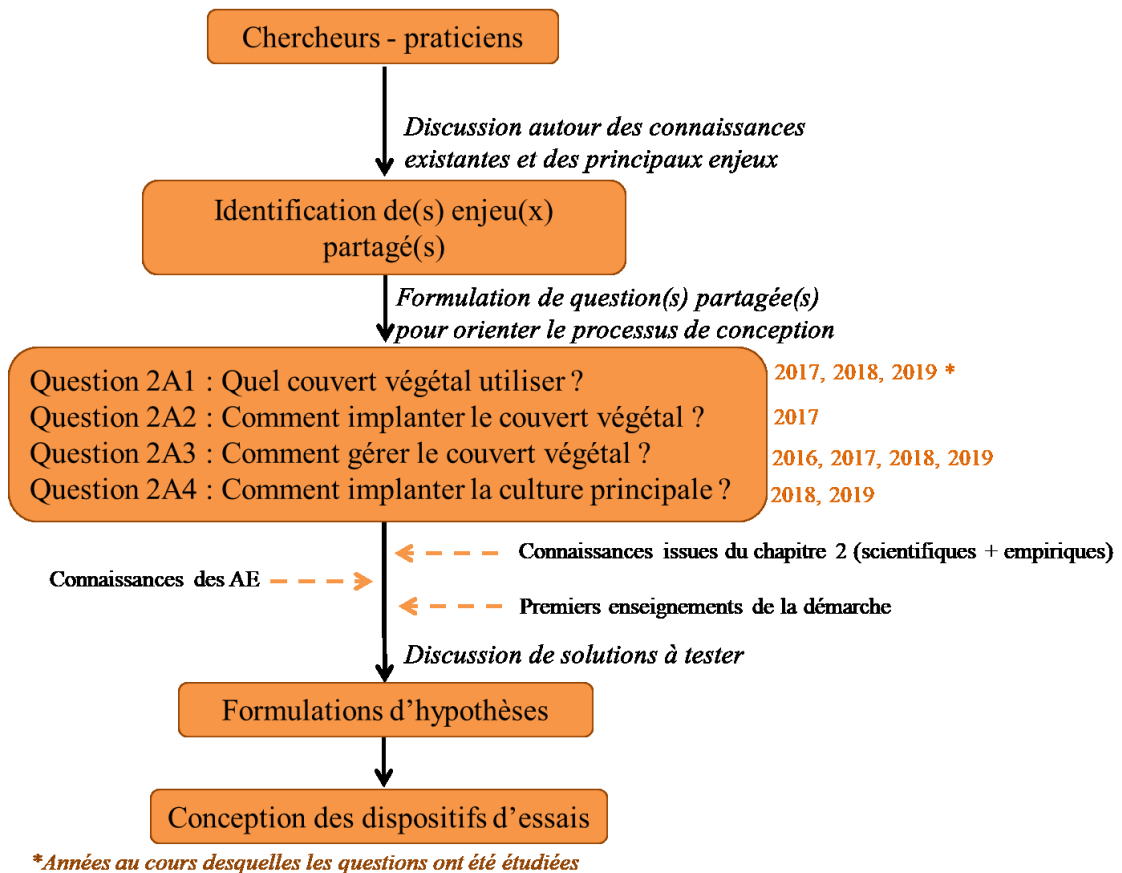


Figure 23: Schéma des principales étapes du processus de conception conjoint d'essais entre chercheurs et praticiens. AE : Agriculteur – Expérimentateur.

1.5. Conception des dispositifs expérimentaux

1.5.1. Définition des dispositifs

Pour répondre aux sous-questions, des essais ont été construits avec différentes modalités sur des cultures de maïs et de soja (Annexes 8 et 9). Dans la suite du manuscrit, nous nous focaliserons sur le soja, qui a été le plus expérimenté chez les praticiens. Les AE intéressés par les mêmes questions, par exemple « espèces du couvert », ont mis en place un dispositif de base¹ similaire, allant de 2 304 m² à 3 456 m², incluant la comparaison de 3 types de couvert : S (seigle), T (triticale), S x T et de deux modes de roulage communs afin de comparer les essais entre les sites (Figure 24). Ces modalités sont répétées 4 fois par site pour permettre un traitement statistique des données. Un essai correspond à un site (dépendant d'une année et d'une localisation données). Lorsque des essais sont menés plusieurs années chez un praticien, une nouvelle parcelle d'essai est sélectionnée. Ainsi, plusieurs sites d'essais peuvent être présents chez un même AE. Les sites sont nommés dans ce manuscrit par un nombre, correspondant à l'année au cours de laquelle l'essai a été conduit, et deux lettres faisant référence au nom du praticien ou de la station expérimentale (ex : 17-BA ; 18-BA).

Au total 4 types de combinaisons techniques ont été construits et testés au niveau de plusieurs sites (Figure 25 et Figure 19) : « espèces x roulages » ; « espèces x gestion du couvert » ; « variétés x inter-rangs » et « date de semis x roulage ». Ces essais sont composés chacun de deux facteurs à deux ou trois modalités (Figure 25).

Les échanges avec chaque AE ont soulevé des points de réflexion et des suggestions. Lorsque cela était possible, ces idées ont été prises en compte en ajoutant des « bandes tests² » afin de les vérifier directement au champ et juger de l'intérêt de poursuivre sur ces axes de recherche (Encadré 1).

Encadré 1 : Exemples de types de bandes test ajoutées par les praticiens

- roulage de pois
- broyage du couvert en rattrapage
- fertilisation de la culture
- densité de semis de la culture augmentée
- semis avant le roulage
- roulage parallèle
- roulage et semis du soja sous un couvert de seigle, matricaire, trèfle
- roulage de Ray grass
- broyage du couvert à différentes hauteurs à la place du roulage
- écimage en rattrapage
- inter-rang plus réduits du soja
- variété de seigle

¹ Le dispositif de base correspond aux modalités qui sont suivies par les chercheurs selon un protocole formalisé

² Les bandes test correspondent à des bandes de surfaces variables selon les praticiens. Souvent de petites tailles et localisées autour des essais « formels », ces bandes ont été suivies à partir d'observations, mais elles n'ont pas été soumises à une analyse quantitative. Ces bandes ont constitué un support de discussion pour enrichir les échanges 'AE-chercheurs'. Elles sont discutées plus en détail dans le chapitre 5.

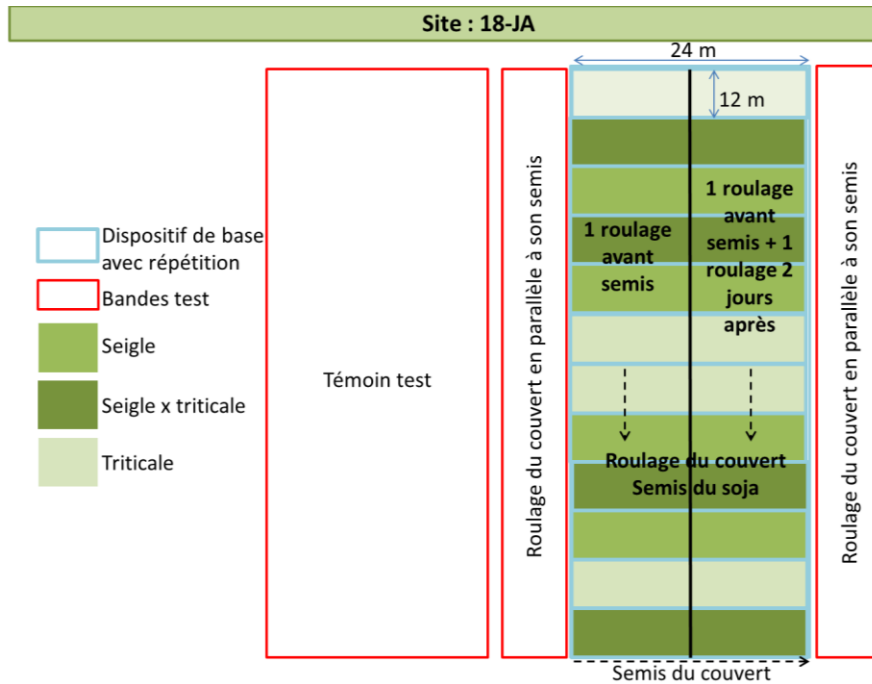


Figure 24: Exemple de dispositif expérimental d'un essai de type « espèces x roulage » menés sur le site 18-JA. Le site est composé d'un dispositif formel (entouré en bleu) avec 2 facteurs : espèces (à 3 modalités) et roulage (à 2 modalités). Chaque modalité d'espèces est répétée 4 fois et répartie aléatoirement au sein de chaque bloc. Des bandes test sont également présentes sur ce site (entourées en rouge) qui correspondent à des petites surfaces sur lesquelles le praticien a souhaité tester de nouvelles idées au cours de l'expérimentation.

1.5.2. Description des sites

Entre 2016 et 2018, 11 essais ont été menés sur la culture de soja. Ces essais étaient caractérisés par différents types de sol (limoneux fins, sablo-limoneux, limono-sableux ou limoneux-argileux)¹ (Annexe 9). Les essais ont été conduits majoritairement sur des parcelles de praticiens sur lesquelles ce manuscrit se focalise (8/11 des sites). Sept AE ont mené un essai (deux essais pour l'un des praticiens : 17-BA et 18-BA). Le blé en tant que précédent a été privilégié afin de permettre un semis du couvert précoce en fin d'été / début d'automne. Avant d'implanter les couverts, 2 à 3 déchaumages ont été réalisés afin de gérer les résidus des cultures précédentes et les adventices.

Les premiers enseignements de notre démarche et les pratiques Nord-Américaines montrent que les densités de semis classiques du couvert, en particulier 90-120 kg.ha⁻¹ pour des graminées, ne sont pas suffisantes pour recouvrir le sol et gérer les adventices sans herbicide (Ryan et al., 2011) (Annexes 6 et 7). Ainsi, les essais mis en place reposaient sur des densités de semis des couverts plus élevées que les pratiques locales en les semant tous à 200 kg.ha⁻¹ (Annexe 9). Le roulage des couverts et le semis des cultures de rente ont été réalisées en moyenne entre mi-mai, et fin mai puis récoltés entre mi-septembre et mi-octobre.

Les ITK testés entre 2016 et 2018 ont évolué car ils ont été affinés chaque année en fonction des enseignements des années précédentes et de la réflexion menée avec les praticiens. Cette évolution a

¹ Le détail des caractéristiques des sites et des ITK par site sont présentés en Annexe 9.

eu lieu sur le choix des couverts, les densités de semis du couvert, les dates de semis du couvert, le sens du roulage du couvert, l'inter-rang de la culture et le matériel utilisé. Nous discuterons de l'origine de ces changements, liés aux apprentissages issus de la démarche, dans le chapitre 5.

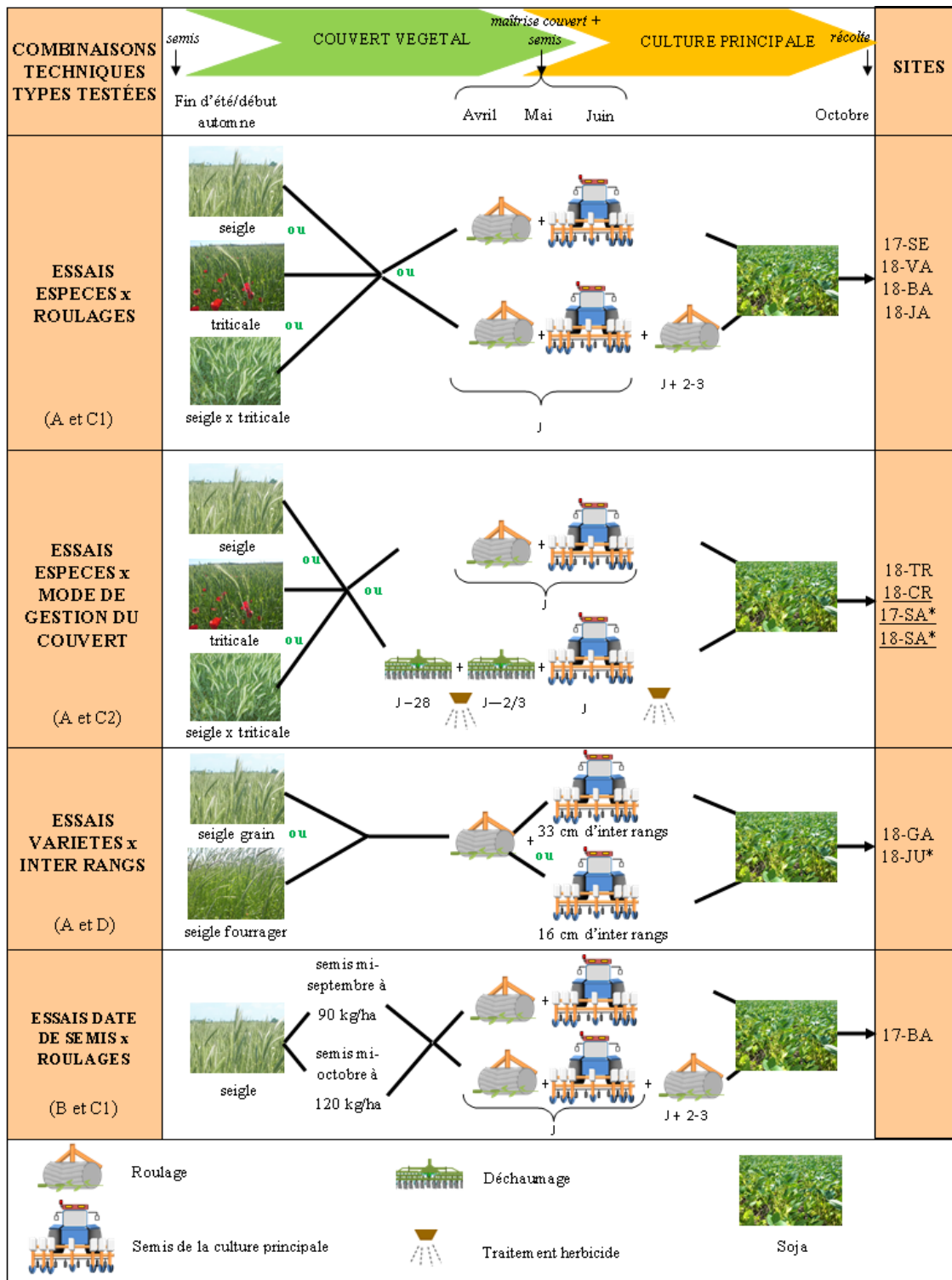


Figure 25: Schéma des itinéraires techniques types expérimentés au cours de la démarche entre 2016 et 2018. Les sites soulignés sont menés en agriculture conventionnelle. Les lettres entre parenthèses correspondent aux hypothèses associées aux combinaisons techniques testées. J fait référence au jour de semis du soja.

1.6. Protocoles de suivi et d'évaluation des performances

Les essais ont été suivis par les chercheurs et les praticiens pour évaluer les performances agronomiques, économiques, organisationnelles et environnementales des ITK conçus. Pour chaque performance, les acteurs ont évalué leurs propres indicateurs retenus sur la base respectivement de la littérature scientifique et sur leur expérience (Tableau 7). Le manuscrit se focalise en particulier sur les performances agronomiques des ITK qui visent à évaluer le développement des couverts, leur maîtrise sans herbicide ni travail du sol, la gestion des adventices et la performance du soja (Tableau 7).

Tableau 7: Indicateurs retenus pour évaluer la performance agronomique des itinéraires techniques.

Indicateurs des suivis scientifiques « évaluation quantitative »	Indicateurs des suivis empiriques « évaluation qualitative » basée sur une observation « continue »
Développement du couvert végétal – avant roulage	
<u>Avant hiver :</u> - Densité - Hauteur - Stade (échelle BBCH) <u>Au printemps (avant roulage) :</u> - Hauteur - Stade (échelle BBCH) - Biomasse	- Estimation visuelle de la qualité de la levée - Qualité du tallage et recouvrement du sol - Hauteur, stade - Rapidité d'implantation et vigueur - Homogénéité, densité et estimation de la biomasse visuelle - Observation du comportement du couvert face au climat et au sol (excès d'eau, stress hydrique, partie de la parcelle plus sableuse ou plus limoneuse, etc.) - Présence de ravageurs ou de maladies - Présence de verse
Maîtrise du couvert végétal roulé	
<u>Lors de la levée du soja :</u> - Nombre de relevés - Nombre de repousses <u>A floraison du soja + avant récolte :</u> - Biomasse restante au sol	- Epaisseur du paillis et recouvrement du sol - Estimation visuelle du pourcentage de relevés et repousses - Homogénéité de la répartition du mulch sur le sol - Stade du seigle couché sur le sol - Comportement des espèces au passage du rouleau (relevés, tiges coupées, blessées) - Observation de la compétition exercée par des repousses sur la culture - Observation de la coloration du couvert roulé entre les espèces (durée nécessaire pour que le couvert soit réellement mort et ne puise plus dans les ressources du sol) - Observation de l'effet du design du rouleau lors du roulage
La maîtrise des adventices	
<u>Avant hiver :</u> - Densité des adventices - Espèces <u>Au printemps (avant roulage) :</u> - Densité des adventices - Espèces et biomasse <u>A la levée du soja :</u> - Densité des adventices et espèces <u>Au début floraison du soja + Récolte :</u> - Espèces et biomasse	- Estimation visuelle de la biomasse - Estimation visuelle de la densité - Identification des espèces - Recouvrement des adventices
Performance du soja	
<u>Lors de la levée :</u> - Densité - Hauteur - Stade <u>A floraison :</u> - Biomasse - Hauteur plant - Hauteur 1 ^{ère} gousse <u>Lors de la récolte :</u> - Composantes du rendement	- Contact graine/sol - Temps de levée du soja et homogénéité des levées - Vigueur du soja lors de la levée, hauteur et stade - Rendement et hauteur des premières gousses - Estimation visuelle de la levée - Dégâts des maladies/ravageurs - Qualité de la récolte (humidité, graines d'adventices) - Recouvrement de l'inter-rang par le soja (+ vitesse de recouvrement) - Observation de l'effet du semoir lors du semis (bourrage, capacité à pénétrer dans le sol, ouverture/fermeture du sillon, profondeur du semis, vitesse de semis)
Conditions pédoclimatiques	
<u>Au cours de la saison :</u> - Températures de l'air et pluviométrie <u>Avant le semis et lors de la levée du soja :</u> - Température et humidité du sol 15 cm	- Suivi de la pluviométrie - Disponibilité de l'azote dans le sol définie par la couleur et la hauteur du couvert / de la culture - Etat du sol (sécheresse, humidité, compactage)

Les performances économiques, organisationnelles et environnementales constituent aussi un enjeu majeur de cette technique. Cependant, l'échelle de l'ITK, privilégiée dans notre étude, réduit la pertinence des indicateurs de ces performances qui nécessitent une analyse sur de plus larges échelles (ex : érosion ou ruissellement des sols, organisation du travail vis-à-vis des autres activités de l'exploitation, investissement dans du matériel, etc.). Ainsi, seuls quelques indicateurs clés, pertinents à l'échelle annuelle, ont été retenus pour estimer ces trois performances comme le temps de travail, la consommation de carburant ou encore la marge brute (Tableau 8).

Tableau 8: Indicateurs retenus pour évaluer les performances économiques, environnementales et organisationnelles des itinéraires techniques.

Indicateurs des suivis scientifiques « évaluation quantitative »	Indicateurs des suivis empiriques « évaluation qualitative »
Performance économique	
- Charges opérationnelles - Produits - Marges Brutes	- Marges Brutes - Coûts des semences des couverts - Rapport coût/bénéfices - Coûts des semoirs SD
Performance environnementale	
- Consommation de carburant - Nombre de passages sur la parcelle - IFT herbicide	- Présence ou non de ruissellement lors de forts épisodes pluvieux (comparé à d'autres parcelles voisines en labour) - Observation de phénomènes d'érosion du sol (vs parcelles voisines en labour) - Consommation de carburant - Nombre de passages
Performance organisationnelle	
- Temps de travail	- Facilité de mise en œuvre - Temps de travail - Accès aux matériels (semoir, rouleau) - Difficultés techniques de mise en œuvre (semis dans des biomasses végétales élevées, compétences pour le réglage des outils, etc.)

IFT : Indice de fréquence de traitement ; SD : semis direct

La mise en place, les méthodes d'observation ainsi que les indicateurs suivis et leur évaluation ont été discutés entre les praticiens et les chercheurs pour orienter et affiner les essais. Ces interactions, régulières entre les acteurs, ont été réalisées par mail, par téléphone ou sur la parcelle d'essai. Ces échanges visaient à confronter les évaluations faites par chacun des acteurs dans l'objectif de produire des connaissances partagées, influencées par les deux approches. L'évaluation faite par les chercheurs a été aussi échangée avec les praticiens à partir de la rédaction de compte-rendus d'avancement des essais, réalisés lors de la levée du couvert, en sortie hiver, avant le roulage des couverts, lors du semis, lors de la levée du soja et lors de sa récolte. Ces compte-rendus, comprenant l'ensemble des sites suivis, ont constitué un outil support pour échanger sur les évaluations des ITK (Annexe 10).

1.6.1. Evaluation réalisée par les chercheurs

1.6.1.1. Données collectées pour le suivi agronomique

Diverses mesures et prélèvements ont été réalisés à divers stades de développement du couvert et de la culture (Tableau 7) : (1) levée du couvert avant hiver, (2) avant le roulage au printemps, (3) levée de la culture au printemps, (4) floraison de la culture et (5) récolte.

Au cours des essais, plusieurs indicateurs ont donc été suivis¹ (Tableau 7):

• **L'état du couvert :**

Des échantillons du couvert ont été prélevés sur des placettes de 0.75 x 0.50 m² afin d'estimer la biomasse aérienne présente avant le roulage. Ces prélèvements sont répétés aléatoirement trois fois par parcelle et réalisés 1 ou 2 jours avant le roulage (Figure 26). Les échantillons ont ensuite été pesés après un séchage pendant 72 h à 80°C. Des échantillons du mulch restant à la surface du sol ont aussi été prélevés au début de la floraison du soja ainsi qu'à sa récolte. La hauteur du couvert a été mesurée avant roulage sur 15 plantes aléatoires par parcelle (Figure 26). Au niveau des 15 plantes mesurées par parcelle, le stade a aussi été identifié à l'aide de l'échelle BBCH (Witzenberger and Hack, 1989).

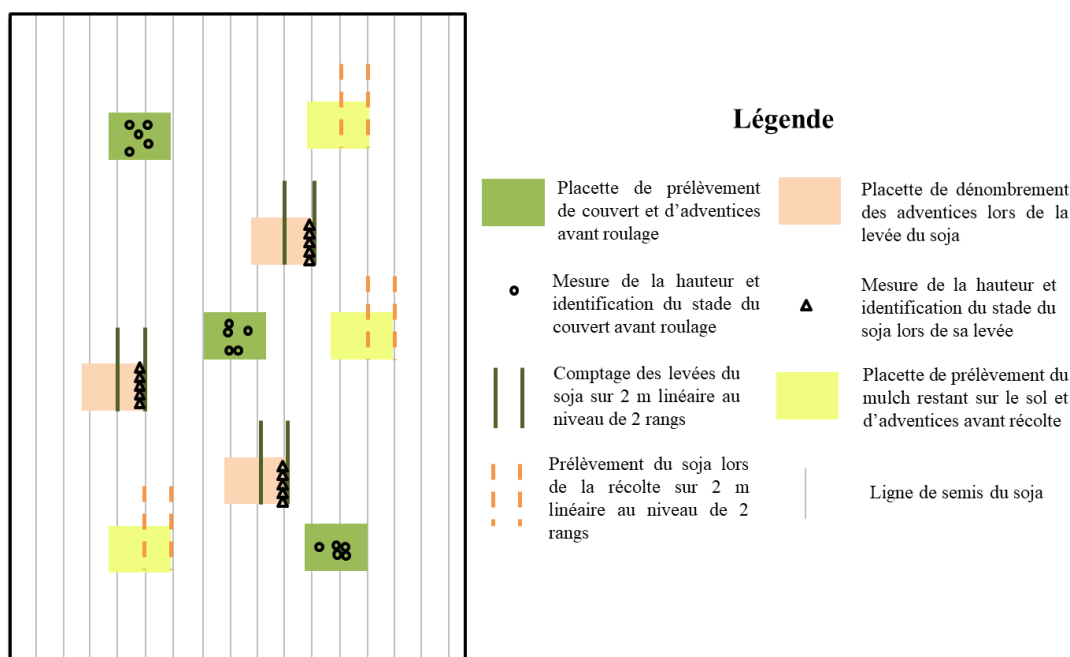


Figure 26: Schéma des différents prélèvements et mesures réalisés sur le couvert, les adventices et la culture avant roulage, lors de la levée et de la récolte de la culture, par parcelle.

• **La gestion des adventices :**

Les adventices ont été identifiées et prélevées avant le roulage et lors de la récolte du soja au niveau des placettes de prélèvement du couvert sur 0.75 x 0.50 m² (3 répétitions/parcelle) (Figure 26). La biomasse aérienne a ensuite été pesée après un séchage à l'étude pendant 72 h à 80°C. Lors de la levée du soja, les adventices ont été identifiées et dénombrées sur des placettes de 0.75 x 0.5 m² (Figure 26).

• **La performance de la culture :**

Les levées ont été dénombrées sur deux rangs de soja de 2 m linéaire avec 3 répétitions par parcelle (Figure 26). La hauteur et le stade du soja ont aussi été observés sur 5 plantes aléatoires du deuxième rang de chaque zone de comptage de la levée (Figure 26).

¹ La méthodologie des mesures et des prélèvements est présentée uniquement pour les variables décrites dans le manuscrit correspondant à 3 périodes : avant roulage, lors de la levée de la culture et lors de la récolte.

Lors de la **récolte du soja**, des plantes ont été prélevées sur 2 m linéaire (répétés 3 fois). Différentes mesures ont été réalisées au niveau de 5 plantes/répétitions : hauteur de la première gousse, hauteur du plant, nombre de ramifications, nombre de gousses par ramification, nombre de gousses sur la tige principale. Les échantillons collectés ont été pesés à l'état frais puis sec après 72h à 80°C (en distinguant les gousses des tiges) pour estimer le taux d'humidité. Après le battage des gousses, les poids de mille grains (PMG) puis les rendements ont été déterminés.

1.6.1.2. Analyse statistique

Des modèles linéaires mixtes ont permis d'évaluer l'effet des facteurs testés sur la performance du couvert (biomasse et hauteur avant roulage, biomasse du mulch avant la récolte), sur la maîtrise des adventices à différentes dates et sur la culture (levée et rendement¹) (Tableau 9). Un modèle linéaire mixte a été construit pour chaque facteur. Au sein de ces modèles, les facteurs “**Espèces couvert**”, “**Variétés couvert**”, “**Roulages couvert**”, “**Gestions couvert**” ou “**Inter-rangs**” sont à effets fixes. Les différents sites comparés pour chacun des facteurs, ainsi que les parcelles répétées au sein des sites ont été considérés comme des facteurs à effet aléatoire. Le facteur « site » correspond à une localisation et à une année donnée « localisation x année ». Le modèle d'analyse suivant a été utilisé pour chacun des facteurs fixes :

$$Y_{ijk} = X_i + A_j + B_k + C_{jk} + XE_{ijk}$$

où X est le facteur fixe (espèce ou variété ou gestion ou inter-rang), A le premier effet aléatoire (site), B le second effet aléatoire (parcelle), C l'interaction entre les facteurs à effet aléatoires, XE l'erreur résiduel, i une espèce, variété un mode de roulage ou un inter-rang spécifique, j un site particulier (location x year) et k correspond à une parcelle donnée.

Tableau 9: Synthèse des différents facteurs étudiés au cours des essais formels

Facteurs		Espèces couvert	Roulages couvert	Gestions couvert	Variétés couvert	Inter-rangs soja	Dates de semis couvert
Nombre d'essais	du semis du couvert jusqu'au roulage	7	4	3	2	2	1
	<i>n</i>	252	144	108	48	48	24
	lors de la levée du soja	6	3	2	2	2	1
	<i>n</i>	216	108	72	48	48	24
	lors de la récolte du soja	6	3	2	1*	1*	1
	<i>n</i>	216	108	72	24	24	24
Tests statistiques		Modèle linéaire mixte			-Modèle linéaire mixte (du semis à la levée du soja) -Modèle linéaire simple (lors de la récolte du soja)		Modèle linéaire simple

*Modèle linéaire simple pour les données de la récolte des facteurs « variété couvert » et « inter-rang soja » car un essai a été abandonné (infestation d'ambrosie + dégâts importants de pigeons)
n : Taille de l'échantillon

¹ Des mesures intermédiaires ont été réalisées sur la culture lors du début de sa floraison mais ne sont pas présentées dans les résultats.

Pour chacun des facteurs fixes, des ANOVA ont été aussi réalisées par site afin d’analyser les variabilités inter-sites. Le facteur ‘**Date de semis couvert**’, qui ne contient qu’un seul site, a été analysé uniquement à partir d’un simple modèle linéaire (Tableau 9). Les conditions de réalisation de l’analyse des variances (ANOVA) (normalité, indépendance et homoscedasticité des données) étaient vérifiées pour la hauteur des couverts et le rendement. Les données relatives à la biomasse du couvert et des adventices ainsi qu’à la levée ont été transformées (racine carrée) pour valider les conditions de réalisation de l’analyse des variances. Les tests statistiques ont été effectués avec le logiciel R (version 1.1.463 © RStudio, Inc), et plus précisément, le package lme4 pour réaliser les modèles linéaires mixtes (Bates et *al.*, 2014). La significativité des résultats a été évaluée avec une *p-value* < 0.05 et les moyennes des modalités ont été comparées en utilisant le test de comparaison Tuckey’s pairwise.

1.6.1.3. Performances économiques, organisationnelles et environnementales

Pour évaluer les performances économiques, organisationnelles et environnementales, des indicateurs ont été estimés au niveau des essais menés chez les AE et comparés à leurs pratiques actuelles réalisées sur le soja (entre 2016 et 2018) (Tableau 8). Le barème d’entraide 2018-2019 de la Fédération Régionale des Cuma Auvergne Rhône-Alpes a été utilisé afin d’estimer les charges liées aux interventions mécaniques (ex : roulage, déchaumage, semis, etc.), le temps de travail et la consommation de carburant des interventions (Cuma Auvergne Rhône-Alpes, 2018). Deux scénarios différents ont été construits pour l’évaluation économique des ITK. Le premier, repose sur l’hypothèse que les semences du couvert sont achetées (Sa), le second, sur l’hypothèse où les couverts implantés proviennent de semences de ferme (Sf). Les estimations de ces indicateurs ont ensuite été discutées avec les praticiens pour vérifier les données et les ajuster en fonction de leurs retours pour améliorer leurs pertinences au regard des conditions rencontrées par les exploitants.

1.6.2. Evaluation des performances réalisée par les praticiens

Lors de la démarche, les AE ont suivi l’essai, mené sur leur site, selon leur propre mode opératoire (observations régulières de la parcelle, photos de l’essai et de parcelles voisines pour comparer, etc.). Les indicateurs évalués par les praticiens sont présentés dans le Tableau 7 et le Tableau 8. Ceux-ci reposent en particulier sur le développement du couvert (ex : densité, homogénéité, etc.), sa maîtrise par roulage (ex : relevés, effet de l’action du rouleau en fonction des espèces) et la performance du soja (ex : levée, hauteur des premières gousses, dégâts de ravageurs, etc.).

Afin de recueillir l’évaluation faite par les praticiens, deux procédures ont été réalisées :

- **prise de notes** lors des échanges avec les praticiens (sur leurs observations, leurs interrogations, leurs solutions, etc.).
- lors de l’**entretien bilan** réalisé 2 mois après la récolte, une grille d’évaluation construite sur la base d’une échelle de notation a été complétée par les praticiens en présence d’un chercheur

pour discuter et justifier les notes attribuées (Annexe 11). L'évaluation repose sur des notes allant de 1 à 6 selon l'appréciation des AE, elle porte sur les performances agronomiques du couvert, du contrôle des adventices, de la culture, de la présence de ravageurs et de maladies ainsi que des performances économiques, organisationnelles et environnementales. Cet entretien a été enregistré afin de relever qualitativement l'évaluation proposée par les AE.

2. Evaluation conjointe des performances agronomiques, économiques, organisationnelles et environnementales

2.1. Performances agronomiques

2.1.1. Optimiser l'implantation et le développement des couverts végétaux

Lorsque le semis du couvert est tardif (mi-octobre), augmenter la densité de semis de 25 % compense la production de matières sèches (MS) du couvert au printemps avec en moyenne 6 109 kgMS.ha⁻¹ pour les deux stratégies de semis testées (date x densité de semis) ($p = 0.45$) (Tableau 10). Avec une hauteur moyenne de 1.25 m, le seigle est plus haut que le triticales (0.74 m) et le mélange (1.14 m) ($p < 0.0001$) (Tableau 10). **Les biomasses ont été faibles** sur la majorité des sites puisqu'elles dépassent 8 000 kg.ha⁻¹ de MS seulement sur 3/11 des essais mais les résultats ne montrent **pas de différence de MS** entre les couverts avec en moyenne 5 067 kg.ha⁻¹ pour le mélange, 5 219 kg.ha⁻¹ pour le seigle et 4 974 kg.ha⁻¹ pour le triticales ($p = 0.70$) (Tableau 10). Cependant, lors de la récolte, avec moins de 2 000 kg.ha⁻¹, la biomasse du mulch de triticales est inférieure aux autres mulch ($p < 0.0001$) (Figure 27).

Le facteur « variété » montre que le **seigle fourrager** a permis d'atteindre les hauteurs les plus élevées avec plus de 1.60 m ($p < 0.0001$), et a produit une **plus forte biomasse** avant roulage que le seigle grain avec une moyenne respectivement de 8 338 kg.ha⁻¹ et 7 389 kg.ha⁻¹ de MS ($p = 0.01$). Cependant, le mulch de seigle fourrager est plus faible lors de la récolte, indiquant une décomposition plus rapide ($p = 0.007$).

Tableau 10: Synthèse des performances agronomiques des essais menés

PERFORMANCES		Agronomiques						
Facteurs	Modalités	Couvert végétal			Adventices		Culture	
		Biomasse av. roulage (kg/ha)	Hauteur (cm)	Biomasse récolte (kg/ha)	Biomasse av. roulage (kg/ha)	Biomasse récolte (kg/ha)	Levée (Nb/ha)	Rdt (qx/ha)
Quel type de couvert végétal ? (1) – Hypothèse A								
Espèces AB & Conv. Moyenne	S	5219 ns	125 a	2965 a	264 b	1167 a	300157 ns	20.7 a
	T	4974 ns	79 c	1889 b	425 a	1491 b	307895 ns	17.4 b
	SxT	5067 ns	114 b	2854 a	297 b	1374 b	291017 ns	20.5 a
Espèces AB	S	5683 ns	122 a	3194 a	308 c	1653 c	302737 ns	25.0 a
	T	5142 ns	76 c	1911 b	525 a	2040 a	319760 ns	20.8 b
	SxT	5370 ns	108 b	3066 a	437 b	1917 b	298766 ns	25.4 a
Espèces Conv.	S	3300 ns	123 a	2508 a	117.6 b	195 b	295000 ns	12.3 a
	T	3093 ns	69 c	1845 b	308 a	395 a	284167 ns	10.7 b
	SxT	3374 ns	114 b	2431 a	75 b	289 a	275521 ns	10.9 b
Variétés	Sg	7389 ns	133 b	5417 a	279 ns	112 ns	249501 a	23.4 ns
	Sf	8338 ns	170 a	4825 b	172 ns	770 ns	201541 b	29.1 ns
Quelle stratégie d'implantation du couvert ? (2) – Hypothèse B								
Date de semis du couvert [†]	Date 1	6278 ns	83 ns	2527 ns	145 a	1758 ns	326042 ns	27.8 ns
	Date 2	5940 ns	87 ns	2837 ns	33 b	1513 ns	346458 ns	30.7 ns
Quelle gestion du couvert ? (3) – Hypothèse C								
Nombre de roulages*	1R	-	-	-	-	1217 ns	338616 a	26.1 a
	2R	-	-	-	-	1238 ns	272937 b	21.2 b
	3R [§]	-	-	-	-	3832	212500	16.7
Mode de destruction	Roulage	-	-	-	-	293 a	284896 a	11.3 b
	Déchaumage	-	-	-	-	232 b	264271 b	17.8 a
Quelle implantation du soja ? (4) – Hypothèse D								
Inter-rangs du soja	16 cm	-	-	-	-	173 ns	199544 b	31.9 a
	33 cm	-	-	-	-	441 ns	251499 a	26.2 b
Références	pratiques AB ^Ω	-	-	-	-	-	-	25.9
	pratiques conv. ^μ	-	-	-	-	-	-	20.0

S :seigle ; T : triticales ; Sg :seigle grain ; Sf : seigle fourrager ; AB : agriculture biologique ; Conv. : agriculture conventionnelle ; R : roulage ; ns : non significativement différent

^ΩMoyenne des résultats obtenus entre 2017 et 2018 par les AE avec leurs pratiques types conduites sur la culture de soja en AB, n = 4 sites

^μMoyenne des résultats obtenus entre 2017 et 2018 par l'AE en agriculture conventionnelle et par la station expérimentale avec leurs pratiques sur le soja en agriculture conventionnelle, n = 2 sites

*Comparaison entre 1R et 2R uniquement entre 3 sites (n=108). La modalité 3R ne fait référence qu'à un seul site et ne peut donc pas être comparée aux 3 autres sites (n=36)

[§]Essai où les 12 bandes de couvert ont été roulées de la même manière, 3 fois, avec réalisation de plusieurs interventions d'écimage pour essayer de gérer les adventices

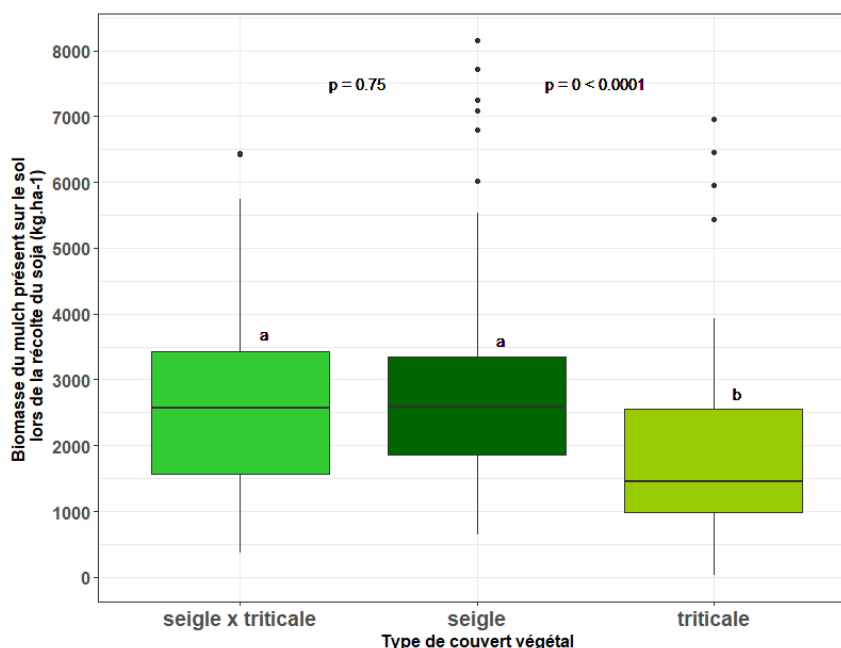


Figure 27: Biomasse du mulch présent sur le sol lors de la récolte du soja. Les données représentées sur ce graphique font références à six essais « espèces ». Ces données ont été analysées à partir d'un modèle linéaire mixte ($p < 0.001$, $n=216$). Les couverts suivis par la même lettre ne sont pas significativement différents.

La majorité des indicateurs de performance du couvert est satisfaisant pour les praticiens (satisfaction $> 4/6$) (Figure 28 et Figure 29). Les AE reportent une rapidité d'implantation des couverts conforme à leurs attentes avec une note de 4,7/6 même si aucune espèce ne se démarque au début du développement. Cependant, les AE observent une levée de la variété de seigle fourrager plus rapide que le seigle grain ; « sa performance était meilleure au niveau de sa biomasse, vigueur et hauteur mais le gel l'a plus affecté car elle était plus avancée » (GA) (Figure 30). Les AE reconnaissent l'importance de la biomasse du couvert mais pensent qu'elle n'a pas été suffisante. Pour les AE, la stratégie de semer tôt et dense optimise la production de MS du couvert mais elle est à raisonner au contexte de chaque année. D'après BA, « il faut semer tôt mais pas avant septembre car ça augmente la sensibilité au gel et le risque d'apparition de pucerons, qui peut constituer un foyer d'infestation ».

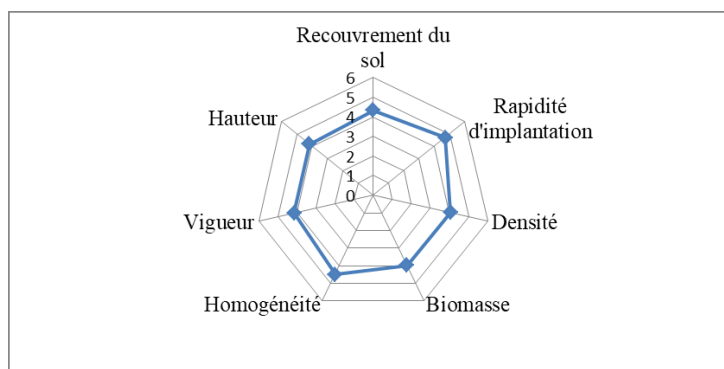


Figure 28: Notes de satisfaction moyenne des agriculteurs – expérimentateurs sur la performance du couvert végétal ($n=7$) (note allant de 1 à 6).



Figure 29: Couverts végétaux de seigle et de triticale au printemps avant le roulage – Site 17-SE – 16 mai 2017



Figure 30: Comparaison de deux variétés de seigle (fourrager et grain) - Site 18-GA - 4 mars 2018

Malgré l'absence de différence de MS entre les espèces testées, d'importants contrastes sont mis en avant par les ANOVA réalisées par site. Le seigle et le mélange atteignent des biomasses supérieures au triticale pour 3 essais alors que c'est le triticale qui obtient la biomasse la plus élevée sur 3 autres essais. Cette variabilité est discutée dans l'article intitulé « *Cover Crop Effectiveness Varies in Cover Crop-Based Rotational Tillage Organic Soybean Systems Depending on Species and Environment* » publié en 2019 dans *Agronomy*. Celui-ci s'inscrit dans deux contextes pédoclimatiques en AB : Sud-Est de la France (Rhône-alpes) et Nord-Américain (Wisconsin) (Annexe 12) (Vincent-Caboud et al., 2019b). Cet article montre la dépendance de la productivité du couvert au contexte mais aussi à un ensemble de facteurs qui sont à considérer dans leur ensemble pour optimiser la performance (date de semis, densité de semis, variété, précédent, teneur en MO du sol). Les AE ont aussi discuté de l'origine de ces variabilités en alimentant en majorité deux facteurs explicatifs :

- **impact des aléas climatiques** : Les conditions d'implantation du couvert à l'automne et au cours de l'hiver ont été les plus discutées. Des pertes de levée du couvert liées à la sécheresse de l'automne sont reportées par 4/7 des AE ; « *les faibles précipitations de l'année 2017/2018 n'étaient pas favorables à la production d'un bon couvert et homogène* » (JA) (Figure 31). Le praticien JU a observé la levée « *en deux temps à cause de la sécheresse. Le seigle fourrager a levé en premier mi-octobre mais le seigle grain s'est implanté 1 mois plus tard et il était plus hétérogène* ». A l'inverse, au cours de l'hiver, un excès d'humidité a été observé qui a eu un effet « *néfaste sur les couverts de céréales et explique la perte des talles et une faible biomasse au printemps* » (VA) (Figure 32). Enfin, la sensibilité au gel du couvert sur certains sites en fonction de leur stade de développement en hiver a aussi été mise en avant comme un facteur limitant de la productivité du couvert (Figure 33).

- **faible disponibilité en azote lors de l'implantation du couvert** : Au total, 3/7 des AE ont reporté un manque de performance du couvert, à cause d'une faible disponibilité de l'azote

lors de son implantation et la nécessité d'actionner des leviers de fertilisation. Le précédent blé de la plupart des sites a impliqué la présence de résidus sur le sol qui, lors de la décomposition a rendu l'azote indisponible pour le couvert. Pour BA, « *la performance du couvert n'était pas satisfaisante, [...], il faut fertiliser et jouer sur la densité, c'est indispensable* ».



Figure 31: Démarrage lent du couvert au sortir de l'hiver avec une perte de talles (sécheresse en automne + faim d'azote) 11 avril 2018 - site 18-JA



Figure 32: Excès d'humidité au cours de la période hivernale ayant affecté les talles des couverts de céréales – site 18-VA – 12 décembre 2017



Figure 33: Gel du triticale (gauche) début février - photo prise le 10 avril 2018 - site 18-BA

L'espèce n'a donc pas été déterminante sur la productivité du couvert en raison de l'important effet du contexte mais elle est essentielle vis-à-vis de la dynamique de décomposition du couvert puisque le mulch de seigle a permis de recouvrir le sol plus longtemps que le triticale. Les choix techniques liés à la date de semis, la densité de semis et à la variété influencent la production de MS du couvert et sa rapidité d'implantation à l'automne. Afin d'optimiser la performance du couvert, la combinaison technique la plus intéressante repose sur **le semis précoce (de début à mi-septembre) d'un couvert de type fourrager et semé avec des densités de semis élevées (au moins 200 kg.ha⁻¹)**.

2.1.2. Maîtriser les adventices

Le **semis précoce du couvert gère mieux les adventices** jusqu'au roulage grâce au recouvrement rapide du sol à l'automne ($p < 0.001$) mais **l'augmentation de la densité de semis** compense un semis tardif puisque lors de la récolte du soja, aucune différence n'a été observée (Figure 34).



Figure 34: Comparaison du recouvrement du sol en hiver (15 déc. 2017) en fonction de deux stratégies de semis d'un couvert de seigle. A gauche, le seigle a été semé mi-septembre à 90 kg.ha⁻¹. A droite, le seigle a été semé un mois plus tard, mi-octobre à

Le **triticale a moins contrôlé les adventices** que les autres couverts avec en moyenne 425 kg.ha⁻¹ de MS d’adventices avant le roulage contre 264 kg.ha⁻¹ et 297 kg.ha⁻¹ pour le seigle et le mélange ($p = 0.002$) (Figure 36). En AB, le triticale atteint plus de 500 kg.ha⁻¹ de MS d’adventices avant roulage (Figure 35). La **levée plus rapide du seigle fourrager**, comparée à un seigle grain, améliore le contrôle des adventices avant roulage avec respectivement 172 et 279 et kg.ha⁻¹ ($p = 0.06$) (Tableau 10).

Cependant, les résultats montrent que la pression des adventices sous le couvert reste plus élevée que sur une modalité classique « déchaumage + chimie » ($p < 0.01$). Enfin, au cours du développement du soja, les deux inter-rangs comparés n’ont conduit à aucune différence sur la maîtrise des adventices ($p = 0.7$) (Tableau 10).

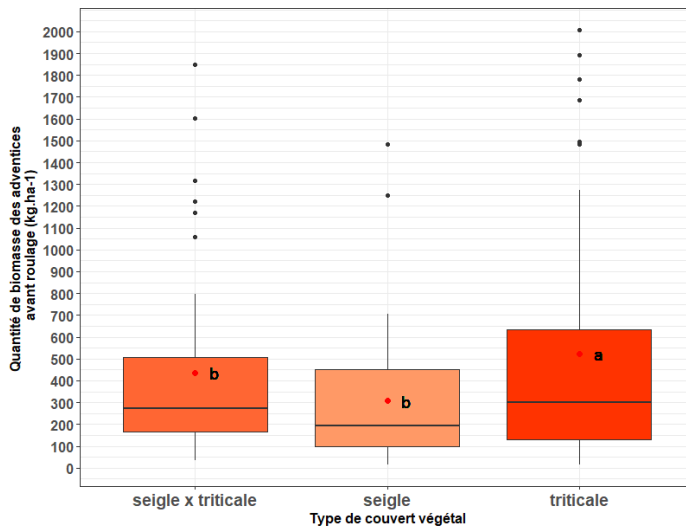


Figure 35: Quantité de biomasse des adventices présente avant le roulage du couvert au niveau des sites en AB. Ces données ont été analysées à partir d’un modèle linéaire mixte ($p < 0.002$, $n=144$). Les couverts suivis par la même lettre ne sont pas significativement différents. Les points rouges correspondent à la moyenne des biomasses des adventices par couvert.



Figure 36: Observation d’une pression des adventices plus élevée sous les bandes de triticale roulées (B) que sous le seigle (A). Site 18-BAR – 6 juin 2018

La moyenne des notes de satisfaction des AE sur la gestion des adventices est de 3.7/6. Les AE ont mis en avant l’importance de « l’épaisseur » du couvert pour gérer les adventices. Trois des AE ont précisé que leur satisfaction était différente selon le stade de l’essai avec une note supérieure à la moyenne avant roulage et lors de la levée du soja, puis une note inférieure à partir de la floraison. Les AE notent tous une meilleure maîtrise des adventices sous les couverts composés de seigle ; « j’ai été impressionné par le seigle, la quantité de MS qu’il a produit pour gérer les adventices, au printemps, c’était visuel il n’y avait pas de coquelicot sur le seigle alors qu’ils étaient là sur le triticale » (SE). Pour eux, la présence de seigle permet de limiter l’ambrosie et les adventices dans la culture suivante. Pour les AE, la maîtrise des adventices est très dépendante du couvert et peut expliquer les variabilités

observées en fonction des sites. Ces résultats confirment l'intérêt du choix du seigle pour sa capacité à gérer les adventices, identifié aussi par d'autres auteurs (Liebert et al., 2017; Wallace et al., 2018).

En fonction des sites, des variabilités importantes de maîtrise des adventices ont été observées. Les AE qui ont obtenus des couverts supérieurs à 8 000 kg.ha⁻¹ de MS ont attribué des notes positives (de 5 à 6/6) car l'épaisseur du mulch a limité le développement des adventices (5-7 kg.ha⁻¹ de MS). A l'inverse, d'autres AE sont plus mitigés en attribuant des notes basses, lorsque des couverts de faibles biomasses n'ont pas permis de contrôler les adventices (plus de 500 kg MS.ha⁻¹ dès la levée). Par exemple, l'AE BA, qui a attribué une note de 2/6, a estimé plus de 80 % de recouvrement du sol par les adventices sur son site (Figure 37). Enfin, sur certains sites, la maîtrise des adventices a été jugée « moyenne » par les AE qui sont néanmoins satisfaits car ils prennent en compte dans leur évaluation le rapport coût/bénéfice sur l'ensemble de l'ITK, comme l'illustrent les producteurs JA et VA : « je suis satisfait de la gestion des adventices par rapport à l'investissement réalisé. Le salissement a été mieux géré que sur certaines parcelles difficiles, où j'ai pas mal de salissement en intervenant beaucoup » ; « à part les vivaces, c'est plutôt encourageant car je n'ai pas vu d'adventice annuelle et on n'a pas fait grand-chose, le plus gros problème a été les liserons mais c'est lié à la parcelle, si on était parti avec une autre on aurait moins eu de problèmes ».

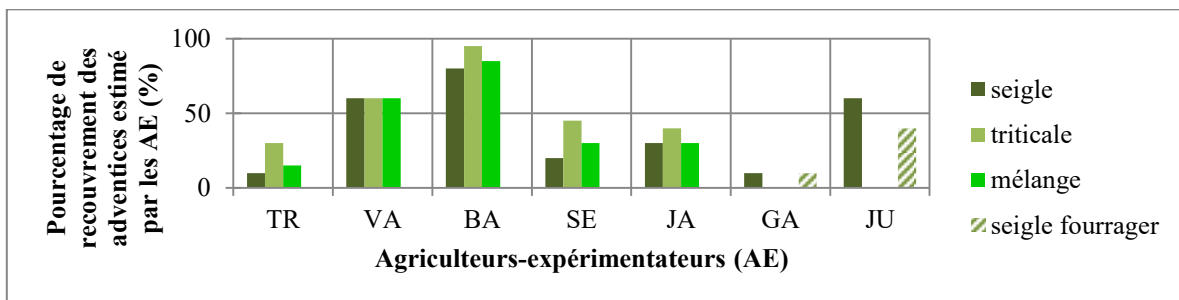


Figure 37: Estimation du pourcentage de recouvrement des adventices par les agriculteurs-expérimentateurs.



Figure 38: Observation de la pression des adventices lors de la levée du soja. A gauche (site 18-GA), la biomasse des adventices est seulement de 6 kg/ha (biomasse du couvert > 9 000 kg/ha avant roulage). A droite, (site 18-BA), la biomasse des adventices est déjà à plus de 1000 kg/ha (biomasse du couvert < 5 000 kg/ha).

Le semis précoce et dense du couvert améliore la maîtrise des adventices en accélérant le recouvrement du sol à l'automne. La productivité de MS du couvert végétal est essentielle à la gestion des adventices mais le choix de l'espèce apparaît aussi déterminant vis-à-vis de deux caractéristiques importantes : le ratio C/N (qui conditionne la dynamique de décomposition du mulch) et l'effet allélopathique. Le couvert doit être composé au moins d'une espèce caractérisée par un potentiel élevé **d'effet allélopathique**, reconnu chez le seigle, et un **ratio C/N élevé pour conserver un épais mulch** sur le sol au cours de la saison et ainsi réduire la pression des adventices.

2.1.3. Amélioration de la maîtrise du couvert végétal

D'après la littérature, le roulage du couvert est plus efficace lorsqu'il est réalisé à un stade de maturité avancé (Mischler et al., 2010; Moyer, 2011). Dans notre étude, le stade du couvert a été influencé par le choix de l'espèce ($p < 0.0001$) et de la variété ($p < 0.0001$). **Le seigle a atteint la floraison 1 à 2 semaines avant le triticale**. De même, la **variété fourragère a permis d'avancer la maturité** grâce à son développement plus rapide à l'automne et au début du printemps.

La maîtrise du couvert a constitué le premier facteur de suivi des praticiens. La gestion des graminées a été satisfaisante pour les AE avec une note moyenne de 4.8/6 (Figure 39 et Figure 40). Les AE ont observé quelques différences **d'efficacité du roulage selon l'espèce et la variété** du couvert en lien avec **leur stade et leur hauteur**. La majorité des AE (5/7) a noté une efficacité du roulage suivant le classement : Seigle > Mélange > Triticale. Une efficacité du roulage plus élevée a aussi été observée pour le seigle fourragère que le seigle grain ; « *après le roulage on parvenait à distinguer les 2 variétés car le seigle fourragère ne s'est pas relevé alors qu'il y avait des relevés d'épis du seigle grain* » (GA).

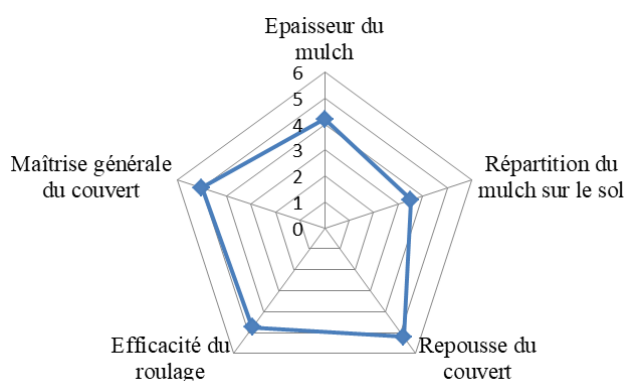


Figure 39: Notes de satisfaction moyenne des agriculteurs – expérimentateurs sur la maîtrise du couvert végétal (n=7) (note allant de 1 à 6).



Figure 40: Roulage du couvert végétal au printemps. 19 mai 2018. Site 18-GAY.

Pour expliquer l'hétérogénéité des résultats, les praticiens ont analysé (1) le design du rouleau, (2) l'orientation du roulage, (3) le positionnement du roulage par rapport au semis du soja, et (4) le nombre de roulages.

- **design du rouleau :** Deux rouleaux ont été utilisés : un rouleau co-construit (utilisé par 6/7 des AE) et un rouleau Faca ® (utilisé par l'AE BA sur 3 essais) (Figure 41). Le premier, a satisfait 5/6 des AE car le poids et le design ont permis d'affecter les tiges. Toutefois, VA précise que le rouleau est plus « adapté à un couvert haut et dense. Dans les conditions que nous avons eu, le couvert était peu dense et le sol était dur ce qui a impliqué des vibrations et une efficacité mitigée ». Pour améliorer le roulage, TR a regretté l'absence « d'effet rippage » sur le rouleau que pourrait avoir un rouleau Roll Krom (actisol) © d'après ses recherches personnelles. Le second rouleau a obtenu une note de 2/6. Pour BA, ce rouleau n'est pas adapté car il n'est pas suffisamment lourd « malgré le remplissage d'eau, j'ai dû passer plusieurs fois, [...], des lames fixées sur des cornières seraient plus adaptées ».



Figure 41: A gauche, le rouleau co-construit pour les essais (3 m de large, 1.4 T). A droite, le rouleau FACA (R) (6 m de large, 2T sans eau).

- **orientation du roulage :** Malgré des études montrant que le roulage donne de meilleurs résultats lorsque celui-ci est perpendiculaire à son semis (Kornecki et al., 2005), 4/7 des AE ont souhaité mener une bande test pour le vérifier chez eux. Les résultats sont conformes aux connaissances scientifiques ; « on voit plus de relevés sur les bandes roulées en parallèle plutôt qu'en perpendiculaire » (GA) (Figure 42).



Figure 42: Bande test - Roulage parallèle au sens du semis du couvert végétal. Le 19 mai 2018. Site 18-GA.

- **positionnement du roulage :** Les AE sont partagés sur la stratégie à privilégier entre « semis/roulage » et « roulage/semis » qui ont été testés sur une « bande test ». Celle-ci a permis d'observer une facilité à semer la graine à 3-4 cm de profondeur, comparée à la stratégie « roulage/semis ». Toutefois, rouler dans un second temps a généré la présence de pailles dans les sillons de semis affectant la levée.
- **nombre de roulages :** Enfin, sur les 4 AE qui ont expérimenté le nombre de roulages, tous ont observé « *un effet visuellement très positif sur la gestion du couvert* » (AE SE). Le second roulage permet de « *ré-appuyer* » les relevés du couvert sur le sol. Pour les AE, « *c'est mieux, c'était très net et cela optimise le recouvrement du sol pour empêcher la prolifération d'adventices* ».

Pour maîtriser le couvert sans herbicide, tout en minimisant la perturbation du sol, un **couvert haut et dense**, associé à un stade de **pleine floraison** conduisent aux meilleurs résultats. Par ailleurs, le passage du rouleau avant le semoir et **perpendiculaire au sens du semis du couvert** améliore la répartition du mulch au niveau de la surface du sol et limite la présence de paille dans les sillons. Le type de rouleau utilisé est un facteur déterminant dans l'efficacité de la gestion du couvert pour blesser durablement les espèces et limiter des relevés. L'enjeu du roulage réside, non seulement, dans la création d'une blessure des tissus végétaux du couvert pour bloquer son alimentation en éléments nutritifs et en eau, mais aussi dans l'arrêt de son cycle de production avant le remplissage des grains afin d'éviter des repousses dans la culture suivante.

2.1.4. Performance du soja au cours des itinéraires techniques innovants

2.1.4.1. Levée de la culture

Les deux stratégies de semis du couvert (date x densité de semis) n'ont pas eu d'effet sur la performance du soja ($p = 0.37$). Cependant, parmi l'ensemble des essais menés **des pertes élevées** de l'ordre de 40 % en moyenne sont constatées affectant le potentiel de rendement du soja. Le type d'espèce du couvert n'a pas impacté la levée du soja qui atteint une moyenne de 325 000 plant.ha⁻¹ ($p = 0.36$) (Tableau 10). Le facteur « variété » montre que la variété de seigle grain a permis d'obtenir 50 000 plante de soja supplémentaires que le couvert de seigle fourrager ($p = 0.005$).

Les modalités de gestion du couvert, en particulier le roulage, présentent un effet important sur la levée. **La levée est affectée lorsque deux roulages ont été réalisés** plutôt qu'un seul ($p < 0.0001$) (Figure 43). Par ailleurs, le roulage du couvert, laissé ensuite sur le sol, a permis d'assurer une meilleure levée du soja que le déchaumage où le soja a été plus affecté par des attaques de pigeons ($p = 0.01$). Enfin, les résultats indiquent 50 000 plant.ha⁻¹ de levées supplémentaires lorsque l'inter-rang du soja est de 33 cm contre 16 cm ($p = 0.002$) (Tableau 10).

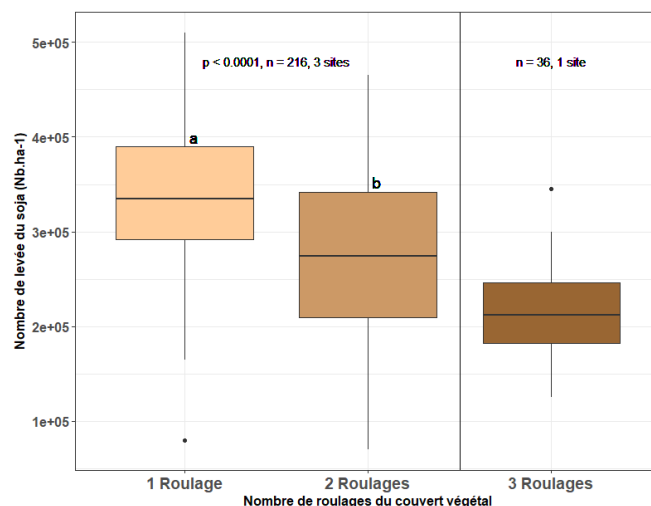


Figure 43: Effet du nombre de roulages sur la levée du soja. Ces données ont été analysées à partir d'un modèle linéaire mixte ($p < 0.0001$, $n=216$). Les modalités suivies par une lettre différente sont significativement différentes.

Les AE ont attribué une note de 3.5/6 pour la levée du soja à cause de pertes et d'hétérogénéité (Figure 44 et Figure 45). La majorité d'entre eux a observé une levée du soja lente qui était « *un peu moins vigoureux, plus petit et chétif* » que le soja produit dans leurs pratiques. Pour 5/7 des AE, le semoir constitue « *un facteur limitant* » et peut expliquer les pertes. D'après JU, « *il aurait fallu ralentir la vitesse du semis pour améliorer la précision* ». Les AE ont insisté sur la nécessité d'améliorer la performance du semoir pour semer une culture « *sous autant de biomasse* » car en fonction des sites « *les sillons n'étaient pas refermés et le sol était dur, entraînant des difficultés pour les disques de rentrer et pour les racines de s'implanter* » (GA). Les graines ne sont parfois « *pas suffisamment enterrées à cause du mulch ... il faudrait doubler les densités de semis du soja* » (BA) pour compenser les difficultés liées au semoir.

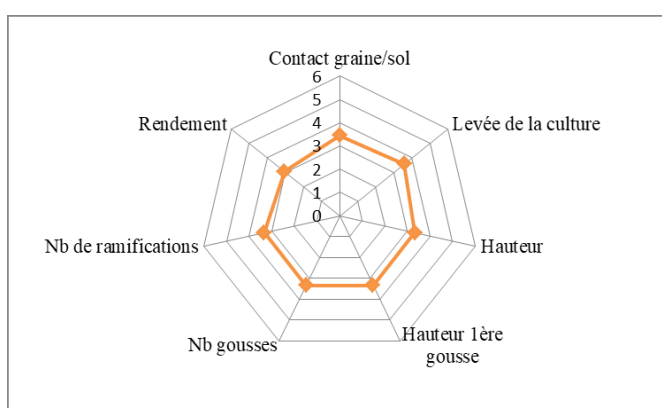


Figure 44: Notes de satisfaction moyenne des agriculteurs – expérimentateurs sur la performance du soja ($n=7$) (note allant de 1 à 6).



Figure 45: Levée du soja sur le site 18-GA le 15 juin 2018.

Des variabilités de levées ont été observées entre les sites. Par exemple, JU n'a observé que 130 000 plant.ha⁻¹ (soit 75 % de perte à la levée) alors qu'à l'inverse l'AE VA a été satisfait de la levée ;

« *c'était plutôt une bonne levée pour des terres argileuses et difficiles* ». Le praticien a observé un peu plus de 400 000 plant.ha⁻¹ (25 % de perte). Ces variabilités inter-sites peuvent être liées au contexte mais aussi à l'hétérogénéité discutée précédemment au niveau de la pression des adventices et de la biomasse du couvert conditionnant l'efficacité du semoir et de la levée. Hormis le matériel, les praticiens ont relevé l'effet du **contexte pédoclimatique** et des **ravageurs** sur la levée.

Notamment, les **conditions sèches** présentes lors de la levée ont généré un stress hydrique expliquant la plus lente levée comparée aux pratiques des AE. D'après JU, « *cette technique est très liée au climat pour le couvert et la culture, pour moi l'un des facteurs limitants de l'essai a été l'eau* ». Les **dégâts de ravageurs**, observés sur certains sites, ont été à l'origine de pertes à la levée plus ou moins importantes (limaces, pigeons, blaireaux, lièvres). Les attaques de pigeons, les plus problématiques pour 3 sites, ont entraîné l'abandon d'un essai. L'AE du site explique que des pigeons ont été « *attirés par le pois roulé situé autour de l'essai et ils se sont ensuite attaqués à l'essai [...] avec la présence du couvert, on a sous-estimé les ravageurs, je pensais que le soja serait protégé* ».

2.1.4.2. Récolte de la culture

Le **rendement du soja est moins élevé sous le mulch de triticale** comparé aux mulch de seigle et du mélange ($p = 0.006$) mais il n'a pas été affecté par la variété du seigle ($p = 0.15$) (Tableau 10). Les modalités de gestion du couvert ont aussi toutes un effet sur le rendement du soja. Les rendements les plus élevés ont été obtenus (1) sur des couverts roulés une seule fois comparé à 2 roulages ($p < 0.0001$), et (2) sur la partie déchaumée en comparaison à la partie roulée ($p < 0.0001$) (Tableau 10). Enfin, les rendements du soja sont plus élevés avec un inter-rang plus étroit à 16 cm contre 33 cm ($p = 0.01$).

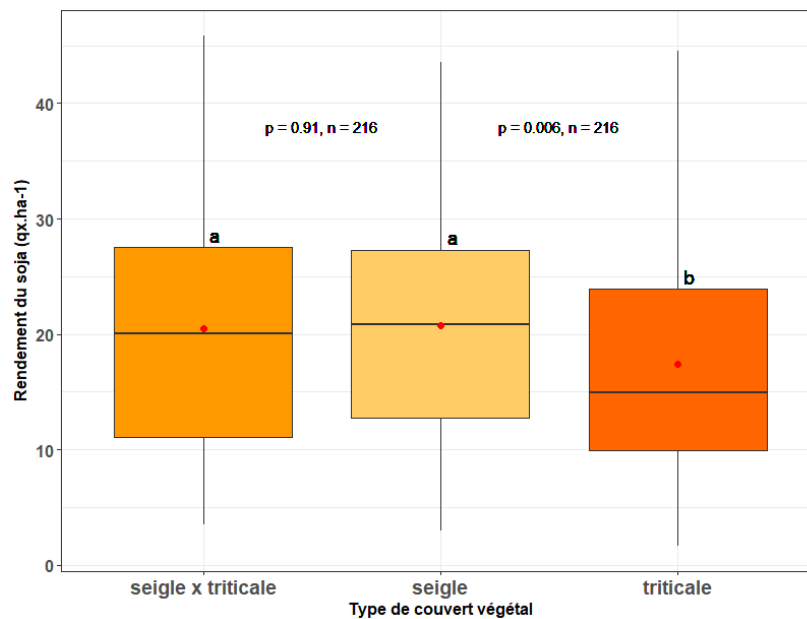


Figure 46: Rendement du soja (qx.ha⁻¹). Ces données ont été analysées à partir d'un modèle linéaire mixte ($p < 0.0001$, $n=216$). Les couverts végétaux suivis par la même lettre ne sont pas significativement différents. Les points rouges correspondent à la moyenne des rendements de soja par couvert.

Les avis des AE sont mitigés avec une note moyenne de 3/6, car les rendements sont inférieurs à leurs pratiques (Figure 44). Trois des AE ont attribué toutefois une appréciation supérieure à la moyenne car le faible temps passé et investi sur la parcelle a été pris en compte dans leur évaluation et peut, d'après eux, « *se compenser sur la marge pour retrouver un équilibre* » (VA) comme l'explique l'AE JA : « *le rendement est un peu moins élevé que le travail du sol mais reste dans la moyenne de ce qu'on connaît et par rapport aux investissements réalisés, c'est encourageant* ». A l'opposé, trois autres AE ne considèrent pas la perte de rendement acceptable. Pour eux, le rendement doit être plus proche de celui visé dans leurs pratiques pour envisager une adoption. Afin d'optimiser le rendement, la maîtrise des adventices reste le principal challenge. D'après l'AE BA, « *même s'il s'agit de mauvaises années [en parlant de la sécheresse], le niveau d'infestation des adventices explique les faibles récoltes, il faut plus jouer sur le couvert et la fertilisation pour que la technique réussisse* ».

La présence de seigle dans le couvert précédent l'implantation du soja en SD conduit à de meilleures performances agronomiques. La levée du soja ne diffère pas en fonction des couverts, mais la **maîtrise des adventices assurée par le seigle (seul ou en mélange)**, à quantité de MS du couvert similaire permet d'obtenir des rendements plus élevés. Cependant, l'application de **plusieurs roulages affecte les levées** qui, associés aux difficultés techniques du semoir pour assurer le contact graine-sol, peut être à l'origine de pertes sur le rendement.

2.2. Performances économiques, organisationnelles et environnementales

Les résultats montrent que la performance économique dépend du rendement mais également des coûts investis sur le couvert végétal. Ceux-ci reposent sur 2 facteurs principaux :

- (1) **Les coûts investis sur l'implantation du couvert** : Le coût des semences, variant en fonction des espèces, constitue une part non négligeable des charges (27 %) puisqu'elles sont semées avec des densités de semis élevées. Le semis du couvert a été réalisé après 2 à 3 déchaumages impactant aussi les résultats économiques et environnementaux ainsi que le temps de travail (Figure 47).



Figure 47: Sol préparé après plusieurs déchaumages avant le semis des couverts végétaux. Site 18-BA.



Figure 48: Parcelle de soja après un écimage réalisé au cours de la floraison du soja (août). Site 18-BA.

- (2) **Le mode de gestion du roulage :** En cas d’infestation des adventices et de recours à des interventions de rattrapage (ex : 2-3 roulages, écimages, etc.) comme cela a été testé sur le site 18-BA, la viabilité de la technique n’est plus assurée (Figure 48).

2.2.1.L’implantation du couvert végétal et de la culture

Le mélange seigle x triticale a obtenu la marge brute la plus élevée comparée au seigle et au triticale dans 3/5 des sites (Figure 49). Le mélange a permis d’atteindre le meilleur équilibre entre l’investissement réalisé sur le couvert et la maîtrise des adventices, assurant un rendement plus élevé que le triticale. Dans le cas du seigle pur, le rendement n’est pas différent du mélange seigle x triticale mais ce dernier permet d’économiser 30 €.ha⁻¹ lors de son implantation.

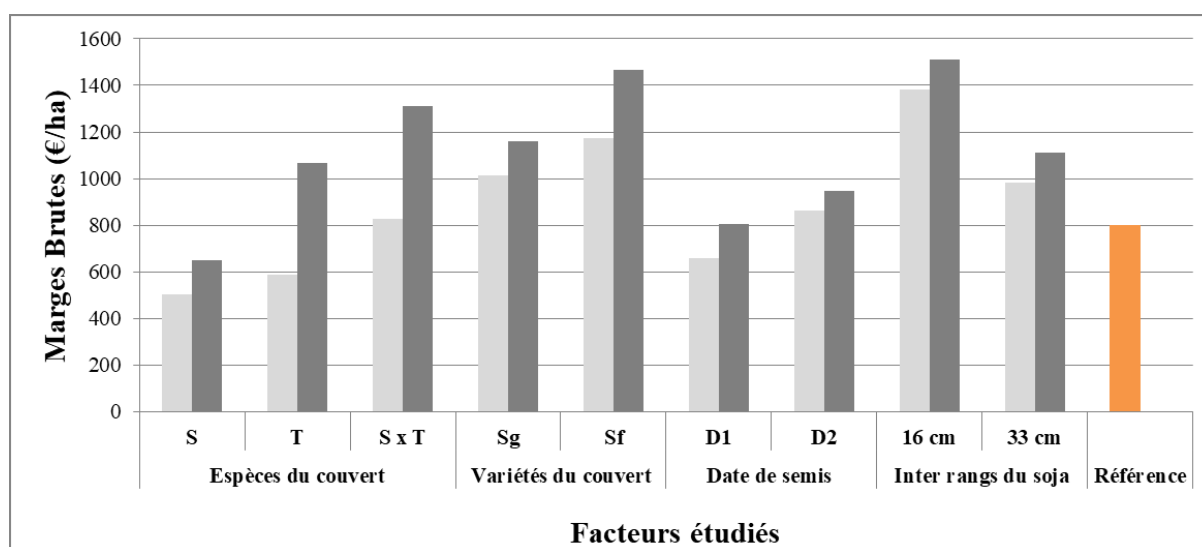


Figure 49: Marges Brutes des modalités testées pour les facteurs liés à l’implantation du couvert et du soja. S : seigle ; T : triticale ; Sg : seigle grain ; Sf : seigle fourrager ; D : date. En gris clair, les marges ont été calculées sur la base d’un achat des semences des couverts utilisés (scénario 1). En gris foncé, les marges brutes reposent sur l’hypothèse d’utilisation de semences de ferme (scénario 2). En orange, la marge brute correspond à la moyenne des résultats obtenus entre 2017 et 2018 par les praticiens avec leurs pratiques.

La marge brute obtenue avec un couvert de seigle fourrager est plus élevée avec 158 €.ha⁻¹ de plus que le couvert de seigle grain, grâce au rendement du soja en SD plus élevé (Figure 49). Cependant, cette différence n’est pas significative et ces résultats ne reflètent que d’un seul essai, mené jusqu’à la récolte. De nouveaux essais sont nécessaires pour identifier la ou les variétés les plus adaptées. La différence observée sur la marge brute entre les deux dates de semis du couvert s’explique par la moyenne plus élevée obtenue sur le rendement du soja pour la seconde date de semis (Figure 49). L’inter-rang le plus étroit, de 16 cm, a permis d’obtenir la marge brute la plus élevée grâce au meilleur rendement, puisque le changement d’inter-rangs n’implique pas d’investissement supplémentaire.

En fonction des sites, les résultats observés au niveau de la marge brute et les avis des AE sont contrastés sur le rapport coût/bénéfice (satisfaction : 3.5/6) (Figure 50 et Figure 51). Sur certains sites,

par exemple les sites 17-SE et 18-BA, les ITK testés n’ont pas permis d’obtenir des marges brutes équivalentes ou supérieures aux ITK pratiqués (Figure 51). Pour TR, « le résultat a été moyen car le rendement est faible, c’est difficile de conclure sur un essai, car j’ai peu d’expérience sur le soja, il faut multiplier les essais ». D’après JU, « les conditions de l’année étaient difficiles et l’échec est lié à la parcelle qui présente une faible RU en eau. C’est une technique soumise aux aléas ce qui double la prise de risque ». A l’inverse, sur d’autres sites, les résultats ont été prometteurs avec des marges brutes supérieures à l’ITK pratique comme sur le site 18-JA (Figure 51). Les praticiens VA et JA ont des opinions optimistes par rapport aux résultats observés sur leur site ; « même avec une année difficile, la technique a été envisageable » (JA) ; « les essais sont encourageants » (VA).

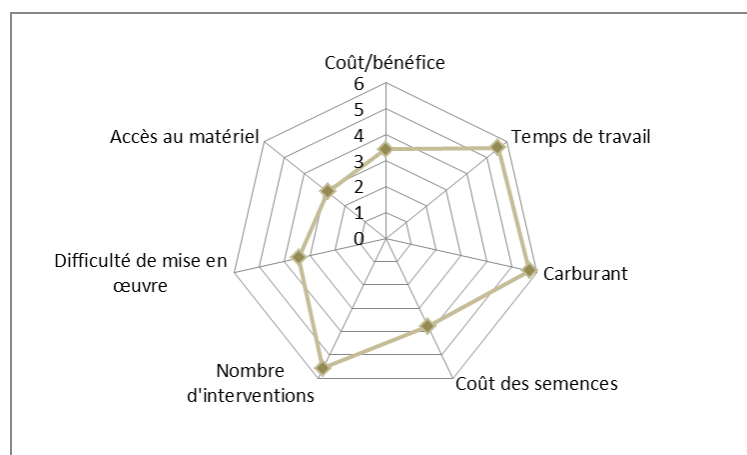


Figure 50: Notes de satisfaction des praticiens vis-à-vis des performances économiques, organisationnelles et environnementales (note allant de 0 à 6).

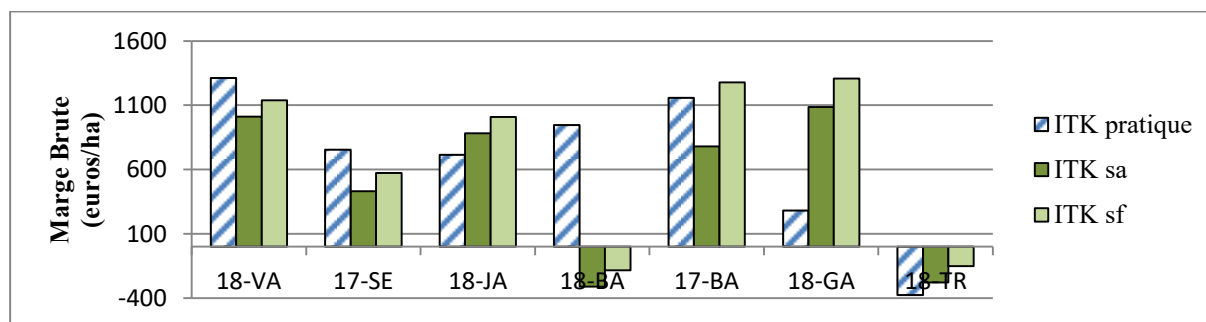


Figure 51: Comparaison des marges brutes obtenues entre les essais et les pratiques des AE sur le soja [sa : les marges ont été calculées sur la base d’un achat des semences (scénario 1), sf : les marges brutes reposent sur l’hypothèse d’utilisation de semences de ferme (scénario 2)].

2.2.2. Le mode de gestion du couvert végétal

Le mode de gestion du couvert a un effet sur la marge brute mais aussi sur le temps de travail et la performance environnementale, puisque qu’il définit le nombre d’interventions appliquées sur la parcelle (Tableau 11). Le second roulage a réduit la marge brute de 780 €.ha⁻¹ car celui-ci a affecté les levées, entraînant une perte de rendement. Il a aussi induit des charges supplémentaires avec l’augmentation de 3.4 l.ha⁻¹ de consommation de carburant et de 0.5 h.ha⁻¹ de temps de travail

(Tableau 11). Un **second roulage engendre donc un investissement plus élevé** sans améliorer les résultats agronomiques. Le positionnement du roulage par rapport au stade de floraison du couvert est plus important que le nombre de roulages.

Le facteur « mode de destruction », quant à lui, montre que le roulage a conduit à de meilleures performances environnementales, organisationnelles et économiques grâce au nombre limité d'interventions, comparé à une technique basée sur du déchaumage et une gestion chimique. Toutefois, les résultats auraient pu être améliorés puisque le rendement a été moindre sur la modalité où le couvert a été roulé à cause d'une faible maîtrise des adventices.

Tableau 11: Performances économiques, organisationnelles et environnementales des modalités d'essais liées à la maîtrise du couvert végétal

Facteurs	Modalités	Marge Brute (€.ha ⁻¹)	Temps de travail (h.ha ⁻¹)	Consommation de carburant (l.ha ⁻¹)	Nombre de passages	IFT herbicide
Nombre de roulages	1 Roulage	1487.5	2.3	48.7	5	-
	2 Roulages	1144.5	2.8	52.1	6	-
	3 Roulages	-182	8	106.64	13	-
Gestion du couvert	Roulage	264.9	1.95	57.3	6	0
	Déchaumage + chimie	-370.2	3.25	78.3	9.5	0.84
Références*	Pratique AB	802.6	6.8	99.8	11	-
	Pratique conv.	105.8	6.1	111.6	13	1.6

AB : Agriculture Biologique ; Conv. : Agriculture Conventionnelle

IFT : Indice de Fréquence de Traitements phytosanitaires

*Moyenne des résultats obtenus entre 2017 et 2018 par les agriculteurs-expérimentateurs avec leurs pratiques types conduites sur la culture de soja (en AB ou en agriculture conventionnelle).

Pour JA, « si le couvert n'est pas assez épais et qu'on fait le choix de continuer, il faut accepter plus d'adventices et des baisses de rendements, [...], au niveau du faible travail on peut se le permettre mais si on investit pour essayer de sauver la parcelle en passant broyeur et compagnie ça devient ridicule on y perd ... intervenir pendant la floraison ne change rien, les jeux sont fait, il ne faut pas perdre du temps et de l'argent à faire des rattrapages inutiles [...], il faut regarder comment aurait géré ça un agriculteur avec le rapport coût/bénéfice, [...], moi je suis satisfait du résultat si je regarde l'investissement et le temps passé pour un résultat qui tient la route. Certains diront c'est sale on a moins de rendement mais pour moi c'est la marge brute qui compte, là c'est concluant ».

Malgré quelques contrastes observés en fonction des sites, les résultats montrent que les ITK innovants permettent de réduire le temps de travail (Tableau 10 et Figure 52). La satisfaction des AE relative au temps de travail est pratiquement maximale (Figure 50). Pour 5/7 des AE, le temps de travail a été réduit de plus de la moitié par rapport au temps qu'ils passent dans leurs pratiques sur le soja (Figure 52). Néanmoins, peu de gain de temps de travail est noté sur le site 18-BA qui correspond au site où différentes interventions de rattrapage ont été testées (roulages, écimages). Au niveau du site

17-SE, le gain de temps de travail est aussi plus faible comparé à l’ITK pratique, reposant déjà sur un nombre limité d’interventions. Les objectifs de ce praticien, depuis plus de 15 ans, s’appuient sur une économie de la consommation énergétique et du nombre d’interventions pour améliorer le taux de MO des sols qui ont été appauvris par une ancienne activité d’arboriculture.

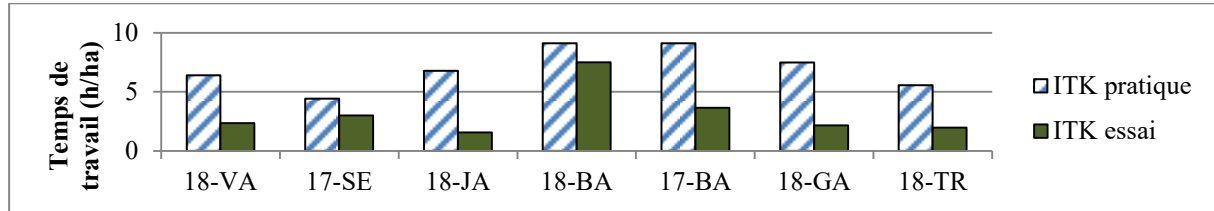


Figure 52: Comparaison du temps de travail passé entre les essais menés chez les praticiens et leurs pratiques

La consommation de carburant connaît sensiblement les mêmes diminutions que le temps de travail et les mêmes satisfactions (Figure 53 et Figure 50). Les AE économisent pratiquement plus de la moitié de leur consommation de carburant pour 5/7 des AE (Figure 53). Au regard des pratiques des AE sur la culture de soja, les deux autres indicateurs suivis pour évaluer la performance environnementale sont également améliorés dans les ITK testés, avec en moyenne 6 interventions en moins sur les parcelles (moins de perturbation du sol) et un IFT –herbicide égale à 0 (Tableau 11).

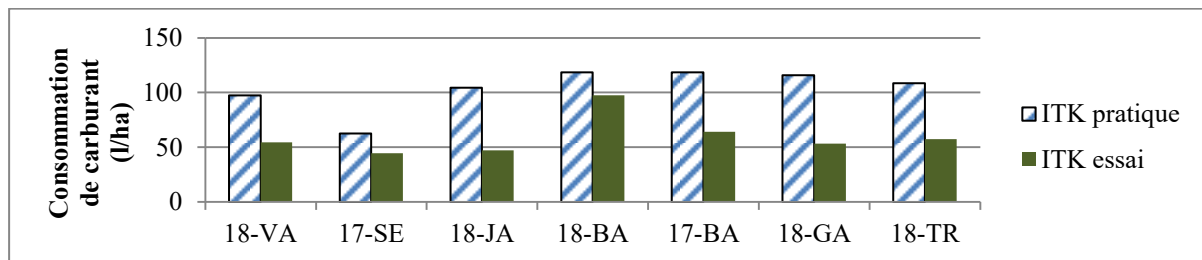


Figure 53: Comparaison de la consommation de carburant entre les essais menés chez les praticiens et leurs pratiques.

3. Discussion

Le **couvert végétal** est le facteur sur lequel les connaissances ont été les plus produites autour de trois questions : Quels types de couvert ? Quelles stratégies techniques de semis ? Comment gérer le couvert ? Les ITK testés ont permis de produire **des connaissances sur l’implantation et la gestion des couverts**. Cependant, des thématiques indispensables à la réussite, identifiées dans le chapitre 3, n’ont été que très peu enrichies. Notamment, les connaissances produites sur les ravageurs ont été limitées alors que la préoccupation des AE reste élevée. En recherche, peu d’études existent sur les ravageurs ou les auxiliaires des cultures en SDSC alors que Rivers et *al.* (2018) montrent que le type de couvert et la période du roulage modifient la population des prédateurs. Par exemple, la vesce et le triticale favoriseraient plus le développement de certains prédateurs (araignées, staphylins, carabes) que le seigle. Dans notre étude, les ravageurs et les prédateurs n’ont pas été suivis mais ils ont été à

l'origine de pertes de levée importantes. Des solutions sont à étudier pour rendre les parcelles de SDSC moins attractives pour les ravageurs en s'intéressant par exemple au choix des espèces, qui jusqu'ici s'est focalisé en priorité sur la production de MS, la capacité à gérer les adventices et la maîtrise des couverts par roulage.

La faible disponibilité de l'azote est aussi une thématique soulevée dans les essais en tant que facteur limitant. D'après les AE, le précédent blé de la plupart des sites a entraîné une faim d'azote lors de l'implantation du couvert mais peu de connaissances ont été produites sur cet axe de recherche. Pour approfondir cette question, des essais à long terme sont à conduire pour identifier les meilleurs précédents et approfondir les connaissances sur la dynamique de l'azote qui diffère des pratiques traditionnelles, basées sur du travail du sol et/ou l'utilisation d'herbicide.

3.1. Les combinaisons techniques innovantes conçues

La littérature montre que les essais menés en milieu paysan reposent souvent sur de petits changements au sein des pratiques déjà en place localement (ex : comparaison de variétés, type de fertilisation, etc.) (Kummer et *al.*, 2012; Sumberg and Okali, 1997). Dans notre étude, le changement est radical, comparé aux pratiques locales, de par la mobilisation d'un couvert pour remplacer l'utilisation d'herbicide et de travail du sol. Cet ITK « en rupture » est ensuite adapté progressivement au contexte, grâce au travail conjoint, par l'application de modifications techniques (espèces ou variétés du couvert, etc.). Les ITK conçus avec les AE reposent sur des conduites **proches de prototypes expérimentés en recherche** sur le continent Nord-Américain (Delate et *al.*, 2012a), ou par quelques praticiens français innovants (Chapitre 3). Cependant, ces ITK présentent des **modifications techniques** émergentes du travail de conception conjoint, qui visent à améliorer l'**adaptation** des principes du SDSC dans le **contexte local** (Rouleau auto-construit, inter-rangs du soja, choix du triticales, plus utilisé dans le secteur, etc.).

Toutes les combinaisons techniques reposent sur les deux principes, sans travail du sol ni herbicide, mais diffèrent par de légères modifications techniques relatives **aux choix des couverts, à la densité de semis, la date de semis, le mode de roulage ou l'inter-rang du soja**. L'absence de travail du sol n'est cependant pas vérifiée sur l'ensemble de l'ITK puisque dans tous les cas, des **déchaumages ont été appliqués pour préparer le sol avant le semis du couvert** (Figure 54). Ces interventions de travail du sol s'apparentent à la méthodologie pratiquée en recherche visant à optimiser leur implantation dès le début de l'ITK pour minimiser la pression initiale des adventices (Mirsky et *al.*, 2012; Wallace et *al.*, 2018).

A l'inverse, les praticiens en transition de notre enquête en ligne (Chapitre 3), misent davantage sur les bénéfices apportés au sol par l'absence de travail à **l'échelle de la rotation**. Ceci afin de ne pas affecter le potentiel agronomique du sol construit sur plusieurs années. Cette question de **SDSC**

« **opportuniste** » est très controversée dans la littérature (Vincent-Caboud et *al.*, 2019a). Des auteurs pensent que le **SDSC continu** est indispensable pour conserver les bénéfices produits par la technique (Anderson, 2015; Grandy et *al.*, 2006; Melero et *al.*, 2011). Au contraire, d'autres auteurs montrent en agriculture conventionnelle, que l'introduction stratégique de travail du sol superficiel au sein de la rotation, permet de gérer les adventices pérennes et de conserver la viabilité de la technique sur plusieurs années (Dang et *al.*, 2015; Liu et *al.*, 2016; Renton and Flower, 2015; Venterea et *al.*, 2006).

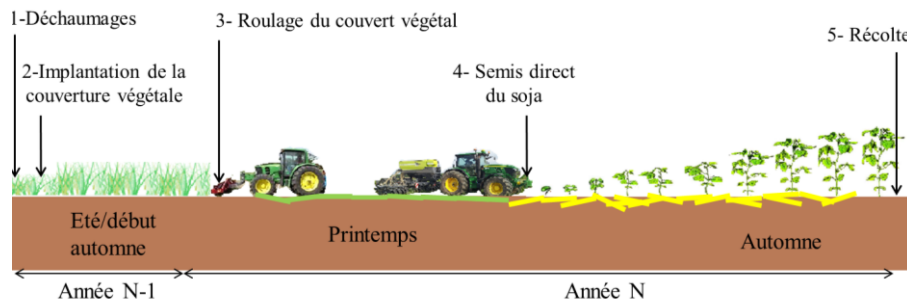


Figure 54: Représentation schématique des cinq interventions principales des itinéraires techniques innovants.

Les techniques conçues sont innovantes mais rencontrent **des limites** lorsqu'elles sont testées au champ, car le **matériel** végétal utilisé pour le mettre en place reste identique aux pratiques locales (variétés du soja et du couvert). Or, le degré de rupture que génère le SDSC sans herbicide nécessite de repenser les pratiques dans leur ensemble (Dugue et *al.*, 2015; Scopel et *al.*, 2004; Triomphe et *al.*, 2008). Les résultats montrent des levées très lentes du soja avec le matériel génétique local car les variétés disponibles sont sensibles à la compétition exercée par le couvert et les adventices. Une amélioration génétique serait à mobiliser en parallèle au sein de ces ITK pour utiliser des variétés plus adaptées à l'environnement compétitif créé.

Dans une étude menée en arboriculture, Sauphanor and Lescourret (2007), expliquent qu'il existe différentes voies de conception d'ITK complémentaires entre elles : (1) la **conception de règles de choix cultureaux**, (2) la **conception expérimentale**, et (3) la **conception assistée par modèle**. Dans notre étude, nous mobilisons les deux premières voies de conception en s'appuyant sur un processus flexible et évolutif en fonction des résultats observés et des avis des praticiens pour adapter la technique au contexte local. Cependant, comme le soulignent différents auteurs, la voie expérimentale de manière exploratoire, bien qu'indispensable et source d'innovation, peut aussi être rapidement coûteuse en temps et en main d'œuvre (Hoffmann et *al.*, 2007; Sauphanor and Lescourret, 2007; Sumberg and Okali, 1997). Ainsi, sur la base des premiers résultats d'essais, la construction de la troisième voie de conception assistée par modèle permettrait d'explorer une plus grande diversité de solutions à moindre coût, avant d'identifier les plus pertinentes à expérimenter.

3.2. Les performances des techniques innovantes expérimentées et les enjeux pour la recherche

Parmi les essais expérimentés chez les praticiens (Figure 25), la Figure 55 présente les trois combinaisons techniques les plus performantes à la fois sur le plan agronomique, économique, organisationnel et environnemental. Ces ITK actionnent des leviers relatifs au type de couvert végétal, à son mode d'implantation et de destruction ainsi qu'à la stratégie de semis du soja.

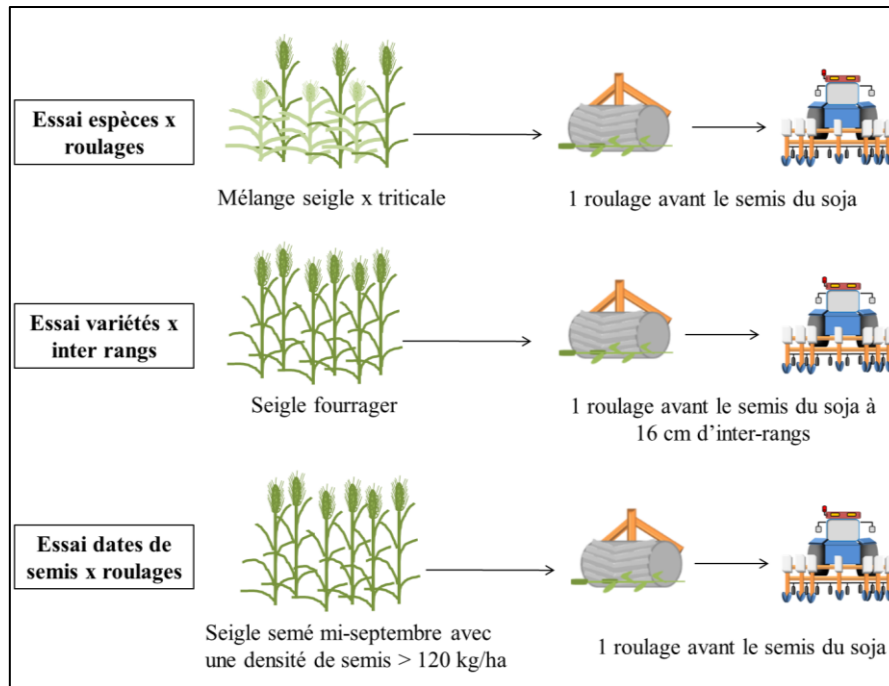


Figure 55: Représentation schématique des combinaisons techniques les plus performantes.

3.2.1. L'implantation du couvert végétal

Quel type de couvert ?

Les résultats confirment l'intérêt du seigle, et notamment de variétés fourragères, pour gérer les adventices. Ceci est aussi relevé dans la littérature (Delate et al., 2012a; Mirsky et al., 2012; Silva, 2014; Vincent-Caboud et al., 2019b) (Figure 55).

En recherche, les couverts les plus expérimentés, et notamment sur la culture du soja, sont des couverts mono spécifiques (Bavougian et al., 2019; Crowley et al., 2018; Lefebvre et al., 2011; Smith et al., 2010; Weber et al., 2017; Wells et al., 2015; Williams et al., 2018). Face à la difficulté de maîtriser plusieurs espèces dans un couvert sans herbicide, ni travail du sol, le nombre d'espèces est souvent limité (Delate et al., 2012a; Wallace et al., 2017). Seuls quelques travaux reportent des connaissances sur des couverts composés de plusieurs espèces (Bavougian et al., 2019; Clark et al., 2017; Liebert et al., 2017; Wallace et al., 2018). Or, nos travaux montrent que les mélanges, bien que plus complexes à gérer, concilient le mieux les dimensions agronomiques et économiques (Figure 55). En assurant la maîtrise des adventices par la présence de seigle, le mélange a permis d'obtenir des

rendements de soja égaux ou plus élevés qu’avec un couvert monospécifique tout en limitant le coût du couvert et en améliorant la marge brute. Le fait d’associer plusieurs espèces est considéré comme un choix « *plus sécuritaire* » par les AE et les praticiens en transition (chapitre 3). Outre le coût du couvert souvent réduit par la mobilisation de mélanges (Kaye and Quemada, 2017; Snapp et al., 2005; Wortman et al., 2012), en cas d’aléas climatiques ou d’hétérogénéités du sol, ce type de couverts améliore la probabilité qu’au moins une espèce s’implante et recouvre le sol. Cependant, Halde et al. (2014) montrent que le mélange de plus de 2 espèces ne conduit pas nécessairement à de meilleurs rendements, biomasse du couvert ni de production d’azote.

Le développement d’outils d’aides à la décision pourrait améliorer le pilotage d’un système de production intégrant du SDSC vis-à-vis de la variabilité observée sur les couverts. Des outils sont disponibles pour évaluer les couverts comme l’application Canopeo (Büchi et al., 2018b; Chung et al., 2017; Joiner, 2016; Patrignani and Ochsner, 2015). Cependant, ceux-ci ne prennent pas en compte la globalité d’un ITK en SDSC et ne sont pas adaptés aux objectifs de la technique.

Quelle stratégie d’implantation du couvert ?

Les essais confirment la stratégie identifiée dans le chapitre 3. Les couverts sont plus épais et améliorent la maîtrise des adventices lorsqu’ils sont **semés tôt avec des densités de semis plus élevées** que les pratiques traditionnelles (Place et al., 2009). En particulier, pour les graminées, les densités de semis classiques testées (90-120 kg.ha⁻¹) ne sont pas concluantes puisqu’elles ont entraîné une forte infestation d’adventices avec plus de 2 500 kg.ha⁻¹ de MS lors de la récolte (Figure 55). Les densités de semis atteignant plus de 200 kg.ha⁻¹ ont été plus adaptées en permettant de favoriser un recouvrement plus rapide du sol comme le montrent Ryan et al. (2011). Dans le cas des mélanges composés de graminées et de légumineuses tels que seigle/pois ou seigle/féverole testés avant le maïs, les proportions seraient à déterminer afin d’identifier les plus appropriées en fonction des conditions.

3.2.2. La maîtrise du couvert sans herbicide ni travail du sol et l’implantation du soja

Quel mode de gestion du couvert ?

En recherche, les ITK reposent souvent sur plusieurs roulages pour maîtriser le couvert (Mirsky et al., 2012). Cependant, plusieurs roulages augmentent le temps de travail, réduisent les performances environnementales et affectent la levée du soja. Cette perte de levée se répercute sur le rendement et la marge brute. Les observations des praticiens indiquent que la maîtrise d’un couvert dense par roulage lors de sa floraison peut être satisfaisante, sans intervention chimique, comme le montrent plusieurs auteurs dans la littérature (Mirsky et al., 2012; Mischler et al., 2010; Moyer, 2011).

Quel mode d’implantation du soja ?

L’inter-rang le plus étroit, de 16 cm, a conduit aux meilleurs rendements bien que la pression des adventices ne soit pas différente (Figure 55). Les connaissances scientifiques sont peu développées sur

les inter-rangs mais Bernstein *et al.* (2011); Lefebvre *et al.* (2011) observent les mêmes tendances avec des rendements plus élevés sur des inter-rangs de 19 et 38 cm comparés à 79 cm. Les inter-rangs étroits ont accéléré le recouvrement du sol permettant de limiter la pression des adventices.

Les essais ont majoritairement été **conduits sur du soja**. Cette méthodologie a permis d’approfondir la mise en place de la technique, mais **limite la généricité des connaissances** produites à d’autres types de cultures. Des essais ont néanmoins été initiés sur le maïs¹ mais le faible nombre de sites répété limite les enseignements et la capacité à valoriser ces connaissances. Les résultats des couples couverts/maïs n’ont pas été concluants pour justifier la répétition de ces combinaisons sur plusieurs sites. D’importantes difficultés sont relevées au niveau de la gestion de couverts composés d’une graminée et d’une légumineuse. De plus, la plus faible capacité de ces couverts à gérer les adventices a affecté plus de la moitié du rendement de maïs. Plusieurs auteurs reportent ces résultats dans la littérature avec des couverts de types pois/seigle ou vesce/seigle (Delate *et al.*, 2012a; Wallace *et al.*, 2017; Wells *et al.*, 2016).

3.3. Méthodes d’expérimentation et de suivi : des apports complémentaires des praticiens et des chercheurs

Comme l’expliquent Hoffmann *et al.* (2007); Vall *et al.* (2016), les méthodes d’expérimentation des chercheurs et des praticiens diffèrent. Travailler conjointement crée une complémentarité de connaissances et ne produit pas les mêmes résultats que si ces derniers avaient travaillé séparément. Ces propos s’illustrent dans le type d’ITK, mais aussi dans (1) l’évolution des essais sur plusieurs années, (2) le mode de suivi des essais et (3) le domaine de validité des connaissances produites.

L’évolution des essais repose sur la flexibilité du processus vis-à-vis des nouvelles idées des AE. En particulier, les bandes test ont permis d’orienter les futurs dispositifs formels en minimisant la prise de risque, pour les AE et les chercheurs, que les essais soient abandonnés avant la récolte. Les bandes test, conçues par les praticiens, émergent en fonction des échanges entre les acteurs. Ces bandes portent souvent sur des sujets peu documentés par la recherche (inter-rangs, positionnement du roulage après le semis de la culture, écimage en rattrapage, etc.), contribuant ainsi à ouvrir le champ des possibles. Les méthodes d’expérimentation formalisées, étant plus coûteuses en moyens et en temps (Sumberg and Okali, 1997), les bandes test ont permis d’optimiser le temps pour le consacrer à la mise en place de dispositifs formels autour des facteurs validés par les AE et les chercheurs. Par exemple, en 2017, une bande test était présente sur le site 17-SE sur laquelle le soja avait été semé avec des inter-rangs plus étroits (16 cm). Lors du développement du soja, la culture était plus dense et vigoureuse comparée au dispositif formel où les inter-rangs étaient plus larges (50 cm). Suite à ces résultats, deux essais comparant plusieurs inter-rangs du soja ont été mis en place l’année suivante.

¹ Données non présentées dans le manuscrit.

La complémentarité des connaissances des praticiens et des chercheurs a aussi été observée dans la **méthode de suivi des essais**. Par exemple, les chercheurs ont procédé à des mesures à des instants ‘t’ définis en amont pour estimer quantitativement les performances du couvert, des adventices et de la culture. A l’inverse, les observations quotidiennes des praticiens ont permis de décrire des phénomènes qui ont pu intervenir entre ces phases de mesures (ex : ravageurs, stress hydrique, etc.). Les observations reportées par les AE améliorent l’interprétation des phénomènes observés et accélèrent ainsi la production de connaissances. Par ailleurs, la méthode de suivi dépend des objectifs propres à chaque acteur et la diversité des intérêts des AE vis-à-vis du SDSC sans herbicide a enrichi la complémentarité des connaissances produites. Par exemple, expérimenter la maîtrise d’un couvert sans travail du sol ni herbicide constituait l’une des motivations premières de 3 AE. Lors de leurs observations, ces AE ont porté une attention particulière à l’action du rouleau sur le couvert lors de la destruction et aux relevés après le roulage.

Enfin, la démarche a permis d’apporter un regard sur le **domaine de validité des connaissances** produites. L’articulation entre les connaissances scientifiques et empiriques a été favorisée et elles ont pu être confrontées entre elles pour rester en cohérence avec les objectifs visés par les acteurs (Figure 56). Les sites permettent sur une petite échelle de combiner plusieurs types de connaissances afin de mobiliser leur complémentarité pour en produire de nouvelles. Combiner les connaissances des chercheurs et des AE sur une diversité de sites a permis la création de références locales et généralisables en recherche pour le facteur « espèces ». Par exemple, les essais étudiant ce facteur ont permis aux praticiens d’observer le comportement des espèces du couvert en lien direct avec leur contexte et d’imaginer, pour certains, des bandes test impliquant d’autres types de couvert plus adaptés à leurs contraintes (ex : pois fourrager, féverole, mélange mutlisécifique de seigle, trèfle et tournesol, etc.). L’interprétation des essais par les AE sur leur site et ces bandes test ont produit des connaissances empiriques (Figure 56). La multiplicité des sites étudiant ce facteur « espèce » a permis, en parallèle, de produire des connaissances scientifiques généralisables, valorisées auprès de la communauté scientifique à partir d’une publication (Vincent-Caboud et *al.*, 2019b).

Le travail conjoint a permis **d’enrichir des thématiques de connaissances scientifiques peu documentées**, en particulier sur le matériel. En effet, au cours des essais la présence des praticiens a permis de produire des connaissances sur les équipements spécifiques au SDSC mobilisés dans les ITK (rouleaux, semoirs SD). Les praticiens ont permis d’enrichir les connaissances techniques pour affiner les réglages des outils. Notamment, la co-construction d’un rouleau puis son utilisation sur la plupart des sites a aussi été riche d’enseignements grâce aux observations empiriques de l’effet du rouleau dans différentes conditions (sol, densité et hauteur du couvert, climat). Ce croisement de points de vue avec les AE permet de préciser le domaine de validité du rouleau et d’identifier des perspectives d’amélioration pour élargir son champ d’application. Par exemple, le domaine de validité lié à la maîtrise du couvert par roulage s’est révélé restreint à certaines conditions [couvert de

graminées hauts (> 1.25m) et dense, sol ressuyé, floraison des espèces]. La recherche d'un rouleau plus agressif avec « un effet ripage » a été discutée en vue de disposer d'un rouleau « mixte », c'est-à-dire, efficace sur une diversité de types de couvert (graminées, légumineuses, etc.).

Le même semoir a aussi été utilisé au niveau de la majorité des sites permettant d'affiner également le domaine de validité des connaissances produites. Cependant, les connaissances restent limitées et les freins liés au semoir sont encore très présents car il ne permet pas d'assurer un contact graine-sol suffisant. Des pistes d'amélioration ont là aussi été proposées telle que l'utilisation de semoirs à disques inclinés mais elles sont freinées par la faible disponibilité du matériel qui limite les choix et les marges de manœuvre, dans le cas d'expérimentations conduites sur de faibles surfaces.

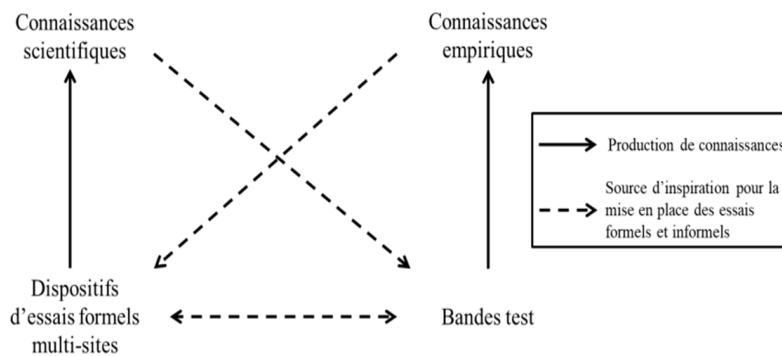


Figure 56: Schéma du processus de production des connaissances au niveau de chaque site

Le travail conjoint a permis de concevoir des techniques performantes et cohérentes avec les objectifs fixés (sans herbicide, ni travail du sol). L'articulation des connaissances des praticiens et des chercheurs a permis d'affiner le domaine de validité de connaissances liées aux matériels et aux espèces du couvert.

Malgré des rendements inférieurs, la démarche a permis d'identifier des combinaisons techniques plus performantes sur le plan économique (mélange seigle/triticales), organisationnel et environnemental que les pratiques locales, dans lesquelles la consommation de carburant et le temps de travail investis, dans le désherbage mécanique ou chimique, sont souvent élevés. Une maîtrise des adventices sans herbicide ni travail du sol a aussi été observée à partir d'importantes biomasses du couvert de seigle (> 8000 kg.ha⁻¹), même si celles-ci restent très dépendantes du contexte pédoclimatique. Ce travail conjoint permet une anticipation des problèmes lors de la mise en place des essais, une meilleure contextualisation de l'innovation, et une amélioration de l'identification de leviers adaptés pour optimiser la réussite. Cependant, l'étude de la gestion des couverts reste à approfondir pour limiter l'investissement réalisé, qui affecte la performance économique (coût des semences), et pour gérer la variabilité de leurs performances agronomiques. De même, des essais multi-sites à long terme permettraient de produire plus de connaissances sur la dynamique de l'azote, la gestion des ravageurs et la rotation, où les connaissances ont peu été développées.

Chapitre 5

**Conception conjointe pour innover et
développer le semis direct sans
herbicide**

Chapitre 5 : Conception conjointe pour innover et développer le semis direct sans herbicide

1. Objectifs et démarche méthodologique

Ce chapitre 5 correspond à l'hypothèse de recherche 3 : **un processus de recherche conjoint entre praticiens et chercheurs constitue une démarche efficace qui améliore la combinaison des connaissances pour en produire de nouvelles et promouvoir le SDSC sans herbicide.**

1.1. Critères d'évaluation retenus pour analyser la démarche

L'efficacité est la capacité à atteindre des objectifs préalablement établis (Midler et *al.*, 1997; Tulkens, 2009). Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, l'efficacité d'une démarche participative est souvent étudiée au travers d'une diversité de critères définis pour évaluer (1) **la participation des acteurs** (ex : rôle, apprentissage, degrés de participation, enrôlement, posture, créativité et innovation, appropriation) (Akpo et *al.*, 2015; Esilaba et *al.*, 2001; Hauser et *al.*, 2010; Probst et *al.*, 1994), (2) **la qualité des produits développés** (ex : performances, degré d'innovation, adoption, connaissances produites, changements dans les pratiques ou méthodes) (Desgagné, 1997; Kummer et *al.*, 2017; Leitgeb et *al.*, 2014) ou (3) **le déroulement du processus de recherche** (ex : efficacité de la démarche vis-à-vis des ressources investies, outils d'animation pour favoriser les échanges et gérer les conflits d'intérêts, atteinte des objectifs fixés, etc.) (Delate et *al.*, 2016; Neef and Neubert, 2011).

Pour évaluer l'efficacité de notre démarche, l'objectif a été de définir quelques critères d'évaluation issus de précédents travaux de recherche basés sur des processus d'expérimentation en milieu paysan. Une grille d'analyse a été élaborée afin d'analyser les forces et les faiblesses de notre démarche comparée à d'autres types d'approches. **La performance des ITK conçus**, précédemment présentée dans le chapitre 4, a constitué l'un des premiers critères. Nous détaillerons dans ce chapitre 5, les résultats de quatre nouveaux critères : **la production de connaissances, la créativité et l'innovation, l'enrôlement** des acteurs ainsi que **l'apprentissage** des praticiens et des chercheurs. Le critère relatif **au changement ou à l'adoption de nouvelles techniques** par les praticiens n'a pas été retenu car les praticiens ont été pour la majorité impliqués sur une durée de 1.5 ans, soit une année d'essai ce qui n'a pas permis de juger de leur degré d'adoption. Nous avons conservé cependant ce critère dans la grille d'analyse afin de discuter à la fin du manuscrit des perspectives de changements des pratiques en s'appuyant sur d'autres démarches identifiées dans la littérature.

L'ensemble de ces critères, a été suivi au cours des échanges réalisés entre les praticiens et les chercheurs mais aussi lors des rencontres collectives organisées, impliquant les partenaires du projet (AE et chercheurs) et des acteurs externes (praticiens, conseillers, techniciens).

1.1.1. La production de connaissances

La production de connaissances est un processus dynamique qui évolue au cours du temps et renvoie « à une combinaison d'expériences, de valeurs, de formations, d'échanges et d'idées qui apporte un cadre pour évaluer et intégrer de nouvelles expériences » (Grossman, 2003; Moschitz et Home, 2012). La capacité d'un processus de recherche à produire des connaissances est un critère d'évaluation indispensable au développement de pratiques durables (Audoux et Gillet, 2015; Clarke et al., 2018; Hall et al., 2010). Dès lors qu'il y a un échange entre plusieurs acteurs, un partage de connaissances s'opère et de nouvelles connaissances sont produites (Bonny, 2015; Lacombe et al., 2018). Dans notre étude, la démarche vise à favoriser la combinaison des connaissances scientifiques et empiriques, présentées dans le chapitre 3, en mobilisant des outils d'animation et d'interaction entre les acteurs. Nous allons donc nous interroger sur les connaissances produites à l'issue de notre démarche.

Outre la production de connaissances qu'une personne peut développer seule, en observant par exemple une parcelle, deux modes de production de connaissances, combinant les connaissances scientifiques et empiriques, sont présents dans la démarche et ont été favorisés : (1) des **rencontres AE-chercheurs**, entre les acteurs actifs du processus de recherche conjoint et (2) des **rencontres collectives** impliquant d'autres acteurs extérieurs au projet (praticiens, conseillers, techniciens)

1.1.1.1. Mode de suivi des connaissances au sein de la démarche

Des guides d'entretien semi-directifs ont été élaborés. Chaque année, deux entretiens formels ont été réalisés par AE : (1) au début de leur implication et (2) à la fin pour un entretien bilan (Figure 57). Le premier vise à caractériser le profil de l'AE et à définir ses pratiques (Annexe 13). L'entretien repose aussi sur le partage des objectifs entre l'AE et les chercheurs afin de trouver des compromis lors de la conception. L'entretien bilan a pour objet l'évaluation des performances agronomiques, organisationnelles, économiques et environnementales de l'essai. Lors de cet entretien, un support d'animation est utilisé. Il s'agit d'une grille de notation permettant au praticien d'évaluer son niveau de satisfaction sur des indicateurs de performance définis (Annexe 11). Le praticien peut ensuite librement justifier ses notations. Tous ces entretiens sont enregistrés.

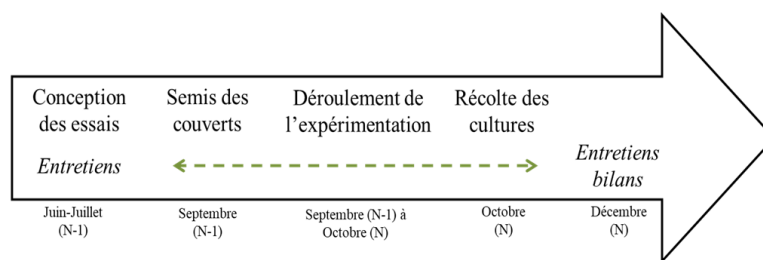


Figure 57: Représentation schématique d'une année et demie d'essais impliquant des agriculteurs - expérimentateurs

Lors de l'entretien bilan, un questionnaire de 5 min a été complété par les AE pour évaluer la démarche et suivre dans le temps la réponse à leurs attentes. Celle-ci constitue un indicateur clé relevé dans la littérature pour impliquer les praticiens (Gouttenoire et *al.*, 2014; Probst et *al.*, 1994; Reed, 2008). Ce questionnaire bilan a permis aux AE d'évaluer aussi la pertinence des ITK conçus, de leur niveau de participation aux choix opérés pendant la conduite des essais, du niveau de concertation entre « AE et chercheurs » et enfin de leur satisfaction générale du déroulement de la démarche.

Lors des échanges informels avec les AE, quel que soit le mode de communication (rencontres sur le terrain, appels téléphoniques, échanges d'emails ou de sms), des prises de notes ont été réalisées pendant et/ou après l'échange. Enfin, lors des rencontres collectives, des prises de notes et des enregistrements ont permis de recueillir les connaissances produites et les leviers suggérés pour faire face aux difficultés rencontrées. L'objectif était de relever les idées émergentes de ces échanges afin de les rediscuter avec les AE, pour orienter le processus d'expérimentation et les prochains essais mis en place. Ces échanges collectifs sont un outil support d'animation et d'enrichissement du processus de production de connaissances.

1.1.1.2. Méthode d'analyse des connaissances

Les résultats des essais ont permis de produire des connaissances locales sur le SDSC sans herbicide, aujourd'hui non pratiqué par les AE. Cependant, à l'échelle de la démarche, des connaissances ont également été produites au cours du processus lors des interactions « AE-Chercheurs » et lors des rencontres collectives dans lesquelles les partenaires ont été impliqués. Afin de caractériser ces connaissances, nous nous sommes intéressés à leur contenu (Tableau 12).

Une analyse thématique a été réalisée en fonction des principales catégories de connaissances qui émergeaient des interactions : les couverts végétaux, le matériel, les rotations, le sol, la levée de la culture, la gestion de l'azote, les ravageurs, les adventices, les techniques de mise en œuvre ainsi que les dimensions organisationnelles, économiques et environnementales. Ce travail a été réalisé pour chaque rencontre collective. Une connaissance est considérée ici comme toute intervention de l'un des acteurs amenant le débat avec les participants autour d'une idée, d'une information, d'une observation, d'une interprétation ou de la proposition de leviers d'amélioration. Les autres acteurs débattent sur

cette connaissance en apportant leurs points de vue. Chaque sujet (S) discuté a été catégorisé en fonction de son thème (ex : pour la catégorie couvert végétal : (S1) « *il faut semer tôt pour qu'il soit mature début mai* », (S2) « *le cycle du seigle a continué car on voit les graines* », (S3) etc.). L'importance de chaque thème a été déterminée en fonction du nombre de connaissances abordées autour du thème.

Tableau 12: Critères et indicateurs d'évaluation de la démarche

Critères d'évaluation de l'efficacité de la démarche	Indicateurs suivis
Production de connaissances	<ul style="list-style-type: none"> - Thématique abordée (rencontres collectives + interactions AE-chercheurs) - Effet des outils d'animation sur les types de connaissances produites
Enrôlement des acteurs	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre de participations aux rencontres - Part des acteurs impliqués sur plusieurs rencontres - Nombre d'AE prêts à expérimenter conjointement - Nombre de praticiens prêts à expérimenter la technique par leurs propres moyens - Attentes des acteurs - Capacité à répondre à leurs attentes
L'innovation et la créativité	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre de bandes test - Nombre d'initiatives d'essais - Type de bandes test (surface, échelle, objet de la bande test) - Type d'initiatives d'essais (surface, échelle, objet de l'essai) - Nombre de leviers identifiés pour répondre aux problèmes rencontrés lors des visites d'essais
L'apprentissage des acteurs (praticiens et chercheurs)	<ul style="list-style-type: none"> - Types de connaissances développées au cours du processus - Evolution des points de vue des acteurs entre la phase d'engagement et de désengagement - Perspectives d'évolution des pratiques des acteurs vis-à-vis du SDSC sans herbicide

AE : Agriculteur-Expérimentateur ; SDSC : Semis Direct Sous Couvert végétal

1.1.2.L'enrôlement des acteurs

Dans le cadre de la théorie de l'acteur-réseau (Schneider et *al.*, 2012), la notion d'enrôlement est définie comme un processus par lequel un individu s'engage dans un rôle qui lui a été attribué. La réussite d'une démarche participative dépend du degré d'implication de chaque acteur. Des auteurs soulignent la difficulté d'impliquer les praticiens qui, souvent par manque de temps, ne participent pas à toutes les réunions ou se désengagent avant la fin du projet (Hauser et *al.*, 2010; Hocdé et *al.*, 2008). Cette limite a une conséquence directe sur le critère d'évaluation « changements et adoptions » car le suivi de l'évolution des pratiques ne sera pas garanti.

Dans notre démarche, nous analyserons donc sa capacité à impliquer les praticiens. Cette participation est évaluée sur un temps court. Nous nous intéresserons à l'implication des praticiens au sein des rencontres et à la capacité du processus à enrôler de nouveaux acteurs à s'intéresser aux enjeux de la technique pour créer de nouveaux partenariats « AE-chercheurs » et ainsi pérenniser la démarche.

Des auteurs suggèrent de conserver une transparence au cours du processus par des échanges réguliers, des réponses aux attentes des acteurs et par la mobilisation d'outils d'animation pour dynamiser les

échanges (Duru *et al.*, 2012; Lançon *et al.*, 2008; Reardon, 1998; Reau *et al.*, 2012). Dans notre étude, divers supports ont été mis en place pour garantir l'implication des acteurs : expérimentations dans le contexte local, visites d'essais, ateliers de conception, auto-constructions d'outils.

Pour évaluer la capacité de la démarche à enrôler les acteurs, plusieurs indicateurs ont été suivis (Tableau 12) : la réponse à leurs attentes, le nombre de participations aux rencontres et la part des acteurs s'étant impliqués dans plusieurs rencontres. Ces indicateurs ont été calculés pour chaque rencontre collective. Au début et à la fin des rencontres, les participants complétaient des fiches « bilan » visant à caractériser les connaissances apprises lors des journées et les attentes de chacun pour garantir leur implication. Nous avons aussi évalué l'efficacité de la démarche à impliquer de nouveaux praticiens et à favoriser la promotion de la technique (Tableau 12).

1.1.3.L'innovation et la créativité

La créativité et l'innovation sont deux notions liées puisque la première renvoie à l'émission d'idées produites à la suite d'une réflexion alors que l'innovation est la mise en application (Amabile, 1996). Le chapitre 4 a montré le caractère novateur des ITK, en rupture avec les pratiques locales. Cependant, l'objectif ici est d'évaluer la créativité et l'innovation créées à partir de la conception de ces ITK. Les indicateurs retenus pour évaluer ces critères reposent sur l'analyse qualitative et quantitative des bandes test et des initiatives d'essais proposées par les praticiens (Tableau 12).

Les bandes test ont émergé au cours du processus en fonction des réflexions des AE et des chercheurs, des premiers résultats d'essais et d'échanges avec d'autres acteurs lors des rencontres collectives. Ces bandes test constituent le produit des nouvelles idées (créativité) des AE mises en application directement au champ (innovation). Les initiatives d'essais proposées par les AE sont, quant à elles, des essais qu'ils planifient de faire par leurs propres moyens à la fin du projet de recherche conjoint.

La créativité a aussi été suivie au sein des échanges collectifs. Chaque connaissance débattue au cours des rencontres, a été catégorisée en fonction de l'objet visé : proposer un levier, anticiper un risque, interpréter un résultat ou identifier un problème. Nous avons ainsi pu suivre la capacité des échanges collectifs à faire émerger des solutions pour répondre aux problèmes. Dans ce manuscrit nous nous concentrons sur la créativité et les innovations produites au sein des interactions AE-chercheurs.

1.1.4.L'apprentissage des acteurs

Mubiru *et al.* (2004) mettent en avant l'importance d'intégrer les praticiens dans un processus d'apprentissage pour favoriser leur créativité et la valorisation de leurs connaissances. D'après Muro and Jeffrey (2008), l'apprentissage social est le fruit d'une interaction entre des acteurs qui se réunissent pour résoudre un problème en développant des connaissances et un réseau social à partir d'un partage d'expériences. Un apprentissage est composé de différentes connaissances. Cabero and

van Immerzeel (2007); Akpo *et al.* (2015) expliquent que l'apprentissage des praticiens repose sur deux types de configuration : (1) les expérimentations qu'ils mènent sur leur exploitation et (2) par l'observation directe des phénomènes observés dans leurs pratiques quotidiennes. Lorsque celles-ci apparaissent performantes, les expérimentations s'intègrent dans les pratiques (Hauser *et al.*, 2010).

L'apprentissage des acteurs dans une démarche est étroitement lié à son déroulement (Jakku and Thorburn, 2010; Reed, 2008). Pour Akpo *et al.* (2015), un apprentissage émerge au cours de chaque interaction entre acteurs. Il peut être favorisé par l'organisation de rencontres collectives (ex : réunions en plein champ, ateliers de conception) au cours desquelles les participants confrontent leurs points de vue et apprennent les uns des autres (McCrum *et al.*, 2009). D'après Hauser *et al.* (2010), la conduite d'expérimentations est un outil d'animation bénéfique pour le développement de la capacité d'acteurs à échanger sur un sujet, à gagner confiance en soi, à développer des connaissances et plus facilement adopter des techniques. De plus, la mobilisation de supports (ex : fiches techniques, modélisation, etc.) lors de ces échanges favorise la formalisation des connaissances, encourageant les participants à s'inscrire dans une démarche d'apprentissage incrémentale (Duru *et al.*, 2012; Matthews *et al.*, 2008; Triomphe *et al.*, 2013).

Un apprentissage est aussi considéré comme le « *couplage entre un sujet, ses connaissances, son activité, et son environnement* » (Chantre *et al.*, 2014). En s'appuyant sur le cycle de l'apprentissage de Kolb, des auteurs s'intéressent aux situations favorisant des apprentissages (Chantre *et al.*, 2014; Dewey 2004; Mayen 2008). Dans sa thèse, Chantre (2011) analyse différentes configurations d'apprentissage des praticiens, en retraçant les trajectoires de changements de plusieurs exploitations agricoles. Sur la base des travaux menés par Dewey (2004), Chantre *et al.* (2014) proposent 3 phases pour analyser ces apprentissages : phase de mise en alerte (identification du problème, suggestion de solutions), phase d'expérience (essais) et phase d'évaluation (confrontation des hypothèses).

Dans notre étude, qui s'appuie sur un travail conjoint entre deux types d'acteurs, il convient de s'interroger sur leurs apprentissages respectifs pour évaluer la capacité de la démarche à les inscrire au sein d'un processus d'apprentissage social. Pour tracer l'apprentissage des acteurs au cours de la démarche, une trajectoire a été construite pour chaque AE et pour les chercheurs. Cette trajectoire consiste à repositionner les connaissances développées au cours du processus. Dans le cas de la recherche, il s'agira d'étudier l'évolution des dispositifs d'essais et des questions de recherche entre 2016 et 2018. Pour les AE, ces trajectoires ont été construites sur la base du suivi des connaissances présenté dans la partie 1.1.1.1. (entretiens semi directifs, prises de notes, enregistrements, etc.).

La trajectoire est composée de la phase qualifiée « de mise en alerte » correspondant à des configurations d'apprentissage qui expliquent l'émergence d'un intérêt pour la technique par l'AE et ainsi son implication dans le processus de recherche conjoint (Figure 58). Cette phase nous a permis de faire un état des lieux des connaissances des AE et de leur expérience sur l'objet d'étude. Ces

données ont été relevées lors du premier entretien semi directif (date installation, formations, pratiques, expériences sur le SD).

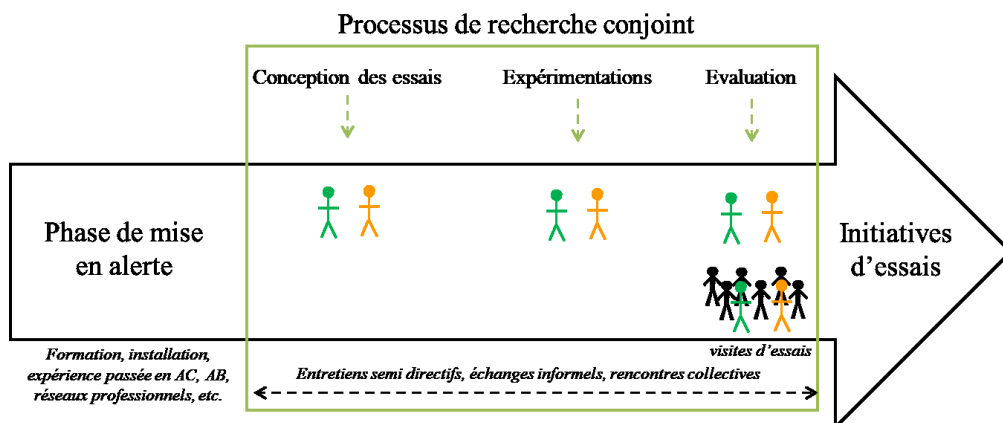


Figure 58: Schéma de la trajectoire d'apprentissage des agriculteurs-expérimentateurs de la démarche

La trajectoire est ensuite composée par la phase d'expérimentation, faisant référence au travail de conception conjoint (conception, expérimentation et évaluation). Les données de cette phase ont principalement été récoltées à partir des échanges informels réguliers menés avec les sept AE. Enfin, notre dernière phase correspond aux perspectives d'essais des AE à initier de nouveaux essais par eux-mêmes à la fin du projet sur la base de leurs apprentissages.

1.2. Présentation du dispositif

1.2.1. Caractérisation du profil des agriculteurs-expérimentateurs

Au cours des premières années, au total sept praticiens ont mené conjointement des essais avec deux chercheurs : 1 en 2016 (phase exploratoire) (Vincent-Caboud, 2016), 2 en 2017 et 6 en 2018. Le profil de ces AE diffère au niveau de leurs objectifs et de leurs contraintes, de leurs perceptions vis-à-vis du SDSC sans herbicide et de leur expérience (Annexe 14). Cependant, ils se sont tous impliqués dans la démarche dans l'objectif de produire des connaissances et d'échanger avec d'autres acteurs. La sélection des AE n'a pas reposé sur le choix de producteurs expérimentés sur la technique mais davantage sur leurs motivations à expérimenter conjointement (Chapitre 4).

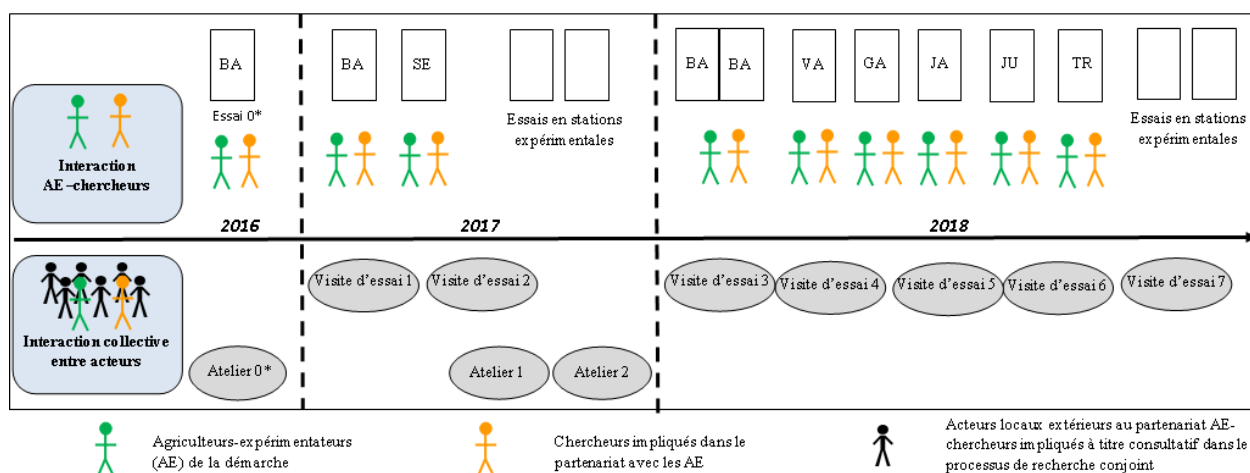
Parmi les AE, trois ont arrêté le labour et pratiquent des TCSL et quatre utilisent principalement du labour dans leurs pratiques. Parmi ces quatre AE, deux expérimentent des TCSL en AB en partenariat avec la recherche depuis plus de 10 ans. Que ce soit par défis techniques, curiosité ou par nécessité d'atteindre leurs objectifs (ex : limiter le temps de travail, améliorer la qualité des sols, limiter la consommation de carburant, etc.), **les sept praticiens avaient tous pour objectif de développer des connaissances sur la technique et de rentrer dans une dynamique d'échanges**. Les trois AE expérimentés en TCSL n'avaient jamais conduit d'essais sur du SDSC sans herbicide mais ils avaient pour objectif d'en entreprendre. Toutefois, des difficultés matérielles freinaient la mise en place de

cette perspective. En collaborant entre praticiens et chercheurs, l'idée d'expérimenter la technique dans le contexte local, en minimisant les coûts (semences, matériels), s'est présentée comme une opportunité pour les AE ; « vous me permettez avec le semoir SD et le rouleau de tester la technique car on ne peut pas le faire, c'est un matériel qui coûte cher donc juste pour faire des essais tout seul c'est risqué on ne peut pas se le permettre... si on le faisait seul on ne partirait pas forcément avec toutes les chances de notre côté... on ferait du bricolage avec nos outils !... alors que là on peut tester le matériel, en discuter ... c'est comme ça qu'on avance ».

1.2.2. Déroulement de la démarche

L'apprentissage et le développement d'une technique émergent d'interactions sociales et d'essais (Chantre et al., 2014; Crawford et al., 2007; Hoffmann et al., 2007). Ces interactions favorisent la diffusion des connaissances et l'enrôlement des acteurs (Sewell et al., 2014). Dans notre démarche, outre les essais constituant un premier outil d'apprentissage, les praticiens et les chercheurs ont aussi été inscrits dans 2 types d'interactions qui ont permis le pilotage conjoint des essais (Figure 59) :

- interactions formelles et informelles de chaque AE pris individuellement avec un chercheur,
- échanges collectifs impliquant divers acteurs (chercheurs, AE, praticiens, conseillers, techniciens) : visites d'essais, ateliers de conception et auto-construction de matériels (Tableau 13).



*Essai et atelier qui ont permis d'initier le processus de recherche conjoint (Vincent-Caboud, 2016)

Figure 59: Schéma des interactions AE-chercheurs et des interactions collectives organisées au cours de la démarche

Les rencontres collectives reposaient sur l'utilisation d'outils d'animation pour favoriser les interactions et servir de base de discussion. Lors des visites d'essais, après une courte présentation en salle des enjeux de la démarche et des dispositifs d'essais, un exercice d'évaluation collective des ITK a été proposé aux participants. A partir d'une grille d'évaluation (Annexe 15), des groupes de 2-3 acteurs ont jugé différentes performances agronomiques (couverts, adventices, cultures, maladies, ravageurs, recouvrement du sol, etc.) par un système de notation allant de 1 à 6 afin d'évaluer leur

satisfaction. A la fin de ce travail, l'ensemble des participants mettait en commun leurs observations pour un débriefing final. Lors des ateliers de conception, après un rappel des enjeux de la démarche ainsi qu'un apport de connaissances empiriques et scientifiques (Annexe 16), l'objectif était de concevoir des systèmes de culture¹ (SdC) intégrant le plus possible de couverts et de SDSC en AB. Enfin, 2 groupes d'auto-construction de rouleaux ont été constitués. Le premier visait la construction d'un rouleau pour les essais de la démarche. Le second groupe a été créé à la demande de l'un des AE afin d'aider les praticiens à auto-construire un outil adapté à leurs contraintes.

Tableau 13: Rencontres collectives réalisées au cours de la démarche

Dates	Rencontres collectives	Nombre de participants		
		Nb total	Nb d'agriculteurs	Nb d'AE
	Formats			
4 mars 2016	Atelier de conception 1	8	5	1
2016-17	Auto-construction d'un rouleau 1	12	3	2
16 juin 2017	Visite d'essai 1	19	9	3
19 juin 2017	Visite d'essai 2	36	23	3
1 ^{er} décembre 2017	Atelier de conception 2	17	14	2
7 décembre 2017	Atelier de conception 3	14	11	2
2018-19	Auto-construction d'un rouleau 2	5	3	1
27 mars 2018	Réunion en salle + visite d'essai 3*	23	7	4
6 juin 2018	Visite d'essai 4	19	15	1
15 juin 2018	Visite d'essai 5*	12	4	2
19 juin 2018	Visite d'essai 6	20	10	2
25 juin 2018	Visite d'essai 7*	35	14	2

Nb : Nombre ; AE : Agriculteurs - expérimentateurs

2. Efficience de la démarche de recherche conjointe chercheurs – praticiens

2.1. La production de connaissances au cours du processus

Quel que soit le mode de production de connaissances (rencontres collectives ou interactions AE-chercheurs), une diversité de connaissances a été produite au sein de la démarche. Ces connaissances sont principalement axées sur **les couverts végétaux** associés à l'effet du **contexte pédoclimatique**, **des adventices** et **des techniques** de mise en œuvre (inter-rangs, densité de semis, date de semis), ainsi que des connaissances orientées sur **le matériel**.

Le **couvert végétal** est l'une des thématiques qui a constitué le plus de suivi par les AE et les chercheurs, de son implantation à la récolte du soja. Les indicateurs évalués, pour déterminer la performance du couvert (Chapitre 4), ont permis d'enrichir les connaissances sur l'implantation des couverts (choix des espèces ou des variétés, calendrier cultural, densité de semis) et du mode de maîtrise du couvert (nombre de roulages, conception du rouleau, etc.). Au-delà des connaissances liées aux propriétés même des couverts utilisés (effet allélopathique, production de MS, hauteur, etc.), les connaissances ont été aussi produites en lien étroit avec le contexte pédoclimatique (pluviométrie, gel,

¹ D'après la définition de Sebillote en 1974 cité dans Doré et Meynard, 2006, un SdC est « un ensemble de modalités techniques appliquées sur une parcelle ou un ensemble de parcelles agricoles traitées de manière identique dans un contexte pédoclimatique donné ».

sécheresse), les choix techniques (inter rangs, densité de semis, date de semis) et les adventices (Encadré 2).

Encadré 2 : Exemples de verbatims des praticiens liés aux couverts

Verbatims liées aux couverts :

- « *Le triticale en paille était plus impressionnant que le seigle car ses feuilles sont plus larges, on avait l'impression que c'était plus garnis. En termes de levée aucun ne se détachait.* »
- « *Le seigle fourrager est plus fin que le seigle grain.* »
- « *Le fait de rouler tardivement le couvert entraîne quelques repousses sur le n+1.* »
- « *Le roulage en perpendiculaire permet de mieux répartir le paillis sur le sol.* »

Verbatims de connaissances sur le lien couverts – contexte pédoclimatique :

- « *Le couvert a pompé l'eau du sol et vu la sécheresse, l'eau n'était plus disponible pour le soja.* »
- « *Le couvert s'est levé en deux temps à cause de l'absence de pluie à l'automne. Le seigle fourrager en premier et plus tard le seigle grain... mais on avait un réel décalage... le sol est très séchant.* »

Ces résultats confortent l'intérêt porté sur les couverts, identifié dans le Chapitre 3 comme le facteur clé de réussite. Lors des échanges collectifs, les acteurs ont été force de proposition de leviers¹ pour gérer les difficultés rencontrées en lien avec les couverts. Par exemple, les participants ont proposé des solutions pour limiter le coût des couverts, optimiser sa production de MS ou encore améliorer sa maîtrise avant de semer la culture principale. Une diversité de couverts a également été proposée pour un SDSC de différentes cultures (maïs, soja, tournesol, blé, sarrasin, etc.) (Tableau 14). Ces leviers soulignent aussi la capacité de notre démarche à stimuler la créativité des participants (cf. partie 2.3).

Les connaissances produites sur **le matériel** sont aussi nombreuses, alors qu'elles sont encore peu disponibles dans la littérature. Ces connaissances, amenées en majorité par les praticiens dans notre démarche lors des opérations techniques, étaient quant à elles focalisées sur deux types d'outils : le rouleau et le semoir SD. En particulier, la construction d'un rouleau a encouragé des réflexions techniques au niveau du design de l'outil pour optimiser la maîtrise du couvert (Encadré 3). Concernant le semoir, les praticiens se sont intéressés au contact graine-sol, à la profondeur de la graine dans le sol, à la fermeture du sillon et à la capacité des disques à trancher les résidus au niveau de la ligne de semis.

Encadré 3 : Exemples de verbatims liés aux matériels

- « *Le rouleau est bien pour des couverts hauts et denses.* »
- « *Il manque un effet ripage pour mieux blesser le couvert.* »
- « *C'est bien car le rouleau est lourd mais toutes les espèces ne sont pas forcément maîtrisables par roulage car là on voit que le pois repart, le rouleau ne lui a rien fait.* »
- « *On voit des graines sur le mulch et pas au contact du sol... le semoir n'est pas assez lourd avec toute cette biomasse.* »
- « *Il faudrait des disques plus gros pour bien ouvrir à travers la paille et sur le sol sec.* »

¹ L'ensemble des leviers proposés au cours des rencontres n'est pas présenté dans ce manuscrit. Pour les consulter, contactez : lavincent.caboud@gmail.com ou jpeigne@isara.fr

En fonction des outils mobilisés lors des rencontres collectives, quelques variations ont été observées sur les connaissances produites. Les visites d'essais ont permis de stimuler la production de connaissances qui visent l'interprétation des phénomènes observés au champ, soulevant des liens forts de cause à effet avec le contexte pédoclimatique, le matériel utilisé, la performance du couvert à maîtriser les adventices ou encore la fertilité du sol. Les ateliers ont, quant à eux, permis d'aborder des échelles d'organisation plus larges (rotation, viabilité économique, organisation de l'exploitation, etc.). La diversité des formats d'interactions a permis d'aborder la complexité du SDSC sans herbicide à partir de plusieurs angles d'approche en fonction des objectifs fixés lors de chaque rencontre (ex : concevoir un SdC intégrant du SDSC sans herbicide, construire un rouleau pour maîtriser le couvert sans herbicide ni travail du sol, évaluer la performance agronomique d'ITK).

Tableau 14: Exemples de combinaisons couverts/cultures proposées lors des rencontres collectives

Couverts végétaux	Cultures de rente
Féverole + Pois four. + Fenugrec	Orge d'hiver
Vesce velue + Pois four. + Radis four.	Sorgho
Seigle (200 kg/ha)	Soja
Pois four. (100 kg/ha)+ Avoine (20 kg/ha)	Maïs
Sorgho four. (30 kg/ha)	Soja
Sorgho four. (12 kg/ha) + Crotalaire (12 kg/ha)	Soja
Sorgho four. (12 kg/ha) + Moha (12 kg/ha)	Soja
Sorgho four. (15 kg/ha) + Millet (10 kg/ha)	Soja
Seigle four. (150 kg/ha) + Seigle forestier (100 kg/ha)	Soja
Féverole d'hiver (200 kg/ha)	Maïs
Féverole (100 kg/ha) + Seigle four. (100 kg/ha)	Maïs
Féverole (50 kg/ha) + Lupin (100 kg/ha) + Vesce velue (12.5 kg/ha) + Pois four. (15 kg/ha)	Maïs
Féverole (66 kg/ha) + Vesce velue (16.5 kg/ha) + Trèfle d'Alexandrie (8.25 kg/ha)	Maïs
Lupin (75 kg/ha) + Féverole (100 kg/ha)	Maïs
Sorgho four. + Millet	Blé
Seigle ou Avoine	Soja ou Tournesol
Moutarde + Radis chinois	Blé
Trèfle violet	Soja ou Tournesol
Mélange de légumineuses x graminées	Sarrasin
Prairie - Luzerne de 3 ans	Blé (mélange population) ou Méteil (triticale /pois)
Féverole d'hiver + Vesce velue	Maïs
Féverole + Pois four.	Pailles secondaire
Seigle + Phacélie	Soja

2.2. L' enrôlement des acteurs

La démarche a encouragé les praticiens locaux à s'intéresser aux enjeux du SDSC sans herbicide et à initier des essais chez eux. Alors qu'au début de la démarche, en 2016, l'implication des praticiens était difficile avec un seul partenariat « AE-chercheur » maintenu, en 2018, les AE étaient au nombre de six (Tableau 15). Tous étaient prêts à reconduire des essais l'année suivante. Cet enrôlement s'explique par la dynamique collective mise en place au sein de la démarche puisque la majorité des AE présents en 2018 avait participé, avant de s'engager, à au moins une rencontre collective en amont

(visite d'essai et/ou atelier de conception). A l'issue de chaque année d'essai, le nombre de nouveaux producteurs ayant sollicité la recherche dans l'objectif de mener conjointement un essai a augmenté de 14 % en 2 ans en passant d'un seul praticien en 2016 à sept à la fin de l'année 2018.

Tableau 15: Enrôlement des praticiens dans le processus d'expérimentation entre les praticiens et les chercheurs

Année de la démarche	Nb d'agriculteurs-expérimentateurs	Nb d'agriculteurs souhaitant mener une recherche conjointe * (devenir AE)	Nb d'agriculteurs prêts à expérimenter par eux-mêmes (à la suite des rencontres)
2016	1	1	0
2017	2	3	4
2018	6	7	3

*hors AE actuels

AE : Agriculteurs-expérimentateurs ; Nb : Nombre

La dynamique collective a également encouragé quelques participants aux visites à initier leurs propres essais sur des ITK proches de ceux visités (semis de seigle > roulage du seigle > SD du soja), (3 à 4 praticiens locaux chaque année) (Tableau 15). Ce résultat illustre l'influence des connaissances produites par notre démarche sur les expérimentations initiées par d'autres praticiens locaux. Cette dynamique d'enrôlement de la démarche s'illustre aussi par le nombre élevé de participations aux rencontres collectives. Ces rencontres ont impliqué des praticiens mais également des conseillers et des techniciens qui se sont aussi fortement mobilisés pour participer aux discussions.

Les attentes des acteurs lors de ces rencontres reposaient sur des échanges de connaissances et l'observation de références locales, telle que la maîtrise des adventices sans travail du sol ni herbicide (Figure 60). Plus de 77 % des participants ont estimé que les rencontres avaient répondu à leurs attentes (Figure 61). En moyenne 50 % des participants à une rencontre donnée se sont impliqués dans au moins deux rencontres collectives. Dans les rares cas où la réponse aux attentes n'a pas été atteinte, il s'agissait d'acteurs ne partageant pas les objectifs du projet : « *sans travail du sol* » et « *sans herbicide* » et/ou qui n'avaient pas compris l'objectif de la rencontre. Ces acteurs considéraient ces rencontres comme « *une formation* » contrairement à l'objectif de « *travail collectif* » spécifié en amont. Les acteurs qui ont explicité un avis mitigé ou non satisfait, ne se sont pas impliqués dans de nouvelles rencontres. Dans l'ensemble, l'exercice d'évaluation collective des essais utilisé en tant que support d'animation a été apprécié et mis en avant dans les évaluations de ces rencontres par les participants. De plus, la diversité des profils des participants a été soulignée dans les retours comme bénéfique et constructive aux discussions.

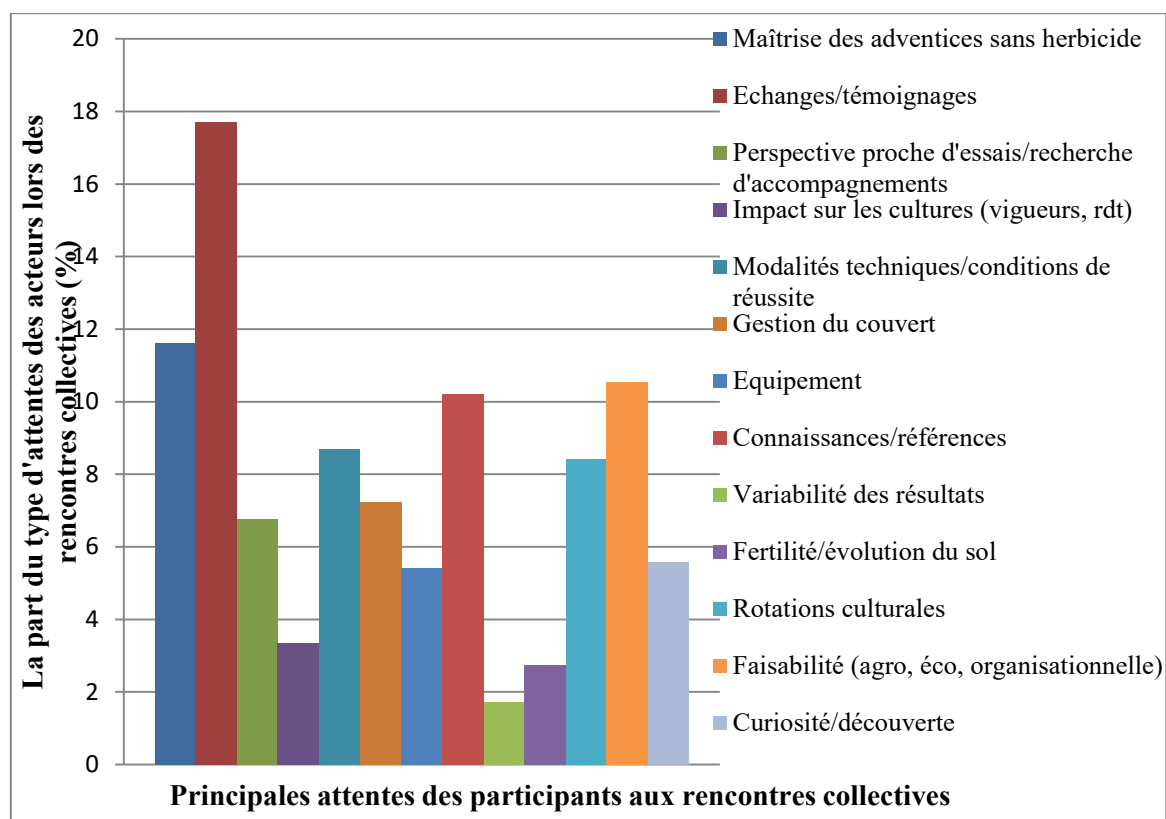


Figure 60: Principales attentes des participants aux rencontres collectives

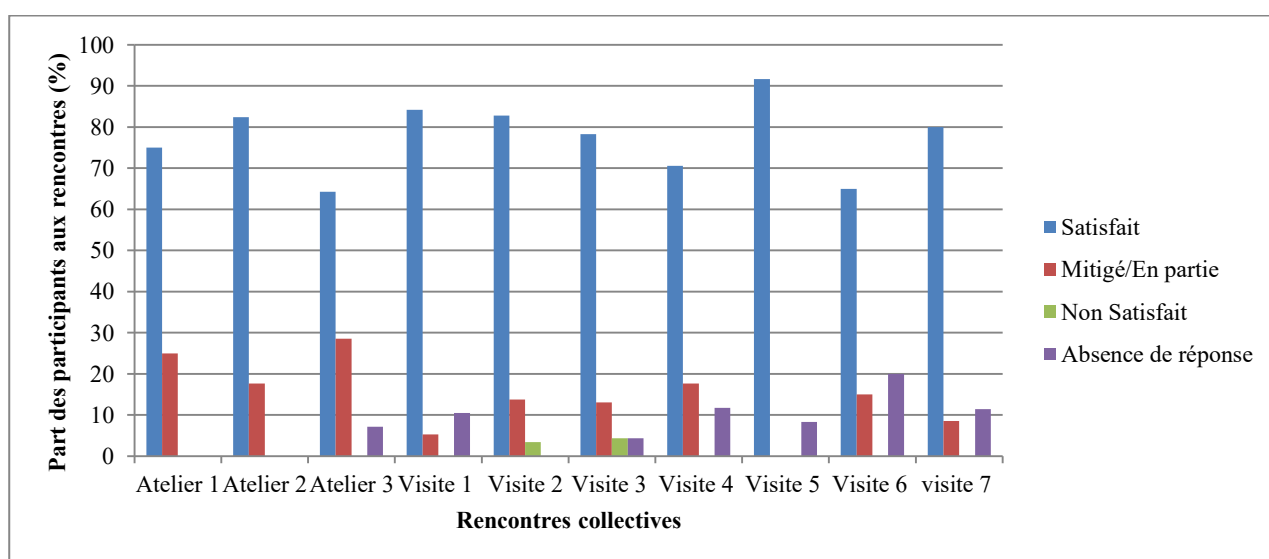


Figure 61: Satisfaction des participants aux rencontres collectives

Enfin, les résultats montrent une évolution des points de vue des AE au cours de la démarche. Par exemple, l'AE VA, un praticien qui pratique du labour en AB depuis les années 2000, était au début de la démarche sceptique vis-à-vis de la faisabilité du SDSC en AB. Les essais qu'il expérimentait depuis plus de 10 ans sur les TCSL en AB ne l'avaient pas convaincu à cause d'importantes infestations d'adventices. De plus, il gardait en mémoire deux essais visités en 2005 et 2008 sur la technique dont les pertes de rendement avaient été considérables sur le maïs. Le praticien a souhaité s'impliquer dans la démarche, pour développer ses connaissances et par défi technique, mais au cours

de la conception à plusieurs reprises, il a exprimé son point de vue « *ne pas travailler le sol pour moi en AB c'est pas possible surtout ici, les conditions sont difficiles, je ne suis pas convaincu du non labour en bio sur mes sols* ». Cependant, au cours de l'entretien bilan, le praticien avait un avis différent : « *je reviens sur ce que je disais, c'est plutôt encourageant* », « *moi ça m'a surpris dans le bon sens, car le couvert n'était pas bien, la parcelle était sale, c'était peut-être la pire de l'exploitation, on a pris celle-ci car c'était la seule disponible mais on partait avec un gros handicap... j'ai failli abandonner pour le semis du soja... et puis finalement le soja était plutôt joli... pour moi c'est encourageant... car on s'en est pas mal sorti avec une parcelle et une année difficiles ... [...] ça m'a donné des idées, j'ai envie de tester d'autres choses...[...]* ». A l'inverse, des résultats négatifs obtenus sur un essai pourraient aussi affecter la motivation des praticiens (abandon d'essais, pertes de rendements). Cependant, bien que certains essais aient conduit à de plus faibles performances que celles espérées par les AE, aucun effet n'a été observé sur leur perception de la technique puisque leur objectif premier en s'impliquant dans la démarche était de développer des connaissances en observant la mise en pratique de la technique chez eux.

2.3. Une activité de conception et d'évaluation collective pour renforcer la créativité et la capacité à innover

L'objet de la démarche étant de tester chez les AE, une technique innovante, les ITK conçus sont en toute logique en rupture avec les pratiques locales. Ces ITK reposent sur une réduction d'interventions de préparation du sol ou de désherbage avec deux fois moins d'interventions au total (4.5) que leurs pratiques actuelles (9.5). Hormis ces ITK, créant de l'innovation locale, la démarche a favorisé la créativité et la capacité à innover des praticiens, illustrées par les initiatives d'essais et les bandes test ajoutées par les AE. Les rencontres collectives ont aussi stimulé la créativité des participants qui ont été force de proposition de solutions techniques pour ouvrir le champ des possibles¹.

2.3.1. Bandes test

Les AE ont ajouté des modalités d'essais, qualifiées de « bandes test », en fonction de leurs idées émergentes au cours des essais pour tester d'autres modalités. En moyenne, les AE ont ajouté trois à quatre bandes test par site (Tableau 16). Ces bandes test reposaient sur de petites surfaces (en moyenne 1000 m²) et étaient souvent localisées sur le pourtour des essais formels menés conjointement.

¹ La créativité des participants au cours des rencontres collectives n'est pas détaillée dans le manuscrit qui se concentre sur la créativité des agriculteurs-expérimentateurs.

Tableau 16: Bandes test et initiatives d'essais entreprises par les praticiens

Agriculteurs-expérimentateurs	Nb de bandes test	Initiatives d'essais envisagées après l'essai
JA	3	<ul style="list-style-type: none"> - Tester du SDSC avec d'autres cultures de l'exploitation : tournesol, blé, orge - Intégrer dans une rotation en SD de la luzerne - SDSC derrière un colza - Tester la rotation *: blé + apport N /(fév. Ou pois four.) SD paille secondaire/(seigle) soja/ (féverole + vesce) SD maïs + apport N/SD pois d'hiver
VA	3	<ul style="list-style-type: none"> - SD du maïs avec semis d'une féverole sur le rang + trèfle incarnat en inter rangs - SD du maïs sous féverole avec semis de trèfle incarnat dans l'inter rangs
SE	3	<ul style="list-style-type: none"> - De nouveaux essais en réduisant les inter rangs de la culture - Tester avec d'autres cultures : sarrasin, lin, lentille - (trèfle incarnat) SD de B > SD ou semis en combiné de seigle > (seigle) SD de sarrasin > (vesce velue + moutarde) SD de lin > (luzerne + trèfle incarnat ou sainfoin) semis en combiné de blé > semis après récolte ou en combiné de seigle - Roulage d'un couvert de sorgho - Auto-construction d'un nouveau rouleau
BA (3 années)	8	<ul style="list-style-type: none"> - Fertiliser le couvert et la culture au semis - Semoir SD à disques inclinés - Semer dense le couvert et la culture principale - Auto-construction d'un nouveau rouleau - Semis d'un couvert de vesce/roulage/semis de maïs + cameline dans l'inter rang
TR	3	<ul style="list-style-type: none"> - Des tests de roulages - Rotation : (couvert) Tsol en TCSL/SD de céréales à pailles/(couvert) T en TCSL/SD de blé/ (couvert) maïs en tcs/SD d'orge/ (seigle) SD de soja/ SD de céréales à pailles - Semis de blé dans du seigle - Pour le SD du soja sous seigle : semis du seigle + apport de fumier au semis/ broyage en automne pour apport N/roulage au printemps (+roll krop actisol)/SD du soja
GA	4	<ul style="list-style-type: none"> - Roulage en diagonale du couvert - Tester la rotation* : prairie temporaire (sorgho four. + millet SD blé/(seigle ou avoine) SD soja ou tsol + apport N /(mélanges de graminées + légumineuses) (sarrasin) SD Méteil orge+pois ou triticales + pois - Semis de seigle au printemps quelques jours avant de semer le soja
JU	3	<ul style="list-style-type: none"> - Soja sous pois fourrager/protéagineux - SD de colza après blé - SD de pois ou féverole après orge

SD : semis direct ; N : azote ; TCSL : technique culturale sans labour ; Tsol : tournesol ; four. : fourrager ; SDSC : semis direct sous couvert végétal

Les types de bandes test reposent sur de petites modifications comparées à l'ITK innovant testé (inter-rangs, variétés, espèces). Les bandes test sont diversifiées mais parmi les 16 types de bandes référencées (Tableau 17), 12 portent sur le **couvert végétal** dont 8 concernent le type de couvert, 3 le

mode de maîtrise du couvert et 1 sa densité de semis. Les types de couverts se différencient des ITK innovants par l'espèce (luzerne, pois, féverole, etc.) ou par la variété du seigle. Dans tous les cas, les AE souhaitaient tester une espèce ou une variété correspondant à des semences de ferme ou des couverts déjà implantés dans un autre objectif lorsque la décision de conduire la bande test a été prise.

La majorité des bandes test a été menée sur des thématiques peu documentées en recherche (inter-rangs du soja, variétés, écimage, fertilisation). Dans le cas de l'orientation du roulage vis-à-vis du sens de semis du couvert, malgré quelques connaissances scientifiques, les praticiens ont souhaité pour la majorité conduire des bandes test de roulage en parallèle pour vérifier ces connaissances dans leurs conditions. En effet, le roulage perpendiculaire au sens du semis du couvert améliore la répartition du mulch sur le sol mais implique une anticipation dès le semis du couvert. Cette méthode génère aussi des difficultés de mise en œuvre par rapport à l'hétérogénéité du sol en travaillant le sol dans un sens contraire aux pratiques habituelles. Pour les AE, ce phénomène impacte la qualité de l'implantation d'un couvert homogène sur la parcelle d'où la recherche d'une autre solution.

Tableau 17: Description des types de bandes test ajoutées au cours du processus expérimental

Types de bandes test	Nombre de bandes test	Objectifs recherchés
Roulage du couvert en parallèle à son semis	8	Vérifier les connaissances scientifiques + praticité de conduite de l'ITK
Variété de soja précoce	2	Semis tardif du soja + tester des semences de ferme
Roulage de Ray grass + SD soja	1	Gérer une végétation spontanée par roulage
Inter rangs étroits du soja à 16 cm	2	Recouvrir plus rapidement le sol pour mieux maîtriser les adventices
Roulage de luzerne + SD de soja	1	Tester l'effet du roulage pour maîtriser la luzerne et sur la performance du semoir SD à semer sous l'espèce
Ecimage à floraison du soja	1	Trouver une solution de rattrapage pour gérer le couvert ou les adventices
Broyage (différentes hauteurs)	2	Concilier la maîtrise du couvert et le contact graine – sol de la culture principale
Augmenter/ doubler la densité de semis du couvert	2	Accélérer le recouvrement du sol pour mieux gérer les adventices
Fertilisation du maïs	2	Limiter la faim d'azote lors du développement de la culture, créée par le seigle
Variété de seigle	2	Tester le matériel génétique accessible sur la ferme (semences de ferme)
Couvert végétal multispécifique	1	Tester des couverts utilisés couramment sur l'exploitation pour limiter le coût
Semis du soja avant le roulage	1	Améliorer le contact graine – sol + combler le manque de référence
Roulage d'un couvert de féverole + SD du soja	1	Tester avec d'autres espèces et des semences de ferme
Roulage de pois fourrager	1	Tester avec d'autres espèces et des semences de ferme
Roulage de pois protéagineux	1	Tester avec d'autres espèces et des semences de ferme
Roulage de vesce commune/seigle + SD de soja	1	Tester l'effet du rouleau sur la vesce et du semis direct

SD : semis direct

2.3.2. Initiatives d'essais

À l'issue des essais, chaque AE a proposé au moins deux initiatives d'essais¹ prévues les années suivantes en fonction de la disponibilité du matériel qui reste un frein majeur dans leur mise en place (Tableau 16). Quatre des AE ont discuté d'un système de culture intégrant du SDSC sans herbicide qu'ils souhaitent expérimenter (Tableau 16). Parmi eux, 3 se sont appuyés sur les SdC co-conçus lors d'ateliers de conception auxquels ils ont participé.

Les résultats montrent des techniques plus complètes proposées par les AE lors de l'entretien bilan, comparés aux bandes test qu'ils ont ajoutées au début ou au cours des essais qui reposaient sur de petites modifications de l'ITK innovant testé conjointement. En effet, les initiatives d'essais portent davantage sur des ITK se différenciant sur plusieurs techniques des ITK co-conçus. Certains ITK sont particulièrement innovants. Par exemple, l'AE BA, propose de semer un couvert de légumineuse de type vesce/féverole, qui serait ensuite roulé, avant de semer en direct le maïs et un couvert de cameline dans l'inter-rang du maïs afin d'occuper le sol lorsque les légumineuses se dégradent (Tableau 16). L'AE VA propose, quant à lui, d'utiliser un GPS et de semer un couvert de féverole sur le rang du futur maïs, ainsi qu'un trèfle incarnat dans l'inter-rang. Après un roulage en parallèle au sens de semis du couvert, le maïs est semé en SD avec l'avantage que le trèfle incarnat présent dans l'inter-rang ne repartira pas puisqu'il sera en fin de cycle. Ces observations illustrent une évolution des AE et donc un apprentissage au cours du processus qui sera discuté plus en détail dans la partie 2.4.

Les initiatives d'essais soulevées par les praticiens, se tournent pour la plupart d'entre elles vers **de nouvelles cultures** de rente sur lesquelles il existe peu ou pas de référence dans la littérature (lin, blé, sarrasin, colza, tournesol, féverole, méteil, pois). De même, dans les rotations, une réflexion est présente autour de **la stratégie de fertilisation** à adopter, qui reste faiblement documentée en recherche. Par exemple, l'AE TR suggère le semis précoce d'un couvert de seigle avant septembre avec un apport de fumier au semis pour qu'il se développe rapidement (Tableau 16). À l'automne, il propose soit un pâturage soit un broyage au 21 octobre, pour : limiter la sensibilité du seigle lors de la période hivernale et restituer de l'azote au sol qui sera disponible au printemps, au redémarrage de la végétation. Le couvert est ensuite roulé avant le semis du soja. Enfin, quelques initiatives d'essais liées **au matériel** ont aussi été proposées, avec l'utilisation d'autres types de semoirs (à disques inclinés) ou d'autres rouleaux. Deux AE ont entrepris de concevoir leur rouleau pour poursuivre les essais.

2.3.3. Co-construction de rouleaux cranteurs

Sur la base d'un travail collaboratif avec deux praticiens, un ingénieur régional et un IUT mécanique, nous avons auto-construit un rouleau cranteur afin de gérer les couverts au sein des ITK testés (Figure

¹ Initiatives d'essais : Essais menés par les AE par leurs propres moyens après le processus de recherche conjoint dans l'objectif d'approfondir leurs connaissances et de l'adapter chez eux.

62). Ce rouleau a été construit à partir des connaissances scientifiques, des connaissances empiriques et des contraintes des AE, BA et SE, impliqués depuis le début de la démarche.

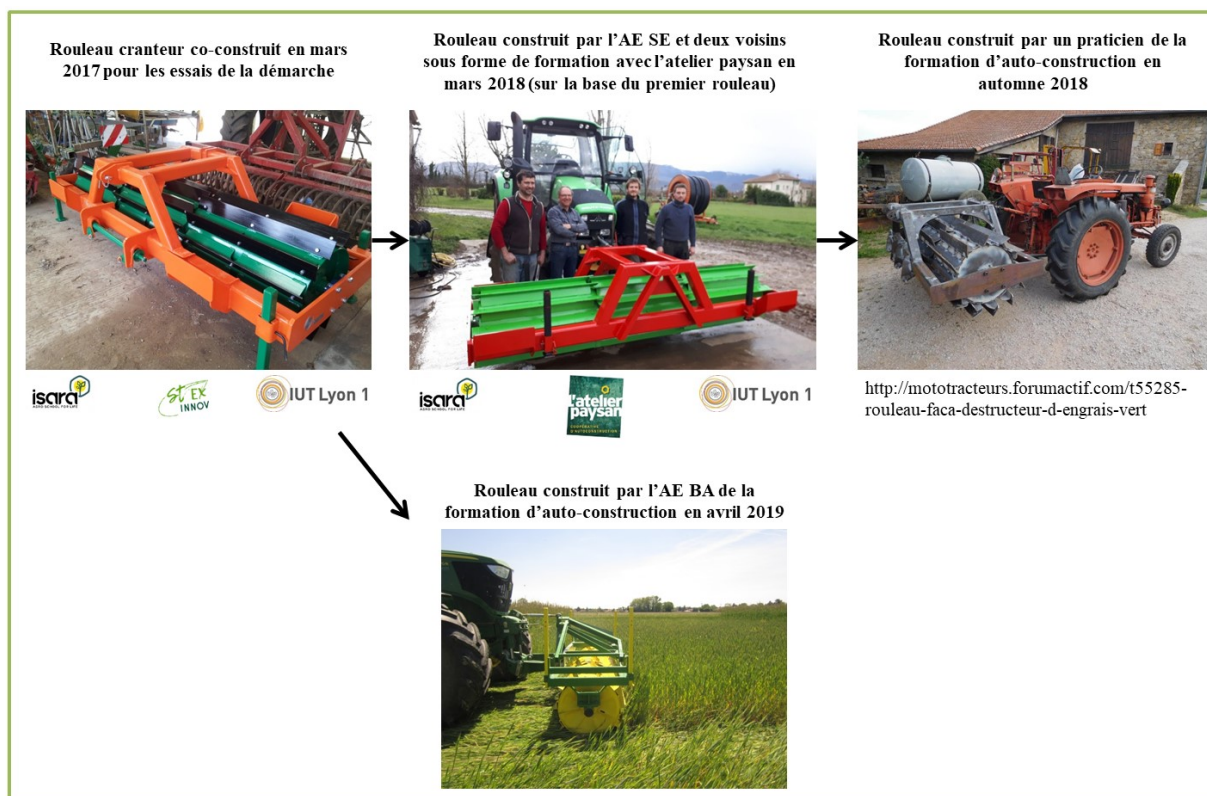


Figure 62: Processus d'amélioration continue du rouleau utilisé dans la démarche pour gérer le couvert sans herbicide

La co-construction de ce rouleau et son utilisation par les AE, lors des essais, a encouragé trois initiatives d'auto-construction par deux AE et un voisin (Figure 62). Ces rouleaux présentent des caractéristiques de conception proches du rouleau construit conjointement mais possèdent tous des modifications illustrant les innovations apportées par les praticiens pour adapter l'outil.

Par exemple, le rouleau conçu par l'AE SE, avec deux voisins et l'atelier paysan est étanche pour ajouter plus de poids en le remplissant d'eau (Figure 62). Le deuxième rouleau a été construit par l'un des collègues de l'AE SE qui a souhaité mieux adapter le rouleau à son propre contexte (Figure 62). Ce praticien explicite étape par étape son raisonnement lors de l'auto-construction incluant les modifications apportées par rapport au premier modèle sur un forum internet¹. Enfin, le troisième rouleau a été construit en 2019 par l'AE BA qui participe depuis trois ans à la démarche. Il s'est inspiré du premier prototype de rouleau, d'informations relevées lors de journées de démonstrations ou dans des magazines et de son expérience personnelle à partir des essais menés chez lui.

¹ <http://mototracteurs.forumactif.com/t55285-rouleau-faca-destructeur-d-engrais-vert>

2.4. L'apprentissage des acteurs

L'apprentissage des acteurs a été le plus important sur **le couvert végétal**. Ce résultat est cohérent avec les types de bandes test ajoutés et les ITK testés, en majorité basés sur des facteurs liés au couvert : « espèce/variété du couvert », « date de semis du couvert » « mode de roulage ». **Le matériel** a également constitué un apprentissage important, en particulier pour les praticiens, qui se sont davantage intéressés aux modes de conception des outils et à leurs performances lors des opérations techniques (roulage, SD). Cet apprentissage acquis au niveau du matériel a aussi été bénéfique pour les chercheurs en orientant les outils (rouleau, semoir SD) et/ou les stratégies techniques (réglages au niveau des éléments semeurs) mobilisés pour améliorer les ITK. La confrontation des points de vue des acteurs lors de la conception a constitué un outil particulièrement riche d'apprentissage pour chaque partenaire leur permettant de valoriser leurs connaissances respectives.

2.4.1. Les apprentissages de la recherche

En recherche, l'apprentissage autour des couverts s'illustre par la publication produite sur l'effet d'un couvert de seigle et de triticale sur la maîtrise des adventices et la performance du soja (Vincent-Caboud *et al.*, 2019b). Il s'observe aussi dans l'évolution des essais mis en place depuis 2016 (Tableau 18), incluant des changements liés à l'implantation du couvert (date de semis, densité de semis, espèce et variété) ou à sa destruction (orientation du roulage, type de rouleau). Ces évolutions s'appuient sur les résultats observés les années précédentes (ex : couvert peu dense, maturité tardif, etc.). Celles-ci s'expliquent par la recherche de compromis entre les principes agroécologiques visés pour réussir la technique (ex : effet allélopathique pour gérer les adventices, etc.) et les contraintes des praticiens (répartition de la charge de travail, accès au matériel, etc.). Par exemple, en 2016, la difficulté à maîtriser par roulage un couvert multispécifique en place a conduit à limiter le nombre d'espèces présentes dans le couvert à une ou deux les années suivantes. Le choix du triticale, en tant que couvert, a été proposé par les praticiens du fait d'un moindre coût et d'un accès plus facile que le seigle. Les essais ont montré qu'un couvert composé d'un triticale en pure maîtrisait moins les adventices que le seigle, même si en mélange, ces deux espèces représentent une solution comparable à un seigle pure. Ce type de mélange seigle/triticale ou encore seigle/orge est un axe de recherche à approfondir car il combine des espèces caractérisées par différentes propriétés (hauteur, largeur des feuilles, etc.) qui peuvent se compléter et réduire la variabilité des performances agronomiques des couverts.

Ce travail de recherche conjoint « AE-chercheurs », a permis de soulever de nouvelles questions à l'échelle de la parcelle et de la rotation : quels inter-rangs de la culture ? quelles variétés ? quelles solutions de rattrapage possibles ? ; quelles stratégies de fertilisation ? comment gérer le mulch ? quelles autres cultures que le soja ? quels précédents ? Au-delà du choix de l'espèce du couvert, primordiale pour maîtriser les adventices, un ensemble de facteurs est à prendre en compte pour

limiter la variabilité des résultats tels que la fertilisation, les outils utilisés et leurs réglages, le type de sol ou encore le climat (Vincent-Caboud et *al.*, 2019b).

2.4.2. Les apprentissages des praticiens

Chez les praticiens, quatre types d'apprentissage sur les couverts ont pu être identifiés (Tableau 19) : le **choix des couverts** (effet allélopathique, hauteur, etc.), l'importance de la **biomasse du couvert**, les stratégies permettant **d'optimiser sa productivité** et le **mode d'action du rouleau**, en fonction de sa conception, sur les espèces du couvert en fonction de sa composition.

Au terme du travail conjoint, les praticiens ont pris conscience de l'importance de « *prendre soin du couvert comme une culture principale* ». Ceci avait été relevé par certains praticiens innovants sondés lors de l'enquête en ligne (chapitre 3). Leur raisonnement vis-à-vis du choix du couvert en SDSC sans herbicide a évolué. Il reposait, à la fin du programme de recherche, sur des propositions de couverts composés d'une ou de deux espèces en considérant comme premier critère, la « maîtrise des adventices », alors qu'au début de la conception, le couvert était considéré comme un engrais vert classique incluant une diversité d'espèces et de familles pour bénéficier de multitudes de services.

Par ailleurs, la densité de semis élevée du couvert planifié, à partir de connaissances scientifiques, paraissait trop importante pour les AE au début des essais. Lors de l'entretien bilan, tous les AE soulignaient l'importance de semer le couvert dense pour produire des niveaux de MS élevés, et ainsi gérer les adventices. De même, lors du semis des couverts, un choix orienté vers des semis précoces avait été proposé aux praticiens sur la base de la littérature. Ce choix ne semblait pas en accord avec la charge de travail des AE car ces semis rentraient en concurrence avec d'autres travaux de l'exploitation (activité élevage, semis de colza). Par manque de temps, deux couverts ont été semés tardivement, conduisant à un développement du couvert plus hétérogène. Lors du bilan, tous les AE soulignaient la nécessité de semer tôt le couvert et de réfléchir à un précédent adapté pour le permettre.

Tableau 18 : Evolution des dispositifs expérimentaux au cours de la démarche

Années	2016 – 1 ^{ère} année	2017 – 2 ^{ème} année	2018 – 3 ^{ème} année
Modalités testées	<ul style="list-style-type: none"> - date du roulage : avril ou mai - nombre de roulages (2,3 ou 4) - bandes test : différentes hauteurs de couverts broyés 	<ul style="list-style-type: none"> - espèces du couvert végétal : S, T ou mélange - stratégie d'implantation du couvert : mi-septembre ou mi-octobre - mode de roulage - bandes test : inter-rangs de soja réduits, couvert de vesce/seigle ; couvert de ray grass 	<ul style="list-style-type: none"> - espèces du couvert pour le soja : S, T ou mélange pour le soja et seigle fourrager ou seigle grain - espèces du couvert pour le maïs : pois/seigle ou seigle - mode de gestion du couvert : 1 ou 2 roulages ou déchaumages - bandes test : inter rang de soja réduits, sens du roulage en parallèle, semences de ferme, différentes espèces testées pour le couvert, semis avant le roulage
Changements principaux réalisés	/	<ul style="list-style-type: none"> - utilisation de rouleaux cranteurs plus lourds et plus adaptés (construction d'un rouleau cranteur expérimental) - sens du roulage du couvert perpendiculaire au sens de son semis - tester un essai en augmentant les densités de semis du couvert - déchaumages avant de semer le couvert 	<ul style="list-style-type: none"> - semis précoces des couverts : entre fin août à début octobre - tous les couverts des essais semés à 200 kg/ha - tous les essais ont été semés avec le même semoir SD - ajout d'essais sur la comparaison de variétés de seigle et d'inter-rangs du soja
Principaux résultats et conclusions	<ul style="list-style-type: none"> - ne pas rouler le couvert avant floraison (relevées) : Rouler à 50% de floraison au moins - nécessité d'avoir plus de biomasse du couvert pour gérer les adventices : Utiliser des espèces avec une biomasse élevée, comme du seigle ou du triticale (plus facile d'accès et moins cher) - le nombre de roulages n'est pas important mais plutôt la période du premier roulage - le semis du soja réalisé trop tôt : Retarder le semis pour avoir un sol plus réchauffé - faible poids du rouleau et peu agressif : auto-construire un rouleau plus adapté - difficile de gérer un couvert multispécifique : Il faut limiter le nombre d'espèces à 1 ou 2. - roulage peu efficace : tester d'autres orientations du roulage 	<ul style="list-style-type: none"> - plus de biomasse du couvert obtenue avec un couvert de seigle - plus de biomasse du couvert est nécessaire pour gérer les adventices jusqu'à la récolte de la culture (> 8 TMS/ha ; si <8 TMS/ha plus de 1500 KgMS/ha d'adventices à la récolte) - meilleure gestion des adventices avec les couverts de seigle et mélange seigle/triticale - difficultés à semer dans une biomasse > 10T de MS - un second roulage après le semis optimise le recouvrement du sol mais affecte la levée : attention aux conditions d'intervention - effet sur la qualité de l'implantation du couvert/semis du couvert en perpendiculaire au sens de travail du sol - le semis du couvert à 90 ou 120 Kg/ha implique une biomasse trop faible pour gérer les adventices - le couvert semé en novembre a été abandonné (couvert trop hétérogène – attaque de limaces - et peu mature en mai : semer plus tôt les couverts et plus dense 	<ul style="list-style-type: none"> - performances des couverts très variables selon les contextes pédoclimatiques → pas de différence de MS entre S, T et M - difficultés à obtenir 8 T de MS/ha - le seigle fourrager permet un recouvrement plus rapide du sol - gestion des adventices améliorée avec le seigle dans le mélange - rendements du soja plus élevés sous couverts composés de seigle - un inter rang plus étroit a permis d'obtenir de meilleurs rendements mais nécessite davantage de références - le seigle dans le couvert crée une faim d'azote pour le maïs - l'augmentation du nombre de roulage pour mieux gérer le couvert affecte les levées de la culture et le rendement - les bandes test de maïs fertilisées sont plus développées - le semis avant le roulage améliore le contact graine-sol mais gêne la levée du soja à cause de pailles dans le sillon de semis - l'écimage est difficile à gérer : repousses de graminées + augmente le temps de travail et la consommation énergétique
Nouvelles questions	<ul style="list-style-type: none"> - quelle stratégie d'implantation du couvert privilégier ? (densité, date de semis) - le sens du roulage du couvert en perpendiculaire à son semis permettrait-il d'améliorer la maîtrise du couvert ? - quel type de couvert utiliser pour optimiser la biomasse du couvert ? 	<ul style="list-style-type: none"> - quand le couvert n'est pas suffisamment performant, la réduction des inter-rangs pourrait-elle améliorer la gestion des adventices ? réduction de l'inter-rang du soja ? - d'autres variétés (fourragères ou forestières) ou espèces pourraient-elles améliorer la production de MS du couvert ? - d'autres cultures pourraient-elles être pratiquées en SDSC ? - une fertilisation permettrait-elle de sécuriser la réussite ? - comment gérer le mulch restant sur le sol à la récolte ? - quelles solutions de rattrapage sont disponibles ? 	<ul style="list-style-type: none"> - comment gérer la variabilité de la performance des couverts ? - une fertilisation au niveau du couvert permettrait-elle de sécuriser la réussite en assurant la productivité du couvert de MS ? Quel positionnement de la fertilisation ? (au semis ou sortie hiver) - faudrait-il augmenter le nombre d'espèces dans le couvert afin de trouver un meilleur équilibre entre la maîtrise des adventices et la restitution azotée au sol pour limiter la faim d'azote ? - quelle est la viabilité d'un système intégrant la technique ? - quelles solutions de rattrapage sont disponibles au cours de l'été ?

Le matériel a constitué un facteur d'intérêt fort des praticiens et donc d'un apprentissage important. Ce phénomène d'apprentissage peut s'observer par exemple avec l'AE BA, inscrit depuis le début de la démarche. Ce praticien expérimente conjointement avec la recherche depuis 2005 des TCSL en AB. Depuis 2016, 3 types de rouleaux différents ont été testés sur son exploitation, lui permettant d'observer l'effet de ces rouleaux sur différents types d'espèces : seigle, triticale, pois fourrager, féverole. En 2019, le praticien a auto-construit son propre rouleau en s'appuyant sur l'expérience développée au cours des essais et des échanges avec son réseau professionnel (Figure 63). Ce rouleau est le fruit de l'apprentissage matériel que ce praticien a acquis à la fois sur les outils mais aussi sur les espèces du couvert afin de comprendre comment les maîtriser par roulage.



Rouleau co-construit et testé en 2005, 2008 et 2016 chez l'AE BA



Rouleau SKY Agriculture® testé en SDSC sans herbicide chez BA en 2017 et 2018



Rouleau co-construit en 2017 impliquant l'AE BA et testé en 2019 chez BA



Rouleau auto-construit par l'AE BA en 2019

Figure 63: Initiative d'auto-construction d'un rouleau adapté au contexte local par un agriculteur-expérimentateur du processus de recherche conjoint après l'expérimentation de 3 rouleaux différents chez lui ces dernières années

Malgré le peu de connaissances sur le sol, lors de l'entretien bilan, tous les praticiens soulignaient l'importance du potentiel agronomique du sol dès le démarrage de l'ITK pour assurer la réussite de la technique. Or, au début de la conception des essais, les praticiens ont eu tendance à choisir des parcelles à faible potentiel ou à forte pression adventices afin de juger de la pertinence de cette technique dans des conditions fragiles tout en limitant la prise de risque.

Au cours du processus, les praticiens ont également pris conscience de l'importance des changements à opérer pour intégrer la technique. Par exemple, l'AE SE, souhaitait conserver ses pratiques d'irrigation du soja en n'intervenant pas avant la floraison de la culture. Cependant, le soja a perdu une partie importante de son potentiel de rendement dès la levée. Le soja s'est épuisé en levant rapidement au stade crosse pour traverser le mulch et chercher la lumière puis il a végété longtemps aux premiers stades de développement le rendant sensible aux aléas climatiques et aux ravageurs. A l'issue des essais, les AE ont mis en évidence l'intérêt d'une irrigation précoce dès la première feuille trifoliée du soja pour favoriser son développement et limiter la perte du potentiel de rendement.

Enfin, les praticiens ont développé des connaissances sur l'effet du SDSC sans herbicide sur la culture suivante et sur la fertilité du sol qui restent encore très peu documentées. Après l'arrêt de l'essai (après la récolte du soja), les praticiens ont poursuivi les observations de la parcelle d'essai au niveau de la qualité du sol, de la pression des adventices, des repousses du couvert, de la facilité à semer la culture suivante et du développement de cette culture.

Tableau 19 : Principaux apprentissages des praticiens au cours du processus de recherche conjoint au niveau des couverts végétaux et du matériel¹

Apprentissages des agriculteurs – expérimentateurs	
Matériel	<ul style="list-style-type: none"> - un déchaumeur à dents gère mieux les résidus qu'un outil à disques - il faut un rouleau avec du poids et des lames qui blessent le couvert - un effet ripage sur le rouleau permettrait de mieux blesser des couverts moins hauts et moins denses car les couverts sont restés verts quelques semaines donc le roulage n'avait pas totalement coupé l'alimentation des plantes - les lames du rouleau agissent plus ou moins bien selon le type de couvert - avec un diamètre plus petit, la vitesse de rotation est plus grande impliquant plus de pincement sur le couvert car les lames arrivent plus vite mais le coût est plus élevé pour la consommation énergétique - utiliser 2 petits rouleaux doit être plus efficace pour le même coût - les lames hélicoïdales limiteraient les vibrations sur le sol - le roulage d'un couvert haut et dense est efficace - le deuxième roulage permet de mieux rappuyer le couvert sur le sol, mais il y avait moins de levées de soja - le roulage de sorgho est efficace aux endroits où il est haut mais lorsqu'il est plus hétérogène, le rouleau est moins efficace - il faut auto-construire son matériel pour l'adapter à son contexte - difficulté technique de semer du soja dans du rey grass roulé (bourrage) - les lames du rouleau doivent pincer le couvert pour couper l'alimentation mais ne pas couper sinon il repart - il faut un semoir SD à disques pour trancher le mulch sur la ligne, un semoir à dents entraînerait du bourrage - l'écimage est intéressant pour gérer les repousses du couvert, mais ces interventions multiplient les passages car elles stimulent leur développement - le broyage du couvert améliore le contact graines-sol lors du SD du soja mais le couvert se dégrade vite et les adventices prennent le dessus - cette technique nécessite du temps au début pour le réglage des outils - liée à l'hétérogénéité du sol, la biomasse du couvert est différente sur la parcelle, donc il faudrait pouvoir adapter le réglage du semoir en fonction mais ce n'est possible donc le contact graine-sol n'est pas assuré de partout et les graines sont parfois sur le mulch - il faudrait un semoir qui crée un peu plus de terre fine sur la ligne de semis - si la biomasse du couvert > 9 T/ha de MS, le sillon n'est pas bien refermé, et des pailles sont présentes dans le sillon - le semis avant le roulage entraîne plus de pailles dans le sillon à cause du rouleau et des roues du tracteur - en SD, il faut ralentir la vitesse pour améliorer le semis - lors du semis, il faut un équilibre entre le positionnement de la graine en profondeur et la fermeture du sillon - il faut un semoir SD avec des disques en biais pour améliorer le contact graine-sol - sur le semoir il faut des grands disques ouvreurs quand il y a une importante biomasse sur le sol - il faut rajouter des masses sur les éléments semeurs

¹ Pour consulter l'ensemble du tableau lié à l'apprentissage des AE au cours de la démarche : lavincent.caboud@gmail.com ou jpeigne@isara.fr

Apprentissages des agriculteurs – expérimentateurs

Couvert végétal

- il faut semer le soja en parallèle au roulage sinon le mulch entraîne des bourrages
- sur des terres argileuses le SD n'est pas évident car le sol au printemps peut être très sec et dur
- l'effet allélopathique du seigle gère mieux les adventices et laisse un sol propre pour le n+1
- la variété ovid est un bon choix pour le seigle
- les couverts doivent être semés denses, il faut doubler la densité de semis
- il peut être semé mi-septembre
- une forte biomasse au printemps protège le sol contre l'érosion et le ruissellement
- un roulage tardif du couvert entraîne une petite production de graines et donc de repousses dans le n+1
- pour éviter les repousses du couvert dans la culture suivante, il faut faire 1 à 2 déchaumages après la moisson du soja pour enfouir les résidus
- le triticale peut être impressionnant en feuillage car les feuilles sont plus larges
- le couvert pompe l'eau du sol qui n'est pas disponible pour le soja
- le manque d'azote (en fonction du précédent) a du participer à l'avortement des talles
- le semis précoce du couvert avance la maturité mais si les graminées épiant trop tôt l'épi peut geler dans la gaine et bloquer la montaison
- des conditions sèches bloquent la décomposition du mulch, il n'y a pas de minéralisation dans le sol
- le blé est récolté tôt donc le couvert peut être semé tôt mais le blé n'est pas un bon précédent vis à vis de la disponibilité de l'azote
- le seigle fourrager est un peu plus fin que le seigle grain
- le seigle fourrager s'implante plus rapidement et peut produire beaucoup de biomasse
- le seigle permet de faire un bon paillage sur le sol
- le roulage en perpendiculaire permet de mieux gérer et répartir le couvert
- le seigle fourrager était plus haut mais il est plus sensible à la verse
- les épis du couvert peuvent relever après le roulage si les conditions sont humides
- il faut anticiper le sens du semis du couvert dès le début
- le semis précoce des graminées peut favoriser le développement de pucerons
- il faut fertiliser le couvert pour qu'il soit plus dense et vigoureux au printemps,
- il faut favoriser une implantation du couvert rapide à l'automne pour gérer les adventices, mais pas trop pour limiter sa sensibilité en hiver
- le couvert doit être roulé au moment de sa floraison pour éviter les relevées
- un couvert multispécifique est plus complexe à gérer car toutes les espèces n'ont pas le même cycle
- le mélange seigle et pois est intéressant car le seigle fait tuteur et améliore la maîtrise du pois
- sortie hiver il faut faire des reliquats d'azote pour savoir si un apport azoté est nécessaire pour stimuler le couvert
- la vesce a un bon pouvoir étouffant
- le couvert avec le mélange seigle et triticale a une performance intermédiaire entre les espèces en pure
- le semis du couvert en perpendiculaire du sens de travail de la parcelle peut être affecté par l'hétérogénéité du sol

Les praticiens ont donc développé différents apprentissages au cours du processus, orientés sur les couverts, le matériel, et le développement de la culture. Ces apprentissages expliquent que les praticiens aient été davantage force de proposition à la fin de l'essai, en proposant diverses initiatives d'essais, qu'au début de la démarche où ils étaient plus dans une posture d'attente d'informations. Les apprentissages diffèrent en fonction des AE puisqu'ils dépendent aussi d'une multitude de facteurs. En effet, les connaissances que les praticiens apprennent sont fonction de leurs objectifs, de leurs contraintes personnelles, de leurs expériences, de leurs points de vue au démarrage de l'essai et de la manière dont ils se sont investis dans la démarche.

A titre d'exemple, l'AE TR, possédait déjà un certain nombre de connaissances au début de la démarche grâce à sa formation, son expérience et ses pratiques. Il a développé un apprentissage approfondi au niveau du sol, qui n'a pas été observé chez les autres AE, moins expérimentés en AC. En particulier, l'AE TR a observé l'évolution du sol à la suite de l'essai en termes de réduction de ruissellement, de meilleure vie du sol, de portance, d'infiltration de l'eau et de facilité de semis pour la culture suivante. Lors des échanges, cet AE illustre ses propos en comparant les données observées avec les autres essais qu'il mène en TCSL dans ses pratiques quotidiennes sur d'autres cultures (maïs, tournesol ou blé) et avec d'autres types de couverts (phacélie, moutarde/seigle, etc.). L'analyse des différents essais lui permettait d'interpréter avec précision des phénomènes observés. L'interprétation faite par l'AE sur la facilité de semis de la culture suivante après l'essai, un blé, vis-à-vis de l'état physique et biologique du sol est un exemple : *« à l'automne j'étais surpris quand j'ai voulu semer mon blé...la terre était fine sur la partie SD et facile à travailler alors que sur la partie déchaumée ça collait [...]. En l'absence de couvert sur cette partie, le sol s'est asséché plus vite cet été je pense avec la canicule, il y avait moins de vers de terre... alors que sur la partie SD de l'essai, le couvert conservait mieux l'humidité, les vers de terre étaient plus actifs et ils ont du mieux travailler la verticalité du sol, ... pour moi ça expliquerait qu'à l'automne l'eau se soit mieux infiltré ».*

A l'inverse, d'autres praticiens moins expérimentés sur les TCSL, au début de la démarche et avec des pratiques dominantes en labour, se sont plus axés sur des apprentissages matériels et agronomiques centrés sur la performance de la culture et de la maîtrise des adventices par le couvert végétal.

3. Discussion : une démarche de recherche conjointe entre praticiens et chercheurs de la conception à l'évaluation

A partir des critères d'évaluation, nous avons identifié les forces et les faiblesses de notre démarche, que nous avons comparées à d'autres approches d'expérimentations en milieu rural (Annexe 17).

3.1. Quels apports de la démarche ?

3.1.1. La production de connaissances pour développer des techniques innovantes et performantes

Une **diversité de connaissances** a été produite en 3 ans grâce à la conduite d'essais locaux. Ces essais multi-sites ont permis d'ouvrir le champ des possibles pour favoriser la **créativité des praticiens** lors des interactions (bandes test, initiatives d'essais). Cette créativité a permis de stimuler la recherche de solutions pour améliorer les ITK au niveau de différentes performances (ex : deux fois moins de consommation de carburant pour la dimension environnementale). D'autres démarches qui reposent sur un partage de connaissances montrent une multitude de leviers soulevés (Astatke et *al.*, 2003; Crawford et *al.*, 2007; Petersen et *al.*, 1999). Par exemple, Astatke et *al.* (2003) montrent qu'à l'issue d'essais conçus par des chercheurs et des praticiens, la créativité est stimulée grâce à des visites d'essais où les participants suggèrent des changements pour améliorer la technique testée. D'après Petersen et *al.* (1999) la diversité d'expérimentations menées en milieu paysan augmente les chances d'identifier de nouvelles stratégies dans la gestion du SD sans herbicide.

Notre démarche permet, chaque année, de produire des connaissances à la fois scientifiques (essais formels) et empiriques (bandes tests, interactions). Ces formes de connaissances, **complémentaires** et nécessaires pour le développement de pratiques durables (DeWalt, 1994; Hoffmann et *al.*, 2007; Lyon, 1996), sont produites en parallèle dans notre étude et s'alimentent entre elles. Les AE s'appuient sur les connaissances scientifiques, mobilisées au sein des dispositifs formels, pour ajouter des bandes test sur de nouvelles idées émergentes ou pour vérifier, dans leur contexte, leur validité. A l'inverse, les chercheurs s'inspirent de ces bandes test ou des initiatives d'essais des AE pour orienter les essais formels, qui constituent l'outil de production de connaissances scientifiques de notre démarche. A titre illustratif, le changement de variétés du seigle et les modifications d'inter-rangs du soja sont issus des connaissances empiriques. De même, les chercheurs mobilisent les connaissances en lien avec les équipements et leurs réglages afin d'améliorer les essais et limiter les biais liés au manque de connaissances scientifiques sur ces thématiques (Chapitre 3).

Des auteurs montrent que cette complémentarité permet de faire émerger des connaissances plus **performantes dans le contexte local** (Vogl et *al.*, 2015). Vogl et *al.* (2015) indiquent que des techniques conçues collectivement ont amélioré l'efficacité de la production de fumures organiques et réduit le temps de travail de 3h par jour. Dans notre étude, la performance des ITK ne permet pas

d'atteindre les rendements visés par les AE, qui restent inférieurs aux pratiques, mais le temps de travail et la consommation de carburant sont réduits de plus de la moitié. De plus, différents leviers ont été identifiés pour améliorer les performances agronomiques (fertilisation, variété des cultures, etc.).

3.1.2. Un apprentissage des acteurs

Les apprentissages au sein de notre démarche ont été produits à partir du travail conjoint de conception et d'évaluation, qui s'appuie sur **une confrontation de points de vue, de connaissances et de méthodologies**, mais aussi par **le renforcement de la capacité des acteurs** à innover.

Lors de la conception, le **confrontation des points de vue** a été un premier outil d'apprentissage. Le chapitre 3 a montré des divergences dans les connaissances (cultures, couverts, gestion du couvert, etc.). Celles-ci ont soulevé des questions, lors de la conception, sur lesquelles les acteurs ont fait des compromis pour concilier leurs objectifs et les contraintes locales (disponibilité du matériel, variétés, etc.). Ces discussions ont reposé sur **les choix méthodologiques** des essais (ex : types de couverts, densités de semis, choix de la parcelle, etc.). Cette recherche de compromis est liée aux divergences d'intérêt et aux différentes représentations sur l'objet d'étude. En effet, d'après Lenne et *al.* (2007), pour le chercheur, le SDSC correspond à la mise en œuvre de principes agro-écologiques (ex : limiter le travail du sol, mobilisation de couverts). A l'inverse, pour les praticiens le SDSC constitue un moyen de répondre aux contraintes (ex : simplifier les ITK, trouver une alternative au glyphosate pour protéger sa santé, l'environnement et répondre à la pression sociétale). Ces confrontations de points de vue permettent de construire des ITK issus d'un compromis entre les partenaires tout en apprenant chacun des autres pour enrichir leurs sphères de connaissances respectives.

Notre démarche a **développé la capacité des AE** à construire des solutions en réponse aux problèmes. Au cours du processus, les AE ont proposé des bandes test pour chercher d'autres moyens de favoriser le développement du couvert ou d'améliorer leur maîtrise. D'autres auteurs observent une meilleure capacité des praticiens à répondre aux difficultés qu'ils rencontrent, après avoir été impliqués dans des expérimentations collaboratives (Lenne et *al.*, 2007; Sabourin et *al.*, 2004; Sar et *al.*, 2010). D'après Hauser et *al.* (2010), ce phénomène résulte du renforcement de la capacité des acteurs (ou de leur émancipation), au cours du processus, grâce aux différentes compétences et connaissances qu'ils acquièrent. La notion d'« *empowerment* », discutée dans l'état de l'art (chapitre 2), prend son sens ici. En effet, notre démarche a montré une évolution dans la posture des AE. Au démarrage, l'influence des connaissances scientifiques sur les ITK conçus était plus élevée (semis de soja sous couvert de seigle roulé, très présent dans les essais scientifiques). Toutefois, au cours du processus, les praticiens ont commencé à apporter plus d'idées au sein des essais (sur le matériel, le choix des variétés, etc.), puis en ajoutant des bandes test. Enfin, les initiatives d'essais proposées à la fin du projet, traduisent cette émancipation, avec la suggestion de rotations ou l'auto-construction d'outils. Cette évolution

peut s'expliquer aussi par un manque de connaissances au début de la démarche (les AE n'étant pour la majorité pas expérimentés sur le SD).

D'après Toillier et *al.* (2018) **trois types de situations d'apprentissage** existent : (1) la créativité ou l'exploration ; (2) l'exploitation et (3) l'appropriation. Dans notre démarche, outre les apprentissages liés à la créativité et au travail d'expérimentation conjointe, l'apprentissage lié à « l'appropriation » de la technique est cependant difficilement évaluable après 1.5 ans, en moyenne, d'implication des AE dans la démarche. D'après Feder et *al.* (2004, 1985); Fischer et *al.* (1996); Long et *al.* (2016), en fonction de l'objet étudié, les **changements peuvent être plus ou moins longs**. Les études disponibles sur la technique du SD en agriculture conventionnelle montrent que ces changements sont souvent longs, c'est-à-dire plus de 10 à 15 ans, car la technique remet en question différentes échelles d'organisation de l'exploitation (Labbaci et *al.*, 2015; Laurent et *al.*, 2011; Raunet, 2002; Scopel et *al.*, 2004; Villemaine et *al.*, 2012). La technique du SDSC sans herbicide complexifie davantage les changements nécessaires, puisqu'en l'absence d'herbicide, d'autres stratégies sont à mobiliser pour gérer les adventices (biomasse du couvert, outils adaptés à la présence d'un mulch épais, etc.).

Notre travail conjoint, a mis en évidence des **effets de la mise en pratique** de la technique **sur des échelles plus larges** que l'exploitation. Par exemple, des impacts sur les débouchés des cultures ont été observés. La valorisation du soja dans la filière « alimentation humaine sans gluten » n'est pas permise à cause de la présence du seigle dans le couvert. De même, le soja valorisé, en « alimentation humaine », particulièrement intéressante sur le marché de production en AB, peut rapidement être déclassé en « alimentation animale », en présence de graines de graminées dans les récoltes de soja, liée aux repousses du couvert. Au-delà de l'aspect technique, Schneider et *al.* (2012) mettent aussi en avant une transformation de l'ensemble du réseau professionnel des praticiens, nécessaire lors d'une transition vers du SDSC. Une transition qui peut ainsi s'avérer longue à réaliser. Par exemple, dans notre démarche, tous les entrepreneurs collaborant habituellement avec les AE, n'étaient pas prêts à récolter le soja à cause du mulch ou de repousses du couvert (modification des réglages, salissement).

3.1.3.L'implication des praticiens favorisée par les échanges collectifs autour des essais

Les résultats ont montré l'**intérêt croissant** des praticiens pour la thématique du SDSC sans herbicide mais aussi la capacité de notre processus de recherche à **impliquer de nouveaux praticiens** pour expérimenter conjointement ou **initier leurs propres essais**.

Notre démarche a confirmé l'**intérêt marqué** des praticiens pour les enjeux de la technique, identifié dans le chapitre 3. En moyenne, les visites d'essais comptaient 23 participants par rencontre (/7 visites) et les ateliers 15 participants (/3 ateliers). Sur du SD sans herbicide, en 3 ans Petersen et *al.* (1999) montrent une implication de plus de 400 praticiens dans les échanges, organisés autour d'essais menés en milieu rural au Brésil. Plus de 36 expérimentations ont été conduites dans cette étude et les

connaissances empiriques sur le SD étaient plus développées. En effet, en agriculture conventionnelle, le Brésil est le deuxième pays à l'échelle internationale en termes de surfaces cultivées en AC, avec plus de 32 millions d'hectares, et notamment le SD est très répandu (Kassam *et al.*, 2019). Dans notre étude, le nombre de participations aux rencontres collectives a été plus faible mais il reste prometteur au regard des pratiques locales, encore principalement axées, sur de fréquentes interventions en travail du sol (labour, déchaumage), en vue de préparer le lit de semence et maîtriser les adventices.

Dans notre démarche, la **combinaison de divers outils d'animation** (essais, ateliers de conception, visites d'essais, auto-construction), a été efficace pour répondre aux attentes des praticiens. Parmi les 7 AE inscrits dans la démarche, tous étaient prêts à poursuivre les essais conjointement et 6 à continuer les essais par eux-mêmes. L'implication durable des acteurs est souvent un critère très discuté dans la littérature car, par manque de temps et de moyens, le nombre de praticiens est faible ou se désengagent avant la fin du projet (Hocdé *et al.*, 2008). Au sein de notre processus, tous les praticiens sont restés impliqués dans la conduite des essais jusqu'à la récolte de la culture et ils ont poursuivi leurs observations dans la culture suivante.

Dans notre étude, à l'issue de chaque essai, le nombre de praticiens prêts à expérimenter augmentait. En moyenne, 26 % des praticiens visitant un essai ont souhaité tester la technique chez eux. La capacité de notre processus à inciter les praticiens « visiteurs » à **initier leurs essais** a aussi été observée par Vall *et al.* (2016) dans une démarche de conception similaire. Les auteurs montrent que la conduite d'essais conjointement a encouragé 21 % des praticiens à initier des essais pour mieux observer leurs sols et améliorer la gestion des fumures organiques des cultures. Ngalamulume Tshiebue (2010) montre aussi cet « effet d'entraînement » de voisins à adopter de nouvelles techniques grâce à un apprentissage social entre pairs lors de visites d'essais.

3.2. Les limites de la démarche

3.2.1. Valorisation scientifique et fiabilité des résultats

Bien que la flexibilité du processus ait favorisé la diversité des connaissances produites, celle-ci a réduit la valorisation scientifique de certains essais, rendant parfois difficile de conclure sur les phénomènes observés. Cette **difficulté à publier** au sein de démarches participatives est souvent relevée et constitue un frein à l'implication des praticiens dès les premières étapes de conception (Astatke *et al.*, 2003; Faugere *et al.*, 2010; Ngalamulume Tshiebue, 2010; Petersen *et al.*, 1999).

D'après Douzet *et al.* (2014), la **fiabilité de résultats** issus d'essais en milieu paysan est parfois remise en question à cause des biais auxquels ceux-ci doivent faire face. En effet, les prises de décisions lors d'essais menés avec des praticiens, sont confrontées à une compétition par rapport à leur charge de travail avec d'autres parcelles ou activités de l'exploitation, qui sont priorisées. Nous avons observé aussi ce phénomène dans notre étude. Par exemple, pour l'AE JU, le semis du couvert a été

réalisé tardivement, comparé aux autres sites à cause d'un retard dans ses semis de colza. Hormis, le biais produit pour valoriser cet essai en recherche, ce retard a aussi eu des conséquences sur la faible biomasse du couvert au printemps et ainsi sur la réussite de la conduite de l'essai jusqu'à la récolte. Un autre exemple peut être discuté sur la faible disponibilité de semoirs SD. Pendant les semis, les essais, étant répartis sur de faibles surfaces, ils n'étaient pas prioritaires vis-à-vis de la charge de travail des entrepreneurs, rendant les semis SD dépendants à la fois de leur disponibilité, de celle des AE et des chercheurs mais aussi des conditions climatiques. Cet ensemble de contraintes a conduit à des semis qui n'étaient pas toujours réalisés dans des conditions « optimales ».

Dans la littérature, Astatke et *al.* (2003) soulignent aussi d'autres contraintes expérimentales qui peuvent intervenir au sein d'essais conjoints telle que **l'importante variabilité** pouvant exister d'une exploitation à l'autre et entraîner des biais dans les résultats (types de sol, matériel utilisé, etc.). Des modèles statistiques complexes sont alors développés pour analyser les données (Astatke et *al.*, 2003).

3.2.2. Des manques de connaissances demeurent présents

Des manques de connaissances persistent à l'issue de notre étude. L'importante variabilité des performances obtenues entre les exploitations, dont la cause est souvent attribuée **au matériel et/ou aux variétés utilisées**, nous amène à nous interroger sur **le choix des acteurs** au sein de la démarche. Par ailleurs, **l'échelle annuelle** des essais menés limite la production de connaissances sur l'évolution du sol, la rotation culturale ou les dimensions organisationnelles et environnementales.

Dans notre démarche, le noyau actif du processus conjoint s'appuie sur le partenariat AE-chercheurs. D'autres acteurs interviennent lors de l'évaluation mais seulement, à titre consultatif. Cependant, dans la démarche proposée par Vall et *al.* (2016), les auteurs s'interrogent sur le rôle des conseillers et l'importance de les intégrer plus tôt dans le processus, en leur attribuant un poids dans les prises de décision afin de combler les manques de connaissances observés. Dans notre démarche, **l'implication** d'autres types d'acteurs dès la conception tels que **des machinistes ou des semenciers** pourrait être constructif pour combler les manques de connaissances sur les choix techniques matériels et variétaux. Leur implication pourrait augmenter la marge de manœuvre pour innover sur les outils. Par exemple, lors des semis, des idées ont émergé pour améliorer l'implantation des cultures (ajout de chasses débris, ajout d'une dent pour créer plus de terre fine, ajout de poids sur les éléments semeurs), mais qui n'ont pas pu être appliquées sur les semoirs des entrepreneurs (manque de temps).

Les essais menés à l'échelle annuelle limitent la dynamique de production des connaissances sur des niveaux d'organisation plus larges que l'exploitation (rotation, répartition du travail). Or, lors de l'expérimentation conjointe, l'insertion des ITK a, par exemple, soulevé des difficultés pour certains praticiens, en particulier les éleveurs, à se dégager du temps pour un semis précoce du couvert. Ainsi, la prise en compte de la dimension organisationnelle, doit être plus présente au sein de la démarche

pour améliorer la faisabilité de la technique. Des manques de connaissances existent aussi au niveau de l'effet de la technique sur l'évolution des performances agronomiques au cours du temps (qualité du sol, flore adventices, etc.) et sur les dimensions économiques (viabilité de la technique à l'échelle de la rotation). Notre démarche a aussi soulevé des limites à l'échelle des débouchés, comme discuté précédemment, mais notre échelle d'étude ne permet pas d'apporter des solutions pour sécuriser la qualité du soja, produit en SDSC sans herbicide, pour assurer sa valorisation au sein de filières spécifiques en alimentation humaine, particulièrement exigeantes sur la qualité des grains.

3.2.3. Un processus de recherche itératif long et coûteux

Cette démarche conjointe et itérative visait à réduire l'asymétrie entre chercheurs et praticiens souvent, reportée dans la littérature (Coulibaly *et al.*, 2011; Hocdé *et al.*, 2008; Vall *et al.*, 2016). Cependant, **les investissements matériels et humains** nécessaires pour conduire ce processus sont élevés.

La faible disponibilité des équipements spécifique au SD dans la région de l'étude a entraîné des difficultés à trouver des outils adaptés. Ce phénomène constitue souvent un frein dans les essais conduits en milieu paysan (Clarke *et al.*, 2018; Petersen *et al.*, 1999). De plus, dans notre démarche l'apprentissage social dépend des interactions qui s'opèrent entre les praticiens et les chercheurs. Ces échanges ont été nombreux avec chacun des sept AE, en mobilisant différents outils. A l'inverse, Vongkasem *et al.* (2001) présentent une démarche menée en Thaïlande, où les interactions sur les parcelles d'essais entre les acteurs et le suivi des essais ont été très limités, en raison de l'éloignement des parcelles et de la faible disponibilité des chercheurs. Au sein d'une démarche participative, le fait de ne pas entretenir ces échanges limite l'intérêt de collaborer avec des praticiens et peut réduire leur implication. Dans notre démarche, l'ensemble des interactions, mises en place avec chaque AE, alourdit le processus, mais celles-ci constituent un outil clé permettant de recueillir les connaissances empiriques. Elles peuvent aussi expliquer l'évolution des AE au cours de la démarche. En effet, l'établissement **d'une relation de confiance** à partir de ces interactions, a pu favoriser la capacité des AE à proposer des modifications des ITK, au cours du processus, comparée à la phase d'initiation des essais. Dans la littérature, des auteurs soulignent aussi que ces interactions sont indispensables pour construire une relation de confiance mais aussi pour créer un langage commun d'échanges. Cependant, le temps passé pour garantir ces interactions est souvent sous-estimé lors du montage des projets de recherche alors qu'ils constituent une part essentielle de la réussite de l'implication des praticiens. D'après Clarke *et al.* (2018), la posture qu'adopte le praticien et cette confiance qu'il a vis-à-vis du projet et des chercheurs est cruciale pour une rapide adoption.

Les **moyens financiers**, pour expérimenter une technique innovante à de plus larges échelles, sont élevés (matériels spécifiques, prise de risque sur les rendements, compétences techniques élevées, technique soumise aux aléas climatiques, etc.). Plusieurs auteurs discutent de ces **charges de travail** et financières importantes nécessaires pour conduire des processus de recherche itératifs ou parfois

qualifiés de démarches « à tâtonnement » (Lenne et *al.*, 2007; Sabourin et *al.*, 2004; Vall et *al.*, 2016). Dans notre étude, pour gérer la variabilité des résultats et minimiser la prise de risque, il apparaît important de combler les manques de connaissances techniques avant de concevoir des systèmes de culture pour les expérimenter à de plus larges échelles. La modélisation peut être pertinente à mobiliser pour explorer une diversité de prototypes possibles et identifier les plus performants à expérimenter chez les praticiens par une évaluation multicritères *ex ante*.

3.2.4. Changements et adoption du SDSC sans herbicide

Au regard de la dynamique de **production de connaissances** dans notre démarche, il convient de s'intéresser à son effet sur le niveau d'**adoption** et de **promotion de la technique**. Les démarches portées sur de légères modifications techniques des pratiques montrent d'importants niveaux d'adoption et de diffusion. A l'opposé, les démarches qui reposent sur des objets d'études nécessitant de profonds changements, tel que le SDSC sans herbicide, **restent à l'échelle d'expérimentation après 3 ans**. La technique n'est cependant pas rejetée par les praticiens mais le manque de connaissances sur l'effet de l'adoption à de plus larges échelles implique une prise de risque élevée.

Douzet et *al.* (2014) s'intéressent aux **connaissances de praticiens et à l'adoption** de l'AC suite à l'effet des champs écoles auxquels ils ont participé et observent un décalage entre leurs connaissances élevées sur le sujet et le faible niveau d'adoption. Pour les auteurs ce décalage s'explique par des contraintes qui restent fortes pour les praticiens : résidus de culture sur le sol, infestation des adventices, difficulté des travaux de semis. Dans notre démarche, un décalage est aussi présent entre la diversité des connaissances échangées et de leviers proposés et le faible engagement des praticiens vers de réels changements. Ces observations résultent du faible recul sur notre démarche et des connaissances encore insuffisantes pour l'expérimenter à de plus larges échelles. D'après Hocdé et *al.* (2008), les objectifs visés par les praticiens, s'impliquant dans une démarche, sont aussi importants à prendre en compte pour évaluer le critère d'adoption de techniques. Dans notre étude, deux praticiens sont proches de la retraite et se sont impliqués, en tant que AE, pour développer leurs connaissances, par défis technique et par passion de leur métier, mais pas dans un objectif de transformer l'exploitation à 2-3 ans de la retraite. A l'inverse, l'un des AE s'est récemment installé et reste très prudent sur les changements vis-à-vis des pratiques familiales pour limiter la prise de risque.

Dans la littérature, des projets participatifs relatifs à de légers changements techniques aboutissent à un niveau d'adoption et de diffusion élevé (Humphries et *al.*, 2015). Par exemple, dans une approche champ-école paysanne conduite au Congo, Ngalamulume Tshiebue (2010) observe l'évolution des pratiques. Ce type d'approche, reposant sur des essais collectifs menés, par et chez les praticiens, avec l'aide de « facilitateurs », permet d'améliorer l'appropriation des techniques développées. Celles-ci, portent souvent sur de nouvelles variétés, des méthodes de fertilisation ou encore des méthodes de lutte contre les ravageurs qui visent à améliorer les performances agronomiques et économiques des

pratiques. De même, en Thaïlande, Vongkasem et *al.* (2001) montrent que les praticiens mobilisent les techniques conçues avec les chercheurs pour limiter l'érosion de leur sol. Les auteurs montrent que les surfaces sur lesquelles les praticiens s'approprient la technique augmentent avec le temps. Cependant, dans cette étude, la créativité des praticiens apparaît limitée puisque chaque praticien choisit parmi une liste d'options, définies par les chercheurs, celles qu'ils souhaitent tester. Cette liberté que les praticiens ont d'approfondir les options, qu'ils considèrent les plus adaptées, peut expliquer que les praticiens adoptent plus facilement les options expérimentées.

Dans notre démarche, la transition est plus longue, et la notion d'adoption ne peut encore être discutée. A l'opposé des démarches discutées précédemment, les changements à opérer sont importants et la prise en compte de l'échelle de la parcelle seule n'est pas suffisante. Nos résultats montrent toutefois que les AE et de nouveaux producteurs étaient prêts à poursuivre les expérimentations, ce qui constitue un facteur indispensable d'appropriation d'une technique pour envisager une adoption. Par ailleurs, 4/7 des AE étaient prêts à initier des essais avec la recherche, à l'échelle de la rotation et agrandir la taille des surfaces allouées à l'expérimentation. Dans la démarche menée au Brésil sur le SD sans herbicide, Petersen et *al.* (1999) n'observent pas non plus d'adoption en 3 ans mais ils notent l'augmentation annuelle de la taille des parcelles expérimentales menées par les praticiens. Pour les auteurs, ce dernier résultat, associé à l'augmentation du nombre de praticiens impliqués dans les essais indiquent un potentiel d'adoption et de diffusion de la technique. A l'issue de cette étude, il serait intéressant de s'interroger sur l'évolution du projet et des pratiques des agriculteurs brésiliens impliqués dans ce projet 20 ans plus tard pour observer les changements opérés. Cependant, comme le discutent Lacombe et *al.* (2018), les contraintes des projets de recherche, souvent financés pour 3 ans, limitent la capacité des chercheurs à maintenir de telles démarches aussi coûteuses sur de longues années. Ainsi, peu de travaux discutent à la fin des projets de ces notions d'« adoption » des techniques co-conçues et d'« appropriation » dans les pratiques (Lacombe et *al.*, 2018).

Le parallèle conduit avec la démarche participative brésilienne présentée par Petersen et *al.* (1999) est intéressant puisqu'il repose sur un objet d'étude très proche de notre processus de recherche mais mené dans un contexte différent (politique, culturel, climatique, etc.). Cette comparaison nous amène à nous interroger sur l'effet de l'expérience des praticiens autour du SD en agriculture conventionnelle sur la forte dynamique d'expérimentations et d'« effet d'entraînement » reportés par Petersen et *al.* (1999). En effet, dans notre démarche, 5/7 des AE impliqués n'avaient jamais conduit d'essais en SDSC que ce soit avec ou sans herbicide. Ce résultat peut expliquer que le processus d'évolution des AE vers de plus grandes échelles d'expérimentation se révèle plus long que dans la démarche brésilienne où le SD (avec herbicide) est une pratique répandue. Par ailleurs, dans la démarche brésilienne, tous les praticiens ont expérimenté pendant les 3 années de l'étude, ce qui permet d'améliorer l'apprentissage individuel et d'approfondir plus finement l'adaptation de la technique. A l'inverse dans notre étude, un seul des AE a expérimenté pendant les 3 ans de la démarche.

Enfin, il est intéressant de noter que les blocages relevés dans notre étude sur le matériel SD ou par Clarke et *al.* (2018), au Laos, sont les mêmes que Petersen et *al.* (1999) ont mis en avant 20 ans plus tôt au Brésil. Ces résultats confortent l'idée que l'insertion et la diffusion du SDSC sans herbicide est un processus très long et coûteux, puisque 20 ans plus tard en Europe, cette difficulté est encore fortement présente. Toutefois, ces outils commencent à se développer sur le marché européen. De plus, nos essais montrent que les semoirs SD les plus disponibles ne sont pas les plus adaptés au SDSC sans herbicide et nécessiteraient des modifications. Par ailleurs, la pression des débats politiques internationaux existants autour du glyphosate ces dernières années pourrait accélérer le processus de diffusion des connaissances, puisque comme nous l'avons montré dans le chapitre 3, une augmentation de la production de connaissances scientifiques et empiriques est perceptible (plus de publications scientifiques, 493 réponses à notre enquête en ligne).

Pour conclure, **une recherche conjointe améliore la combinaison des connaissances, favorise l'enrôlement des acteurs et crée un apprentissage social permettant de promouvoir la technique.** Cependant, cette diffusion s'opère uniquement à l'échelle expérimentale. Le degré de rupture de la technique avec les pratiques locales, laisse encore de nombreuses questions sur des échelles d'analyse plus longues sur lesquelles la démarche n'a pas permis de produire de connaissances.

Les principaux points forts du processus reposent sur l'importance des **connaissances produites** sur les couverts et sur le matériel en 3 ans. En particulier, ces connaissances ont favorisé la construction de 4 rouleaux. L'efficacité de la démarche à stimuler la **créativité des praticiens** a aussi permis d'ouvrir le champ des possibles pour faire évoluer les ITK et améliorer leurs performances. Les essais, conduits en milieu rural, ont suscité de l'intérêt auprès des praticiens en faisant **évoluer les points de vue**. Ce résultat constitue une perspective prometteuse pour améliorer la diffusion de la technique. Par ailleurs, la dynamique d'échanges a favorisé un **apprentissage social** grâce à la flexibilité du processus, laissant le choix aux praticiens d'ajouter des bandes test en s'appuyant sur les ITK conçus. Les praticiens ont ainsi pu développer des connaissances sur les techniques permettant d'optimiser le développement du couvert et sa maîtrise par roulage (ex : choix des couverts, sens du roulage, etc.). Les chercheurs, quant à eux, se sont inspirés des idées des praticiens pour orienter les essais formalisés (ex : inter-rangs, matériel) et donc la production des connaissances scientifiques.

Cependant, la démarche montre des limites car elle n'a pas permis de produire beaucoup de connaissances sur des thématiques indispensables à la réussite qui nécessiteraient des études sur un plus long terme (gestion des adventices pérennes, évolution du sol, construction d'une rotation, gestion de la fertilisation). Au-delà de l'importance des changements à prendre en compte sur l'exploitation, des contraintes ont aussi été identifiées au niveau des débouchés des cultures mais aussi du réseau professionnel des praticiens et constituent un frein à l'adoption du SDSC sans herbicide.

Conclusion

1. Retour sur la problématique de la thèse

L'objectif de cette thèse était de **concevoir, expérimenter et évaluer avec les praticiens du SDSC sans herbicide**, une technique en rupture avec les pratiques des agriculteurs français, **pour produire de nouvelles connaissances afin d'améliorer ses performances et sa diffusion**.

Le premier axe de recherche a consisté à analyser les connaissances disponibles dans la communauté des scientifiques et celle des praticiens. Parmi les quelques connaissances identifiées, le couvert et le matériel sont les deux premiers facteurs de réussite. Cependant, les connaissances disponibles sont peu actionnables pour permettre une mise en pratique de la technique qui reste présente à titre expérimental dans les exploitations. L'analyse bibliographique montre que les **connaissances scientifiques sont peu généralisables car elles sont insuffisantes et dépendantes de contextes spécifiques** réduisant leur domaine de validité. Dans une enquête en ligne menée auprès des praticiens, les **connaissances empiriques sont plus nombreuses mais très éparses** (lieux, sols, climats, méthodologies, ITK, équipements) les rendant peu accessibles (processus de recherche non formalisé) et difficilement transposables. Des divergences ont été mises en évidence, entre ces deux formes de connaissances au niveau des choix relatifs aux types de couverts mobilisés (ex : couverts monospécifiques ou multi-espèces), aux équipements, aux modes de destruction des couverts, des cultures et aux ITK. Bien qu'en pratique la distinction entre ces connaissances ne soit pas aussi cloisonnée, l'écart qui existe, sur une technique aussi innovante, freine l'avancée des praticiens et des chercheurs dans le développement de leurs connaissances. Les connaissances scientifiques et empiriques identifiées présentent toutefois des **complémentarités qui pourraient aider les acteurs à lever leurs points de blocage respectifs** (ex : connaissances empiriques sur le matériel ou sur une diversité d'espèces testées en couvert vs les connaissances scientifiques sur la maîtrise d'un couvert par roulage). L'état des lieux des connaissances confirme aussi l'intérêt marqué des praticiens pour la technique et leurs attentes vis-à-vis de la production de nouvelles connaissances pour son développement. Ces motivations ont constitué un moteur pour la mise en place de notre processus de recherche conjoint.

Une démarche de recherche conjointe a été mise en place en Auvergne-Rhône-Alpes, impliquant sept agriculteurs-expérimentateurs. Au cours de celle-ci, les praticiens et les chercheurs ont conçu, expérimenté dans les exploitations puis évalué ensemble des ITK innovants orientés, en majorité, sur des semis de soja sous couvert de graminées roulées. Les résultats montrent que la maîtrise des adventices, sans travail du sol ni herbicide, est possible en présence d'une biomasse du couvert élevée (>8 t.ha⁻¹). La variabilité observée sur la maîtrise des adventices, en fonction des sites, est liée aux différences de performance du couvert, fortement soumis aux aléas climatiques. Les essais montrent

aussi que la gestion du couvert par roulage est possible, mais celui-ci doit être réalisé sur un couvert haut, dense et mature. Notre démarche montre que la combinaison technique la plus performante parmi celles qui ont été testées, sur le plan agronomique, économique, organisationnel et environnemental, **repose sur le semis d'un couvert composé de seigle et de triticale, roulé une seule fois** (au stade 50 % de la floraison du triticale) pour limiter le tassement du sol et l'augmentation du temps de travail, **avant de semer le soja**. Comparée aux espèces en pure, l'utilisation du mélange seigle/triticale en tant que couvert, a permis d'améliorer les performances agronomiques (meilleure gestion des adventices grâce à l'effet allélopathique du seigle et rendement du soja plus élevé), économiques (semences de triticale moins onéreuses que le seigle), organisationnelles (facilité d'accès à des semences de triticale). L'utilisation de variétés fourragères constitue un levier pour favoriser une implantation rapide du couvert, dès l'automne, mais les choix variétaux sont rapidement restreints sur le marché des semences certifiées AB. Enfin, bien que notre démarche indique une performance du soja plus élevée avec des inter-rangs plus étroits, la question des inter-rangs reste très controversée entre les connaissances scientifiques et empiriques. Elle nécessiterait d'être davantage approfondie et analysée en lien avec d'autres paramètres qui ont pu influencer les résultats dans notre étude : densité de semis, performance du semoir à céréales utilisé à travers la biomasse élevée présente sur le sol.

Le processus de recherches conjoint mené a permis la **production de connaissances** axées sur les **couverts et le matériel**, constituant les principaux apprentissages des acteurs. La démarche a aussi favorisé l'enrôlement des praticiens en stimulant leur **créativité** et **leur capacité à innover** sur une technique aussi exploratoire que le SDSC sans herbicide. Les bandes test et les initiatives d'essais proposées par les AE ou la diversité des leviers soulevés lors des rencontres collectives témoignent de la créativité produite par la démarche. Cette créativité ouvre le champ des possibles pour faire face aux freins des praticiens et des chercheurs pour développer leurs connaissances. L'intérêt croissant des praticiens, associé à des **évolutions de points de vue** et aux **initiatives d'essais** engagées par les visiteurs des sites expérimentaux, laissent entrevoir un potentiel de diffusion intéressant. Toutefois, au regard de la rupture qu'implique la technique avec les pratiques locales, la notion de changement voire d'adoption ne peut pas être discutée après seulement 3 ans d'expérimentation à une échelle annuelle. Des **manques de connaissances** demeurent sur **l'échelle de la rotation** (succession de cultures, évolution du sol, maintien des rendements, maîtrise des adventices pérennes). Par ailleurs, le travail conjoint mené avec les praticiens a permis d'identifier de nouveaux points de blocage concernant des échelles plus larges que l'exploitation. Ceux-ci sont à étudier pour un meilleur développement de la technique (qualité et débouchés des cultures, transformation du réseau professionnel des praticiens).

L'originalité de notre démarche repose sur ce travail conjoint mené entre les praticiens et les chercheurs de la conception jusqu'à l'évaluation d'ITK. Ce processus de recherche porte sur un objet d'étude très peu documenté dans la communauté scientifique et constitue la première démarche engagée sur le SDSC sans herbicide dans le contexte français. Ce travail a permis de produire une

diversité de connaissances sur une courte période grâce à la complémentarité des connaissances et des compétences apportées par chaque acteur. Notre démarche a permis de conduire au total 13 essais formalisés et 27 bandes test entre 2016 et 2018. Les essais ont généré des connaissances autour de 9 facteurs [*espèces couvert et variétés couvert (pour soja), espèces couvert (pour maïs), stratégie de semis du couvert (date x densité de semis), inter-rangs du soja, nombre de roulages, date du roulage, mode de gestion du couvert (roulage vs déchaumage) (avant soja), mode de gestion du couvert (avant maïs)*]. Ces expérimentations ont été menées, pour la majorité, directement dans les exploitations des praticiens impliqués et constituent l'originalité de cette thèse. Cette méthode nous a permis de tester et produire des connaissances à la fois nouvelles dans le contexte national mais également peu enrichies à l'échelle internationale sur la technique (ex : la réduction des inter-rangs de la culture de rente ou l'utilisation de triticales en tant que couvert proposées par les praticiens). Enfin, ce travail met l'accent sur l'importance de mieux combiner les connaissances empiriques et scientifiques au cours de l'ensemble du processus pour améliorer l'implication des praticiens mais aussi accélérer les avancées scientifiques sur une technique autant en rupture avec les pratiques actuelles.

2. Perspectives

La pression sociétale autour du glyphosate et du réchauffement climatique, nous amènent à innover dans les pratiques actuelles pour identifier des alternatives répondant à ces préoccupations, mais qui concilient aussi les enjeux de production, de santé publique et d'intégrité des écosystèmes. La transition vers ce type d'alternative ne peut se faire qu'à l'issue de profonds changements, tel que nous l'avons vu dans les exploitations, mais aussi à d'autres niveaux d'études de la recherche génétique des plantes ou d'innovations en machinisme jusqu'au système alimentaire dans son ensemble (Figure 64).

Pour améliorer la résilience du SDSC sans herbicide à l'échelle de la parcelle, au-delà des composantes purement techniques liées aux choix opérés (types de combinaison couvert/culture, calendrier cultural, densité de semis, etc.), des améliorations en génétique (pour le couvert et la culture) et en machinisme sont indispensables. En effet, les variétés disponibles n'ont pas été sélectionnées et développées dans un objectif de production inscrit au sein d'un environnement aussi compétitif que créé la technique entre le couvert, la culture et les adventices. Ce phénomène, associé à l'action du climat changeant qui influe également sur ces relations inter-trophiques, expliquent qu'aujourd'hui les variétés existantes atteignent leurs limites (développement hétérogène du couvert, levée lente du soja, etc.) et fragilise la réussite.

Les praticiens travaillant aujourd'hui sur la transition de leurs pratiques vers du SDSC sans herbicide sont soumis à d'importantes transformations à opérer au sein de l'exploitation mais aussi à un ensemble de contraintes externes qui agissent sur leur capacité à réussir (amélioration variétale, politique agricole commune, manque de connaissances et d'accompagnements, etc.) (Figure 64).

Malgré les bénéfices attendus au niveau de l'amélioration de la fertilité du sol, de la réduction du temps de travail et de la consommation énergétique, la période de transition est longue et nécessite d'importants investissements de la part des agriculteurs (transformations du parc matériel, formations, essais, observations, etc.). Ce coût représente une prise de risque élevée au regard du système alimentaire actuel dans lequel ces changements s'inscrivent. En effet, cet investissement n'est pas compensé par un soutien financier ou un accompagnement, ni par une élévation du prix d'achat des produits. Les produits issus de ce type d'alternatives en AC, répondant aux enjeux environnementaux et sociétaux du 21^{ème} siècle, ne sont pas valorisés auprès des consommateurs (Figure 64).

Ainsi, au-delà du besoin incontestable de poursuivre la production de connaissances à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation, pour comprendre comment insérer cette innovation, tout en conciliant les enjeux des praticiens, il convient en parallèle de s'interroger sur des moyens permettant de limiter leurs prises de risques pour favoriser et aider les transitions (subventions, développement d'un label pour améliorer la communication auprès des consommateurs et mieux valoriser le travail, etc.).

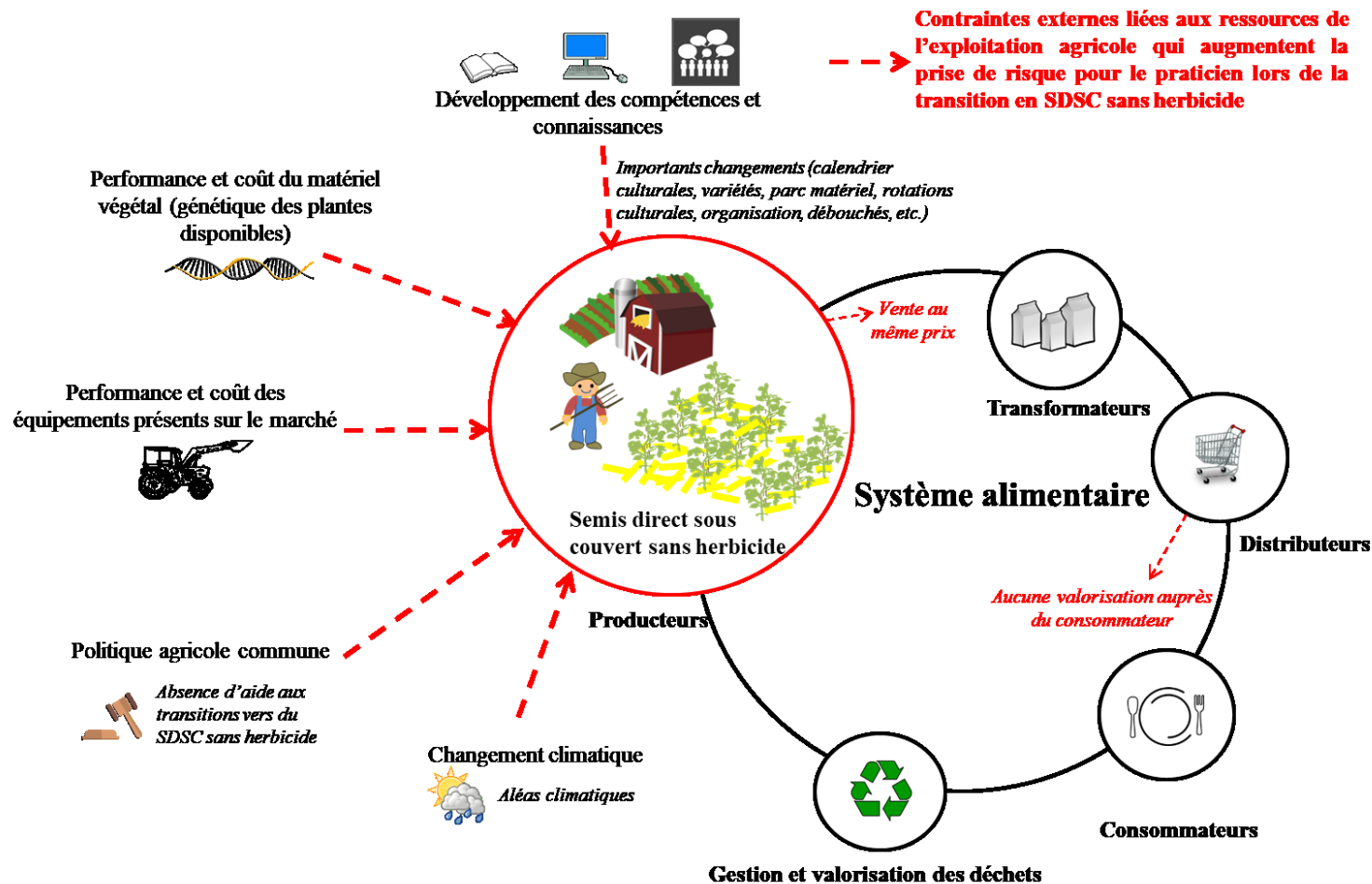


Figure 64: Représentation schématique des contraintes qui s'appliquent à une exploitation en transition vers du semis direct sous couvert végétal sans herbicide

Références

- Agence Bio, 2017. La Bio dans l'Union Européenne [WWW Document]. URL https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2018/10/Carnet_UE_2017.pdf (accessed 5.27.19).
- Akpo, E., Crane, T.A., Vissoh, P.V., Tossou, R.C., 2015. Co-production of Knowledge in Multi-stakeholder Processes: Analyzing Joint Experimentation as Social Learning. *The Journal of Agricultural Education and Extension* 21, 369–388. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2014.939201>
- Akrich, M., Callon, M., Latour, B., 1988. A quoi tient le succès des innovations ? 1 : L'art de l'intéressement; 2 : Le choix des porte-parole. *Gérer et Comprendre. Annales des Mines* 4–17 & 14–29.
- Allaire, G., 1988. Le modèle de développement agricole des années 1960. *Économie rurale* 184, 171–181. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1988.3908>
- Allard-Poesi, F., Perret, V., 2003. La Recherche-Action. *Conduire un projet de recherche, une perspective qualitative*, EMS, pp. 85-132.
- Amabile, T.M., 1996. Creativity and innovation in organizations. Harvard Business School Background Note 396-239.
- Anderson, R.L., 2015. Integrating a complex rotation with no-till improves weed management in organic farming. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 967–974. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0292-3>
- Andreotti, G., Koutros, S., Hofmann, J.N., Sandler, D.P., Lubin, J.H., Lynch, C.F., Lerro, C.C., De Roos, A.J., Parks, C.G., Alavanja, M.C., Silverman, D.T., Beane Freeman, L.E., 2018. Glyphosate Use and Cancer Incidence in the Agricultural Health Study. *J Natl Cancer Inst* 110, 509–516. <https://doi.org/10.1093/jnci/djx233>
- Andrieu, N., Barbier, J.M., Delmotte, S., Dugue, P., Hossard, L., Gal, P.Y.L., Michel, I., Stark, F.S., Tourdonnet, S.D., 2018. Co-conception de changements techniques et organisationnels au sein des systèmes agricoles, in: *Innovation et Développement Dans Les Systèmes Agricoles et Alimentaires / Faure Guy (Ed.), Chiffolleau Yuna (Ed.), Goulet Frederic (Ed.), Temple Ludovic (Ed.), Touzard Jean-Marc (Ed.)*. Ed. Quae, Versailles, pp. 151–161.
- Antoni, V., Arrouays, D., Bispo, A., Brossard, M., Le Bas, C., Stengel, P., Villanneau, E., 2011. Synthèse sur l'état des sols de France. *Gis Sol, Olivet*. https://www.gissol.fr/rapports/synthese_HD.pdf (accessed 6.5.19).
- Armengot, L., Berner, A., Blanco-Moreno, J.M., Mäder, P., Sans, F.X., 2014. Long-term feasibility of reduced tillage in organic farming. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 339–346. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0249-y>
- Ashby, J.A., Braun, A.R.C., 2000. Investing in farmers as researchers: experience with local agricultural research committees in Latin America. *ciat*. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=QT2001000424> (accessed 6.5.19).
- Astatke, A., Jabbar, M., Tanner, D., 2003. Participatory conservation tillage research: an experience with minimum tillage on an Ethiopian highland Vertisol. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 95, 401–415. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00225-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00225-6)
- Audoux, C., Gillet, A., 2015. Chapitre 4. Recherches participatives, collaboratives, recherches-actions. Mais de quoi parle-t-on ?, in: *Les recherches-actions collaboratives, Politiques et interventions sociales*. Presses de l'EHESP, Rennes, pp. 44–47. <https://doi.org/10.3917/ehesp.lesch.2015.01.0044>
- Audoux, C., Gillet, A., 2011. Recherche partenariale et co-construction de savoirs entre chercheurs et acteurs : l'épreuve de la traduction. *Revue Interventions économiques. Papers in Political Economy*.
- Baker, C.J., Saxton, K.E., Baker, C.J., Food and Agriculture Organization of the United Nations (Eds.), 2007. No-tillage seeding in conservation agriculture, 2nd ed. ed. Published jointly by Food and Agriculture Organization of the United Nations and Cabi Pub, Wallingford, UK ; Cambridge, MA.
- Balkcom, K., 2007. Managing Cover Crops in Conservation Tillage Systems 18.
- Balota, E.L., Calegari, A., Nakatani, A.S., Coyne, M.S., 2014. Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: a long-term study. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 197, 31–40.
- Banks, J., Marsden, T., 2000. Integrating Agri-Environment Policy, Farming Systems and Rural Development: Tir Cymen in Wales. *Sociologia Ruralis* 40, 466–480. <https://doi.org/10.1111/1467-9523.00161>
- Bärberi, P., 2002. Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Research* 42, 177–193. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2002.00277.x>
- Barcellini, F., Prost, L., Cerf, M., 2015. Designers' and users' roles in participatory design: What is actually co-designed by participants? *Applied Ergonomics* 50, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.02.005>
- Barré, K., Le Viol, I., Julliard, R., Kerbirou, C., 2018. Weed control method drives conservation tillage efficiency on farmland breeding birds. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 256, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.004>
- Barreteau, O., Bots, P., Daniell, K., 2010. A framework for clarifying participation in participatory research to prevent its rejection for the wrong reasons. *Ecology and Society* 15, 22–p.
- Basche, A.D., Kaspar, T.C., Archontoulis, S.V., Jaynes, D.B., Sauer, T.J., Parkin, T.B., Miguez, F.E., 2016. Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management* 172, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.006>

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., Walker, S., 2014. Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4. arXiv:1406.5823 [stat].
- Battaglin, W.A., Meyer, M.T., Kuivila, K.M., Dietze, J.E., 2014. Glyphosate and Its Degradation Product AMPA Occur Frequently and Widely in U.S. Soils, Surface Water, Groundwater, and Precipitation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 50, 275–290. <https://doi.org/10.1111/jawr.12159>
- Battaglin, W.A., Rice, K.C., Focazio, M.J., Salmons, S., Barry, R.X., 2009. The occurrence of glyphosate, atrazine, and other pesticides in vernal pools and adjacent streams in Washington, DC, Maryland, Iowa, and Wyoming, 2005–2006. *Environ Monit Assess* 155, 281–307. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0435-y>
- Bavougian, C.M., Sarno, E., Knezevic, S., Shapiro, C.A., 2019. Cover crop species and termination method effects on organic maize and soybean. *Biological Agriculture & Horticulture* 35, 1–20. <https://doi.org/10.1080/01448765.2018.1455607>
- Béguin, P., Cerf, M., Béguin, P., Cerf, M., 2009. Dynamic knowledge, dynamic changes. OCTARÈS Éditions.
- Benbrook, C.M., 2016. Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environmental Sciences Europe* 28, 3. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0070-0>
- Benouniche, M., Errahj, M., Kuper, M., 2016. The Seductive Power of an Innovation: Enrolling Non-conventional Actors in a Drip Irrigation Community in Morocco. *The Journal of Agricultural Education and Extension* 22, 61–79. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2014.977307>
- Bentley, J., 2006. Folk experiments. *Agriculture and Human Values* 23, 451–462.
- Bentley, J.W., 1994. Facts, fantasies, and failures of farmer participatory research. *Agriculture and human values* 11, 140–150.
- Bernstein, E.R., Posner, J.L., Stoltenberg, D.E., Hedtcke, J.L., 2011. Organically Managed No-Tillage Rye–Soybean Systems: Agronomic, Economic, and Environmental Assessment. *Agronomy Journal* 103, 1169. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0498>
- Bertheau, P., Garel, G., 2015. Déterminer la valeur de l'innovation en train de se faire, c'est aussi et déjà innover. *Innovations* 47, 15. <https://doi.org/10.3917/inno.047.0015>
- Berthet, E.T.A., Barnaud, C., Girard, N., Labatut, J., Martin, G., 2016. How to foster agroecological innovations? A comparison of participatory design methods. *Journal of Environmental Planning and Management* 59, 280–301. <https://doi.org/10.1080/09640568.2015.1009627>
- Beyene, S., Regassa, T.H., Legesse, B., Mamo, M., Tadesse, T., 2018. Empowerment and Tech Adoption: Introducing the Treadle Pump Triggers Farmers' Innovation in Eastern Ethiopia. *Sustainability* 10, 3268. <https://doi.org/10.3390/su10093268>
- Bhargava, A., Srivastava, S., 2019. Future of Participatory Plant Breeding, in: Bhargava, A., Srivastava, S. (Eds.), *Participatory Plant Breeding: Concept and Applications*. Springer Singapore, Singapore, pp. 241–247. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7119-6_10
- Biggs, S., 1989. A synthesis of experience from nine national agricultural research systems [WWW Document]. URL http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABD218.pdf (accessed 3.16.16).
- Biggs, S., Smith, G., 1998. Beyond Methodologies: Coalition-Building for Participatory Technology Development. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(97\)10041-9](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(97)10041-9)
- Bilalis, D., Kakabouki, I., Karkanis, A., Travlos, I., Triantafyllidis, V., Dimitra, H., 2012. Seed and saponin production of organic quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) for different tillage and fertilization. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 40, 42.
- Bilalis, D., Karkanis, A., Patsiali, S., Agriogianni, M., Konstantas, A., Triantafyllidis, V., 2011. Performance of wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) under conservation tillage practices in organic agriculture. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 39, 28.
- Blanchard, M., Vall, E., Chia, E., 2010. Conduire une experimentation en recherche action en partenariat co-concevoir une innovation, l'étudier, in: emilie coudel, b.h., hubert devautour, Christophe-Toussaint Soulard (Ed.), *ISDA 2010*. Cirad-Inra-SupAgro, Montpellier, France, p. 10 p.
- Blazy, J.-M., Ozier-Lafontaine, H., Doré, T., Thomas, A., Wery, J., 2009. A methodological framework that accounts for farm diversity in the prototyping of crop management systems. Application to banana-based systems in Guadeloupe. *Agricultural Systems* 101, 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.02.004>
- Bond, W., Grundy, A.C., 2001. Non-chemical weed management in organic farming systems. *Weed Research* 41, 383–405. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2001.00246.x>
- Bonneuil, C., 2004. Les transformations des rapports entre sciences et société en France depuis la Seconde Guerre mondiale: un essai de synthèse 26. http://sciences-medias.ens-lsh.fr/article.php3?id_article=56 (accessed 6.5.19).
- Bonny, Y., 2015. Les recherches partenariales participatives: Ce que chercher veut dire 7.
- Borchert, J.R., 1971. The Dust Bowl in the 1970s. *Annals of the Association of American Geographers* 61, 1–22. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1971.tb00762.x>
- Bouahom, B., Tivet, F., Tran Quoc, H., Lienhard, P., Chantharath, B., Panyasiri, K., Julien, P., Séguy, L., 2005. Direct seeding mulch-based cropping systems-A holistic research approach implemented in Northern Laos.
- Boussard, J.-M., 2010. Pourquoi l'instabilité est-elle une caractéristique structurelle des marchés agricoles? *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* 69–83.

- Braun, A., Duveskog, D., 2008. The Farmer Field School Approach – History, Global Assessment and Success Stories 39.
- Braun, A., Jiggins, J., Röling, N., Snijders, P., 2006. A Global Survey and Review of Farmer Field School Experiences 102.
- Braun, A.R., Thiele, G., Fernández, M., 2000. Farmer field schools and local agricultural research committees: complementary platforms for integrated decision-making in sustainable agriculture. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=GB2013202966> (accessed 6.5.19).
- Brousseau, G., 2011. La théorie des situations didactiques en mathématiques. *Education didactique* 5, 101–104.
- Buchanan, A.L., Hooks, C.R.R., 2018. Influence of Winter Cover Crop Mulch on Arthropods in a Reduced Tillage Cucurbit System. *Environ Entomol* 47, 292–299. <https://doi.org/10.1093/ee/nvy004>
- Büchi, L., Wendling, M., Amossé, C., Necpalova, M., Charles, R., 2018a. Importance of cover crops in alleviating negative effects of reduced soil tillage and promoting soil fertility in a winter wheat cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 256, 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.005>
- Büchi, L., Wendling, M., Mouly, P., Charles, R., 2018b. Comparison of Visual Assessment and Digital Image Analysis for Canopy Cover Estimation. *Agronomy Journal* 110, 1289. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.11.0679>
- Bussières, D., 2018. La recherche partenariale : d’un espace de recherche à la coconstruction de connaissances (Thèse ou essai doctoral accept e). Université du Québec   Montréal, Montréal (Québec, Canada).
- Bussières, D., Fontan, J.-M., 2011. La recherche partenariale : point de vue de praticiens au Québec. *SociologieS*. <http://journals.openedition.org/sociologies/3670> (accessed 6.5.19).
- Cabero, J., van Immerzeel, W., 2007a. Building small-scale farmers learning networks: Pachamama Raymi as an innovative knowledge management system. *Knowledge Management for Development Journal* 3, 52–63.
- Cabero, J., van Immerzeel, W., 2007b. Building learning networks for small-scale farmers: Pachamama Raymi as an innovative knowledge management system. *Knowledge Management for Development Journal* 13.
- Casagrande, M., Peigné, J., Payet, V., M ader, P., Sans, F.X., Blanco-Moreno, J.M., Antichi, D., B arberi, P., Beeckman, A., Bigongiali, F., Cooper, J., Dierauer, H., Gascoyne, K., Grosse, M., He , J., Kranzler, A., Luik, A., Peetsmann, E., Surböck, A., Willekens, K., David, C., 2015. Organic farmers’ motivations and challenges for adopting conservation agriculture in Europe. *Org. Agr.* 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13165-015-0136-0>
- Catalogna, M., 2018. Analyse des tests de pratique des agriculteurs : en quoi facilitent-ils le passage vers l’agroécologie ou l’agriculture biologique. *ciences agricoles*. Université d’Avignon, 2018. Français. NNT:2018AVIG0705.
- Catalogna, M., Navarrete, M., 2016. An agronomical framework for analyzing farmers’ experiments. 12th European International Farming Systems Association (IFSA) Symposium, Social and technological transformation of farming systems: Diverging and converging pathways, 12-15 July 2016, Harper Adams University, Newport, Shropshire, UK 1–12.
-  er io lu, M., Anderson, S.H., Udawatta, R.P., Alagele, S., 2019. Effect of cover crop management on soil hydraulic properties. *Geoderma* 343, 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.027>
- Cerf, M., Taverne, M., 2012. Chapitre 6 - Interactions entre concepteurs et utilisateurs autour d’outils pour raisonner la lutte contre le scl erotinia. Editions Qué.
- Chambers, R., 1994. chambers-pra.pdf [WWW Document]. URL <http://old.alnap.org/pool/files/chambers-pra.pdf> (accessed 3.16.16).
- Chambers, R., Ghildyal, B.P., 1985. Agricultural research for resource-poor farmers: The farmer-first-and-last model. *Agricultural Administration* 20, 1–30. [https://doi.org/10.1016/0309-586X\(85\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0309-586X(85)90063-9)
- Chan, K.Y., 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity — implications for functioning in soils. *Soil and Tillage Research* 57, 179–191. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00173-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00173-2)
- Chang, E.T., Delzell, E., 2016. Systematic review and meta-analysis of glyphosate exposure and risk of lymphohematopoietic cancers. *Journal of Environmental Science and Health, Part B* 51, 402–434. <https://doi.org/10.1080/03601234.2016.1142748>
- Chantre, E., 2011. Apprentissages des agriculteurs vers la réduction d’intrants en grandes cultures : Cas de la Champagne Berrichonne de l’Indre dans les années 1985-2010.
- Chantre,  ., Le Bail, M., Cerf, M., 2014. Une diversité de configurations d’apprentissage en situation de travail pour réduire l’usage des engrais et pesticides agricoles. Yvon Haradji, Katia Kostulski, Alexandre Morais et Pascal Ughetto 3.
- Chapelle-Barry, C., 2008. Dans le sillon du non-labour. *Agreste primeur* 207, 1–4.
- Chauhan, B.S., Singh, R.G., Mahajan, G., 2012. Ecology and management of weeds under conservation agriculture: A review. *Crop Protection* 38, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.03.010>
- Chauveau, J.-P., 2018. L’innovation en agriculture: Questions de méthodes et terrains d’observation. IRD  ditions.
- Chung, Y.S., Choi, S.C., Silva, R.R., Kang, J.W., Eom, J.H., Kim, C., 2017. Case study: Estimation of sorghum biomass using digital image analysis with Canopeo. *Biomass and Bioenergy* 105, 207–210. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.027>
- Civera, C., Colle, S. de, Casalegno, C., 2019. Stakeholder engagement through empowerment: The case of coffee farmers. *Business Ethics: A European Review* 28, 156–174. <https://doi.org/10.1111/beer.12208>

- Clark, A.J., Meisinger, J.J., Decker, A.M., Mulford, F.R., 2007. Effects of a Grass-Selective Herbicide in a Vetch–Rye Cover Crop System on Corn Grain Yield and Soil Moisture. *Agronomy Journal* 99, 43. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0362>
- Clark, K.M., Boardman, D.L., Staples, J.S., Easterby, S., Reinbott, T.M., Kremer, R.J., Kitchen, N.R., Veum, K.S., 2017. Crop Yield and Soil Organic Carbon in Conventional and No-till Organic Systems on a Claypan Soil. *Agronomy Journal* 0. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.06.0367>
- Clarke, E., Jackson, T.M., Keoka, K., Phimpachanvongsod, V., Sengxua, P., Simali, P., Wade, L.J., 2018. Insights into adoption of farming practices through multiple lenses: an innovation systems approach. *Development in Practice* 28, 983–998. <https://doi.org/10.1080/09614524.2018.1504890>
- Colbach, N., Cordeau, S., 2018. Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures. *European Journal of Agronomy* 94, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.008>
- Cook, B.I., Miller, R.L., Seager, R., 2009. Amplification of the North American “Dust Bowl” drought through human-induced land degradation. *PNAS* 106, 4997–5001. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810200106>
- Coquil, X., FIORELLI, J.-L., Mignolet, C., Blouet, A., Foissy, D., Trommenschlager, J.M., Bazard, C., Gaujour, E., Gouttenoire, L., Schrack, D., others, 2009. Assessing the agro-environmental sustainability of organic mixed-crop dairy systems on the basis of a multivariate approach. *Carrefours de l’Innovation Agronomique* 4, 239–247.
- Corvalán, C., Hales, S., McMichael, A.J., Millennium Ecosystem Assessment (Program), World Health Organization (Eds.), 2005. *Ecosystems and human well-being: health synthesis, Millennium ecosystem assessment*. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Coulibaly, K., Vall, E., Blanchard, M., Autfray, P., 2011. Expérimenter à l’échelle de la parcelle paysanne pour concevoir des itinéraires techniques innovants : quelle méthode de traitement des données ? Cas du travail du sol en sec, Province du Tuy, Burkina Faso, in: E, V., N, A., E, C., B, N.H. (Eds.), *Partenariat, Modélisation, Expérimentations : Quelles Leçons Pour La Conception de l’innovation et l’intensification Écologique ?*, Colloques. Cirad, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, p. 8 p.
- Crawford, A., Nettle, R., Paine, M., Kabore, C., 2007. Farms and Learning Partnerships in Farming Systems Projects: A Response to the Challenges of Complexity in Agricultural Innovation. *The Journal of Agricultural Education and Extension* 13, 191–207. <https://doi.org/10.1080/13892240701427573>
- Cristofari, H., 2018. Une analyse pragmatiste des processus d’apprentissage en agroécologie : le cas de l’agriculture de conservation (phd). Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Cross, D., 2010. Action conjointe et connaissances professionnelles de l’enseignant. *Éducation et didactique* 4, 39–60. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.850>
- Crowley, K.A., 2017. Tradeoffs in cereal rye management strategies prior to organic soybean.
- Crowley, K.A., Van Es, H.M., Gómez, M.I., Ryan, M.R., 2018. Trade-Offs in Cereal Rye Management Strategies Prior to Organically Managed Soybean. *Agronomy Journal* 110, 1492–1504. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.10.0605>
- CTIC, C.T.I.C., 2011. National Crop Residue Management Survey (CRM) Data [WWW Document]. URL <https://www.ctic.org/CRM/> (accessed 6.10.19).
- Cuma Auvergne Rhône-Alpes, 2018. Barème d’entraide 2018-2019.
- Dabney, S.M., Delgado, J.A., Reeves, D., 2001. USING WINTER COVER CROPS TO IMPROVE SOIL AND WATER QUALITY. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104110>
- Dalton, T., Lilja, N., Johnson, N., Howeler, R., 2007. CIAT. Impact of participatory natural resource management research in cassava-based cropping systems in Vietnam and Thailand.
- Dang, Y.P., Moody, P.W., Bell, M.J., Seymour, N.P., Dalal, R.C., Freebairn, D.M., Walker, S.R., 2015. Strategic tillage in no-till farming systems in Australia’s northern grains-growing regions: II. Implications for agronomy, soil and environment. *Soil and Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.013>
- David, S., 2007. Learning to Think for Ourselves: Knowledge Improvement and Social Benefits among Farmer Field School Participants in Cameroon. *Journal of International Agricultural and Extension Education* 14. <https://doi.org/10.5191/jiaee.2007.14203>
- De Leener, P., 2001. Towards an evolving conceptual framework to effectively capture the complexity of collaborative research, in: *Technical Workshop on Methodologies, Organization and Management of Global Partnership Programmes*, IFAD, Rome. pp. 9–10.
- De Tournonnet, S., 2007. Les vertus du non-labour. <https://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/Reussir-vertus-non-labour.pdf> (accessed 6.5.19).
- Dedieu, B., Aubin, J., Duteurtre, G., Alexandre, G., Vayssières, J., Bommel, P., Faye, B., 2011. Conception et évaluation de systèmes d’élevage durables en régions chaudes. *Productions animales* 24, 113.
- Defoer, T., Budelman, A., Toulmin, C., Carter, S.E., 2000. *Managing soil fertility in the tropics. Building common knowledge: participatory learning and action research*. Royal Tropical Institute, KIT Press, 2000.
- Delate, K., Canali, S., Turnbull, R., Tan, R., Colombo, L., 2016. Participatory organic research in the USA and Italy: Across a continuum of farmer–researcher partnerships. *Renewable Agriculture and Food Systems* 1–18. <https://doi.org/10.1017/S1742170516000247>

- Delate, K., Cwach, D., Chase, C., 2012a. Organic no-tillage system effects on soybean, corn and irrigated tomato production and economic performance in Iowa, USA. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27, 49–59. <https://doi.org/10.1017/S1742170511000524>
- Delate, K., Cwach, D., Fiscus, M., 2012b. Evaluation of an Organic No-Till System for Organic Corn and Soybean Production—Agronomy Farm Trial, 2011. Organic Ag Program Webpage, Iowa State University, Ames, IA.
- Delate, K., DeWitt, J., 2004. Building a farmer-centered land grant university organic agriculture program: A Midwestern partnership. *Renewable Agriculture and Food Systems* 19, 80–91. <https://doi.org/10.1079/RAFS200365>
- Deléage, E., 2010. La coproduction des savoirs dans l'agriculture durable, in: ISDA 2010. Cirad-Inra-SupAgro, pp. 8–p.
- Délye, C., Boucansaud, K., Pernin, F., Couloume, B., 2009. Détection de résistances aux inhibiteurs de l'ALS: des outils moléculaires pour un diagnostic rapide et fiable. *Innovations Agronomiques* (2008) 3, 157-165
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., Li, H., 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 3, 1–25.
- Derpsch, R., Sidiras, N., Roth, C.H., 1986. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. *Soil and Tillage Research, Reduced Tillage - Rational Use in Sustained Production*, III 8, 253–263. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(86\)90338-7](https://doi.org/10.1016/0167-1987(86)90338-7)
- Desgagné, S., 1997. Le concept de recherche collaborative : l'idée d'un rapprochement entre chercheurs universitaires et praticiens enseignants. *rse* 23, 371–393. <https://doi.org/10.7202/031921ar>
- Desgagné, S., Bednarz, N., Lebuis, P., Poirier, L., Couture, C., 2001. L'approche collaborative de recherche en éducation: un rapport nouveau à établir entre recherche et formation. *rse* 27, 33–64. <https://doi.org/10.7202/000305ar>
- DeWalt, B., 1994. Using Indigenous Knowledge to Improve Agriculture and Natural Resource Management. *Human Organization* 53, 123–131. <https://doi.org/10.17730/humo.53.2.ku60563817m03n73>
- Dewey, J., 2004. Comment nous pensons. *Les Empêcheurs de penser en rond*,.
- Dicko, M., Diawara, B., Tangara, B., Jamin, J.-Y., Rougier, J.-E., Bah, S., 2018. Une Approche Participative Pour Améliorer La Maintenance Du Réseau Et La Gestion De L'eau Dans Un Périmètre Irrigué Au Mali. *Irrigation and Drainage* 0. <https://doi.org/10.1002/ird.2239>
- Ding, G., Liu, X., Herbert, S., Novak, J., Amarasiriwardena, D., Xing, B., 2006. Effect of cover crop management on soil organic matter. *Geoderma* 130, 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.01.019>
- Dogliotti, S., van Ittersum, M.K., Rossing, W.A.H., 2005. A method for exploring sustainable development options at farm scale: a case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems* 86, 29–51. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.08.002>
- Douglas, M., 2004. Comment pensent les institutions: suivi de La connaissance de soi et Il n'y a pas de don gratuit. *La découverte*.
- Douzet, J.-M., Karambiri, M., Havard, M., 2014. Le champ école des producteurs: une approche efficace pour l'apprentissage et la diffusion de l'agriculture de conservation? <https://agritrop.cirad.fr/574504/> (accessed 6.5.19).
- Drain, A.R., 2019. Creative capacity building : enhancing participatory design with rural Cambodian farmers: a thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering at Massey University, Albany, New Zealand (Thesis). Massey University.
- Dube, E., Chiduzza, C., Muchaonyerwa, P., 2012. Conservation agriculture effects on soil organic matter on a Haplic Cambisol after four years of maize–oat and maize–grazing vetch rotations in South Africa. *Soil and Tillage Research* 123, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.02.008>
- Dufour, J., Gravier, J., Larue, J.-P., 1990. Fortes pluies et érosion des sols. L'orage de mai 1988 dans la Sarthe (Heavy rains and soil erosion in the Sarthe, France). *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 67, 159–170. <https://doi.org/10.3406/bagf.1990.1526>
- Dugue, P., Ameur, F., Benouniche, M., El Amrani, M., Kuper, M., 2015. Lorsque les agriculteurs familiaux innovent: cas des systèmes de production irrigués de la plaine du Saïs (Maroc). *Agronomie, Environnement et Sociétés* 5, 87–95.
- Dulcire, M., Chia, E., Sibelet, N., Sierra, Z., Sito, L., Paturel, D., 2018. Recherche-action en partenariat et innovation émancipatrice, in: *Innovation et Développement Dans Les Systèmes Agricoles et Alimentaires / Faure Guy (Ed.), Chiffolleau Yuna (Ed.), Goulet Frederic (Ed.), Temple Ludovic (Ed.), Touzard Jean-Marc (Ed.)*. Ed. Quae, Versailles, pp. 139–150.
- Dumanski, J., 2006. Definition of Conservation Agriculture 7. <http://www.un-csam.org/publication/ConservationAgri/ParaOfCA.pdf> (accessed 6.5.19).
- Duru, M., Felten, B., Theau, J.P., Martin, G., 2012. A modelling and participatory approach for enhancing learning about adaptation of grassland-based livestock systems to climate change. *Reg Environ Change* 12, 739–750. <https://doi.org/10.1007/s10113-012-0288-3>
- Duval, M.E., Galantini, J.A., Capurro, J.E., Martinez, J.M., 2016. Winter cover crops in soybean monoculture: Effects on soil organic carbon and its fractions. *Soil and Tillage Research* 161, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.006>

- Esilaba, A.O., Byalebeka, J.B., Nakiganda, A., Mubiru, S., Ssenyange, D., Delve, R., Mbalule, M., Nalukenge, G., 2001. Integrated nutrient management in iganga district, uganda: diagnosis by participatory learning and action research 79.
- FAO, 2018. Symposium international sur l'innovation agricole au service des agriculteurs familiaux: libérer le potentiel de l'innovation agricole pour atteindre les objectifs de développement durable [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/3/BU659fr/bu659fr.pdf> (accessed 9.25.19).
- FAO, 2010. Notre vision | Renforcement des capacités | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/capacity-development/our-vision/fr/> (accessed 6.12.19).
- FAO, 2003. 1. INTRODUCTION [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/docrep/005/y2781f/y2781f03.htm> (accessed 12.10.14).
- Farooq, M., Siddique, K.H.M., 2015. Conservation Agriculture: Concepts, Brief History, and Impacts on Agricultural Systems, in: Farooq, M., Siddique, K.H.M. (Eds.), Conservation Agriculture. Springer International Publishing, Cham, pp. 3–17. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11620-4_1
- Farrington, J., Martin, A., 1988a. Farmer participation in agricultural research. Overseas Development Institute.
- Farrington, J., Martin, A.M., 1988b. Farmer participatory research: A review of concepts and recent fieldwork. *Agricultural Administration and Extension* 29, 247–264. [https://doi.org/10.1016/0269-7475\(88\)90107-9](https://doi.org/10.1016/0269-7475(88)90107-9)
- Faugere, E., Navarrete, M., Charles, M., Etienne, M., Fauriel, J., Lasseur, J., Lécivain, E., Napoleone, M., Paratte, R., 2010. Des connaissances scientifiques en quête de connaissances d'acteurs.
- Faure, G., Gassel, P., Triomphe, B., Temple, L., Hocdé, H., 2010. Innover avec les acteurs du monde rural: la recherche-action en partenariat. Editions Quae.
- Feder, G., Just, R.E., Zilberman, D., 1985. Adoption of Agricultural Innovations in Developing Countries: A Survey. *Economic Development and Cultural Change* 33, 255–298. <https://doi.org/10.1086/451461>
- Feder, G., Murgai, R., Quizon, J.B., 2004. Sending farmers back to school: the impact of farmer field schools in Indonesia. *Review of agricultural economics*.
- Fernandez-Cornejo, J., Hallahan, C., Nehring, R., Wechsler, S., Grube, A., 2012. Conservation tillage, herbicide use, and genetically engineered crops in the United States: the case of soybeans. *AgBioForum* 15, 231–241.
- FiBL, IFOAM, 2019. The World of Organic Agriculture - Statistics and Emerging Trends 2019 353.
- Fischer, A.J., Arnold, A.J., Gibbs, M., 1996. Information and the Speed of Innovation Adoption. *Am J Agric Econ* 78, 1073–1081. <https://doi.org/10.2307/1243863>
- Flamant, J.-C., 2010. Une brève histoire des transformations de l'agriculture au 20^e siècle 20.
- Fliert, E. van de, Braun, A.R., 2016. Conceptualizing integrative, farmer participatory research for sustainable agriculture: From opportunities to impact. *Agriculture and Human Values* 19, 25–38. <https://doi.org/10.1023/A:1015081030682>
- Fliert, E. van de, Braun, A.R., 1999. Farmer field school for integrated crop management of sweetpotato: Field guides and technical manual. International Potato Center (CIP).
- Fontaine, L., Fourrié, L., Garnier, J.F., Mangin, M., Colomb, B., Carof, M., Aveline, A., Prieur, L., Quirin, T., Chareyron, B., Maurice, R., Gouraud, J.P., 2012. Connaître, caractériser et évaluer les rotations en systèmes de grandes cultures biologiques. *Innovations Agronomiques* 25, 27–40.
- Forest, J., Micaëlli, J.-P., Perrin, J., 1997. Innovation et conception : pourquoi une approche en terme de processus ? Presented at the Deuxième Congrès International Franco-Québécois de Génie Industriel, p. 10 p.
- Friedrich, T., Kassam, A., 2012. No-till Farming and the Environment: Do No-Till Systems Require More Chemicals? [WWW Document]. <https://doi.org/info:doi/10.1564/23aug02>
- Friedrich, T., Kassam, A., Corsi, S., Jat, R.A., Sahrawat, K.L., Kassam, A.H., 2014. Conservation agriculture in Europe, in: Conservation Agriculture: Global Prospects and Challenges. CABI, pp. 127–170.
- Gabriel, J.L., Garrido, A., Quemada, M., 2013. Cover crops effect on farm benefits and nitrate leaching: Linking economic and environmental analysis. *Agricultural Systems* 121, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.06.004>
- Gadermaier, F., Berner, A., Fließbach, A., Friedel, J.K., Mäder, P., 2012. Impact of reduced tillage on soil organic carbon and nutrient budgets under organic farming. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27, 68–80. <https://doi.org/10.1017/S1742170510000554>
- Gallien, E., Bissonnais, Y.L., Eimberck, M., Benkhadra, H., Ligneau, L., Ouvry, J.-F., Martin, P., 1995. Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé. *Cahiers Agricoles* 4, 171–183 (1).
- García-González, I., Hontoria, C., Gabriel, J.L., Alonso-Ayuso, M., Quemada, M., 2018a. Data supporting the cover crops benefits related to soil functionality in a 10-year cropping system. *Data in Brief* 18, 1327–1333. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.04.029>
- García-González, I., Hontoria, C., Gabriel, J.L., Alonso-Ayuso, M., Quemada, M., 2018b. Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. *Geoderma* 322, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.024>
- Gérard, F., Piketty, M.-G., Boussard, J.-M., 2008. L'instabilité des prix agricoles: réflexion sur les causes et les implications de la flambée des prix. *OCL. Oléagineux Corps gras Lipides* 15, 378–384.
- Gerbaux, F., Muller, P., 1984. La naissance du développement agricole en France. *Économie rurale* 159, 17–22.

- Giacomoni, G., Jardat, R., 2014. L'innovation par l'hybridation : une hydre scientifique, in: Pesqueux Y., S.E., Freitas Gouveia de Vasconcelos I. (Ed.), *L'entreprise Durable et Le Changement Organisationnel L'organisation Innovatrice et Durable*, Hors Collection. éditions - ems - Management & Société, pp. 410 pages-Chapitre 1 (pp. 27-54).
- Giller, K.E., Andersson, J.A., Corbeels, M., Kirkegaard, J., Mortensen, D., Erenstein, O., Vanlauwe, B., 2015. Beyond conservation agriculture. *Frontiers in Plant Science* 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00870>
- Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M., Tittonell, P., 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research* 114, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017>
- Gillet, A., Tremblay, D.-G., 2017. Les recherches partenariales et collaboratives. PUQ.
- Girard, N., 2014. Etudier et utiliser les connaissances des praticiens pour accompagner le développement des systèmes techniques: une synthèse bibliographique dans le domaine agricole. Conference: Communication au colloque GECSO, Aix, Juin 2014.
- Gohlke, T., Ingersoll, T., Roe, R.D., Oregon, N., Pullman, W.N., 2000. Soil disturbance in no-till and direct seed planting systems. *Natural Resources Conservation Service, Agronomy, Technical Note* 1–6.
- Gonzalez-Laporte, C., 2014. Recherche-action participative, collaborative, intervention... Quelles explicitations? 28.
- Goulet, F., 2017. Explorer et partager. Les expériences de réduction des pesticides dans une revue professionnelle agricole. *Economie rurale* n° 359, 103–120.
- Goulet, F., 2012. La notion d'intensification écologique et son succès auprès d'un certain monde agricole français: une radiographie critique. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA* 62, 19–30.
- Goulet, F., 2008. L'innovation par retrait: reconfiguration des collectifs sociotechniques et de la nature dans le développement de techniques culturelles sans labour. Grenoble 2.
- Gouttenoire, L., Taverne, M., Cournut, S., Hostiou, N., Houdart, M., Lardon, S., 2014. Faciliter les échanges entre chercheurs sur les projets de recherche participative: proposition d'une grille d'analyse. *Cahiers Agricultures* 23, 205–212.
- Grandjean, P., Landrigan, P.J., 2014. Neurobehavioural effects of developmental toxicity. *The Lancet Neurology* 13, 330–338. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(13\)70278-3](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(13)70278-3)
- Grandy, A.S., Robertson, G.P., Thelen, K.D., 2006. Do Productivity and Environmental Trade-offs Justify Periodically Cultivating No-till Cropping Systems? *Agronomy Journal* 98, 1377. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0137>
- Griffon, M., 2014. L'agroécologie, un nouvel horizon pour l'agriculture. *Etudes* décembre, 31–39.
- Grossman, J.M., 2003. Exploring farmer knowledge of soil processes in organic coffee systems of Chiapas, Mexico. *Geoderma, Ethnopedology* 111, 267–287. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00268-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00268-9)
- Guo, M., Jia, X., Huang, J., Kumar, K.B., Burger, N.E., 2015. Farmer field school and farmer knowledge acquisition in rice production: Experimental evaluation in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment, Sustainable intensification of China's agriculture: the key role of nutrient management and climate change mitigation and adaptation* 209, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.02.011>
- Halde, C., Bamford, K.C., Entz, M.H., 2015. Crop agronomic performance under a six-year continuous organic no-till system and other tilled and conventionally-managed systems in the northern Great Plains of Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 213, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.029>
- Halde, C., Gulden, R.H., Entz, M.H., 2014. Selecting Cover Crop Mulches for Organic Rotational No-Till Systems in Manitoba, Canada. *Agronomy Journal* 106, 1193. <https://doi.org/10.2134/agronj13.0402>
- Hall, A., Dijkman, J., Sulaiman, R., 2010. Research Into Use: Investigating the Relationship between Agricultural Research and Innovation.
- Hanrahan, B.R., Tank, J.L., Christopher, S.F., Mahl, U.H., Trentman, M.T., Royer, T.V., 2018. Winter cover crops reduce nitrate loss in an agricultural watershed in the central U.S. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265, 513–523. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.004>
- Hansen, Z., Libecap, G., 2003. Small Farms, Externalities, and The Dust Bowl of the 1930s 51.
- Hartwig, N.L., Ammon, H.U., 2002. Cover crops and living mulches. *Weed science* 50, 688–699.
- Haruna, S.I., Anderson, S.H., Nkongolo, N.V., Zaibon, S., 2018. Soil Hydraulic Properties: Influence of Tillage and Cover Crops. *Pedosphere* 28, 430–442. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60387-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60387-4)
- Hassan, S.A., Akhlaq, F., Tayyab, M., Awan, A.R., Firyal, S., Khan, W.A., Saif, R., Wasim, M., 2017. Glyphosate: cancerous or not? Perspectives from both ends of the debate. *Advancements in Life Sciences* 4, 108–112.
- Hatchuel, A., Masson, P.L., Weil, B., 2002a. De la gestion des connaissances aux organisations orientées conception. *Revue internationale des sciences sociales* 29–42. <https://doi.org/10.3917/riss.171.0029>
- Hatchuel, A., Masson, P.L., Weil, B., 2002b. From knowledge management to design-oriented organisations. *International Social Science Journal* 54, 25–37. <https://doi.org/10.1111/1468-2451.00356>
- Hatchuel, A., Weil, B., others, 2003. A new approach of innovative Design: an introduction to CK theory., in: *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*.
- Hauser, M., Huq Chowdhury, A., Peloschek, F.A., Singh, S.J., 2010. Farmer Participatory Research: An approach to fostering community-led innovation in smallholder agriculture. *Journal für Entwicklungspolitik* 26, 111–128.
- Hellin, J., 2013. Enhancing Crop Diversity and Livelihood Security in the Andes Through the Emergence of Agricultural Innovation Systems, in: *The Future of Mountain Agriculture*. Springer, pp. 39–50.

- Hiltbrunner, Jürg, Liedgens, M., Bloch, L., Stamp, P., Streit, B., 2007. Legume cover crops as living mulches for winter wheat: Components of biomass and the control of weeds. *European Journal of Agronomy* 26, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.08.002>
- Hiltbrunner, J., Liedgens, M., Stamp, P., Streit, B., 2005. Effects of row spacing and liquid manure on directly drilled winter wheat in organic farming. *European Journal of Agronomy* 22, 441–447. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.06.003>
- Hiltbrunner, J., Streit, B., Liedgens, M., 2007. Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? *Field Crops Research* 102, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.03.009>
- Hobbs, P.R., Sayre, K., Gupta, R., 2008. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, 543–555. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
- Hocde, H., 1998. Expérimentation paysanne et systèmes nationaux de recherche agricole: interventions des acteurs de base dans cette greffe d... 10. https://agritrop.cirad.fr/390783/1/document_390783.pdf (accessed 6.5.19).
- Hocdé, H., Triomphe, B., Faure, M., Dulcire, M., 2008. From participation to partnership: a different way for researchers to accompany innovation processes—challenges and difficulties. *Innovation Africa: Enriching Farmers Livelihoods* 135–152.
- Hoffmann, V., Probst, K., Christinck, A., 2007. Farmers and researchers: How can collaborative advantages be created in participatory research and technology development? *Agriculture and Human Values* 24, 355–368. <https://doi.org/10.1007/s10460-007-9072-2>
- Hole, D.G., Perkins, A.J., Wilson, J.D., Alexander, I.H., Grice, P.V., Evans, A.D., 2005. Does organic farming benefit biodiversity? *Biological Conservation* 122, 113–130. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.07.018>
- Holland, J.M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 103, 1–25.
- Hornbeck, R., 2012. The Enduring Impact of the American Dust Bowl: Short- and Long-Run Adjustments to Environmental Catastrophe. *American Economic Review* 102, 1477–1507. <https://doi.org/10.1257/aer.102.4.1477>
- Horowitz, J., 2011. No-till Farming Is a Growing Practice. DIANE Publishing.
- Humblot, P., 2016. Impacts du changement climatique sur l'agriculture Européenne: vers une meilleure prise en compte de la ressource en eau dans la modélisation bio-économique.
- Humphries, S., Rosas, J.C., Gómez, M., Jiménez, J., Sierra, F., Gallardo, O., Avila, C., Barahona, M., 2015. Synergies at the interface of farmer–scientist partnerships: agricultural innovation through participatory research and plant breeding in Honduras. *Agriculture & Food Security* 4, 27. <https://doi.org/10.1186/s40066-015-0046-0>
- ITAB, 2011. Rotations pratiquées en grandes cultures biologiques en France: état des lieux par région.
- Jaime, A., Gardoni, M., Mosca, J., Vinck, D., 2004. La démarche qualité, cadre de la capitalisation des connaissances dans les organismes de recherche. 12.
- Jakku, E., Thorburn, P.J., 2010. A conceptual framework for guiding the participatory development of agricultural decision support systems. *Agricultural Systems* 103, 675–682. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.08.007>
- Jat, R.K., Singh, R.G., Gupta, R.K., Gill, G., Chauhan, B.S., Pooniya, V., 2019. Tillage, crop establishment, residue management and herbicide applications for effective weed control in direct seeded rice of eastern Indo–Gangetic Plains of South Asia. *Crop Protection* 123, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.05.007>
- Johnsen, A.R., Thorling, L., Helsen, D.R., Larsen, F., 2016. Comments on the article: Re-evaluation of groundwater monitoring data for glyphosate and bentazone by taking detection limits into account. *Sci. Total Environ.* 557–558, 914–915. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.130>
- Joiner, J., 2016. Canopeo: a new tool to measure green canopy cover. *Crops and Soils* 49, 24–25. <https://doi.org/10.2134/cs2016-49-1-6>
- Justes, E., Beaudoin, N., Bertuzzi, P. [et al], 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques 416.
- Kaffo, C., Fongang, G., 2009. Les enjeux agricoles et sociétaux de l'eau sur les monts Bamboutos (Cameroun). *Cahiers Agricultures* 18, 17–25.
- Kahl, H.M., Leslie, A.W., Hooks, C.R.R., 2018. Effects of Red Clover Living Mulch on Arthropod Herbivores and Natural Enemies, and Cucumber Yield. *Ann Entomol Soc Am.* <https://doi.org/10.1093/aesa/say036>
- Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R., 2019. Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies* 76, 29–51. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>
- Kassam, A., Friedrich, T., Shaxson, F., Pretty, J., 2009. The spread of Conservation Agriculture: justification, sustainability and uptake¹<sup>1</sup>. *International Journal of Agricultural Sustainability* 7, 292–320. <https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0477>
- Kaye, J.P., Quemada, M., 2017. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 37. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0410-x>
- Keene, C.L., Curran, W.S., Wallace, J.M., Ryan, M.R., Mirsky, S.B., VanGessel, M.J., Barbercheck, M.E., 2017. Cover Crop Termination Timing is Critical in Organic Rotational No-Till Systems. *Agronomy Journal* 109, 272–282. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.05.0266>

- Knittel, F., 2005. La charrue `` dombasle `` (C. 1814-C. 1821): Histoire d'une innovation en matiere de travail du sol. *Etude et Gestion des Sols* 12, 18.
- Knook, J., Eory, V., Brander, M., Moran, D., 2018. Evaluation of farmer participatory extension programmes. *The Journal of Agricultural Education and Extension* 24, 309–325. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2018.1466717>
- Kornecki, T.S., Raper, R.L., Arriaga, F.J., Balkcom, K.S., Price, A.J., 2005. Effects of rolling/crimping rye direction and different row-cleaning attachments on cotton emergence and yield, in: *Proc. Southern Conservation Tillage Conf.*, 27th. Florence, SC. Citeseer, pp. 27–29.
- Korucu, T., Shipitalo, M.J., Kaspar, T.C., 2018. Rye cover crop increases earthworm populations and reduces losses of broadcast, fall-applied, fertilizers in surface runoff. *Soil and Tillage Research* 180, 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.004>
- Kummer, S., Leitgeb, F., Vogl, C.R., 2017. Farmers' own research: organic farmers' experiments in Austria and implications for agricultural innovation systems. *Sustainable Agriculture Research* 6, 103–119.
- Kummer, S., Leitgeb, F., Vogl, C.R., 2008. Changes as triggers and as results of farmers' experiments: examples of organic farmers in Austria. Conference: 8th European IFSA Symposium. At: Clermont-Ferrand, France, 6-10 July. Volume: DEDIEU, B. & ZASSER-BEDOYA, S. (eds.), Empowerment of the rural actors: A renewal of Farming Systems perspectives. ISBN: 978-2-7380-1252-4. p. 413-422
- Kummer, S., Milestad, R., Leitgeb, F., Vogl, C.R., 2012. Building Resilience through Farmers' Experiments in Organic Agriculture: Examples from Eastern Austria. *Sustainable Agriculture Research* 1, 308. <https://doi.org/10.5539/sar.v1n2p308>
- Labbaci, T., Dugué, P., Kemoun, H., Rollin, D., 2015. Innovation and collective action: direct seeding of rainfed crops in the Middle Sebou region (Morocco). *Cahiers Agricultures* 24, 76–83. <https://doi.org/10.1684/agr.2015.0742>
- Labreuche, J., SOUDER, L., Castillon, P., Ouvry, J.F., 2007. Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans labour (TCSL) en France. Partie I: La pratique des TCSL en France. ADEME.
- Lacombe, C., Couix, N., Hazard, L., 2018. Designing agroecological farming systems with farmers: A review. *Agricultural Systems* 165, 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.014>
- Lal, R., Reicosky, D.C., Hanson, J.D., 2007. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research* 93, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.11.004>
- Lançon, J., Reau, R., Cariolle, M., Petit, M.-S., Viaux, P., Wery, J., 2008. Elaboration à dire d'experts de systèmes de culture innovants, in: *Systèmes de Culture Innovants et Durables*. INRA, Dijon.
- Landel, P., Laurent, C., 2015. Participation and Technological Lock-In in the Ecological Transition of Agriculture. The Case of Conservation Agriculture in France and Brazil. (Theses). *AgroParisTech. CoSPoF 2015, 6. Congrès des associations francophones de Science Politique*, Feb 2015, Lausanne, Suisse.
- Laparra, M., Margolinas, C., 2010. Milieu, connaissance, savoir. Des concepts pour l'analyse de situations d'enseignement. *Pratiques : linguistique, littérature, didactique* 145–146, 141–160.
- Lardon, S., Albaladejo, C., Allain, S., Cayré, P., Gassel, P., Lelli, L., Moity-Maïzi, P., Napoléone, M., Theau, J.-P., 2015. Dispositifs de recherche-formation-action pour et sur le développement agricole et territorial, in: *Partenariats pour le développement territorial*. Editions Quæ, pp. 47–58.
- Lardon, S., Houdart, M., Cournut, S., Gouttenoire, L., Hostiou, N., Taverne, M., 2010. Recherches participatives sur les exploitations agricoles et les territoires: des démarches innovantes [WWW Document]. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00637669/document> (accessed 3.14.16).
- Laurent, F., 2015. L'Agriculture de Conservation et sa diffusion en France et dans le monde. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.27284>
- Laurent, F., 2006. Les pollutions des ressources en eau par l'agriculture dans l'ouest de la France. "L'eau, source de vie, source de conflits", 15ème forum du Monde Diplomatique, les " Carrefours de la Pensée ", 2006, Rennes, France. pp.143-150. halshs-00009752.
- Laurent, F., Leturcq, G., Mello, I., Corbonnois, J., Verdum, R., 2011. La diffusion du semis direct au Brésil, diversité des pratiques et logiques territoriales : l'exemple de la région d'Itaipu au Paraná. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasilera de geografia*. <https://doi.org/10.4000/confins.7143>
- Le Bellec, F., Rajaud, A., Ozier-Lafontaine, H., Bockstaller, C., Malezieux, E., 2012. Evidence for farmers' active involvement in co-designing citrus cropping systems using an improved participatory method. *Agronomy for sustainable development* 32, 703–714.
- Le Masson, P., Weil, B., 2010. La conception innovante comme mode d'extension et de régénération de la conception réglée: les expériences oubliées aux origines des bureaux d'études. *Entreprises et histoire* 51–73.
- Lefebvre, M., Leblanc, M., Gilbert, P.-A., Estevez, B., Grenier, M., Belzile, L., 2011. Semis direct sur paillis de seigle roulé en régie biologique (Rapport final 08 BIO-24 (IRDA-400063)). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Québec.
- Lefèvre, V., Capitaine, M., Peigné, J., Roger-Estrade, J., 2013. Farmers and agronomists design new biological agricultural practices for organic cropping systems in France. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 623–632. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0177-2>
- Leitgeb, F., Funes-Monzote, F.R., Kummer, S., Vogl, C.R., 2011. Contribution of farmers' experiments and innovations to Cuba's agricultural innovation system. *Renewable Agriculture and Food Systems* 26, 354–367. <https://doi.org/10.1017/S1742170511000251>

- Leitgeb, F., Kummer, S., Funes-Monzote, F.R., Vogl, C.R., 2014. Farmers' experiments in Cuba. *Renewable Agriculture and Food Systems* 29, 48–64. <https://doi.org/10.1017/S1742170512000336>
- Lenne, P., Sabourin, E., Triomphe, B., Scopel, E., Xavier, J.H.V., Macena, F., 2007. INSTITUT D'ETUDES DU DEVELOPPEMENT ECONOMIQUE ET SOCIAL (IEDES). Université de Paris.
- Leroux, B., 2015. L'émergence de l'agriculture biologique en France : 1950-1990. *Pour N°* 227, 59–66.
- Liebert, J.A., DiTommaso, A., Ryan, M.R., 2017. Rolled Mixtures of Barley and Cereal Rye for Weed Suppression in Cover Crop-based Organic No-Till Planted Soybean. *Weed Science* 1–14. <https://doi.org/10.1017/wsc.2016.23>
- Liebman, M., Davis, A.S., Francis, C., 2009. Managing Weeds in Organic Farming Systems: An Ecological Approach, in: *Agronomy Monographs*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr54.c8>
- Liu, A., Ma, B.L., Bomke, A.A., 2005. Effects of Cover Crops on Soil Aggregate Stability, Total Organic Carbon, and Polysaccharides. *Soil Science Society of America Journal* 69, 2041–2048. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0032>
- Liu, H., Crawford, M., Carvalhais, L.C., Dang, Y.P., Dennis, P.G., Schenk, P.M., 2016. Strategic tillage on a Grey Vertosol after fifteen years of no-till management had no short-term impact on soil properties and agronomic productivity. *Geoderma* 267, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.002>
- Liu, M., 1997. La validation des connaissances au cours de la recherche-action. *Études et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement* 183–196.
- Lockeretz, W. (Ed.), 2007. *Organic farming: an international history*. CABI, Wallingford, UK ; Cambridge, MA.
- Lockeretz, W., 1978. The Lessons of the Dust Bowl: Several decades before the current concern with environmental problems, dust storms ravaged the Great Plains, and the threat of more dust storms still hangs over us. *American Scientist* 66, 560–569.
- Long, T.B., Blok, V., Coninx, I., 2016. Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe: evidence from the Netherlands, France, Switzerland and Italy. *Journal of Cleaner Production* 112, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.044>
- Lopez, L.M., 2015. Au cœur du développement professionnel des enseignants, la conscientisation critique. Exemple d'une recherche collaborative sur l'évaluation formative à l'école primaire genevoise. *Carrefours de l'éducation* 119–135. <https://doi.org/10.3917/cdle.039.0119>
- Loyce, C., Wery, J., 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture, in: *L'agronomie Aujourd'hui*. QUAE Editions. Versailles, pp. 77–95.
- Lucas, V., de Tournonnet, S., Barbier, J.-M., Gassel, P., 2018. Communication dans un colloque scientifique avec actes 32.
- Luna, J.M., Mitchell, J.P., Shrestha, A., 2012. Conservation tillage for organic agriculture: Evolution toward hybrid systems in the western USA. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27, 21–30. <https://doi.org/10.1017/S1742170511000494>
- Lyet, P., 2016. Les recherches conjointes : Des tentatives pour construire des « connaissances composites » appropriables par les scientifiques et les intervenants. *Sociétés et jeunesse en difficulté. Revue pluridisciplinaire de recherche*.
- Lyet, P., 2014. Renouveler les pratiques de construction des savoirs dans les « recherches collectives ». *Le sociographe* 87–102. <https://doi.org/10.3917/graph.hs07.0087>
- Lyon, F., 1996. How farmers research and learn: The case of arable farmers of East Anglia, UK. *Agric Hum Values* 13, 39–47. <https://doi.org/10.1007/BF01530522>
- Mabit, L., Laverdière, M.R., Bernard, C., 2002. L'érosion hydrique : méthodes et études de cas dans le Nord de la France. *Cahiers Agricultures* 13.
- Mader, P., 2002. Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming. *Science* 296, 1694–1697. <https://doi.org/10.1126/science.1071148>
- Mäder, P., Berner, A., 2012. Development of reduced tillage systems in organic farming in Europe. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27, 7–11. <https://doi.org/10.1017/S1742170511000470>
- Mahé, L.-P., Rainelli, P., 1987. Impact des pratiques et des politiques agricoles sur l'environnement. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales* 4, 9–31.
- Malassis, L., 1988. Histoire de l'agriculture, histoire de l'alimentation, histoire générale. *Économie rurale* 184, 192–198.
- Malone, M., Foster, E., 2019. A mixed-methods approach to determine how conservation management programs and techniques have affected herbicide use and distribution in the environment over time. *Sci. Total Environ.* 660, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.266>
- Mapfumo, P., Adjei-Nsiah, S., Mtambanengwe, F., Chikowo, R., Giller, K.E., 2013. Participatory action research (PAR) as an entry point for supporting climate change adaptation by smallholder farmers in Africa. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2012.11.001>
- Margolinas, C., 2014. Connaissance et savoir. Concepts didactiques et perspectives sociologiques ? *Revue française de pédagogie. Recherches en éducation* 13–22. <https://doi.org/10.4000/rfp.4530>
- Margolinas, C., 2012. Connaissance et savoir. Des distinctions frontalières? 40.
- Margolinas, C., 2004. Points de vue de l'élève et du professeur. *Essai de développement de la théorie des situations didactiques* 161. Education. Université de Provence - Aix-Marseille I, 2004.

- Marin, A., Ely, A., van Zwanenberg, P., 2016. Co-design with aligned and non-aligned knowledge partners: implications for research and coproduction of sustainable food systems. *Current Opinion in Environmental Sustainability, Sustainability challenges* 20, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.09.003>
- Martin, A., Sherington, J., 1997. Participatory research methods—Implementation, effectiveness and institutional context. *Agricultural Systems, Socio-economic Methods in Renewable Natural Resources Research* 55, 195–216. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(97\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(97)00007-3)
- Martini, E., Roshetko, J.M., Paramita, E., 2016. Can farmer-to-farmer communication boost the dissemination of agroforestry innovations? A case study from Sulawesi, Indonesia. *Agroforest Syst* 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0011-3>
- Masson, P.L., Hatchuel, A., Weil, B., 2018. Théorie C-K-Fondements et implications d’une théorie de la conception.
- Masson, P.L., McMahon, C., 2016. Armand Hatchuel et Benoît Weil La théorie C-K, un fondement formel aux théories de l’innovation 24. *Les grands auteurs du management de l’innovation et de la créativité*, In Quarto - Editions Management et Société, pp.588-613, 2016.
- Maton, L., 2010. Le changement climatique dans les Pyrénées Orientales: Impacts sur l’agriculture et stratégies d’adaptation. https://m.brgm.fr/sites/default/files/2010_vulcain_support_atelier.pdf (accessed 6.5.19).
- Matthews, K.B., Schwarz, G., Buchan, K., Rivington, M., Miller, D., 2008. Wither agricultural DSS? *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.11.001>
- Mayen, P., 2008. Dix développements sur la didactique professionnelle et le développement. *Didactique professionnelle et didactiques disciplinaires en débat*. Toulouse: Octarès 110–125.
- Mazoyer, M., Roudart, L., 2017. *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*. Le Seuil.
- McCrum, G., Blackstock, K., Matthews, K., Rivington, M., Miller, D., Buchan, K., 2009. Adapting to climate change in land management: the role of deliberative workshops in enhancing social learning. *Environmental Policy and Governance* 19, 413–426. <https://doi.org/10.1002/eet.525>
- Melero, S., Panettieri, M., Madejón, E., Macpherson, H.G., Moreno, F., Murillo, J.M., 2011. Implementation of chiselling and mouldboard ploughing in soil after 8 years of no-till management in SW, Spain: Effect on soil quality. *Soil & tillage research*.
- Merrill-Sands, D., Collion, M.-H., 1994. Farmers and Researchers: The Road to Partnership. *Agriculture and Human Values* 11, 26–37. <https://doi.org/10.1007/BF01530444>
- Mesnage, R., Defarge, N., Spiroux de Vendômois, J., Séralini, G.E., 2015. Potential toxic effects of glyphosate and its commercial formulations below regulatory limits. *Food and Chemical Toxicology* 84, 133–153. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.08.012>
- Mesnage, R., Moesch, C., Grand, R.L.G., Lauthier, G., Vendômois, J.S. de, Gress, S., Séralini, G.-E., 2012. Glyphosate Exposure in a Farmer’s Family. *Journal of Environmental Protection* 03, 1001–1003. <https://doi.org/10.4236/jep.2012.39115>
- Meynard, J.-M., 2012. La reconception est en marche ! Conclusion au Colloque « Vers des systèmes de culture innovants et performants : De la théorie à la pratique pour concevoir, piloter, évaluer, conseiller et former »1 [WWW Document]. URL <https://www6.inra.fr/ciag/content/download/3770/36054/file/Vol20-8-Meynard.pdf> (accessed 3.16.16).
- Meynard, J.-M., 2008. Produire autrement: réinventer les systèmes de culture, in: *Systèmes de culture innovants et durables: quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri Editions, Dijon.
- Meynard, J.-M., Dedieu, B., Bos, A.P., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices, in: Darnhofer, I., Gibbon, D., Dedieu, Benoît (Eds.), *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 405–429.
- Midler, C., Garel, G., Kessler, A., 1997. Le co-développement, définitions, enjeux et problèmes 16. *Éducation permanente*, Arcueil : Éducation permanente, 1997, pp.95-108.
- Mirsky, S.B., Ryan, M.R., Curran, W.S., Teasdale, J.R., Maul, J., Spargo, J.T., Moyer, J., Grantham, A.M., Weber, D., Way, T.R., Camargo, G.G., 2012. Conservation tillage issues: Cover crop-based organic rotational no-till grain production in the mid-Atlantic region, USA. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27, 31–40. <https://doi.org/10.1017/S1742170511000457>
- Mirsky, S.B., Ryan, M.R., Teasdale, J.R., Curran, W.S., Reberg-Horton, C.S., Spargo, J.T., Wells, M.S., Keene, C.L., Moyer, J.W., 2013. Overcoming Weed Management Challenges in Cover Crop-Based Organic Rotational No-Till Soybean Production in the Eastern United States. *Weed Technology* 27, 193–203. <https://doi.org/10.1614/WT-D-12-00078.1>
- Mischler, R., Duiker, S.W., Curran, W.S., Wilson, D., 2010. Hairy Vetch Management for no-till organic corn production. *Agronomy Journal* 102, 355–362. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0183>
- Mitchell, J., Klonsky, K., Miyao, E., Hembree, K., 2009. *Conservation tillage tomato production in California’s San Joaquin Valley*. UCANR Publications.
- Mitra, S., Boussard, J.-M., 2011. Les stocks et la volatilité des prix agricoles. Un modèle de fluctuations endogènes. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* Pagination. <https://doi.org/10.4000/economierurale.2925>
- Mollard, A., Chatellier, V., Codron, J.M., Dupraz, P., Jacquet, F., 2003. L’agriculture contre l’environnement? Diagnostic, solutions et perspectives économiques. *Annales des mines* 24.
- Morini, R., 2018. Glyphosate: Health Controversy, Benefits and Continuing Debate 5.

- Morrisette, J., 2013. Recherche-action et recherche collaborative : Quel rapport aux savoirs et à la production de savoirs? *nps* 25, 35–49. <https://doi.org/10.7202/1020820ar>
- Moschitz, H., Home, R., 2012. Studying learning and innovation networks—a conceptual and methodological framework. <https://orgprints.org/22255/> (accessed 6.5.19).
- Motta, A.C.V., Reeves, D.W., Burmester, C., Feng, Y., 2007. Conservation Tillage, Rotations, and Cover Crop Affecting Soil Quality in the Tennessee Valley: Particulate Organic Matter, Organic Matter, and Microbial Biomass. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38, 2831–2847. <https://doi.org/10.1080/00103620701663065>
- Moyer, J., 2011. Organic no-till farming. Advancing no-till agriculture. Crops, soil, equipment. Copyright, Acres U.S.A, Austin, Texas.
- Mubiru, D.N., Ssali, H., Kaizzi, C.K., Byalebeka, J., Tushemereirwe, W.K., Nyende, P., Kabuye, F., Delve, R., Esilaba, A., 2004. Participatory research approaches for enhancing innovations and partnerships in soil productivity improvement. *Uganda Journal of Agricultural Sciences* 9, 192–198.
- Muhammad, I., Sainju, U.M., Zhao, F., Khan, A., Ghimire, R., Fu, X., Wang, J., 2019. Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research* 192, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.020>
- Muoni, T., Rusinamhodzi, L., Rugare, J.T., Mabasa, S., Mangosho, E., Mupangwa, W., Thierfelder, C., 2014. Effect of herbicide application on weed flora under conservation agriculture in Zimbabwe. *Crop Protection* 66, 1–7.
- Muro, M., Jeffrey, P., 2008. A critical review of the theory and application of social learning in participatory natural resource management processes. *Journal of Environmental Planning and Management* 51, 325–344. <https://doi.org/10.1080/09640560801977190>
- Myers, J.P., Antoniou, M.N., Blumberg, B., Carroll, L., Colborn, T., Everett, L.G., Hansen, M., Landrigan, P.J., Lanphear, B.P., Mesnage, R., Vandenberg, L.N., vom Saal, F.S., Welshons, W.V., Benbrook, C.M., 2016. Concerns over use of glyphosate-based herbicides and risks associated with exposures: a consensus statement. *Environmental Health* 15, 19. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0117-0>
- Navarrete, M., Brives, H., Catalogna, M., Gouttenoire, L., Heinisch, C., Lamine, C., Ollion, E., Simon, S., 2018. Farmers’ involvement in collective experimental designs in a French region, Rhône-Alpes. How do they contribute to farmers’ learning and facilitate the agroecological transition?
- Navarrete, M., Lefevre, A., Dufils, A., Pares, L., Perrin, B., 2017. Concevoir et évaluer avec les acteurs des systèmes de culture adaptés à leurs cadres de contraintes et d’objectifs en production maraîchère sous abri. Mise en pratique et enseignements dans les projets GeDuNem et 4SYSLEG. *Innovations Agronomiques* 61, 33–49.
- Neef, A., Neubert, D., 2011. Stakeholder participation in agricultural research projects: a conceptual framework for reflection and decision-making. *Agriculture and Human Values* 28, 179–194. <https://doi.org/10.1007/s10460-010-9272-z>
- Ngalamulume Tshiebue, G., 2010. L’approche champ-ecole paysanne (cep): une methode de recherche-action impliquant davantage les producteurs ruraux dans la maitrise et l’amélioration de leur systeme de production. l’exemple des cep du kasaï occidental/r.d.congo, in: Emilie COUDEL, B.H., Hubert DEVAUTOUR, Christophe-Toussaint SOULARD (Ed.), ISDA 2010. Cirad-Inra-SupAgro, Montpellier, France, p. 10 p.
- Nichols, V., Verhulst, N., Cox, R., Govaerts, B., 2015. Weed dynamics and conservation agriculture principles: A review. *Field Crops Research* 183, 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.012>
- Nouri, A., Lee, J., Yin, X., Tyler, D.D., Saxton, A.M., 2019. Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. *Geoderma* 337, 998–1008. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.016>
- Novak, S., 2008. Méthodes de conception de systèmes de production innovants à l’échelle de l’exploitation agricole. Synthèse bibliographique. Solphy expertise P 66.
- Nyamangara, J., Mashingaidze, N., Masvaya, E.N., Nyengerai, K., Kunzekweguta, M., Tirivavi, R., Mazvimavi, K., 2014. Weed growth and labor demand under hand-hoe based reduced tillage in smallholder farmers’ fields in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 187, 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.005>
- Okoth, J., Braun, A., Delve, R., Khamaala, H., Khisa, G., Thomas, J., 2006. The emergence of Farmer Field Schools Networks in Eastern Africa 10.
- Orabi, M.A., 2017. Farmer participatory research: Approaches and impact.
- Ouattara, B., Coulibaly, K., Kohio, E., Doumbia, S., Ouédraogo, S., Nacro, H.B., 2018. Effets du Système de Culture sous couverture Végétale (SCV) sur les flux hydriques d’un sol ferrugineux à l’Ouest du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 12, 1770. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i4.20>
- Patrignani, A., Ochsner, T.E., 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agronomy Journal* 107, 2312. <https://doi.org/10.2134/agnonj15.0150>
- Paturel, D., 2015. Chapitre 22. La recherche participative en travail social : l’option d’une épistémologie et d’une méthodologie constructiviste, in: Les recherches-actions collaboratives, Politiques et interventions sociales. Presses de l’EHESP, Rennes, pp. 197–205. <https://doi.org/10.3917/ehesp.lesch.2015.01.0197>
- Peigné, J., 2018. Les-pratiques-de-lagriculture-de-conservation-un-levier-damelioration-de-la-fertilite-des-sols-et-dinnovation-en-agriculture-biologique.pdf (Mémoire d’habilitation à diriger la recherche (HDR)). Lyon 1.
- Peigné, J., Ball, B.C., Roger-Estrade, J., David, C., 2007. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management* 23, 129–144. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00082.x>

- Peigné, J., Casagrande, M., Payet, V., David, C., Sans, F.X., Blanco-Moreno, J.M., Cooper, J., Gascoyne, K., Antichi, D., Bàrberi, P., Bigongiali, F., Surböck, A., Kranzler, A., Beeckman, A., Willekens, K., Luik, A., Matt, D., Grosse, M., Heß, J., Clerc, M., Dierauer, H., Mäder, P., 2016. How organic farmers practice conservation agriculture in Europe. *Renewable Agriculture and Food Systems* 31, 72–85. <https://doi.org/10.1017/S1742170514000477>
- Peigné, J., Lefevre, V., Vian, J.F., Fleury, Ph., 2015. Conservation Agriculture in Organic Farming: Experiences, Challenges and Opportunities in Europe, in: Farooq, M., Siddique, K.H.M. (Eds.), *Conservation Agriculture*. Springer International Publishing, Cham, pp. 559–578.
- Penot, E., Andrieu, N., Cialdella, N., Pedelohore, P., 2018. Des outils de simulation pour comprendre, évaluer et renforcer l'innovation dans les exploitations agricoles, in: *Innovation et Développement Dans Les Systemes Agricoles et Alimentaires / Faure Guy (Ed.), Chiffolleau Yuna (Ed.), Goulet Frederic (Ed.), Temple Ludovic (Ed.), Touzard Jean-Marc (Ed.)*. Ed. Quae, Versailles, pp. 239–250.
- Perkins, D.D., Zimmerman, M.A., 1995. Empowerment theory, research, and application. *Am J Commun Psychol* 23, 569–579. <https://doi.org/10.1007/BF02506982>
- Petersen, P., Tardin, J.M., Marochi, F., 1999. Participatory development of no-tillage systems without herbicides for family farming: the experience of the center-south region of Paraná. *Environment, Development and Sustainability* 1, 235–252.
- Pierce, F.J., 1998. *Advances in Soil and Water Conservation*. CRC Press.
- Pittelkow, C.M., Liang, X., Linnquist, B.A., van Groenigen, K.J., Lee, J., Lundy, M.E., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T., van Kessel, C., 2015a. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature* 517, 365–368. <https://doi.org/10.1038/nature13809>
- Pittelkow, C.M., Linnquist, B.A., Lundy, M.E., Liang, X., van Groenigen, K.J., Lee, J., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T., van Kessel, C., 2015b. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research* 183, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>
- Place, G.T., Reberg-Horton, S.C., Dunphy, J.E., Smith, A.N., 2009. Seeding Rate Effects on Weed Control and Yield For Organic Soybean Production. *Weed Technology* 23, 497–502. <https://doi.org/10.1614/WT-08-134.1>
- Portelance, L., Giroux, L., 2009. La problématisation dans un processus de recherche collaborative (Report). Centre de Recherche en Education de Nantes (CREN), Université de Nantes.
- Portier, C.J., Armstrong, B.K., Baguley, B.C., Baur, X., Belyaev, I., Bellé, R., Belpoggi, F., Biggeri, A., Bosland, M.C., Bruzzi, P., Budnik, L.T., Bugge, M.D., Burns, K., Calaf, G.M., Carpenter, D.O., Carpenter, H.M., López-Carrillo, L., Clapp, R., Cocco, P., Consonni, D., Comba, P., Craft, E., Dalvie, M.A., Davis, D., Demers, P.A., Roos, A.J.D., DeWitt, J., Forastiere, F., Freedman, J.H., Fritsch, L., Gaus, C., Gohlke, J.M., Goldberg, M., Greiser, E., Hansen, J., Hardell, L., Hauptmann, M., Huang, W., Huff, J., James, M.O., Jameson, C.W., Kortenkamp, A., Kopp-Schneider, A., Kromhout, H., Larramendy, M.L., Landrigan, P.J., Lash, L.H., Leszczynski, D., Lynch, C.F., Magnani, C., Mandrioli, D., Martin, F.L., Merler, E., Michelozzi, P., Miligi, L., Miller, A.B., Mirabelli, D., Mirer, F.E., Naidoo, S., Perry, M.J., Petronio, M.G., Pirastu, R., Portier, R.J., Ramos, K.S., Robertson, L.W., Rodriguez, T., Röösli, M., Ross, M.K., Roy, D., Rusyn, I., Saldiva, P., Sass, J., Savolainen, K., Scheepers, P.T.J., Sergi, C., Silbergeld, E.K., Smith, M.T., Stewart, B.W., Sutton, P., Tateo, F., Terracini, B., Thielmann, H.W., Thomas, D.B., Vainio, H., Vena, J.E., Vineis, P., Weiderpass, E., Weisenburger, D.D., Woodruff, T.J., Yorifuji, T., Yu, I.J., Zambon, P., Zeeb, H., Zhou, S.-F., 2016. Differences in the carcinogenic evaluation of glyphosate between the International Agency for Research on Cancer (IARC) and the European Food Safety Authority (EFSA). *J Epidemiol Community Health* 70, 741–745. <https://doi.org/10.1136/jech-2015-207005>
- Pretty, J.N., 1995. Participatory learning for sustainable agriculture. *World Development* 23, 1247–1263. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(95\)00046-F](https://doi.org/10.1016/0305-750X(95)00046-F)
- Price, A.J., Balkcom, K.S., Duzy, L.M., Kelton, J.A., 2012. Herbicide and Cover Crop Residue Integration for *Amaranthus* Control in Conservation Agriculture Cotton and Implications for Resistance Management. *Weed Technology* 26, 490–498. <https://doi.org/10.1614/WT-D-11-00127.1>
- Probst, K., Hagmann, J., From, C., Fern, M., Ashby, J.A., 1994. 2003: Understanding Participatory Research in the Context of Natural Resource Management – Paradigms, Approaches and Typologies. *Agricultural Research & Extension Network (AgREN)* published by the Overseas Development Institute, Network Paper.
- Qi, Z., Helmers, M.J., 2010. Soil Water Dynamics under Winter Rye Cover Crop in Central Iowa. *Vadose Zone Journal* 9, 53–60. <https://doi.org/10.2136/vzj2008.0163>
- Quizon, J., Feder, G., Murgai, R., 2001. Fiscal Sustainability of Agricultural Extension: The Case of the Farmer Field School Approach. *Journal of International Agricultural and Extension Education* 8. <https://doi.org/10.5191/jiaee.2001.08102>
- Rakotovololona, L., 2018. Quantification expérimentale et modélisation de la production, des flux d'eau et d'azote en systèmes de culture biologiques. https://www6.hautsdefrance.inrae.fr/agroimpact/content/download/3643/35190/version/1/file/These_Lucia%20Rakotovololona_2018.pdf (accessed 6.5.19).
- Raunet, M., 2002. Projet de recherche-développement sur le semis direct avec couverture végétale en Tunisie ____ 23.

- Raymond, C.M., Fazey, I., Reed, M.S., Stringer, L.C., Robinson, G.M., Evely, A.C., 2010. Integrating local and scientific knowledge for environmental management. *Journal of Environmental Management* 91, 1766–1777. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.023>
- Reardon, K.M., 1998. Participatory Action Research as Service Learning. *New Directions for Teaching and Learning* 1998, 57–64. <https://doi.org/10.1002/tl.7307>
- Reau, R., Monnot, L.-A., Schaub, A., Munier-Jolain, N., Pambou, I., Bockstaller, C., Cariolle, M., Chabert, A., Dumans, P., 2012. Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs. *Innovations Agronomiques* 20, 5–33.
- Reberg-Horton, S.C., Grossman, J.M., Kornecki, T.S., Meijer, A.D., Price, A.J., Place, G.T., Webster, T.M., 2012. Utilizing cover crop mulches to reduce tillage in organic systems in the southeastern USA. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27, 41–48. <https://doi.org/10.1017/S1742170511000469>
- Reed, M.S., 2008. Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biological Conservation* 141, 2417–2431. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.07.014>
- Reeves, D.W., Price, A.J., Patterson, M.G., 2009. Evaluation of Three Winter Cereals for Weed Control in Conservation-Tillage Nontransgenic Cotton1. *Weed Technology* 19(3):731-736.
- Reicosky, D.C., 2015. Conservation tillage is not conservation agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation* 70, 103A-108A. <https://doi.org/10.2489/jswc.70.5.103A>
- Reicosky, D.C., Forcella, F., 1998. Cover crop and soil quality interactions in agroecosystems. *Journal of Soil and Water Conservation* 53, 224–229.
- Reicosky, D.C., Saxton, K.E., 2006. benefits of no-tillage. *No-tillage seeding in conservation agriculture / C.J. Baker ... [et al.]*; edited by C.J. Baker and K.E. Saxton.
- Reinbott, T.M., Conley, S.P., Blevins, D.G., 2004. No-Tillage Corn and Grain Sorghum Response to Cover Crop and Nitrogen Fertilization. *Agronomy Journal* 96, 1158–1163. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1158>
- Relyea, R.A., 2005. The Impact of Insecticides and Herbicides on the Biodiversity and Productivity of Aquatic Communities. *Ecological Applications* 15, 618–627. <https://doi.org/10.1890/03-5342>
- Renton, M., Flower, K.C., 2015. Occasional mouldboard ploughing slows evolution of resistance and reduces long-term weed populations in no-till systems. *Agricultural Systems* 139, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.06.005>
- Resosudarmo, B.P., Yamazaki, S., 2011. Training and Visit (T&V) Extension vs. Farmer Field School: The Indonesian Experience (SSRN Scholarly Paper No. ID 1910317). Social Science Research Network, Rochester, NY.
- Reynaud, A., 2008. Impacts économiques de la sécheresse sur l'agriculture. *INRA Sciences Sociales* 2008.
- Rhoades, R., Bebbington, A., 1991. Farmers as experimenters. *Joining Farmers' Experiments* 251–253.
- Rhoades, R.E., Booth, R.H., 1982. Farmer-back-to-farmer: A model for generating acceptable agricultural technology. *Agricultural Administration* 11, 127–137. [https://doi.org/10.1016/0309-586X\(82\)90056-5](https://doi.org/10.1016/0309-586X(82)90056-5)
- Richard, A., 2018. L'approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole au service de la qualité des eaux souterraines. L'expérience d'une démarche de co-conception avec et par les agriculteurs.
- Rivers, A.N., Mullen, C.A., Barbercheck, M.E., 2018. Cover Crop Species and Management Influence Predatory Arthropods and Predation in an Organically Managed, Reduced-Tillage Cropping System. *Environ Entomol* 47, 340–355. <https://doi.org/10.1093/ee/nvx149>
- Robinson, R.A., Sutherland, W.J., 2002. Post-War Changes in Arable Farming and Biodiversity in Great Britain. *Journal of Applied Ecology* 39, 157–176.
- Roesch-McNally, G., Basche, A., Arbuckle, J., Tyndall, J., Miguez, F., Bowman, T., Clay, R., 2017. The trouble with cover crops: Farmers' experiences with overcoming barriers to adoption. *Agronomy & Horticulture -- Faculty Publications*.
- Rogers, E.M., 2010. *Diffusion of Innovations*, 4th Edition. Simon and Schuster.
- Röling, N.G., 2009. Pathways for impact: scientists' different perspectives on agricultural innovation. *International Journal of Agricultural Sustainability* 7, 83–94. <https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0043>
- Röling, N.G., Wagemakers, M.A.E., 2000. *Facilitating Sustainable Agriculture: Participatory Learning and Adaptive Management in Times of Environmental Uncertainty*. Cambridge University Press.
- Rosario-Lebron, A., Leslie, A.W., Chen, G., Hooks, C.R.R., 2018. The Effect of Barley Cover Crop Residue and Herbicide Management on the Foliar Arthropod Community in No-Till Soybeans. *Agronomy* 8, 87. <https://doi.org/10.3390/agronomy8060087>
- Rullac, S., 2018. Recherche Action Collaborative en travail social : les enjeux épistémologiques et méthodologiques d'un bricolage scientifique. *Pensee plurielle* n° 48, 37–50.
- Ryan, M.R., Curran, W.S., Grantham, A.M., Hunsberger, L.K., Mirsky, S.B., Mortensen, D.A., Nord, E.A., Wilson, D.O., 2011. Effects of Seeding Rate and Poultry Litter on Weed Suppression from a Rolled Cereal Rye Cover Crop. *Weed Science* 59, 438–444. <https://doi.org/10.1614/WS-D-10-00180.1>
- Sabourin, E., Da Silveira, L.M., Sidersky, P., 2004. Production d'innovation en partenariat et agriculteurs-expérimentateurs au Nordeste du Brésil. *Cahiers Agricultures* 13, 203–210.
- Salembier, C., Elverdin, J.H., Meynard, J.-M., 2016. Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agronomy for Sustainable Development* 36. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>

- Samiee, S., Rezaei-Moghaddam, K., 2018. The Consequences of Tillage Technology: The Sustainability Perspective (The Case of Fars Province, Iran). *International Journal of Agricultural Management and Development* 8, 409–420.
- Sánchez-Moreno, S., Castro, J., Alonso-Prados, E., Alonso-Prados, J.L., García-Baudín, J.M., Talavera, M., Durán-Zuazo, V.H., 2015. Tillage and herbicide decrease soil biodiversity in olive orchards. *Agronomy for Sustainable Development* 2, 691–700. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0266-x>
- Sands, D.M., 1986. Farming Systems Research: Clarification of Terms and Concepts. *Experimental Agriculture* 22, 87–104. <https://doi.org/10.1017/S0014479700014174>
- Santini, J., Sensevy, G., 2012. Apprendre et enseigner : une action conjointe. *Cahiers Pédagogiques* 100–102.
- Sapkota, T.B., Mazzoncini, M., Barberi, P., Antichi, D., Silvestri, N., 2012. Fifteen years of no till increase soil organic matter, microbial biomass and arthropod diversity in cover crop-based arable cropping systems. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 853–863. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0079-0>
- Sar, S.A., King, A., Van de Fliert, E., Opassa, R., Atoai, M., Appa, A., Papaya, T., 2010. Engaging stakeholders through participatory research: farmer innovations in the use of predatory ants for pest management in Papua New Guinea.
- Sarrantonio, M., Gallandt, E., 2003. The Role of Cover Crops in North American Cropping Systems. *Journal of Crop Production* 8, 53–74. https://doi.org/10.1300/J144v08n01_04
- Sauphanor, B., Lescourret, F., 2007. Conception d'itinéraires techniques pour une protection intégrée en arboriculture.
- Schinasi, L., Leon, M.E., 2014. Non-Hodgkin Lymphoma and Occupational Exposure to Agricultural Pesticide Chemical Groups and Active Ingredients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11, 4449–4527. <https://doi.org/10.3390/ijerph110404449>
- Schmidt, J.H., Junge, S., Finckh, M.R., 2019. Cover crops and compost prevent weed seed bank buildup in herbicide-free wheat–potato rotations under conservation tillage. *Ecology and Evolution* 9, 2715–2724. <https://doi.org/10.1002/ece3.4942>
- Schneider, F., Steiger, D., Ledermann, T., Fry, P., Rist, S., 2012. No-tillage farming: co-creation of innovation through network building. *Land Degrad. Dev.* 23, 242–255. <https://doi.org/10.1002/ldr.1073>
- Schubert, S.D., Suarez, M.J., Pegion, P.J., Koster, R.D., Bacmeister, J.T., 2004. On the Cause of the 1930s Dust Bowl. *Science* 303, 1855–1859. <https://doi.org/10.1126/science.1095048>
- Scoones, I., Thompson, J., 2009. Farmer first revisited: Innovation for agricultural research and development. Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation.
- Scoones, I., Thompson, J. (eds), 1994. Beyond Farmer First: rural people's knowledge, agricultural research and extension practice.
- Scopel, E., Triomphe, B., Ribeiro, M. dos S., Séguy, L., Denardin, J.E., Kochann, R.A., 2004. Direct seeding mulch-based cropping systems (DMC) in Latin America, in: *New Directions for a Diverse Planet: Proceedings for the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia*. pp. 1–16.
- Selim, H.M., Zhou, L., Zhu, H., 2003. Herbicide Retention in Soil as Affected by Sugarcane Mulch Residue. *Journal of Environmental Quality* 32, 1445–1454. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.1445>
- Sensevy, G., 2011. Le sens du Savoir. *Éléments pour une théorie de l'action conjointe en didactique*. De Boeck.
- Sensevy, G., 2008. Le travail du professeur pour la théorie de l'action conjointe en didactique. *Une activité située ? Recherche et formation* 39–50. <https://doi.org/10.4000/rechercheformation.822>
- Sewell, A.M., Gray, D.I., Blair, H.T., Kemp, P.D., Kenyon, P.R., Morris, S.T., Wood, B.A., 2014. Hatching new ideas about herb pastures: Learning together in a community of New Zealand farmers and agricultural scientists. *Agricultural Systems* 125, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.12.002>
- Sharma, A., Jha, P., Reddy, G.V.P., 2018. Multidimensional relationships of herbicides with insect-crop food webs. *Science of The Total Environment* 643, 1522–1532. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.312>
- Sibelet, N., 1995. L'innovation en milieu paysan ou la capacité des acteurs locaux à innover en présence d'intervenants extérieurs. *Nouvelles pratiques de fertilisation et mise en bocage dans le Nioumakélé (Anjouan Comores)*.
- Silva, E., Delate, K., 2017. A Decade of Progress in Organic Cover Crop-Based Reduced Tillage Practices in the Upper Midwestern USA. *Agriculture* 7, 44. <https://doi.org/10.3390/agriculture7050044>
- Silva, E.M., 2014. Screening Five Fall-Sown Cover Crops for Use in Organic No-Till Crop Production in the Upper Midwest. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 38, 748–763. <https://doi.org/10.1080/21683565.2014.901275>
- Smith, A.N., Reberg-Horton, S.C., Place, G.T., Meijer, A.D., Arellano, C., Mueller, J.P., 2011. Rolled Rye Mulch for Weed Suppression in Organic No-Tillage Soybeans. *Weed Science* 59, 224–231. <https://doi.org/10.1614/WS-D-10-00112.1>
- Smits, R.E., Kuhlmann, S., Shapira, P., 2010. *The Theory and Practice of Innovation Policy: An International Research Handbook*.
- Snapp, S.S., Swinton, S.M., Labarta, R., Mutch, D., Black, J.R., Leep, R., Nyiraneza, J., O'Neil, K., 2005. Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agronomy Journal* 97, 322–332.
- Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., Roger-Estrade, J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research* 118, 66–87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>

- Soulard, C.T., Compagnone, C., Lémery, B., 2007. La recherche en partenariat : entre fiction et friction. *Natures Sciences Sociétés* 15, 13–22. <https://doi.org/10.1051/nss:2007019>
- Soulière, M., Fontan, J.-M., 2018. Les recherches conjointes : un fait socio-anthropologique contemporain. *rs* 59, 15–24. <https://doi.org/10.7202/1051423ar>
- Soullignac, V., Ermine, J.-L., Paris, J.-L., Devise, O., Chanet, J.-P., 2011. Un serveur de connaissance pour l'agriculture durable, in: 4ème Conférence Francophone Gestion Des Connaissances, Société et Organisation. pp. 25–p.
- Sterk, B., Van Ittersum, M.K., Leeuwis, C., Wijnands, F.G., 2007. Prototyping and farm system modelling—Partners on the road towards more sustainable farm systems? *European Journal of Agronomy* 26, 401–409.
- Stoate, C., Jones, S., Crotty, F., Morris, C., Seymour, S., 2019. Participatory research approaches to integrating scientific and farmer knowledge of soil to meet multiple objectives in the English East Midlands. *Soil Use and Management* 35, 150–159. <https://doi.org/10.1111/sum.12488>
- Stockfisch, N., Forstreuter, T., Ehlers, W., 1999. Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil and Tillage Research* 52, 91–101. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00063-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00063-X)
- Sumberg, J., Okali, C., 1997. Farmers' experiments: creating local knowledge. *Farmers' experiments: creating local knowledge*.
- Sumberg, J., Okali, C., 1988. Farmers, On-farm Research and the Development of New Technology. *Experimental Agriculture* 24, 333–342. <https://doi.org/10.1017/S0014479700016185>
- Teasdale, J.R., 1996. Contribution of Cover Crops to Weed Management in Sustainable Agricultural Systems. *Journal of Production Agriculture* 9, 475–479. <https://doi.org/10.2134/jpa1996.0475>
- Teasdale, J.R., Coffman, C.B., Mangum, R.W., 2007. Potential long-term benefits of no-tillage and organic cropping systems for grain production and soil improvement. *Agronomy journal* 99, 1297–1305.
- Teklewold, H., Kassie, M., Shiferaw, B., Köhlin, G., 2013. Cropping system diversification, conservation tillage and modern seed adoption in Ethiopia: Impacts on household income, agrochemical use and demand for labor. *Ecological Economics* 93, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.05.002>
- Thom, M.D., Forcella, F., Eberle, C.A., Matthees, H.L., Weyers, S.L., Gesch, R.W., Ott, M.A., Feyereisen, G.W., Stroock, J.S., Wyse, D., 2018. Reduced-nutrient leachates in cash cover crop-soybean systems. *bioRxiv* 254169. <https://doi.org/10.1101/254169>
- Titi, A.E., 2002. *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press. <https://content.taylorfrancis.com/books/download?dac=C2009-0-09574-0&isbn=9780429125850&format=googlePreviewPdf> (accessed 6.5.19).
- Toffolini, Q., Jeuffroy, M. H., Prost, L.. L'activité de re-conception d'un système deculture par l'agriculteur: implications pour la production de connaissances en agronomie. *Agronomie, Environnement et Sociétés, Association Française d'Agronomie*, 2016, 6 (2).
- Toillier, Aurélie, Devaux-Spartakis, A., Faure, G., Barret, D., Marquié, C., 2018. Comprendre la contribution de la recherche à l'innovation collective par l'exploration de mécanismes de renforcement de capacité. *Cahiers Agricultures* 27, 15002. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017055>
- Toillier, A., Kola, P., Mathe, S., Tsafack, S., Dabire, D., Triomphe, B., 2018. L'écologisation de l'agriculture au prisme de l'innovation collaborative, in: *La Transition Agro-Ecologique Des Agricultures Du Sud / Cote Francois-Xavier* (Ed.), Poirier-Magona Emmanuelle (Ed.), Perret Sylvain (Ed.), Roudier Philippe (Ed.), Bruno Rapidel (Ed.), Thirion Marie-Cecile (Ed.). Ed Quae, Versailles, pp. 359–392.
- Torres, C.A.Q., Douthwaite, B., Velasco, J.I.R., Ashby, J., 2004. Colombia, Latin America and the spread of local agricultural research committees (CIALS): extension through farmer research. Volume 3. *Demand-Driven Approaches to Agriculture Extension* 10.
- Triomphe, B., 1988. Methodes d' experimentation en milieu rural - approche bibliographique - 10. https://agritrop.cirad.fr/459530/1/document_459530.pdf (accessed 6.5.19).
- Triomphe, B., Floquet, A., Kamau, G., Letty, B., Vodouhe, S.D., Ng'ang'a, T., Stevens, J., van den Berg, J., Selemna, N., Bridier, B., Crane, T., Almekinders, C., Waters-Bayer, A., Hocdé, H., 2013. What Does an Inventory of Recent Innovation Experiences Tell Us About Agricultural Innovation in Africa? *The Journal of Agricultural Education and Extension* 19, 311–324. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2013.782181>
- Triomphe, B., Goulet, F., Dreyfus, F., De Tourdonnet, S., 2006. Du labour au non-labour : pratiques, innovations et enjeux au Sud et au Nord, in: *Techniques de Travail de La Terre, Hier et Aujourd'hui, Ici et Là-Bas*. Centre d'histoire du travail, Nantes, France, p. np.
- Triomphe, B., Sabourin, E., Hocdé, H., Scopel, E., Nascimento de Oliveira, M., Xavier, V., Humberto, J., Macena Da Silva, F.-A., de Almeida, R., Cibeli, S., 2008. Participatory cropping and farming system design among multiple stakeholders to contribute to sustainable agricultural production. Experiences and lessons with the agrarian reform sector in the brazilian cerrados, in: *Empowerment of the Rural Actors: A Renewal of Farming Systems Perspectives*. 8 Th European IFSA Symposium, Clermont-Ferrand, France, 6–10 July 2008. Clermont-Ferrand France, pp. 3–12.
- Triplet, G.B., Dick, W.A., 2008. No-Tillage Crop Production: A Revolution in Agriculture! *Agronomy Journal* 100, S-153. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0005c>
- Tulkens, H., 2009. La performance productive d'un service public. Définitions, méthodes de mesure et application à la Régie des Postes en Belgique. *L'Actualité économique* 62, 306–335. <https://doi.org/10.7202/601373ar>

- Turner, R.J., Davies, G., Moore, H., Grundy, A.C., Mead, A., 2007. Organic weed management: A review of the current UK farmer perspective. *Crop Protection, Weed Science in Time of Transition* 26, 377–382. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.01.021>
- Uri, N.D., 2000. Perceptions on the use of no-till farming in production agriculture in the United States: an analysis of survey results. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 77, 263–266. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00085-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00085-7)
- USDA, A., 2005. Terminology and Definitions for Soil Tillage and Soil-Tool Relationships 5. https://prod.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_documents/nrcs144p2_053410.pdf (accessed 6.5.19).
- Vall, É., Blanchard, M., Coulibaly, K., Ouédraogo, S., Dabiré, D., Douzet, J.-M., Kouakou, K., Andrieu, N., Havard, M., Chia, E., Bougouma, V., Koutou, M., Karambiri, S., Delma, J.-B., Sib, O., 2019. Co-concevoir des systèmes de polyculture-élevage innovants en zone cotonnière au Burkina Faso 29.
- Vall, E., Blanchard, M., Diallo, M.A., Dongmo, A.L., Bayala, I., 2010. Savoirs techniques locaux, sources d'innovations? Production de savoirs actionnables dans une démarche de recherche action en partenariat, in: *Savanes Africaines En Développement: Innover Pour Durer*. Cirad, pp. 14–p.
- Vall, E., Chia, E., Blanchard, M., Koutou, M., Coulibaly, K., Andrieu, N., 2016. La co-conception en partenariat de systèmes agricoles innovants. *Cah. Agric.* 25, 15001. <https://doi.org/10.1051/cagri/2016001>
- van den Berg, H., Knols, B.G.J., 2006. The Farmer Field School: a method for enhancing the role of rural communities in malaria control? *Malaria Journal* 5, 3–6. <https://doi.org/10.1186/1475-2875-5-3>
- Van Deynze, B., Swinton, S.M., Hennessy, D.A., 2018. Are Glyphosate-Resistant Weeds a Threat to Conservation Agriculture? Evidence from Tillage Practices in Soybean [WWW Document]. URL https://tind-customer-agecon.s3.amazonaws.com/ee274e6a-da79-4960-a18d-b2f1be599c1a?response-content-disposition=inline%3B%20filename%2A%3DUTF-8%27%27Abstracts_R18_05_23_20_49_13_94_67_183_37_102_0.pdf&response-content-type=application%2Fpdf&AWSAccessKeyId=AKIAXL7W7Q3XHXDQYS&Expires=1559757367&Signature=psXigiLKpI7daaqRncWUZy07LkI%3D (accessed 6.5.19).
- Vazquez, M.A., Maturano, E., Etchegoyen, A., Difilippo, F.S., Maclean, B., 2017. Association between Cancer and Environmental Exposure to Glyphosate. *International Journal of Clinical Medicine* 08, 73–85. <https://doi.org/10.4236/ijcm.2017.82007>
- Veloso, M.G., Angers, D.A., Tiecher, T., Giacomini, S., Dieckow, J., Bayer, C., 2018. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 268, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.024>
- Venterea, R.T., Baker, J.M., Dolan, M.S., Spokas, K.A., 2006. Carbon and Nitrogen Storage are Greater under Biennial Tillage in a Minnesota Corn–Soybean Rotation. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1752. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0010>
- Vereijken, P., 1997. A methodological way of prototyping integrated and ecological arable farming system in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy* 235–250.
- Villamil, M.B., Bollero, G.A., Darmody, R.G., Simmons, F.W., Bullock, D.G., 2006. No-Till Corn/Soybean Systems Including Winter Cover Crops. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1936–1944. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0350>
- Villemaine, R., Sabourin, É., Goulet, F., 2012. Limits to the development of no-till mulching systems among smallholders in the Brazilian Amazon region. *Cahiers Agricultures* 21, 242–247. <https://doi.org/10.1684/agr.2012.0576>
- Vincent-Caboud, L., 2016. Semis direct sous couvert végétal en agriculture biologique: Conception de systèmes de culture innovants chez les agriculteurs de Rhône-Alpes (Mémoire de fin d'études). ISARA.
- Vincent-Caboud, L., 2015. Le semis direct en agriculture biologique: Les enjeux et les perspectives de son adoption chez les agriculteurs Rhône-Alpins en culture de maïs et soja (Projet de recherche personnel). ISARA.
- Vincent-Caboud, L., Casagrande, M., David, C., Ryan, M.R., Silva, E.M., Peigne, J., 2019a. Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 39, 45. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0590-2>
- Vincent-Caboud, L., Peigné, J., Casagrande, M., Silva, E.M., 2017. Overview of Organic Cover Crop-Based No-Tillage Technique in Europe: Farmers' Practices and Research Challenges. *Agriculture* 7, 42. <https://doi.org/10.3390/agriculture7050042>
- Vincent-Caboud, L., Vereecke, L., Silva, E., Peigné, J., 2019b. Cover Crop Effectiveness Varies in Cover Crop-Based Rotational Tillage Organic Soybean Systems Depending on Species and Environment. *Agronomy* 9, 319. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060319>
- Vogl, C.R., Kummer, S., Leitgeb, F., Schunko, C., Aigner, M., 2015. Keeping the Actors in the Organic System Learning: The Role of Organic Farmers' Experiments. *Sustainable Agriculture Research* 4, 140. <https://doi.org/10.5539/sar.v4n3p140>
- Vongkasem, W., Klakhaeng, K., Hemvijit, S., Tongglum, A., Katong, S., Suparhan, D., Howeler, R.H., 2001. Reducing soil erosion in cassava production systems in Thailand: A farmer participatory approach.
- Wallace, J., Williams, A., Liebert, J., Ackroyd, V., Vann, R., Curran, W., Keene, C., VanGessel, M., Ryan, M., Mirsky, S., 2017. Cover Crop-Based, Organic Rotational No-Till Corn and Soybean Production Systems in the Mid-Atlantic United States. *Agriculture* 7, 34. <https://doi.org/10.3390/agriculture7040034>

- Wallace, J.M., Keene, C.L., Curran, W., Mirsky, S., Ryan, M.R., VanGessel, M.J., 2018. Integrated Weed Management Strategies in Cover Crop-based, Organic Rotational No-Till Corn and Soybean in the Mid-Atlantic Region. *Weed Science* 66, 94–108. <https://doi.org/10.1017/wsc.2017.53>
- Walmsley, D.C., Siemens, J., Kindler, R., Kaiser, K., Saunders, M., Fichtner, A., Kaupenjohann, M., Osborne, B.A., 2018. Reduced nitrate leaching from an Irish cropland soil under non-inversion tillage with cover cropping greatly outweighs increased dissolved organic nitrogen leaching. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265, 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.031>
- Watson, C.A., Atkinson, D., Gosling, P., Jackson, L.R., Rayns, F.W., 2002. Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management* 18, 239–247. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00265.x>
- Weber, J., Kunz, C., Peteinatos, G., Zikeli, S., Gerhards, R., 2017. Weed Control Using Conventional Tillage, Reduced Tillage, No-Tillage, and Cover Crops in Organic Soybean. *Agriculture* 7, 43. <https://doi.org/10.3390/agriculture7050043>
- Wells, M.S., Brinton, C.M., Reberg-Horton, S.C., 2015. Weed suppression and soybean yield in a no-till cover-crop mulched system as influenced by six rye cultivars. *Renewable Agriculture and Food Systems* 1–12. <https://doi.org/10.1017/S1742170515000344>
- Wells, M.S., Reberg-Horton, S.C., Mirsky, S.B., 2016. Planting Date Impacts on Soil Water Management, Plant Growth, and Weeds in Cover-Crop-Based No-Till Corn Production. *Agronomy Journal* 108, 162–170. <https://doi.org/10.2134/agronj2014.0524>
- Wells, M.S., Reberg-Horton, S.C., Mirsky, S.B., 2014. Cultural Strategies for Managing Weeds and Soil Moisture in Cover Crop Based No-Till Soybean Production. *Weed Science* 62, 501–511. <https://doi.org/10.1614/WS-D-13-00142.1>
- Wilbois, K.-P., Schwab, A., Fischer, H., Bachinger, J., Palme, S., Peters, H., Dongus, S., 2004. Leitfaden für Praxisversuche. Guide to on-farm research trail. <http://docplayer.org/37228948-Leitfaden-fuer-praxisversuche.html> (accessed 6.5.19).
- Willer, H., Lernoud, J., Kemper, L., 2018. The World of Organic Agriculture 2018: Summary 10. <https://orgprints.org/34674/1/willer-etal-2018-world-of-organic-summary.pdf> (accessed 6.5.19).
- Williams, A., Scott Wells, M., Dickey, D.A., Hu, S., Maul, J., Raskin, D.T., Chris Reberg-Horton, S., Mirsky, S.B., 2018. Establishing the relationship of soil nitrogen immobilization to cereal rye residues in a mulched system. *Plant Soil* 426, 95–107. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3566-0>
- Witzenberger, A., Hack, H., 1989. Explanations of the BBCH decimal code for the growth stages of cereals-with illustrations. *Gesunde Pflanzen*. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DE19900001573> (accessed 6.5.19).
- Worster, D., 2010. The Southern Plains In the 1930s. Dust Bowl 11. 25th Anniversary ed. New York: Oxford University Press.
- Wortman, S.E., Francis, C.A., Bernards, M.L., Drijber, R.A., Lindquist, J.L., 2012. Optimizing Cover Crop Benefits with Diverse Mixtures and an Alternative Termination Method. *Agronomy Journal* 104, 1425. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0185>
- Yenish, J.P., Worsham, A.D., York, A.C., 1996. Cover Crops for Herbicide Replacement in No-Tillage Corn (*Zea mays*). *Weed Technology* 10, 815–821.
- Yusnaini, S., Niswati, A., Arif, M.A.S., Komalasari, Y., Kaneko, N., 2018. Earthworm population under different soil tillage and herbicide application at integrated field laboratory agriculture faculty, University of Lampung. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 215, 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/215/1/012015>
- Zahan, T., Hashem, A., Rahman, M., W Bell, R., Begum, M., 2018. Efficacy of herbicides in non-puddled transplanted rice under conservation agriculture systems and their effect on establishment of the succeeding crops. *Acta Scientifica Malaysia* 2, 17–25. <https://doi.org/10.26480/asm.01.2018.17.25>
- Zimmerman, M.A., 1990. Taking aim on empowerment research: On the distinction between individual and psychological conceptions. *American Journal of Community Psychology* 18, 169–177. <https://doi.org/10.1007/BF00922695>

Annexes

Annexe 1 : Exemple d'une partie de la grille descriptive utilisée pour analyser les publications scientifiques

Annexe 2 : Exemple d'une partie de la grille d'analyse thématique des connaissances scientifiques utilisées

Annexe 3 : Localisation des producteurs qui ont participé à l'enquête en ligne

Annexe 4 : Facteurs de risques et d'échecs les plus cités par les praticiens de l'échantillon 1 (sans herbicide)

Annexe 5 : Combinaisons couverts/cultures identifiées dans l'enquête en ligne

Annexe 6 : Brochure élaborée pour échanger avec les praticiens les premiers enseignements issus d'un atelier de conception exploratoire

Annexe 7 : Brochure technique élaborée pour échanger les connaissances scientifiques avec les praticiens

Annexe 8 : Dispositifs expérimentaux mis en place au niveau des différents sites

Annexe 9 : Détail des itinéraires techniques menés entre 2016 et 2018

Annexe 10 : Exemple de fiches d'avancement intermédiaires mobilisées pour échanger avec les praticiens de l'ensemble des essais menés

Annexe 11 : Guide d'entretien bilan réalisé auprès des agriculteurs – expérimentateurs

Annexe 12 : Article publié dans le journal Agronomy

Annexe 13 : Guide du premier entretien réalisé auprès des agriculteurs – expérimentateurs

Annexe 14 : Caractérisation du profil des agriculteurs-expérimentateurs

Annexe 15 : Exemple de grille d'évaluation complétée par les participants aux visites d'essais

Annexe 16 : Protocole des rencontres collectives axées sur des ateliers de conception

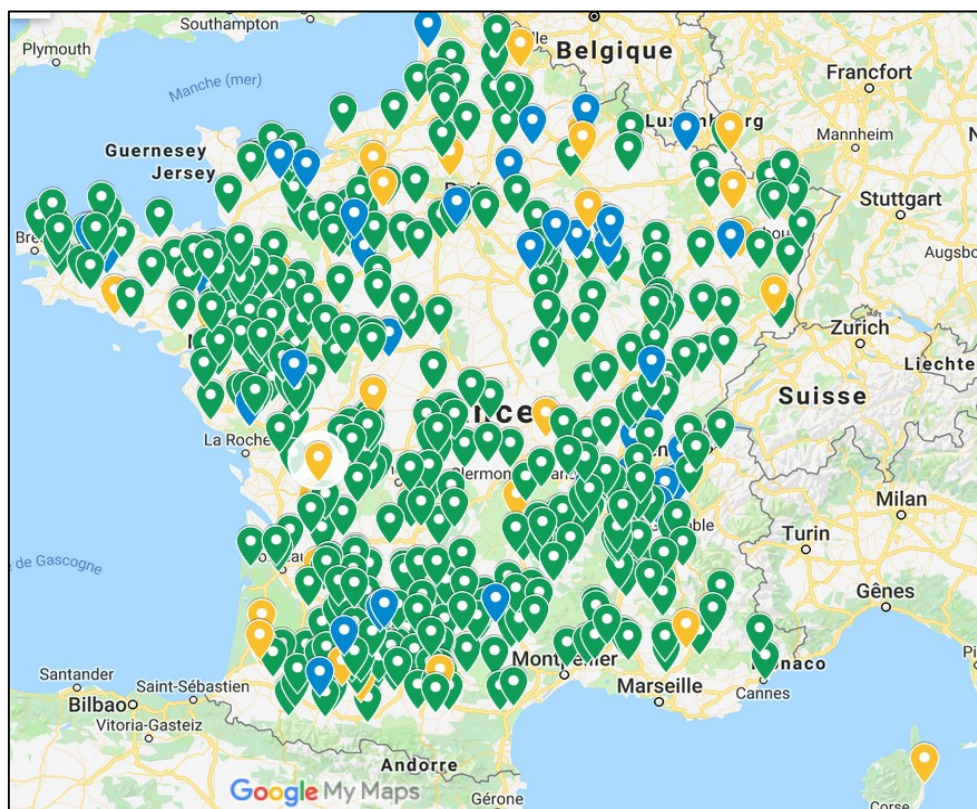
Annexe 17 : Exemple d'une partie de la grille d'analyse utilisée pour comparer le processus de recherche conjoint avec d'autres démarches participatives basées sur des expérimentations conduites en milieu rural

1

Annexe 1³⁷ : Exemple d'une partie de la grille descriptive utilisée pour analyser les publications scientifiques

References	Country	Soil type	Crops/crops rotation	Cover crops	Treatments	Years
Anderson, 2015	USA	/	alfalfa (3 yrs)-maize-soybean-winter wheat-oat-maize-soybean-alfalfa	/	Design of conceptual crops rotation for managing weeds	/
Bavougian et al. 2019	USA (Nebraska)	nora silt loam	maize and soybean	red clover + yellow clover (maize) hairy vetch (maize) winter rye (soybean) triticale (soybean)	Cover crops species Cover crop termination methods (roller crimper, frost kill, spring disk, broadcast flame)	2008-2009 2009-2010
Beach et al., 2018	Canada	/	maize and soybean	/	Literature review Case studies of two Ontario Organic Farmers	2017
Bernstein et al., 2011	USA (Wisconsin)	silt loam	Soybean	winter cereal Cereal rye	Cereal rye termination date; Cereal rye termination equipment; Soybean planting date; Row width (seeding date)	2008-2009
Clark et al., 2017	USA (Missouri)	silt loam, claypan	wheat-maize-soybean	cereal rye (before soybean) cereal rye/hairy vetch (before maize)	Tillage treatment (MNT, tillage without cover crop, tillage with cover crop use)	2012-2014
Crowley, 2017	USA (New York)	silt loam	Soybean	cereal rye	Cover crop management treatments: No cover Cereal rye moldboard plowed Cereal rye harvested and stubble moldboard plowed Cereal rye rolled	2015-2016
Delate et al., 2006 ; Delate et al., 2012;	USA (Iowa)	silty clay loam	maize; soybean	winter wheat/austrian winter pea; hairy vetch/cereal rye	Cover crops species Tillage treatment (NT; traditional tillage)	2005-2006 2006-2007
Frasconi et al., 2019	Italy	clay-loam	/	barley + pea	Cover crop termination methods (rolling vs rolling + flaming) Roller design (Fleco, Clemens, Rodale)	2015-2016
Halde et al., 2015	Canada (Manitoba)	fine sandy loam	(barley/hairy vetch) –NT flax-NT spring oat - (buckwheat/forage radish/turnip/sunflower) – (barley/hairy vetch rolled) – NT spring wheat – (cereal rye)	barley, hairy vetch	Tillage treatment (conservation tillage, NT) under organic or conventional management	2008-2012

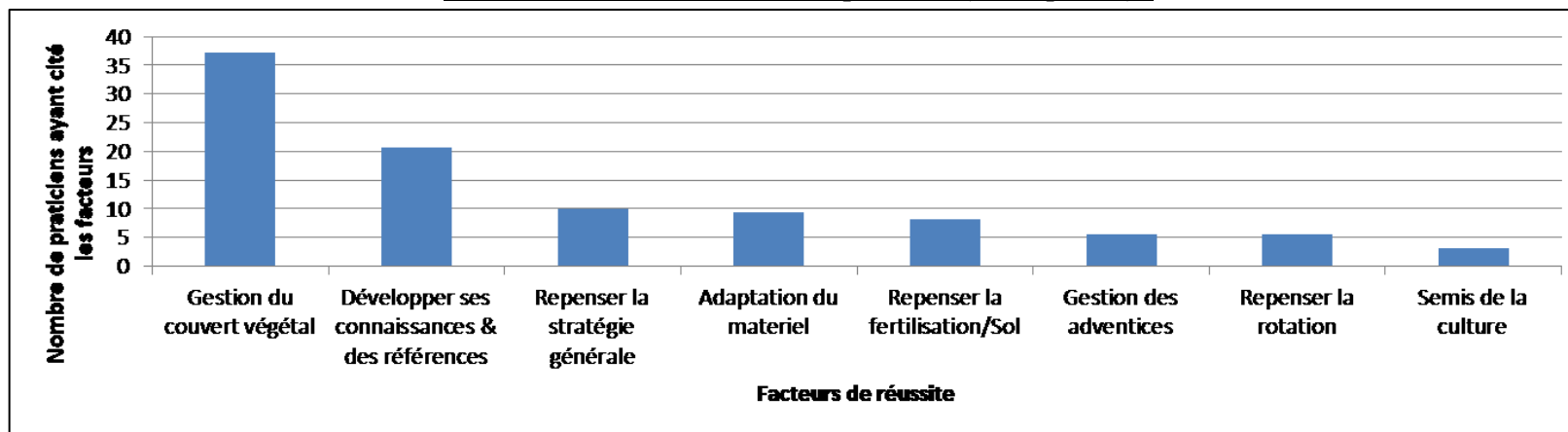
³⁷ Pour consulter les données complètes des tableaux relatifs à l'analyse bibliographique et l'analyse de l'enquête en ligne : lavincent.caboud@gmail.com ou jpeigne@isara.fr

Annexe 3 : Localisation des producteurs qui ont participé à l'enquête en ligne

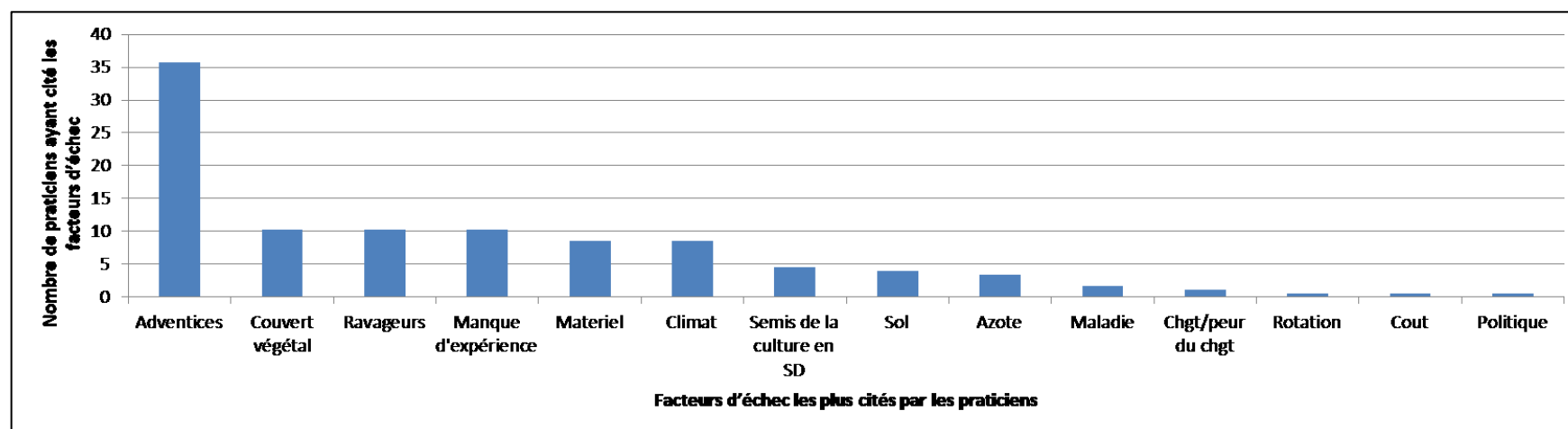
Les points verts correspondent aux praticiens orientés en agriculture biologique ; les points bleus sont les praticiens en agriculture conventionnelle et les points jaunes sont les praticiens en conversion AB

Annexe 4 : Facteurs de risques et d'échecs les plus cités par les praticiens de l'échantillon 1 (sans herbicide)

Premiers facteurs de réussite les plus cités (193 réponses) :



Premiers facteurs d'échec les plus cités (sur 176 réponses) :



Annexe 5 : Combinaisons couverts/cultures identifiées dans l'enquête en ligne

Echantillon 1 – Agriculteurs dans un mode de production sans herbicide :

Blé semé sous ...	Nombre de producteurs	Satisfaction
Couvert multispécifique (pois, féverole, etc.)	6	3,3
Trèfle blanc vivant	3	3
Luzerne vivante	7	3,43
Trefle quarrosum + alexandrie_roulé	1	2
Trèfle broyé	3	3
Trèfle gelé	1	4
Sorgho fourrager roulé	1	5
Vesce velue + vesce commune roulé	1	3
Tsol roulé	1	1
Couvert multispécifique roulé	2	4,5
Résidus de culture	18	2,9
Sarrasin roulé	1	1
Repousses lentilles	2	1,5
Pois	1	3
Moutarde roulé	1	3
Phacélie+fénugrec	1	1
Radis chinois roulé	1	2
Maïs semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Couvert multispécifique roulé	4	2,25
Pois vivant	2	2
Pois fourrager roulé	1	4
Féverole roulé	1	4
Phacélie roulé	1	2
Radis roulé	1	2
Trèfle incarnat roulé	1	2
Avoine/féverole roulé	1	3
Avoine/seigle roulé	1	2
Résidus de cultures	5	2,4
Vesce roulée	2	3
Vesce/chicorée roulée	1	3
Prairie	1	1
Couvert multispécifique vivant	1	2
Colza semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Résidus de culture d'hiver (céréales à paille)	4	2,5
Sorgho fourrager roulé	1	3
Trèfle violet	2	1
Trèfle blanc	1	2
Tsol semés sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Trèfle blanc vivant	1	1
Couvert multispécifique vivant	1	1
Couvert multispécifique roulé	1	1
soja semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Résidus de cultures	6	1,83
Seigle roulé	2	3,5
Avoine roulé	2	3,5
Céréales	1	3
Seigle fourrager roulé	1	4
Seigle fourrager + forrestier roulé	1	5

Couvert multispécifique	1	4
Couvert ensilé	1	3
vesce + seigle roulé	1	2
Vesce + seigle +moutarde roulé	1	2
Orge semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Trèfle violet	2	3
Résidus de cultures	4	3
Trèfle blanc vivant	1	3
Sarrasin	1	5
Lupin	1	3
Luzerne vivante	1	5
Epeautre semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Couvert multispécifique roulé	1	4
Luzerne	1	4
Prairie pâturée	1	2
Résidus de cultures	2	2
Sainfoin	1	3
Avoine semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Trèfle broyé	1	3
Résidus de culture	3	3,3
Prairie pâturée	2	2,5
Luzerne roulée	1	3
Trègle violet	1	3
Méteil semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Résidus de cultures	19	2,85
Trèfle	7	3,1
Luzerne	1	4
Repousses sorgho	1	4
Couvert fauché	2	3,5
Prairie pâturée	7	3,2
Prairie broyée	1	3
Seigle semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Couvert multispécifique broyé	1	1
Résidus de cultures	5	1,9
Céréales semés sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Trèfle	3	1,7
Couvert multispécifique roulé	1	2
Couvert multispécifique ensilé	1	1
Luzerne	2	4
Résidus de cultures	8	2,4
Triticale semés sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Résidus de cultures	2	3,5
Trèfle blanc	2	3
Féverole roulée	1	2
Couvert multispécifique roulé	1	5
Vesce + avoine	1	3
Trèfle violet	1	4

Echantillon 2 – agriculteurs en transition :

Blé semé sous ...	Nombre de producteurs	Satisfaction
Couvert multispécifique	15	4,4
Couvert roulé	2	4
Féverole	3	4
Luzerne	1	4
Prairie	1	3
Résidus de cultures	14	3,6
Trèfle violet	4	4
Trèfle blanc	1	3,8
Avoine semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Couvert roulé	1	3
Trèfle violet	1	2
Céréales semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Couvert végétal multispécifique	2	4
Féverole	1	4
Résidus de cultures	2	2,5
Orge semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Couvert multispécifique	9	3,4
Couvert roulé	1	4
Résidus de cultures	5	3,8
Féverole	3	3,4
Luzerne	1	3
Moha	1	3
Trèfle	1	3
Maïs semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Couvert multispécifique	6	4,2
Couvert roulé	2	4
Résidus de cultures	4	2,25
Féverole	2	3,5
Soja semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Couvert multispécifique	7	3,9
Couvert roulé	1	5
Résidus de culture	2	4,5
Phacélie	1	4
Tournesol semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Couvert multispécifique	1	3
Résidus de culture	1	2
Avoine	1	2
Féverole	1	3
Méteil semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Couvert multispécifique	1	4
Résidus de cultures	2	3,5
Luzerne	1	2
Triticale semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Couvert multispécifique	1	4
Résidus de cultures	1	3
Colza semé sous ...	NB de producteurs	Satisfaction
Couvert multispécifique	6	3,3
Couvert roulé	2	4
Résidus de cultures	7	2,7
Féverole	2	4
Trèfle	3	3

Annexe 6 : Brochure élaborée pour échanger avec les praticiens les premiers enseignements issus d'un atelier de conception exploratoire

→ Pour consulter l'ensemble de la brochure (12p.), elle est disponible sur le lien suivant :

http://www.itab.asso.fr/downloads/com-agro/brochure_sdsc_partie2.pdf

SEMIS DIRECT DE CULTURES DE PRINTEMPS SOUS COUVERT VEGETAL ROULE EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE

Partie 2 : Retour d'expériences et de discussions entre agriculteurs et chercheurs dans la Drôme


Brochure technique **Mars 2017**

En agriculture biologique, le recours répété au travail du sol pour gérer les adventices, préparer le sol ou incorporer des apports organiques peut dégrader la qualité des sols et affecter la durabilité des systèmes de production. Afin de développer des techniques biologiques productives et viables tout en respectant l'environnement, le semis direct sous couvert végétal roulé est l'une des alternatives les plus innovantes qui peut permettre de protéger le sol, limiter les adventices mais aussi réduire le temps de travail et la consommation énergétique.

Le semis direct (SD) a émergé au Brésil et fait partie des techniques culturales sans labour (TCSL) développées en 1930 aux Etats-Unis (**Figure 1**). En Europe, le semis direct se développe depuis les années 1970 en agriculture conventionnelle et suscite de plus en plus d'intérêts vis-à-vis des bénéfices socio-économiques apportés par la réduction du nombre d'interventions sur les parcelles (économie de carburant, diminution du temps de travail etc.). L'objectif est de préserver la fertilité des sols en répondant à l'un des principes de l'**agriculture de conservation** : minimiser la perturbation du sol.

Le SD correspond au semis d'une culture sans travail du sol depuis la récolte de la culture précédente. Le sol est perturbé uniquement au niveau de la ligne de semis sur 2 à 5 cm de profondeur. Par conséquent, une forte quantité de résidus est laissée sur le sol et assure une couverture de l'ordre de 30 à 100 % de la surface du sol.

Le semis direct sous couvert végétal dans la Drôme



SOMMAIRE

1. La pratique du SDSC en France
2. Les perspectives du SDSC chez des céréaliers drômois
3. La construction de nouvelles rotations
4. Exemples de successions culturales avec du SDSC



Document sous Licence Creative Commons sans possibilité d'utilisation commerciale



Pour citer ce document : Vincent-Caboud L., Peigné J., Casagrande M., 2017. Semis direct de cultures de printemps sous couvert végétal roulé en agriculture biologique. Partie 2: Retour d'expériences et de discussions entre agriculteurs et chercheurs dans la Drôme. Edition ISARA-Lyon/ITAB.



L. Vincent-Caboud

Coordination/rédaction : Laura Vincent-Caboud (ISARA-Lyon), Joséphine Peigné (ISARA-Lyon), Marion Casagrande (ITAB)

Remerciements : Laetitia Fourié (ITAB), Laurence Fontaine (ITAB), Erin Silva (Université de Madison, Wisconsin), Caroline Halde (Université Laval, Québec)


TECHNIQUES CULTURALES SANS LABOUR

PSEUDO-LABOUR

20 - 40 cm

TRAVAIL RÉDUIT

> 15 cm

TRAVAIL SUPERFICIEL

< 15 cm

STRIP-TILL

5 - 15 cm

SEMIS DIRECT

2 - 5 cm

Figure 1 : Les différentes techniques de travail du sol sans labour

Annexe 7 : Brochure technique élaborée pour échanger les connaissances scientifiques avec les praticiens

→ Pour consulter l'ensemble de la brochure (12p.), elle est disponible sur le lien suivant :

<http://www.itab.asso.fr/downloads/com-agro/brochuresdscpartie1web.pdf>

SEMIS DIRECT DE CULTURES DE PRINTEMPS SOUS COUVERT VEGETAL ROULE EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE

Partie 1 : Les apports de la recherche Nord-Américaine


Brochure technique
Mars 2017

En agriculture biologique, le recours répété au travail du sol pour gérer les adventices, préparer le sol ou incorporer des apports organiques peut dégrader la qualité des sols et affecter la durabilité des systèmes de production. Afin de développer des techniques biologiques productives et viables tout en respectant l'environnement, le semis direct sous couvert végétal roulé est l'une des alternatives les plus innovantes qui peut permettre de protéger le sol, limiter les adventices mais aussi réduire le temps de travail et la consommation énergétique.

Le semis direct (SD) a émergé au Brésil et fait partie des techniques culturales sans labour (TCSL) développées en 1930 aux Etats-Unis (**Figure 1**). En Europe, le semis direct se développe depuis les années 1970 en agriculture conventionnelle et suscite de plus en plus d'intérêts vis-à-vis des bénéfices socio-économiques apportés par la réduction du nombre d'interventions sur les parcelles (économie de carburant, diminution du temps de travail etc.). L'objectif est de préserver la fertilité des sols en répondant à l'un des principes de l'**agriculture de conservation** : minimiser la perturbation du sol.


Le SD correspond au semis d'une culture sans travail du sol depuis la récolte de la culture précédente. Le sol est perturbé uniquement au niveau de la ligne de semis sur 2 à 5 cm de profondeur. Par conséquent, une forte quantité de résidus est laissée sur le sol et assure une couverture de l'ordre de 30 à 100 % de la surface du sol.

Le semis direct sous couvert végétal en Amérique du Nord



SOMMAIRE

1. Les enjeux de la technique
2. Réussir l'implantation du couvert
3. Détruire le couvert végétal
4. Planter la culture principale
5. Construire sa rotation culturale



Document sous Licence Creative Commons sans possibilité d'utilisation commerciale

Pour citer ce document : Vincent-Caboud L., Peigné J., 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. Edition ISARA-Lyon/ITAB.

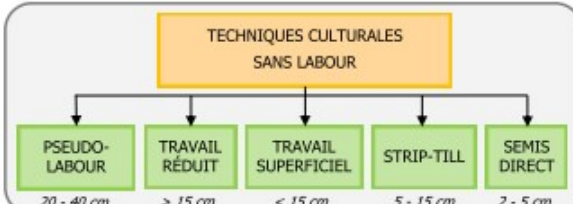




Figure 1 : Les différentes techniques de travail du sol sans labour


Coordination/rédaction : Laura Vincent-Caboud (ISARA-Lyon), Joséphine Peigné (ISARA-Lyon), Marion Casagrande (ITAB)


Remerciements : Laetitia Fourié (ITAB), Laurence Fontaine (ITAB), Erin Silva (Université de Madison, Wisconsin), Caroline Halde (Université Laval, Québec)



Une école d'ingénieurs au cœur de la vie

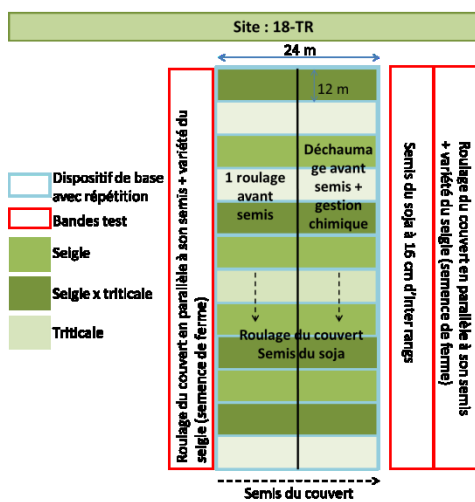
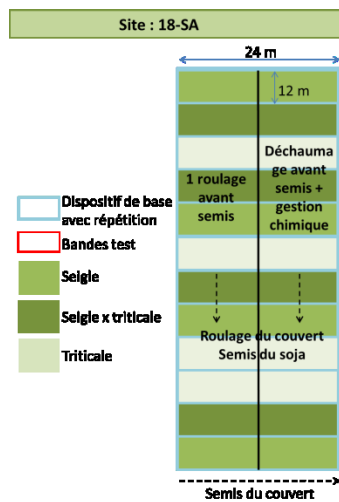
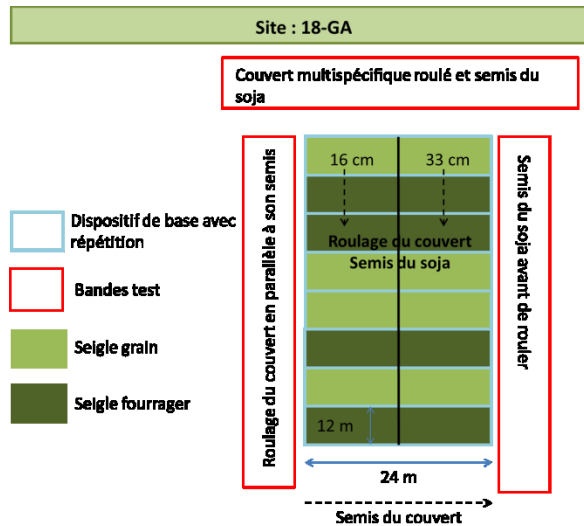
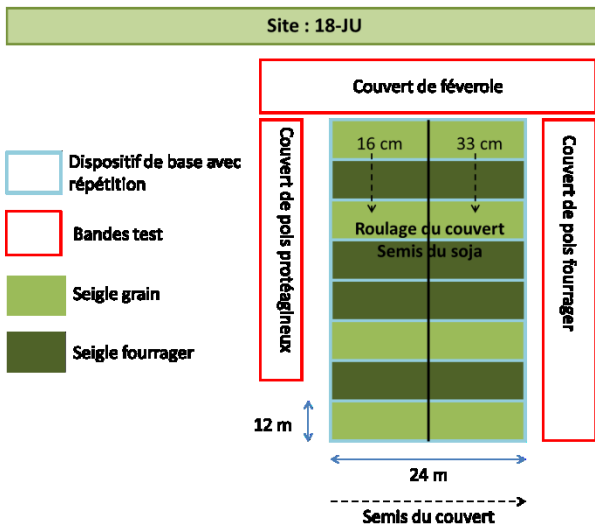
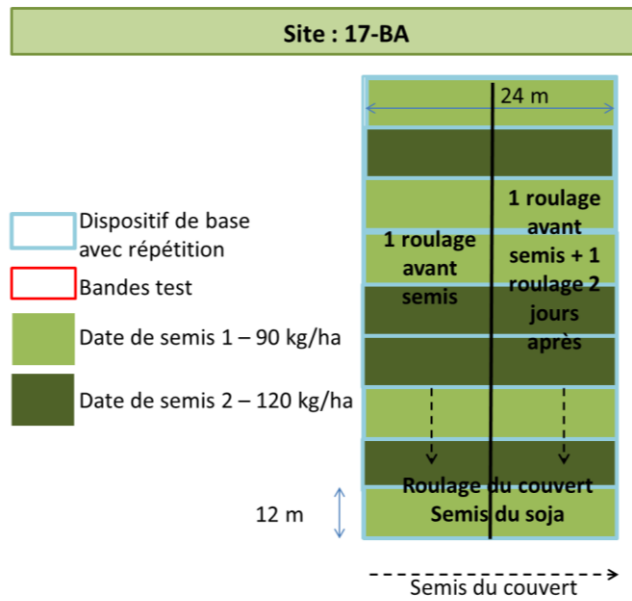
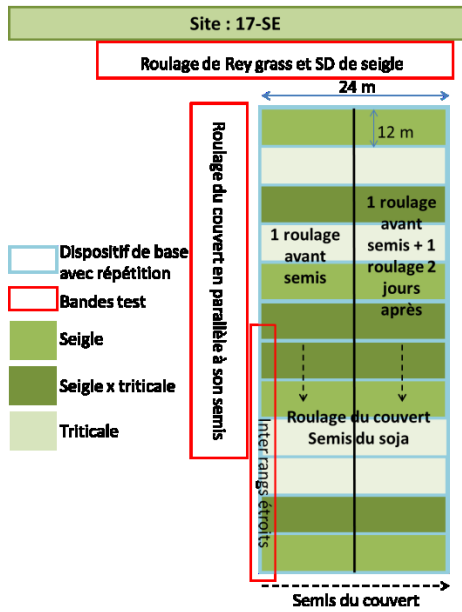




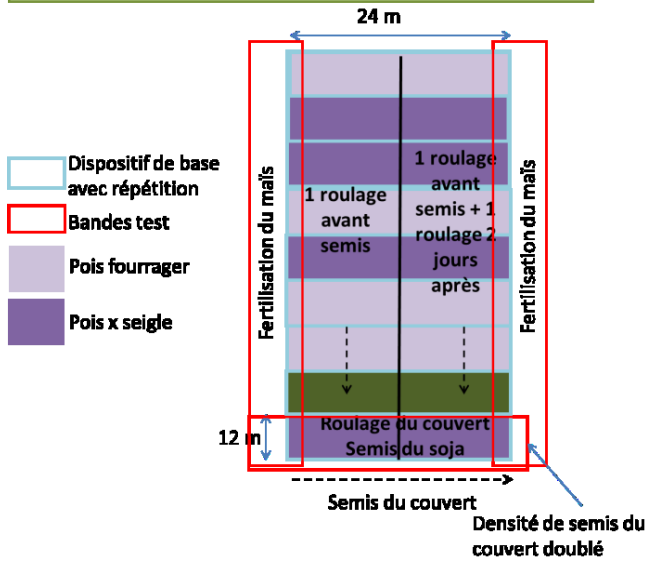


E. Silva (Université Madison du Wisconsin)

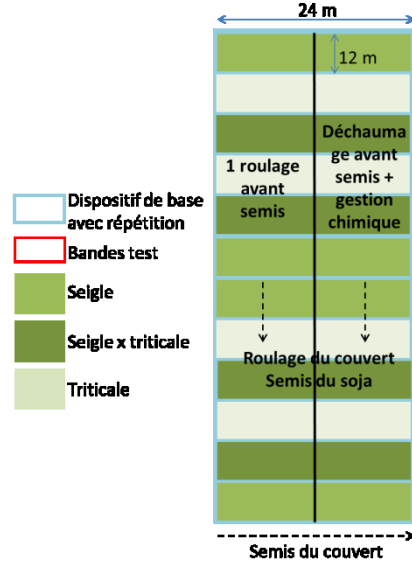
Annexe 8 : Dispositifs expérimentaux mis en place au niveau des différents sites



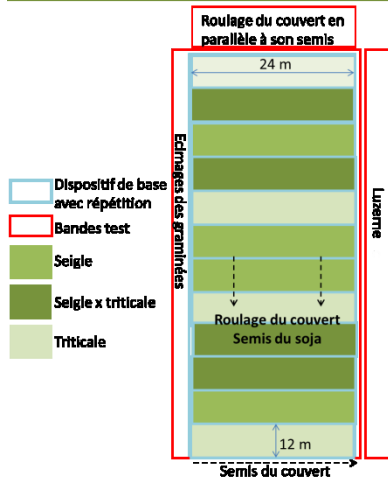
Site : 18-BAmâis



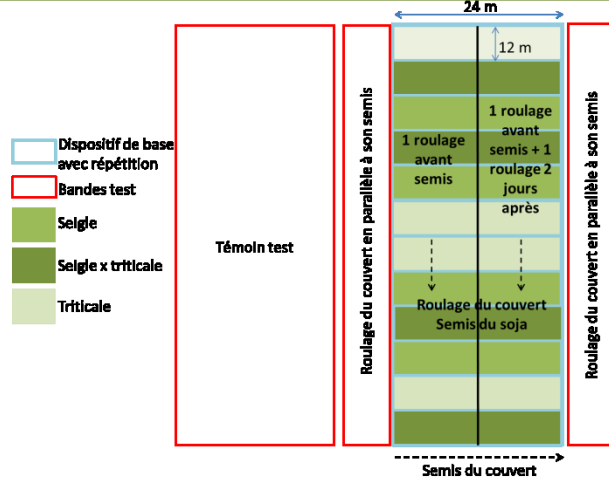
Site : 18-CR



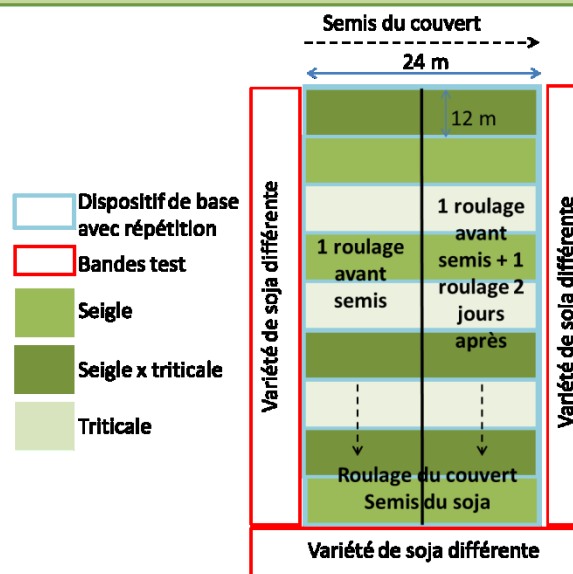
Site : 18-BA



Site : 18-JA



Site : 18-VA



Annexe 9 : Détail des itinéraires techniques menés entre 2016 et 2018

Sites	17-SE	17-BA	18-BA	18-BAm	18-JA	18-VA	18-TR	17-SA	18-SA	18-CRE	18-GA	18-JU
Localisation	Châteauneuf -sur-Isère, Drôme		Thil, Ain		Villette- de-vienne, Isère	Brangués, Isère	Les côtes- d'Arey, Isère		Limonest, Rhône	Pusignan , Rhône	Chalon, Isère	Chonas l'amballand, Isère
Structure	EA		EA		EA	EA	EA		Lycée agricole	Station	EA	EA
Mode de production	AB		AB		AB	AB	Conv.		Conv.	Conv.	AB	AB
Précédent	Blé	Maïs	Luzerne	Soja	blé	Blé	blé		blé	blé	camomille	blé
Type de sol	Sablo- limoneux		Limono-sableux		Limons fins	Limoneux argileux	Limoneux fins		Sablo-lomoneux	Limono- sableux	Limoneux	Limoneux fins
Variétés des couverts	Ovid (S) ; Vuka (T)	Dukato (S)	Dukato (S) ; Vuka (T)	EFB33 (P) ; Dukato (S)	Dukato (S) ; Vuka (T)	Dukato (S) ; Vuka (T)	Dukato (S) ; Vuka (T)	Dukato (S) ; Vuka (T)	Dukato (S) ; Vuka (T)	Dukato (S) ; Vuka (T)	Dukato (gr.) ; Protector (four.)	Dukato (gr.) ; Protector (four.)
Semis - CV	23 sept.-16	22 sept. ou 19 oct.-16	25 août- 17	11 oct.-17	29 août-17	22 août-17	21 sept.-17	3 nov.-16	13 oct.- 17	8 sept.- 17	30 août-17	12 oct.-17
Densité de semis -CV (kg/ha)	200	90 ou 120	200	90 (S) 70 (P)	200	200	200	200	200	200	200	200
Semis-culture	16 mai-17	23 mai-17	18 mai- 18	4 mai-18	25 mai-18	29 mai-18	19 mai-18	-	-	22 mai- 18	19 mai-18	25 mai-18
Densité de semis culture (gr/ha)	605 000	610 000	610 000	100 000	530 000	540 000	530 000	-	-	600 000	530 000	530 000
Variété culture	ES MENTOR	ES MENTOR		FUTURIX	ES MENTOR	KLAXON	ES MENTOR	-	-	ES MENTO R	ES MENTOR	ES MENTOR
Inter rangs (cm)	50	50	50	60	33	50	33	-	-	50	33 ou 16	33 ou 16
Récolte	19 oct.-17	25 sept.-17	26 sept.- 18	27 sept.-18	18 sept.-18	20 sept.-18	26 sept.-18	-	-	27 sept.- 18	17 sept.-18	-

AB : Agriculture Biologique ; Conv. : Agriculture Conventiionnelle ; S : seigle ; T : triticales ; P : Pois ; gr. : grain ; four. : fourrager


Annexe 10³⁸ : Exemple de fiches d'avancement intermédiaires mobilisées pour échanger avec les praticiens de l'ensemble des essais menés

FICHE DE SUIVIS N°3 1

ESSAIS DE SEMIS DIRECT SOUS
COUVERT VEGETAL ROULE

MAI 2018 GRAMINÉES SEMÉES À 200 KG/HA

PRINTEMPS 2018 - SUIVIS DES COUVERTS



Un tout d'experts au cœur de la vie

ESSAI 1 - (ISERE)

(photos prises le 3 mai 2018)

Mode de production de la ferme: AB
Essai de soja sous couvert végétal de seigle, triticale ou mélange de ces deux espèces

Date du semis: 22 août 2017

Le couvert est moins dense que l'objectif visé (avortement des thalles) et présente une faible hauteur.

—> automne sec puis excès d'eau en hiver

Le seigle est toutefois un peu plus développé et permet de mieux gérer les adventices (cf. Fiche n°4).



ESSAI 2 - (AIN)




³⁸ Pour consulter l'ensemble des fiches de suivis intermédiaires des essais, vous pouvez nous contacter par mail : lavincent.caboud@gmail.com ou jpeigne@isara.fr

Annexe 11 : Guide d'entretien bilan réalisé auprès des agriculteurs – expérimentateurs

GUIDE D'ENTRETIEN BILAN

Cet entretien va durer entre 2-3h et vise à réaliser un bilan du travail réalisé autour de l'essai semis direct et de l'ensemble de la démarche sur laquelle vous vous êtes impliqué. L'entretien se déroulera en 3 temps : une première partie où nous allons revenir sur les résultats/observations que nous avons réalisé ensemble pendant toute la saison pour discuter des performances agronomiques et socio-économiques de l'ITK testé (autour des CR d'essais que je vais vous présenter et en comparaison avec vos pratiques habituelles). Il s'agira alors de discuter et compléter une grille d'évaluation qui contient certains critères pour lesquels vous pourrez donner une note allant de 1 à 6 selon votre niveau de satisfaction. Je vous poserai ensuite quelques questions ouvertes pour lesquelles vous pourrez répondre librement. Nous essaierons notamment de voir ensemble dans quel cadre ces ITK testés pourraient s'intégrer dans votre système. Enfin, la dernière partie de cet entretien consistera à évaluer ensemble la démarche globale et discuter de vos perspectives.

ADVENTICES

Modalités testées	Flore adventices	% recouvrement des adventices	Gestion des adventices (échelle de 1 à 6)
Pratiques habituelles			
Bandes test			

Commentaires divers :

Propositions de leviers pour améliorer la gestion des adventices :

COUVERT VEGETAL – AVANT ROULAGE

Modalités testées	Rapidité d'implantation	% recouvrement du sol	Recouvrement du sol	Densité du couvert	Biomasse	homogénéité	Vigueur du couvert	Hauteur
Pratiques habituelles								
Bandes test								

Commentaires divers :

Propositions de leviers pour améliorer le développement du couvert :

COUVERT VEGETAL – APRES ROULAGE

Modalités testées	Epaisseur du mulch	Répartition du mulch	Nb de repousse du couvert	Efficacité du roulage	Dynamique de dégradation du couvert
Pratiques habituelles					
Bandes test					

Commentaires divers :

Propositions de leviers pour améliorer la gestion du couvert :

CULTURES

Modalités testées	Contact graine/sol	Bourrage semis	Profondeur semis	Levée	Hauteur	Hauteur 1 ^{ère} G	Nb de gousses	Nb de ramification	Rdt	Rdt satisfacti on
Pratiques habituelles										
Bandes test										

Commentaires divers :

Propositions de leviers pour améliorer la performance de la culture :

FERTILITE DU SOL

Modalités testées	Disponibilité de l'azote	Vie du sol	Fertilité du sol
Pratiques habituelles			
Bandes test			

Commentaires divers :

Propositions de leviers pour améliorer la fertilité du sol :

RAVAGEURS-MALADIES

Modalités testées	Citer les ravageurs/maladies observés	% dégâts ravageurs	Gestion ravageurs	% dégâts maladies	Gestion maladie
Pratiques habituelles					
Bandes test					

Commentaires divers :

Propositions de leviers pour améliorer la gestion des ravageurs/maladies:

SOCIO-ECONOMIE

Modalités testées	Coût semences	Nb intervention	Quantité de carburant	Temps de travail	Difficultés technique de mise en œuvre	Accessibilité au matériel	Retour sur investissement
Pratiques habituelles							
Bandes test							

Commentaires divers :

Propositions de leviers pour améliorer la viabilité économique :

Pour conclure sur cette 1^{ère} partie autour des performances de l'essai mené ensemble, Comment vois-tu les réussites de l'essai ? les échecs ?

(Relances : peux-tu me citer 1 ou 2 résultats positif de l'essai que tu en retires ? 1 ou 2 limites que tu retiens ?)

PARTIE 2 – Contextualisation à la ferme (partie réalisée selon une méthode semi directive)

Par rapport à l'essai que nous venons de conduire, si on devait maintenant intégrer ces ITK innovants dans ta ferme, qu'est-ce que cela impliquerait ?

Echelle à aborder :

- **Parcelle** : le type de sol à privilégier, changements techniques, etc.
- **Rotation culturale** : Quels changements sur tes rotations en place ? Quelles stratégies de fertilisation ? Quelle stratégie de travail du sol ? A quelle nouvelle idée de rotation aurais-tu pensé suite à notre travail ?
- **EA** : Matériel ? (pour gérer le couvert, les semis, etc.), Organisation ? (Calendrier culturale, charge de travail, etc.), Main d'œuvre ? (compétences supplémentaires, pénibilité du travail), Débouchés ? (valorisation, qualité des récoltes, etc.)

PARTIE 3 – BILAN DE LA DEMARCHE
(Tableau à remplir par le praticien)

	Notation du niveau de satisfaction sur une échelle de 1 à 6	Des suggestions d'amélioration ?
Démarche générale – (conduite de l'essai, échanges, visites d'essais, etc.)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5	
Réponses aux attentes initiales	⁶ <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5	
Pertinence du type de d'essai expérimental testé	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5	
Niveau de participation aux différents choix opérés pendant la conduite de l'essai	⁶ <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5	
Niveau de concertation agriculteur-recherche pour la mise en place et la conduite de l'essai	⁶ <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5	

6

- Qu'est-ce que t'a apporté le travail que nous avons réalisé ensemble au travers de l'essai et des échanges collectifs que nous avons pu avoir lors des visites d'essais ? (Apport de connaissances ?)
- Peux-tu rapidement me faire un retour sur les principaux avantages et contraintes de la démarche ?

(qu'est-ce que tu as apprécié le plus ? le moins ?)

Avantages	Limites

PERSPECTIVES

- Quelles sont tes perspectives (court terme & long terme) par rapport à cette technique ?

Relances : Serais-tu prêt à de nouveau tester un ITK innovant chez toi ? une rotation culturale intégrant ce type de technique ? la rotation discutée précédemment ?

- Est-ce que cela t'es arrivé cette année de discuter de l'essai avec d'autres agriculteurs/conseillers ou techniciens (hors rencontres organisées dans le cadre de ma thèse) ?
Est-ce qu'il serait possible d'avoir leur contact ?

Pour finir, si tu devais conclure en citant 3 mots qui te viennent à l'esprit sur cette année d'essais et d'échanges ?

Annexe 12 : Article publié dans le journal *Agronomy*

Cover Crop Effectiveness Varies in Cover Crop-Based Rotational Tillage Organic Soybean Systems Depending on Species and Environment

Vincent-Caboud, Laura¹, *, Vereecke, Léa², Silva, Erin² and Peigné, Joséphine¹,*

¹Department of Agroecology and Environment, ISARA-Lyon (member of the University of Lyon), 23 rue Jean Baldassini, F-69364 Lyon Cedex 07, France, jpeigne@isara.fr

²Department of Agronomy, University of Wisconsin-Madison, Madison, 53706 WI, USA; vereecke@wisc.edu; emsilva@wisc.edu

*Correspondence: lavincent.caboud@gmail.com

Abstract: Organic farming relies heavily on tillage for weed management; however, intensive soil disturbance can have detrimental impacts on soil quality. Cover crop-based rotational tillage (CCBRT), a practice that reduces the need for tillage and cultivation through the creation of cover crop mulches, has emerged as an alternative weed management practice in organic cropping systems. In this study, CCBRT systems using cereal rye and triticale grain species are evaluated with organic soybean directly seeded into a rolled cover crop. Cover crop biomass, weed biomass, and soybean yields were evaluated to assess the effects of cereal rye and winter triticale cover crops on weed suppression and yields. From 2016-2018, trials were conducted at 6 locations in Wisconsin, USA and Southern France. While cover crop biomass did not differ among the cereal grain species tested, the use of cereal rye as the cover crop resulted in higher soybean yields (2.7 t ha⁻¹ vs. 2.2 t ha⁻¹) and greater weed suppression, both at soybean emergence (231 vs. 577 kg ha⁻¹ of weed biomass) and just prior to soybean harvest (1178 vs. 1545 kg ha⁻¹). On four out of six sites, cover crop biomass was lower than the reported optimal (<8000 kg ha⁻¹) needed to suppress weeds throughout soybean season. Environmental conditions, in tandem with agronomic decisions (e.g., seeding dates, cultivar, planters, etc.), influenced the ability of the cover crop to suppress weeds regardless of the species used. In a changing climate, future research should focus on establishing flexible decision support tools based on multi-tactic cover crop management to ensure more consistent results with respect to cover crop growth, weed suppression, and crop yields.

Keywords: weed management; organic farming; mulch; weed dynamic; cereal grain cover crop; roller-crimper

1. Introduction

Worldwide, land under certified organic production reached 69,8 million hectares in 2017 [1]. Across the global organic land base, the production of organic soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] is increasing, with 429,621 ha under production in 2017 [1]. With more than 39,996 ha of organic soybean grown in 2014, the United States is the third largest producer of organic soybean [1–3]. In recent years, the European market is also rapidly expanding, with 72,710 ha of organic soybean production in 2016 [1,4]. Within Europe, France leads organic soybean production with 24,615 ha.

Improved weed management and increased crop productivity have emerged as two main levers to facilitate the expansion of organic soybean acreage and meet the production demand [5,6]. As the prohibition of most synthetic substances is included in global organic regulatory frameworks, alternative techniques have been developed to manage weeds, including mechanical cultivation, strategic crop rotation, and the use of cover crops [4–7]. For most organic farmers, soil tillage is necessary to manage weeds, prepare the seedbed and incorporate organic inputs [11]. However,

intensive soil disturbance may decrease soil quality (e.g., reducing organic matter, increasing soil erosion, etc.), thereby raising concerns on the sustainability of organic farming practices [12].

To maintain soil fertility, organic farmers are encouraged by the Food and Agriculture Organization of the United Nation (FAO) to reduce soil tillage, improve soil coverage and diversify crop rotation [10–12]. Among all the techniques developed to reduce tillage, organic cover crop-based rotational tillage systems (organic CCBRT) has emerged as a practice of great interest. These systems reduce tillage through the establishment of cash crops into high residue cover crops terminated with a roller crimper [13–16]. The cover crop mulch remains on the soil surface until cash crop harvest, preventing weed emergence and thus eliminating the need for mechanical weed management, maintaining soil quality while reducing labor and fuel consumption. In addition to creating a physical barrier which reduces weed emergence, an additional mechanism of weed suppression includes the competition of the cover crop with weeds for water, nutrients and light [20,21]. Further, weed control may also be enhanced through allelopathic compounds released by the cover crop which can inhibit weed germination [19,21–25].

Currently, reduced tillage practices implemented within conventional row crop systems are highly dependent on the use of chemical herbicides [17,27–29]. Growing concerns about the detrimental impacts of herbicides and the increasing occurrence of herbicide resistant weeds has stimulated research interest for CCBRT in both organic and conventional production systems, especially in the United States where this technique has seen significant growth over the past decade [19,30,31]. The technique is less developed in Europe, but farmers' interest in preserving soil quality is increasing, as shown by an European survey conducted in 2012 on organic conservation practices [32].

Previous research has shown that effective weed control can be achieved through CCBRT until crop harvest if the cover crop biomass reaches from 8,000 to 10,000 kg ha⁻¹ according conditions (e.g., climate, weed infestation, weed specie) before termination [16,33]. Cover crop species selection also serves as a fundamental tool to (1) optimize cover crop biomass, (2) inhibit weed germination through the release of allelopathic compounds and (3) ensure adequate termination of the cover crop with a roller-crimper [34–36].

Several cereal grain cover crops perform well in CCBRT systems with soybean cash crops, including cereal rye (*Secale cereale* L.), triticale (x *Triticosecale* Wittmack), barley (*Hordeum vulgare* L.), oat (*Avena sativa* L.), and winter wheat (*Triticum vulgare* L.) [37,38]. Their main advantages over legume species are the high biomass production and consistent termination with a roller-crimper. Among the cereal grain cover crops, cereal rye has consistently superior performance in the organic CCBRT system, producing high amounts of dry matter and reaching anthesis (Zadoks stage 69) [36,37], the stage of maturity necessary for mechanical termination, earlier than other cereals [19,21,39,40]. Cereal rye has also exhibits a high degree of allelopathy, inhibiting weed seed germination [41,42]. Incomplete mechanical termination of cereal rye in organic CCBRT may result in volunteer cereal rye plants in subsequent phases of the crop rotation, which results in contamination of following crops with rye grain, affecting both quality and yields of subsequent crops [18,40,43,44]. Thus, in recent years, triticale and barley, species with lesser propensity to produce volunteer plants, have been explored as alternative cover crops to rye. Additionally, the more prostrate growth habit and wider leaves characteristic of these species may provide greater light interception, improving early season weed control [39,45]. However, a dearth of references exists on the comparative performances of different cereal species in organic CCBRT systems.

While previous studies have demonstrated the ability of cereal rye cover crops to suppress weeds, the success of the CCBRT technique remains highly variable across years and location [18,46]. Investigation of the performance of organic CCBRT systems over a broad range of pedoclimatic conditions with the comparison of several cereal grain cover crops is needed to understand the reasons for failures and achieve more consistent success. Alternative cereal grain species such as triticale could provide similar results than cereal rye and provide benefits for facing soil and climate condition to reach consistence cover crop performance. The objective of this study was to examine the performance of two cover crop species used in combination with soybean in an organic CCBRT system under different pedoclimatic conditions through a multi-site experiment over two years: (1) in upper-Midwestern USA and (2) Southeastern France. This study aimed (i) to determine which cover crop species leads to the highest soybean success rate and (ii) determine the drivers of variability in cover crop performance, weed control and soybean yields observed in different pedoclimatic conditions.

2. Materials and Methods

2.1. Site description

The trials were conducted on certified organic land at two locations in 2017 and four in 2018, located in the upper Midwestern U.S. and in Southern France (Table 1). The US sites are characterized by short growing season with high seasonal rainfall, cold winter conditions, and warm summer temperatures, as compared to the European sites which were defined by a more temperate climate, with consistent cool conditions and lower precipitation.

Table 1. Description of the 6 experimental sites (soil and climate conditions).

Site	Year	Previous Crop	Soil Type	Organic Matter (%)	pH	Climate (Location)	Irrigation System (yes/no)
17-Arl. A1	2017	Alfalfa	Plano silt loam	3.7	7.3	Humid continental climate, 889 mm, 9.45°C (UWAARS; 43°18' N; 89°21' W; 315 masl)	No
18-Arl. A2	2018	Corn					
17-Frce B	2017	Winter wheat	Loamy sand	2.6	7.8	Mediterranean climate, 835 mm, 12.1°C (45°00'40.2"N 4°59'07.1"E)	Yes
18-Frce C	2018	Winter wheat	Fine loam clay	4.9	8.4	Oceanic and temperate climate, 877 mm, 11.3°C (45°40'51.3"N 5°32'13.9"E)	No
18-Frce D	2018	Alfalfa	Loamy sand	2.7	8.5	Semi continental climate with Mediterranean influence, 785 mm, 11.5°C (45°49'10.9"N 5°02'05.6"E)	yes
18-Frce E	2018	Winter wheat	Fine loam	1.6	7.5	Warm temperate climate, 797 mm, 11.5°C (45°35'09.9"N 4°55'29.3"E)	No

Site A is the University of Wisconsin Arlington Agricultural Research Station (UW-AARS) in Arlington, WI, USA. The four other locations are in Southern France Rhône-Alpes region, with site B in Drôme, site C in Northwestern Isère, site D in Ain and site E in Northeastern Isère. Soil types and

climates are presented in Table 1. At Arlington (site A), fields have been certified organic since 2009 and were under alfalfa cover crop from 2014 through 2016. The organic CCBRT system trial was initiated in 2017 and relies on the common four-year rotation practiced in the upper Midwestern U.S., including, corn, soybean, fallow and small grain[19]. In Southern France (sites B, C, D and E), annual trials were implemented in the typical crop rotation practiced by farmers under organic grain system which is based on similar crops rotation as encountered in the upper Midwestern U.S. (i.e., winter wheat, corn, soybean, alfalfa). At sites B and E, reduced tillage was practiced throughout the prior 10 year period, while the historical management practices at C and D sites relied on traditional tillage. Sites B, C and D have been certified organic for 13-27 years, while site E has been managed organically for 3 years.

2.2. Experimental design and crop management

At each location, two cover crop species were compared (cereal rye and triticale) using a randomized complete block design with four replications. The detailed field operations are presented in Table 2. Site A (Arlington, WI, USA) was a 0.48 ha field with 67x9m sub-plots. The French sites (B, C, D and E) were 0.23 ha fields with 24x12 m sub-plots. Winter rye, ['Aroostook' (site A); 'Dukato' (site C, D, E); 'Ovid' (site B)] and winter triticale ['NE426GT' (site A); 'Vuka' (site B, C, D, E)] were planted at the end of summer or early fall of 2016 and 2017 (Table 2). Different 3 m wide drills were used depending on the location (site A - Model 750, John Deere, Moline, IL; site B and E - Sulky Master; site C - Saphir 7/400-DS 125, Lemken). On site D, the drill was a 4 m wide Vitasem 402 A, Pottinger. Planting depth was standardized at 2.5 cm.

Roller-crimpers of different widths, weight and manufacturers were used to terminate the cover crops (site A - 4.6-m, 1360 kg, I and J Manufacturing, Gap, PA; sites B, C and E - 3-m, 1400 kg, University of Lyon 1, Rhône-Alpes region, France; site D – 6 m, 3300 kg, FACA, Sky Agriculture). Soybeans were planted and cover crops were terminated when the latter reached 50% to 100% anthesis (Zadoks growth stage 65-69) both years, thus resulting in different soybean planting dates depending on year.

Soybeans were planted with a 4.6-m wide conservation tillage planter in Wisconsin (site A) (Model 1750 Max Emerge Plus, Conservation Tillage, John Deere, Moline, IL); a 6-m wide no-till drill on site C and D (Easydrill W 6000, Sky Agriculture); a 3-m wide no-till drill on site E (Easydrill 3000 Fertilisem, Sky Agriculture); and a 4-m wide planter on site B (Maxima 2 TI M, Kuhn)(see Table 2 for row spacing). Crimping and planting were performed the same day in two separate passes across the field, except for 18-Free E site where both crimping and planting were performed as a one-pass operation.

Table 2. Field operations at the different experimental sites.

Sites	Primary Tillage	CC ¹ Planting	CC Seeding Rate (kg ha ⁻¹)	CC row Spacing (cm)	CC Rolling & Soybean Planting	Number of CC growth days	Soybean Seeding Rate (seed ha ⁻¹)	Soybean Cultivar	Soybean Row Spacing (cm)
17-Arl. A1	Aug. 16, Aug. 22, Sept. 2, Sept. 19, 2016	Sept. 19 (triticale), Sept. 26 (rye) ² , 2016	201.75	19	May 26 & May 30 (Rye) / June 8 (Triticale), 2017	273 (rye) / 262 (triticale)	555,986	Viking 0.1706	76.2
18-Arl. A2	Sept. 29, Oct. 2, 2017	Oct. 2, 2017	201.75	19	June 6 (rye)/ June 11 (triticale), 2018	247 (rye) / 252 (triticale)	555,986	Viking 0.1706	76.2
17-Frce B	Jul.9, Aug. 15, Sept. 15, 2016	Sept. 23, 2016	200	16.5	May 16, 2017	235	605,000	ES Mentor	50
18-Frce C	July 15, Aug. 8, Aug. 21, 2017	Aug. 22, 2017	200	12.5	May 29, 2018	280	535,000	Klaxon	50
18-Frce D	Jul. 25, Aug. 10, Aug. 21, Aug. 24, 2017	Aug. 25, 2017	200	12.5	May 18, 2018	266	600,000	ES Mentor	50
18-Frce E	July 18, Aug. 14, Aug. 25, 2017	Aug. 29, 2017	200	16.5	May 25, 2018	269	535,000	ES Mentor	33

1 Cover crop

2 High amounts of precipitation during cover crop planting on 19th September prevented its completion on the same day. Wet conditions did not allow for the completion of cover crop planting until the 26th September

2.3. Data collection

Weather data for site A was obtained from a meteorological station located at UW-AARS (from 2016 to November 14th of 2017) and the Michigan State University Enviroweather Service (from November 15th of 2017 to 2018). In France, individual stations were used for each site: Valence-Chabeuil (site B), Bourgoin (site C), Lyon-Bron (site D) and Reventin (site E). Weather data was collected from the fall of 2016 to the fall of 2018.

Cover crop biomass (in kg of dry matter.ha⁻¹) was determined by collecting aboveground biomass in four randomized quadrats per plots before cover crop termination (quadrat size 0.5 x 0.75 m² in France, 0.5 x 0.5 m² in Wisconsin). The samples were dried at 80°C until constant weight. Cover crop height was also recorded on 20 randomized plants per plots.

Weed biomass (in kg of dry matter.ha⁻¹) was determined by collecting aboveground biomass in three randomized 0.5 x 0.75 m² quadrats per plots centered on the row at two different dates: (i) Date 1 in the summer (July or August) and (ii) Date 2 in the fall (September) prior to soybean harvest. Samples were dried at 80°C until constant weight. Weed species were identified on each plots of each site in the summer (Date 1) to document the dominant weed species.

Soybean stands were determined by counting emerged plants on three randomized 4 linear meters portions of the rows within 3 weeks after planting. Soybean aboveground biomass was estimated at the flowering stage (between R3 and R5 soybean stage) on three randomized 2 linear m per plot. Soybean height was measured on 15 randomized soybean plant per plots at the mid-flowering stage (between R3 and R5 soybean stage). In France, to estimate soybean yields, soybean aboveground biomass and soybean grain weight were measured on 2 linear m. Samples were replicated 3 times per plot or 12 times per cover crop species (cereal rye and triticale). At Arlington (site A), yields were measured using a 4.6 m wide combine (Gleaner, AGCO) in 2017 and a 2-row plot combine in 2018.

2.4. Statistical Analysis

Linear mixed models were used to evaluate the effect of rye and winter triticale on cover crop height and biomass, weed biomass (Date 1 and Date 2), soybean population, biomass at flowering and yield. “Cover crop species” was treated as a fixed effect. The 6 sites and 8 plots per sites were treated as a random effect. The “site” factor refers to “location x year”. The following model was used for analysis:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{jk} + \epsilon_{ijk}$$

where μ is the fixed factor (cover crop specie), α the first random effect (sites), β the second random effect (plots), γ the interaction between both random effect factors, ϵ the error term, i a particular cover crop specie, j a particular site (location x year) and k refer to a particular plot.

ANOVA per factor were also conducted for each site. Cover crop height, soybean height and yield met the assumptions for analysis of variance (ANOVA). Cover crop biomass, weed biomass at Date 1 and Date 2, as well as soybean density and biomass, were transformed as needed to meet the assumption for analysis of variance using square root transformation. We used the R software for every statistical analysis in R version 1.1.463 © RStudio, Inc, and more precisely the lme4 package for the linear mixed models [47]. Statistical significance of the results was evaluated at a p-value < 0.05 and treatment means were compared using Tukey’s pairwise comparison.

3. Results

3.1. Climate

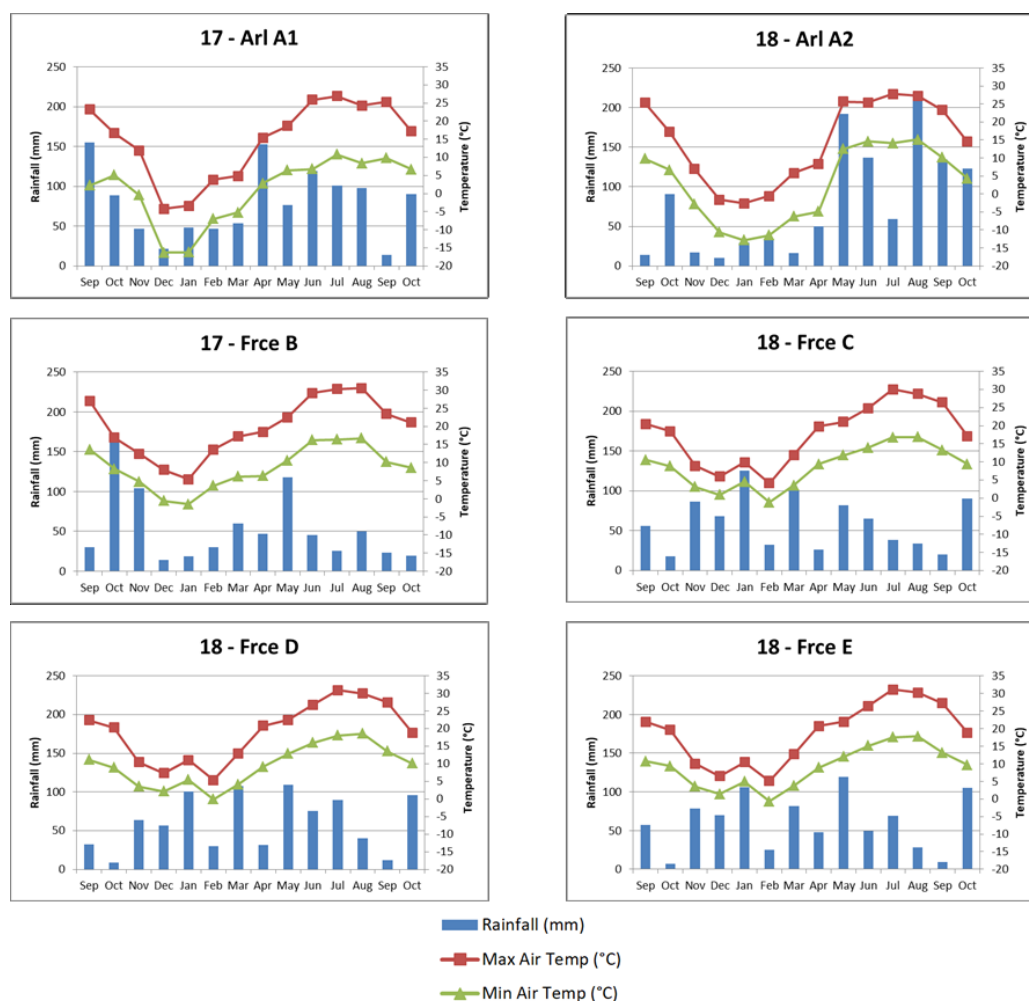


Figure 1. Monthly rainfall accumulation and average temperature for each of the six field locations over the 2016-2017 and 2017-2018 seasons.

Rainfall accumulation during cover crop establishment was greater at all sites in the fall of 2016 compared to the fall 2017 (290 to 300 mm vs. less than 200 mm between September and November) (Figure 1). Both September and October were drier than average in southern France in 2017, while November and December were wetter. In April 2017 and May 2018, Arlington (site A), received more rain than average. The site received between 348.2 and 379.7 mm between April and June both in 2017 and in 2018 while the French sites only received between 173.4 and 216.4 mm over the same period. The greatest difference in rainfall accumulation between Arlington and the French sites was observed in the summer. While Arlington (site A) received 198.6 to 278.6 mm between July and August of 2017 and 2018 the French sites only received 72.9 to 129.7 mm over the same period (Figure 1).

In Arlington in 2017, monthly average temperatures were below 0°C from November to April. The coldest months were December and January, with a minimum air temperature mean of -16.3 °C. In 2018, the temperature raised above 0°C a month later than in 2017 (early May vs. early April) and the coldest months were January and February with monthly minimum air temperatures of -12.8 and -11.5°C respectively. At the French sites, both winters were milder than in Wisconsin and periods of freezing temperatures were rare. In 2017, at site B, January was the coldest month with -1.5°C on

average. The monthly average temperature was above 10°C from March to the end of the growing season. In 2018, February was colder than December and January with one week of frost. Meteorological stations close to the C, D and E sites indicated a monthly minimum air temperature of -1.2 to -0.7°C in February 2018 compared with 4.5 to 5.5°C in January. Monthly average temperatures were above 10°C at the French sites at the beginning of April 2018.

3.2. Cover crop performance

Data from the six trials analyzed with linear mixed models did not show any significant difference in biomass production between cereal rye and triticale, with 6989 kg ha⁻¹ and 7352 kg ha⁻¹ respectively (Figure 2). However, cereal rye grew significantly taller than triticale, 125 cm vs. 77 cm respectively ($P < 0.001$).

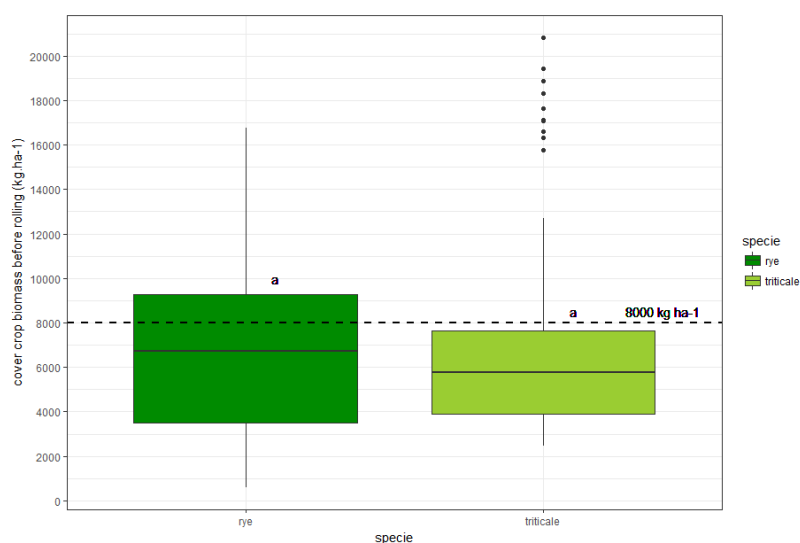


Figure 2. Mean weight of cereal rye and triticale biomass before cover crop rolling, averaged across all sites, 2017 and 2018. The linear mixed model did not indicate significant differences between cereal rye and triticale ($P > 0.05$, $n = 144$). Data presented on Figure 2 are means \pm standard error. Each cover crop species (rye and triticale) followed by same letter are not significantly different. The dotted line refers to a mean of the cover crop biomass values range reported in the scientific literature as a success factor to suppress weed until soybean harvest.

Cover crop biomass of both cereal rye and triticale was highly influenced by the pedoclimatic conditions (location \times year) and varied from 2,963 kg ha⁻¹ at the 18-Frce C site to 16,994 kg ha⁻¹ at 17-Arl A1. Except for 18-Arl A2, the ANOVA performed per site showed a significant effect of cover crop species on cover crop biomass. However, the cover crop species producing the highest biomass differed between sites: cereal rye for 17-Frce B and 18-Frce D sites and triticale for 17-Arl A1, 18-Frce C and 18-Frce E sites (Figure 3). In 2017, at Arlington, triticale produced significantly greater biomass than any other the site, resulting in the nine outlying data points seen on Figure 2.

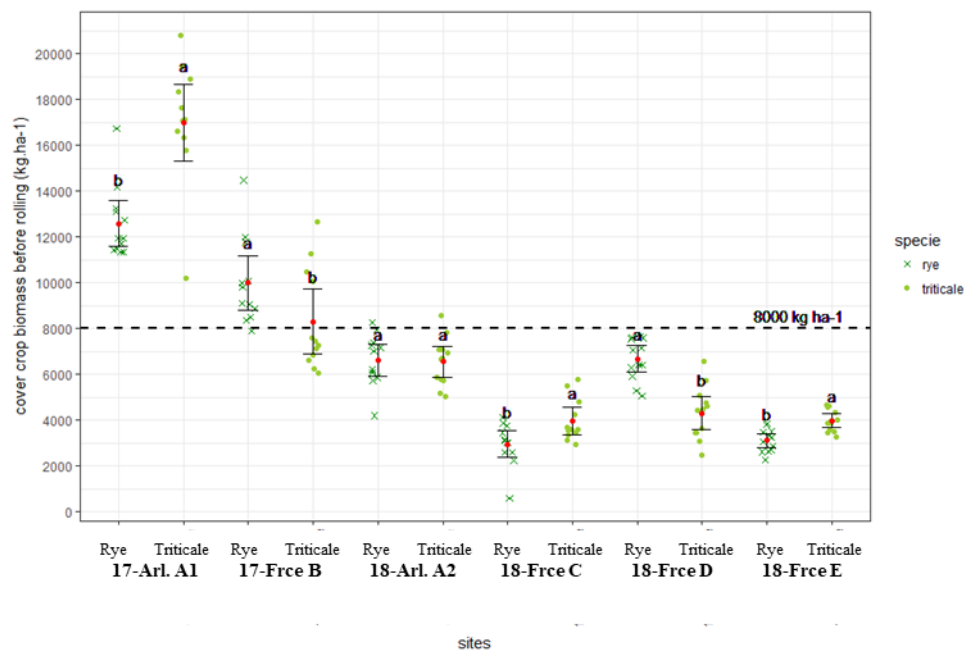


Figure 3. Cover crop biomass before termination per species and per site, 2017 and 2018. The letters represent the results of the ANOVAs per site ($P < 0.05$, $n=24$). For each site, if the two species have the same letter their biomass is not significantly different. The dotted line refers to a mean of the cover crop biomass values range reported in the scientific literature as a success factor to suppress weed until soybean harvest.

3.3. Weed biomass

In Wisconsin in 2018, the dominant weed species were Ladysthumb smartweed (*Polygonum persicaria* L.), lambsquarter (*Chenopodium album* L.), and foxtail (*Setaria pumila*, *Setaria viridis* and *Setaria faberi* L.). In France, the dominant weed species varied by location and year. At site B in 2017, common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.), heartsease (*Viola tricolor* L.) and Scarlet Pimpernel (*Anagallis arvensis*) dominated. In 2018, the weed population at site C was dominated by field bindweed (*Convolvulus arvensis* L.), all-seed (*Chenopodium polyspermum* L.) and round-leaved fluellin (*Kickxia spuria* L.) and at site D by yellow foxtail (*Setaria glauca* L.), switchgrass (*Panicum virgatum* L.) and persicaria (*Persicaria maculosa* Gray L.). Finally, in 2018 at site E, common ragweed was the main species along with annual bluegrass (*Poa annual* L.) and foxtail (*Setaria glauca* L.).

The linear mixed model determined that triticale provided poorer weed suppression compared to rye during the summer (Date 1), with 577 and 231 kg ha⁻¹ of weed biomass for triticale and cereal rye respectively (Table 3). A similar conclusion was shown in the fall (Date 2), with 1545 and 1178 kg ha⁻¹ of weed biomass for triticale and rye respectively. Weed dynamics between the summer and the fall did not differ significantly between rye and triticale; however, weed populations within the triticale cover crop tended to be higher than under cereal rye ($P = 0.09$) (Table 3). Indeed, data from the six trials indicated that the total weed biomass increased by an average of 945 kg ha⁻¹ for the rye and 968 kg ha⁻¹ for the triticale between Date 1 and Date 2.

The ANOVA per site showed that at the 18-Frce D site, the weed biomass was particularly high in the triticale plots with more than 4000 kg ha⁻¹ (Table 3). Significant differences between triticale and cereal rye were also observed during the summer (Date 1) at the 18-Arl. site with 1214 kg ha⁻¹ and 123 kg ha⁻¹ of weed biomass respectively. 18-Frce C is the only site where cereal rye resulted in

poorer weed suppression compared to triticale. However, at that site, increased weed biomass between Date 1 and Date 2 in the triticale was observed as compared to rye (Table 3).

In France, except for site B where weed development was limited, an increase in weed biomass of more than 1000 kg ha⁻¹ was observed between Date 1 and Date 2 for both cover crop species. At Arlington, weed biomass only increased by 204 kg ha⁻¹ (cereal rye) and 127 kg ha⁻¹ (triticale) between Date 1 and 2 in 2017 and decreased between the two measurements in 2018. Overall, the greatest increase in weed biomass between summer and fall was observed at 18-Frce C, D and E (Table 3).

Table 3. Summer and fall weed biomass from the two cover crop treatments over the six sites, 2017 and 2018. Weed biomass changes between the two dates, indicative of the degree of weed growth, are also reported.

Sites	Weed Biomass (kg ha ⁻¹) Date 1 ¹		Weed Biomass (kg ha ⁻¹) Date 2 ²		Weed Biomass change (kg ha ⁻¹) Date 2-Date 1	
	Cereal rye	Triticale	Cereal rye	Triticale	Cereal rye	Triticale
17-Arl. A1	83	148	287	274	204	127
18-Arl. A2	123	1214	55	869	-68	-345
17-Frce B	402	1119	319	857	-83	-262
18-Frce C	327	177	1245	1270	919	1093
18-Frce D	317	639	3479	4445	3163	3806
18-Frce E	134	163	1683	1554	1549	1391
Mean	231a	577b	1178a	1545b	947a	968a
<i>p</i> -value ^β	<0.001		<0.001		0.09	
Significative effect	***		***		.	

¹ Weed biomass was collected in July in France and in August at Arlington. ² Weed biomass was collected in September. ^β Linear mixed model, *n* = 144, Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

3.4. Soybean performance

Using the linear mixed model, no differences were observed in soybean population between the two cover crop species, with an average of 309,020 plants ha⁻¹ in the rye and 309,562 plants ha⁻¹ in the triticale. At flowering, soybean biomass tended to be higher when planted into rye as compared to triticale, with 1,876 and 1,624 kg ha⁻¹ respectively (*P* = 0.07). Soybean height at flowering was also greater under rye cover crop (53 cm) compared to triticale (47 cm) (*P* < 0.01).

The linear mixed model indicated that the choice of cover crop species significantly affected soybean yields (Figure 4). Using cereal rye as opposed to triticale as a cover crop resulted in increased soybean yields of 0.1 to 1.3 t ha⁻¹. At the sites where triticale produced more biomass than rye, the yield gap between the two cover crop species was the lowest; at sites A1, C and E yields were only 0.2, 0.1 and 0.3 t ha⁻¹ lower in the triticale (Table 4). The ANOVA per site also illustrated higher yields of soybeans grown with rye as compared to triticale, except for 18-Frce C and D where the variability within plots was high (*P* > 0.05) (Table 4). Independent of cover crop species, standard deviation varied from 0.8 to 0.9 t ha⁻¹ at sites 18-Frce C, D and E, it was 0.7 t ha⁻¹ at 17-Arl. A1 and 18-Frce B and only 0.15 t ha⁻¹ at 18-Arl. A2.

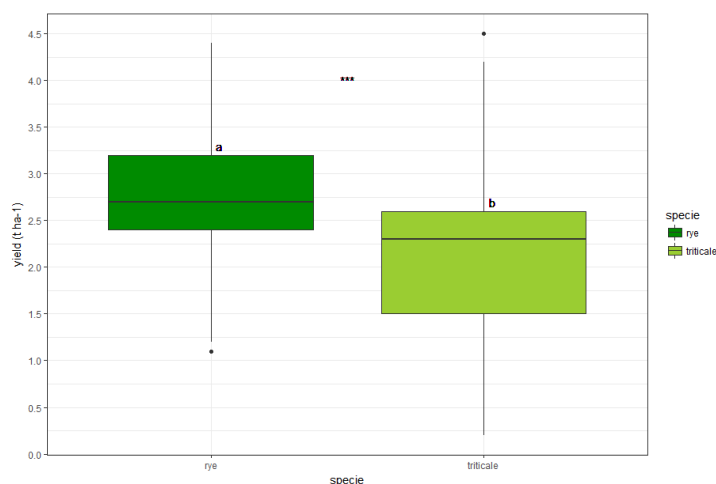


Figure 4. Soybean yields (t ha⁻¹) obtained from cereal rye and triticale cover crop treatments, averaged across all sites, 2017 and 2018, analyzed using linear mixed model ($P < 0.001$, $n=144$). Boxplot followed by same letters are not significantly different.

Table 4. Soybean yield (t ha⁻¹) averages per cover crop and per site, 2017 and 2018.

Sites	Soybean Yield (t ha ⁻¹)		Soybean Yield Losses on Triticale Cover Crop (t ha ⁻¹)
	Cereal rye	Triticale	Cereal rye - Triticale
17-Arl. A1	2.7a	2.5b	0.2
18-Arl. A2	3.5a	2.2b	1.3
17-Frce B	2.8a	2.2b	0.6
18-Frce C	2.7a	2.6a	0.1
18-Frce D	1.8a	1.1a	0.7
18-Frce E	2.6a	2.3b	0.3
Mean¹	2.7a	2.2b	0.5
<i>p</i> -value (mean data) ^β	<0.001		-
Significative effect	***		-

β Linear mixed model, $n = 144$, Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1. 1 Mean from data of the 6 sites ($n = 6 \times 24$). mixed

4. Discussion

4.1. Cover crop biomass production

On average across all sites, despite the difference in cover crop height prior to rolling (i.e., rye taller than triticale), the cover crop biomass did not differ between the two species. However, ANOVA per site determined a significant effect of species on biomass production under certain pedoclimatic conditions, with the most productive species varying between years and locations (Figure 3). Among the six trials, cereal rye biomass before rolling varied from 2936 kg ha⁻¹ (18-Frce C) to 12,588 kg ha⁻¹ (17-Arl. A1) and triticale biomass ranged from 3977 kg ha⁻¹ (18-Frce E) to 16,994 kg ha⁻¹ (17-Arl. A1). Environment (soil and climate) was thus identified as a factor explaining part of the variability observed in the cover crop biomass. This was consistent with other findings in the scientific literature [38,45,48,49]. Smith *et al.* [37] also found contrasting results between years and locations in North Carolina on sandy and loamy sand soil characterized by a warm humid subtropical climate. For

example, a decrease in rainfall accumulation in 2009 was correlated with lower rye biomass (4450 kg ha⁻¹) compared to the previous year (10,854 kg ha⁻¹).

As discussed by Smith *et al.* [37], improved cover crop management including fertilization, planting date, seeding rate, species and cultivar choice is fundamental to successful cover crop establishment and biomass production. This “management x environment” effect was observed at site A, with more than 10,000 kg ha⁻¹ of biomass for both species in 2017 and less than 7000 kg ha⁻¹ in 2018. The first year, the cover crop was planted after alfalfa and manure was applied before planting. The second year, planting occurred after corn harvested for silage and did not receive manure, with temperatures reaching above 0°C a month later than the previous year. The shorter period of cover crop biomass production at 18-Arl. A2, combined with both lower precipitation during cover crop establishment in the fall of 2017 and lower nitrogen availability, resulted in lower biomass.

A similar impact of both environment and management was observed in France, where in 2018, cover crop biomass was lower than 4000 kg ha⁻¹ for every species at every site except cereal rye on site D. The 2017-2018 growing season was characterized by below-average rainfall during cover crop establishment which affected cover crop emergence followed by above average rainfall in the winter which led to reduced tillering. With a fine loam clay soil type, the 18-Frce C was the most affected by the wet conditions; the water did not readily infiltrate through the soil, leading to cover crop stand losses (e.g., 2963 kg ha⁻¹ of cereal rye biomass). A week of frost in February after mild January temperatures which had brought the cover crops out of dormancy also negatively impacted cover crop development in France in 2018. At site D, the earlier planting date (August 25th), nitrogen credit from the preceding alfalfa crop, and mild fall temperatures (above 10°C until November) led to rapid cover crop development before winter. The cover crop was thus at more sensitive stage than at other locations during the period of frost in February, which affected its biomass production potential. The significant difference in cover crop biomass between rye and triticale at site D in 2018 (6668 and 4314 kg ha⁻¹ respectively) was likely explained by the superior winter hardiness of rye compared to triticale (Figure 3).

Cover crop planting and termination timing often has been observed to play a key role in cover crop biomass production, explaining part of the variability between sites [50,51]. Mirsky *et al.* [33] discussed the increase of cover crop biomass production in May in mid-Atlantic region of US following earlier cover crop planting by comparing six planting dates across 10 day intervals under high annual precipitation condition evenly distributed (760-1012 mm) and silt loam soil. Delayed cover crop termination is critical to both improve cover crop termination and increase biomass production. Depending on specific annual conditions, cereal biomass can increase by 200 kg ha⁻¹ per day after the stem elongation stage (i.e., after the 39 Zadok stage) [17]. In our study, planting dates varied from mid-August to early October and termination dates from mid-May to mid-June (Table 2).

One strategy to increase the resilience of the CCBRT may include the use of cover crop species mixtures. As suggested by Liebert *et al.* [39] in New York, mixing tall species such as cereal rye with species that are shorter with wider leaves such as triticale or barley can optimize early soil shading and hasten canopy closure. This strategy could improve cover crop establishment and early spring weed control as well as increase the probability of achieving adequate cover crop biomass at rolling under challenging conditions (e.g., soil type heterogeneity, drought, excess of water, etc.). The main drawback of using species mixtures is the lack of synchronization of anthesis of the different cultivars, which would need to be assessed for successful implementation of a roll-crimp system. Cover crop termination of cereal using a roller crimper has been shown to be most effective when done between

anthesis and early dough stage (Zadoks growth stage 61 to 85), with termination increasingly effective as the cereal matures to the soft dough stage [16,17,40,48,51].

The different cover crop cultivars used in the study particularly between the Upper Midwest and Southern France trials have to be considered as cultivar might impact the potential of cover crop biomass production, the cover crop sensitivity to cold temperatures and change climate as well as the cover crop flowering period [40,52]. In North Carolina, Wells *et al.* [40] observed higher cereal rye biomass (> 9000 kg ha⁻¹) and greater cover crop control (100 %) using earlier-flowering cultivar compared with late-flowering cultivar where cover crop biomass was inferior to 9000 kg ha⁻¹ and the cover crop control effectiveness was inferior to 65%. Thus, despite the cover crop biomass effect, ability to provide an adequate cover crop termination also might influence the weed pressure as well as soybean yield. To address the cultivar effect, interest in breed early-flowering fall rye is growing in North-America to a specific adaptation for organic CCBRT as observed in Canada with the “CETAB+ HÂTIF” cultivar [53,54].

4.2. Weed biomass

As observed by Liebert and Ryan [55] and Ryan *et al.* [56] in humid continental climate and silt loam soil, results showed that when adequate biomass is produced prior to termination, the cover crop can significantly limit weed development. A sufficient amount of cover crop biomass remaining on the soil surface can reduce weed development by acting as a physical barrier, competing with weeds for nutrients, light and water, and releasing allelopathic compounds [20,57,58]. Previous research has concluded that cover crop biomass should reach from 6000 to 10,000 kg ha⁻¹ before termination to ensure adequate weed control until cash crop harvest, with more reliable control at biomass rates closer to 8000 kg ha⁻¹ [17,18,37]. In our study, high levels of cover crop biomass (>8000 kg ha⁻¹) was reached at 2 sites: 17-Arl. A1 and 17-Free B (Figure 3). At these sites, weed biomass increased by 127 to 204 kg ha⁻¹ between Date 1 and Date 2, while at the other southern French sites, the weed biomass increased by more than 1000 kg ha⁻¹ within the same timeframe. In Wisconsin, within the 18-Arl. A2 conditions, cover crop biomasses averaged 6615 and 6548 kg ha⁻¹, which although on the lower end of the anticipated acceptable range suppressed weed establishment throughout soybean season.

While species did not significantly differ in their biomass produced in our multi-site comparative study, cover crop species did differ in their weed suppression. Indeed, results showed that compared to triticale, cereal rye more effectively suppressed weeds through the entire soybean growing season. These results were consistent with previous organic CCBRT studies conducted in soybean or corn production systems. These studies also found that cereal rye used as a cover crop in CCBRT systems provided better weed control than other winter cereals or mixes of winter cereals and legume cover crops (e.g., winter wheat and winter pea, winter wheat, hairy vetch) [18,59,60]. In Iowa, located within the same cold temperate climate as Wisconsin, Delate *et al.* [18] observed lower weed pressure (broadleaf species) on silty clay loam soil with a cover crop mixture including cereal rye and hairy vetch compared to a mix of wheat and winter pea, with weed populations at the beginning of June of 2.2 plant m⁻² and 6.5 plant m⁻² respectively. According to numerous researchers, the greater allelopathic effect of cereal rye may explain the greater weed control observed [56–58]. While few published studies directly address this phenomenon, within these systems where the cover crop remains on soil surface, release of allelopathic compounds could be delayed providing greater season-long effects [42].

Several studies have compared cereal rye and triticale as cover crops in organic CCBRT soybean production system. In conventional systems in Ontario, Canada, Moore *et al.* [60] indicated that cereal

rye provided better control of redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.) than triticale and wheat. In organic systems, Silva [45] did not find any difference in weed biomass using cereal rye, triticale or barley as cover crop neither before cover crop termination nor 12 weeks after cover crop termination in Wisconsin in 2010 and 2011. These results contrast with our study and the difference could be explained by the lower variability in cover crop biomass observed by Silva [45] in 2010 and 2011. In our study, the cover crop biomass was particularly low at three out of six sites (e.g., biomass less than 5000 kg ha⁻¹) while Silva [45] obtained more than 10,000 kg ha⁻¹ of cereal rye, triticale and barley cover crop in 2010 and 2011 (with the exception of triticale in 2011 with 6380 kg ha⁻¹). When cover crop biomass is lower than 8000 kg ha⁻¹, according to Teasdale and Mohler [64] and Smith *et al.* [37] a difference of 1000 to 2000 kg ha⁻¹ of rye biomass between cover crops may explain the success or failure of a CCBRT system. The broad range of pedoclimatic conditions encountered in our study did not allow for the confirmation of this hypothesis, but greater weed growth was observed between summer and fall when the cover crop biomass was less than 6000 kg ha⁻¹. At 18-Frce C, D and E sites, where the cover crop biomass was less than 5000 kg ha⁻¹, weed biomass increased between Date 1 and Date 2 was high (918 to 3162 kg ha⁻¹). Conversely, at the 17-Arl. A1 18-Arl. A2 and 17-Frce B sites where cover crop biomass was greater than 6000 kg ha⁻¹ before rolling, the weed biomass remained stable or increased only slightly.

Despite of cover crop biomass and allelopathic effect, others factors related to the species characteristics also might influence weed management such as potential of tiller number production ensuring soil covering, leaf area, vegetative/reproductive ratio, decay dynamic of cover crop on soil surface (i.e., C/N ratio) and root growth [65]. These remain poorly documented in literature but recent promising paper promote the interest in species mixtures which can provide benefits for weed management and hasten canopy cover before cover crop rolling [39]. For instance, cereal rye combined with other species characterized by shorter height and wider leaves such as triticale or barley could increase light interception and shading.

4.3. Soybean yield

Soybean emergence did not differ between cover crop species or between sites. On average, with a seeding rate between 535,000 and 605,000 seed ha⁻¹, resulting stands only reached 309,291 plant ha⁻¹. In Iowa, with the same seeding rate, Delate *et al.* [18] also observed poor emergence with a final stand count of 324,000 plant ha⁻¹. According to Wallace *et al.*, in order to improve soybean emergence, major improvements to no-till planters must occur. To ensure appropriate seed-to-soil contact, no-till planters must slice through a thick cover crop mulch prior to opening and closing the planting furrow, as a poor seeding environment can result in poor soybean emergence and thereby affect soybean yields [21,66].

While not impacting soybean emergence, cover crop species treatments differed in their subsequent soybean yields. The cereal rye treatments resulted in significantly greater soybean yields as compared to using triticale, with 2.7 and 2.2 t ha⁻¹ respectively. In Pennsylvania, US, with humid continental climate and Southwest Germany, Europe, with moderately continental climate, Wallace *et al.* [21] and Weber *et al.* [66] also compared cereal rye with other cereal species as cover crops (i.e., barley (*Hordeum vulgare* L.)), but did not observe any difference in soybean yield. To explain these results, the authors concluded that depending on the conditions, barley can produce adequate weed control due to quicker canopy closure and wider leaf blades compared to rye. Thus, combining rye with barley can result in similar weed control to the rye cover crop alone, thus leading to similar soybean yields. In our study, when the triticale produced equivalent or higher levels of biomass than rye, it provided

equivalent weed suppression between Date 1 and Date 2 than rye, thereby limiting the yield loss observed on triticale compared with rye cover crop (17-Arl. A1, 17-Frce B, 18-Arl. A2).

Independent of the cover crop species, our results showed that the variability within plots (as measured by standard deviation) is increased in situations where the cover crop biomass is low (i.e., < 6000 kg ha⁻¹). The improved weed control provided by cover crop biomass in excess of 6000 kg ha⁻¹ (i.e., 17-Arl. A1, 18-Arl. A2 and 17-Frce B) reduces water and nutrient competition between weeds and soybean plants, resulting in both more consistent and higher yields. However, cover crop biomass does not appear as the main factor explaining resultant soybean yields: while the average cover crop biomass did not differ among sites, the highest yields were obtained when planting soybean into rye. Additionally, soybean emergence does not seem to explain yield differences. Weed species and growth over the season, influenced by both (i) initial cover crop biomass before rolling and (ii) cover crop species, appeared as a driving factor impacting yields in our study. The allelopathic effect of rye likely influenced weed emergence as well, explaining the higher yields obtained compared to soybean planted into triticale.

5. Conclusion

This study illustrated the impact of pedoclimatic condition on cover crop biomass produced using CCBRT systems, which subsequently impacted weed species and biomass dynamics through the soybean growing season. Despite location and year effect, choice of cover crop species remains a fundamental decision for adequate weed suppression and sustainable soybean yields. Specifically, results showed that cereal rye remains to the best candidate for successful organic CCBRT soybean production. The allelopathic effect of cereal rye likely suppresses weed seed germination to a greater degree than what is achieved by other annual cereal grain species. In addition, cereal rye is more winter hardy and reaches anthesis earlier than triticale, benefiting both biomass accumulation and timely planting with the roller-crimper. Our results provide further confirmation that sufficient cover crop biomass is crucial to suppress weeds throughout the cash crop production season. However, depending on location and year (e.g., dry, wet, degree and length of time below freezing), failures in cover crop establishment and/or poor development may be encountered with cereal rye and can lead to significant yield losses. On a farm-scale level, moving beyond evaluating cover crop decisions solely on agronomic performance, economic and practical considerations may impact farmer choice; for example, cereal rye seed can be more expensive and difficult to access in some regions, such as southern France, as compared to other cereal grain species; with the high seeding rates needed in CCBRT systems, seed cost is a critical factor in the net profitability of the system. Mixing cereal rye with another high biomass cereal species such as triticale emerged may allow for beneficial aspects of both species, including maximizing soil coverage among a variety of soil and climate conditions while reducing seed costs. In addition to the multi-tactic strategies previously highlighted to optimize cover crop biomass production (e.g., planting date, fertilization, irrigation, etc.), additional cover crop varieties and species mixes should be considered for further research (e.g., forage rye, forest rye, etc.). More broadly, in a changing climate, future CCBRT research should focus on flexible decision-support tools based on multi-tactic cover crop management to assist farmers in making the best decisions to ensure cover crop performance and weed management throughout the cash crop growing season.

Author Contributions: L. Vincent-Caboud reviewed the literature and wrote the initial draft of the paper with the assistance from L. Vereecke. Then L. Vincent-Caboud, L. Vereecke, E. M. Silva and J. Peigné, contributed to revising the manuscript.

Funding: The financial support for this project provided by transnational funding bodies, including partners of the FP7 ERA-net project, CORE Organic Plus, and cofunds from the European Commission, the TERRA ISARA foundation, the French Water Agency ‘Rhône Méditerranée Corse’. The USA portion of the work was partially funded by the Ceres Trust and by a USDA ARS Cooperative Agreement (58-5090-7-072). The text in this paper is the sole responsibility of the authors and does not necessarily reflect the views of the national and European funding bodies that financed this project.

Acknowledgments: We acknowledge V. Payet for his assistance on the statistical analysis. We would like to thank the technical teams from the University of Wisconsin-Madison and ISARA. We would like to give a special thanks to the organic farmers who carried out the French trials.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. FiBL; IFOAM, The World of Organic Agriculture - Statistics and Emerging Trends 2019. 2019, 353.
2. USDA Economics, Statistics and Market Information System Available online: <https://usda.library.cornell.edu/> (accessed on May 27, 2019).
3. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service. Organic Market Overview. Available online: <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=178152> (accessed on Feb 20, 2017).
4. Agence Bio La Bio dans l'Union Européenne Available online: https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2018/10/Carnet_UE_2017.pdf (accessed on May 27, 2019).
5. Delate, K.; DeWitt, J. Building a farmer-centered land grant university organic agriculture program: A Midwestern partnership. *Renew. Agric. Food Syst.* 2004, 19, 80–91.
6. Riemens, M.M.; Groeneveld, R.M.W.; Lotz, L. a. P.; Kropff, M.J. Effects of three management strategies on the seedbank, emergence and the need for hand weeding in an organic arable cropping system. *Weed Res.* 2007, 47, 442–451.
7. Watson, C.A.; Atkinson, D.; Gosling, P.; Jackson, L.R.; Rayns, F.W. Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use Manag.* 2002, 18, 239–247.
8. Baker, B.P.; Benbrook, C.M.; Groth, E.; Lutz Benbrook, K. Pesticide residues in conventional, integrated pest management (IPM)-grown and organic foods: insights from three US data sets. *Food. Addit. Contam.* 2002, 19, 427–446.
9. Hole, D.G.; Perkins, A.J.; Wilson, J.D.; Alexander, I.H.; Grice, P.V.; Evans, A.D. Does organic farming benefit biodiversity? *Biol. Conserv.* 2005, 122, 113–130.
10. Anderson, R.L. A Multi-Tactic Approach to Manage Weed Population Dynamics in Crop Rotations. *Agron. J.* 2005, 97, 1579–1583.
11. Bàrberi, P. Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Res.* 2002, 42, 177–193.
12. Maeder, P.; Fließbach, A.; Dubois, D.; Gunst, L.; Fried, P.; Niggli, U. Soil Fertility and Biodiversity in Org. *Farm. Sci.* 2002, 296, 1694–1697.
13. FAO Economic de l'agriculture de conservation Available online: <http://www.fao.org/docrep/005/y2781f/y2781f03.htm> (accessed on Mar 9, 2015).
14. Holland, J.M. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agric. Ecosyst. Env.* 2004, 103, 1–25.
15. Berner, A.; Hildermann, I.; Fließbach, A.; Pfiffner, L.; Niggli, U.; Mäder, P. Crop yield and soil fertility response to reduced tillage under organic management. *Soil Till. Res.* 2008, 101, 89–96.
16. Moyer, J. Organic no-till farming. *Advancing no-till agriculture. Crops, soil, equipment*; Copyright: Acres U.S.A., Austin, Texas, 2011; ISBN 978-1-60173-017-6.
17. Mirsky, S.B.; Ryan, M.R.; Curran, W.S.; Teasdale, J.R.; Maul, J.; Spargo, J.T.; Moyer, J.; Grantham, A.M.; Weber, D.; Way, T.R.; et al. Conservation tillage issues: Cover crop-based organic rotational no-till grain production in the mid-Atlantic region, USA. *Renew. Agric. Food Syst.* 2012, 27, 31–40.
18. Delate, K.; Cwach, D.; Fiscus, M. Evaluation of an Organic No-Till System for Organic Corn and Soybean Production—Agronomy Farm Trial, 2011. Organic Ag Program Webpage, Iowa State University, Ames, IA 2012.
19. Silva, E.; Delate, K. A Decade of Progress in Organic Cover Crop-Based Reduced Tillage Practices in the Upper Midwestern USA. *Agriculture* 2017, 7, 44.
20. Teasdale, J.R.; Coffman, C.B.; Mangum, R.W. Potential long-term benefits of no-tillage and organic cropping systems for grain production and soil improvement. *Agron. J.* 2007, 99, 1297–1305.
21. Wallace, J.; Williams, A.; Liebert, J.; Ackroyd, V.; Vann, R.; Curran, W.; Keene, C.; VanGessel, M.; Ryan, M.; Mirsky, S. Cover Crop-Based, Organic Rotational No-Till Corn and Soybean Production Systems in the Mid-Atlantic United States. *Agriculture* 2017, 7, 34.
22. Blanchart, E.; Bernoux, M.; Sarda, X.; Siqueira Neto, M.; Cerri, C.C.; Piccolo, M.; Douzet, J.-M.; Scopel, E.; Feller, C. Effect of direct seeding mulch-based systems on soil carbon storage and macrofauna in Central Brazil. *Agric; Conspct; Scientif. (ACS)* 2007, 72, 81–87.

23. Wayman, S.; Cogger, C.; Benedict, C.; Burke, I.; Collins, D.; Bary, A. The influence of cover crop variety, termination timing and termination method on mulch, weed cover and soil nitrate in reduced-tillage organic systems. *Renew. Agric. Food Syst.* 2015, 30, 450–460.
24. Kunz, C.; Sturm, D.J.; Varnholt, D.; Walker, F.; Gerhards, R. Allelopathic effects and weed suppressive ability of cover crops. *Plant Soil Env.* 2016, 62, 60–66.
25. Dhima, K.V.; Vasilakoglou, I.B.; Eleftherohorinos, I.G.; Lithourgidis, A.S. Allelopathic Potential of Winter Cereals and Their Cover Crop Mulch Effect on Grass Weed Suppression and Corn Development. *Crop Sci.* 2006, 46, 345–352.
26. Jabran, K.; Mahajan, G.; Sardana, V.; Chauhan, B.S. Allelopathy for weed control in agricultural systems. *Crop Prot.* 2015, 72, 57–65.
27. Mäder, P.; Berner, A. Development of reduced tillage systems in organic farming in Europe. *Renew. Agric. Food Syst.* 2012, 27, 7–11.
28. Vincent-Caboud, L.; Peigné, J.; Casagrande, M.; Silva, E.M. Overview of Organic Cover Crop-Based No-Tillage Technique in Europe: Farmers' Practices and Research Challenges. *Agriculture* 2017, 7, 42.
29. Zikeli, S.; Gruber, S. Reduced Tillage and No-Till in Organic Farming Systems, Germany—Status Quo, Potentials and Challenges. *Agriculture* 2017, 7, 35.
30. Lee, J.A.; Gill, T.E. Multiple causes of wind erosion in the Dust Bowl. *Aeolian Research* 2015, PA, 15–36.
31. Friedrich, T.; Kassam, A.; Corsi, S.; Jat, R.A.; Sahrawat, K.L.; Kassam, A.H. Conservation agriculture in Europe. In *Conservation agriculture: global prospects and challenges*; CABI, 2014; pp. 127–170.
32. Casagrande, M.; Peigné, J.; Payet, V.; Mäder, P.; Sans, F.X.; Blanco-Moreno, J.M.; Antichi, D.; Bàrberi, P.; Beeckman, A.; Bigongiali, F.; et al. Organic farmers' motivations and challenges for adopting conservation agriculture in Europe. *Org. Agr.* 2015, 1–15.
33. Mirsky, S.B.; Ryan, M.R.; Teasdale, J.R.; Curran, W.S.; Reberg-Horton, C.S.; Spargo, J.T.; Wells, M.S.; Keene, C.L.; Moyer, J.W. Overcoming Weed Management Challenges in Cover Crop-Based Organic Rotational No-Till Soybean Production in the Eastern United States. *Weed Technol.* 2013, 27, 193–203.
34. Kornecki, T.S.; Price, A.J.; others Effects of different roller/crimper designs and rolling speed on rye cover crop termination and seed cotton yield in a no-till system. *J. Cotton Sci.* 2010, 14, 212–220.
35. Reberg-Horton, S.C.; Grossman, J.M.; Kornecki, T.S.; Meijer, A.D.; Price, A.J.; Place, G.T.; Webster, T.M. Utilizing cover crop mulches to reduce tillage in organic systems in the southeastern USA. *Renew. Agric. Food Syst.* 2012, 27, 41–48.
36. Keene, C.L.; Curran, W.S.; Wallace, J.M.; Ryan, M.R.; Mirsky, S.B.; VanGessel, M.J.; Barbercheck, M.E. Cover Crop Termination Timing is Critical in Organic Rotational No-Till Systems. *Agron. J.* 2017, 109, 272–282.
37. Smith, A.N.; Reberg-Horton, S.C.; Place, G.T.; Meijer, A.D.; Arellano, C.; Mueller, J.P. Rolled Rye Mulch for Weed Suppression in Organic No-Tillage Soybeans. *Weed Sci.* 2011, 59, 224–231.
38. Clark, K.M.; Boardman, D.L.; Staples, J.S.; Easterby, S.; Reinbott, T.M.; Kremer, R.J.; Kitchen, N.R.; Veum, K.S. Crop Yield and Soil Organic Carbon in Conventional and No-till Organic Systems on a Claypan Soil. *Agron. J.* 2017, 0.
39. Liebert, J.A.; DiTommaso, A.; Ryan, M.R. Rolled Mixtures of Barley and Cereal Rye for Weed Suppression in Cover Crop-based Organic No-Till Planted Soybean. *Weed Sci.* 2017, 1–14.
40. Wells, M.S.; Brinton, C.M.; Reberg-Horton, S.C. Weed suppression and soybean yield in a no-till cover-crop mulched system as influenced by six rye cultivars. *Renew. Agric. Food Syst.* 2015, 1–12.
41. Tabaglio, V.; Gavazzi, C.; Schulz, M.; Marocco, A. Alternative weed control using the allelopathic effect of natural benzoxazinoids from rye mulch. *Agron. Sustain. Dev.* 2008, 28, 397–401.
42. Schulz, M.; Marocco, A.; Tabaglio, V.; Macias, F.A.; Molinillo, J.M.G. Benzoxazinoids in Rye Allelopathy - From Discovery to Application in Sustainable Weed Control and Organic Farming. *J. Chem. Ecol.* 2013, 39, 154–174.
43. Bernstein, E.R.; Posner, J.L.; Stoltenberg, D.E.; Hedtcke, J.L. Organically Managed No-Tillage Rye-Soybean Systems: Agronomic, Economic, and Environmental Assessment. *Agron. J.* 2011, 103, 1169.
44. De Bruin, J.L.; Porter, P.M.; Jordan, N.R. Use of a Rye Cover Crop following Corn in Rotation with Soybean in the Upper Midwest. *Agron. J.* 2005, 97, 587–598.
45. Silva, E.M. Screening Five Fall-Sown Cover Crops for Use in Organic No-Till Crop Production in the Upper Midwest. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 2014, 38, 748–763.
46. Peigné, J.; Lefevre, V.; Vian, J.F.; Fleury, P. *Conservation Agriculture in Organic Farming: Experiences, Challenges and Opportunities in Europe*; Springer International Publishing, 2015; ISBN 978-3-319-11619-8.
47. Bates, D.; Mächler, M.; Bolker, B.; Walker, S. Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4. *arXiv:1406.5823 [stat]* 2014.
48. Ashford, D.L.; Reeves, D.W. Use of a mechanical roller-crimper as an alternative kill method for cover crops. *Renew. Agric. Food Syst.* 2003, 18, 37–45.
49. Crowley, K.A.; Van Es, H.M.; Gómez, M.I.; Ryan, M.R. Trade-Offs in Cereal Rye Management Strategies Prior to Organically Managed Soybean. *Agron. J.* 2018, 110, 1492–1504.
50. Mischler, R.A.; Curran, W.S.; Duiker, S.W.; Hyde, J.A. Use of a Rolled-rye Cover Crop for Weed Suppression in No-Till Soybeans. *Weed Technol.* 2010, 24, 253–261.
51. Mirsky, S.B.; Curran, W.S.; Mortensen, D.M.; Ryan, M.R.; Shumway, D.L. Timing of Cover-Crop Management Effects on Weed Suppression in No-Till Planted Soybean using a Roller-Crimper. *Weed Sci.* 2011, 59, 380–389.
52. Neu, K.; Nair, A. Effect of Planting Date and Cultivar on Cereal Rye Development and Termination for Organic No-Till Production Systems; Iowa State University, Digital Repository: Ames, 2017;
53. Halde, C.; Gagné, S.; Charles, A.; Lawley, Y. Organic No-Till Systems in Eastern Canada: A Review. *Agriculture* 2017, 7, 36.
54. La France, D.; Comeau, A.; Duval, J. Développement d'un Seigle Adapté au rôle de Couvre-sol Pour le Semis Direct Sans Herbicide; Final Report; 2016; p. 36;

55. Liebert, J.A.; Ryan, M.R. High planting rates improve weed suppression, yield, and profitability in organically-managed no-till planted soybean. *Weed Technol.* 2017.
56. Ryan, M.R.; Curran, W.S.; Grantham, A.M.; Hunsberger, L.K.; Mirsky, S.B.; Mortensen, D.A.; Nord, E.A.; Wilson, D.O. Effects of Seeding Rate and Poultry Litter on Weed Suppression from a Rolled Cereal Rye Cover Crop. *Weed Sci.* 2011, 59, 438–444.
57. Carr, P.; Gramig, G.; Liebbig, M. Impacts of Organic Zero Tillage Systems on Crops, Weeds, and Soil Quality. *Sustainability* 2013, 5, 3172–3201.
58. Bernstein, E.R.; Stoltenberg, D.E.; Posner, J.L.; Hedtcke, J.L. Weed Community Dynamics and Suppression in Tilled and No-Tillage Transitional Organic Winter Rye–Soybean Systems. *Weed Sci.* 2014.
59. Parr, M.; Grossman, J.M.; Reberg-Horton, S.C.; Brinton, C.; Crozier, C. Nitrogen Delivery from Legume Cover Crops in No-Till Organic Corn Production. *Agron. J.* 2011, 103, 1578.
60. Moore, M.J.; Gillespie, T.J.; Swanton, C.J. Effect of Cover Crop Mulches on Weed Emergence, Weed Biomass, and Soybean (*Glycine max*) Development. *Weed Technol.* 1994, 8, 512–518.
61. Weston, L.A. Utilization of Allelopathy for Weed Management in Agroecosystems. *Agron. J.* 1996, 88, 860–866.
62. Reberg-Horton, S.C.; Burton, J.D.; Daneshmandi, D.A.; Ma, G.; Monks, D.W.; Murphy, J.P.; Ranells, N.N.; Williamson, J.D.; Creamer, N.G. Changes over time in the allelochemical content of ten cultivars of rye (*Secale cereale* L.). *J Chem. Ecol.* 2005, 31, 179–193.
63. Altieri, M.A.; Lana, M.A.; Bittencourt, H.V.; Kieling, A.S.; Comin, J.J.; Lovato, P.E. Enhancing Crop Productivity via Weed Suppression in Organic No-Till Cropping Systems in Santa Catarina, Brazil. *J. Sustain. Agric.* 2011, 35, 855–869.
64. Teasdale, J.R.; Mohler, C.L. The quantitative relationship between weed emergence and the physical properties of mulches. *Weed Sci.* 2000, 48, 385–393.
65. Halde, C.; Entz, M.H. Plant species and mulch application rate affected decomposition of cover crop mulches used in organic rotational no-till systems. *Can. J. Plant Sci.* 2016, 96, 59–71.
66. Weber, J.; Kunz, C.; Peteinatos, G.; Zikeli, S.; Gerhards, R. Weed Control Using Conventional Tillage, Reduced Tillage, No-Tillage, and Cover Crops in Organic Soybean. *Agriculture* 2017, 7, 43.

Annexe 13 : Guide du premier entretien réalisé auprès des agriculteurs – expérimentateurs

Guide d'entretien des agriculteurs – 1^{er} entretien

Objectifs :

- Comprendre le fonctionnement actuel de l'exploitation actuelle
- Etablir l'état des connaissances de l'acteur au début du suivi autour de SD/SDSC
- Analyser les attentes de l'acteur vis-à-vis de son implication dans le dispositif
- Echanger les connaissances de chacun sur l'objet d'étude
- Etablir un contrat de confiance pour construire un essai conjointement

Ce premier entretien semi-directif se structure en 3 points principaux :

- **Description du fonctionnement actuel de l'exploitation :**
 - **Caractéristiques de l'exploitation :** SAU, type d'exploitation, cultures, rotations culturales types, type de sol, les problèmes rencontrés d'ordre général, les objectifs et les contraintes de l'agriculteur, contexte pédoclimatique
 - **Pratiques dominantes de l'agriculteur :** il s'agira d'identifier les principaux choix d'orientation et d'organisation, la répartition de l'assolement autour de l'exploitation, les principales stratégies de travail du sol et de fertilisation dans les différents SdC.
- **Comprendre la représentation du SD pour l'agriculteur et ses connaissances :** définition, motivations/attentes
- **Présentation du déroulement de l'année d'essai :**
 - Echange des connaissances
 - Partage des objectifs de chacun
 - Définition des rôles de chacun
 - Discuter des premières perspectives de l'essai qui va être mis en place

Protocole de l'entretien :

I. Présentation générale de l'exploitation ~ 15 min

→ **Objectif :** caractériser le profil de l'agriculteur et le type d'exploitation

Nous allons commencer cet entretien par des questions générales sur votre activité :

- *Depuis quand vous êtes-vous installé ? en AB ? (formation, bref historique, forme juridique)*
- *Quelles sont les contraintes et les avantages de votre région ? (contexte pédoclimatique, débouchés, etc.)*
- *Pouvez-vous me décrire brièvement votre exploitation ? (SAU, UTH, type d'exploitation, autres activités, objectifs principaux, cultures, surfaces, rendements, débouchés, irrigation, type de sol : texture, pH, MO, RU, profondeur, évolution de la charge de travail dans l'année → si polycultures-élevage : donner la part en % de temps passé sur les cultures vs l'élevage)*

Rq : si l'agriculteur est un éleveur, préciser rapidement la description de l'atelier élevage et des différentes contraintes associées (débouchés, transformation, etc.)

- *Quelle culture est prioritaire sur l'exploitation ? Sur quelle(s) culture(s) portez-vous le plus grand intérêt ? Quelle culture requiert le plus de temps de travail ?*

- *Etes-vous confronté à des problématiques particulières par rapport à vos sols (érosion, ruissellement, tassement, hydromorphie, battance etc.) ? Comment les gérez-vous ?*
- *Quels matériels possédez-vous pour gérer vos cultures (travail du sol, semis, destruction de couverts, fertilisation, etc.) ? (Propriété, Cuma etc.)*
- *Appartenez-vous à des groupes professionnels agricoles ?*

II. Principales stratégies dominantes pratiquées dans les systèmes de culture ~ 20 min

→ **Objectif** : comprendre la logique dominante des pratiques de l'agriculteur au niveau de la gestion des différents SdC et des principales règles de décision des interventions de travail du sol et de fertilisation lors du premier entretien. Le but est de comparer les ITK qui seront testés aux pratiques dominantes des agriculteurs

Nous allons dans cette partie de l'entretien discuter de vos principales pratiques de travail du sol et de fertilisation que vous mettez en place en fonction des rotations culturales et du type de sol considéré de votre exploitation.

- *Combien d'îlots sont répartis sur l'exploitation ? Comment se présente le morcellement parcellaire ? (parcellaire regroupé, parcelles isolées etc.)*
- *Quelles sont les principales rotations présentes sur votre exploitation et comment se répartissent-elles au niveau du parcellaire ?*

NB : infos du tableau à récupérer (le tableau est complété avec les stratégies de désherbage chimiques dans les différentes rotations pour les conventionnels)

- *Comment gérez-vous le travail du sol au niveau des différentes rotations ?*

NB1 : si l'agriculteur pratique du SD localisé sur un certain type de parcelle et rotation, orienter les questions dessus.

Relances : *Quelles techniques de travail du sol pratiquez-vous ? Dans quel type de rotation ? Est-ce que vous adaptez la technique au type de sol ? Aux cultures ? Pratiquez-vous des TCSL ? Sur quelles cultures en particulier ? Est-ce systématique ? Comment prenez-vous la décision de moins travailler le sol ? Modifiez-vous les techniques de travail du sol en fonction de la rotation ? En fonction des caractéristiques du sol ? Quelle est la part du SD par rapport à l'ensemble de vos pratiques ? Sur quels types de sol privilégiez-vous des TCSL/SD ? Sur quelles cultures ? Dans quelles conditions ? (irrigation, climat, etc.)*

→ *Par rapport à ces techniques de travail du sol, est-ce qu'elles impliquent des méthodes de lutte particulières contre les adventices ? Quel désherbage pratiquez-vous derrière ?*

Relances : *Observez-vous une pression d'adventices différente en TCSL ? Quelles adventices ? Comment les gérez-vous ? Est-ce que cela conduit à une gestion différente par rapport à un labour traditionnel ? Quel désherbage pratiquez-vous de manière générale dans vos rotations ? A quel moment ? Sur quels types de sol ? En général, combien de fois intervenez-vous sur vos parcelles pour désherber ? Est-ce beaucoup ? Quels outils utilisez-vous ? Vos pratiques de travail du sol actuelles vous amènent-elles à faire appel à d'autres leviers pour gérer les adventices (leviers agronomiques : faux-semis, couverts, décalage de date de semis, alternance cultures de printemps/hiver etc.) ? Insérez-vous des couverts végétaux spécifiques pour gérer les adventices ?*

- *(Uniquement pour les conventionnels) Comment gérez-vous le désherbage chimique ? 'type d'herbicide, dose, date, conditions d'application, etc.) Comment vos pratiques de désherbage ont-elles évolué ? quelles rotations impliquent le plus de désherbage chimique ?*
- *Vos techniques de travail du sol impliquent-elles une gestion spécifique de la fertilisation ? des ravageurs ? des maladies ?*

Relances : *Sur quelles rotations en particulier ? Quels types de sol ? Quelles cultures ? Comment gérez-vous la fertilisation de façon générale ? Est-ce systématique ? La fertilisation est-elle gérée différemment pour des parcelles que vous travaillez moins ? Insérez-vous des couverts végétaux ? Lesquels ? A quels moments ? Utilisez-vous plutôt des espèces seules ou en mélange ? Quels sont les intérêts et les limites de ces couverts ?*

- *Mettez-vous en place d'autres pratiques innovantes dont nous n'avons pas encore discuté ?*

Relances : *Depuis quand ? Quels objectifs recherchez-vous ? Comment voyez-vous l'avenir ?*

- *Quelles sont les perspectives d'évolution de votre exploitation agricole ?*

III. Semis direct sous couvert végétal : représentation et connaissances ~ 30 min

→ **Objectif :** Caractériser la représentation des acteurs vis-à-vis de la technique et l'état de leurs connaissances sur la thématique.

1) Représentation et motivations

Si on s'intéresse maintenant plus particulièrement au SD/SDSC, sans discuter tout de suite du dispositif sur lequel on reviendra dans la prochaine partie de cet entretien :

- *pour vous qu'est-ce que le SD ? le SDSC ? que pensez-vous de cette technique ?*
- *depuis quand vous intéressez-vous à cette technique ? pour quelles raisons ? qu'est-ce qu'elle pourrait apporter dans votre exploitation ? quels effets recherchez-vous ?*
- *avez-vous déjà réalisé des essais/pratiques sur le SDSC dans votre exploitation que vous n'avez pas évoqué tout à l'heure dans la description de vos pratiques ? si oui, pouvez-vous rapidement me les décrire ?*

2) Informations et connaissances sur le SDSC

Connaissances acquises :

- *Que pensez-vous du SDSC ? bénéfiques/limites ? (si jamais expérimenté) si demain vous étiez amené à le mettre en place ou à le tester chez vous ? comment procéderiez-vous ? quelles cultures ? quels couverts ? quels outils ? etc.*
- *(si l'acteur a déjà expérimenté chez lui la technique) Qu'est-ce que vous a apporté cette expérience ? qu'avez-vous appris ?*

Relance : *Qu'est-ce que vous avez retiré de cette expérience ? Quels sont les freins du SD selon vous ? Au regard de votre expérience sur cette innovation, pensez-vous à d'autres effets que pourrait générer le SD si vous étiez amené à le pratiquer sur davantage de surface, d'autres rotations, d'autres type de sol, d'autres cultures ? (adventices, maladies, ravageurs, gestion du couvert, fertilisation, la disponibilité des outils ? d'un point de vue économique, etc.) Pensez-vous à une rotation de votre*

ystème qui serait particulièrement problématique ou intéressante pour mettre en place du SDSC ? Quelles sont les limites des machines que vous avez utilisées ? Si vous deviez reconduire demain un essai ou pratiquer du SD qu'est-ce que vous changeriez par rapport à ce que vous avez déjà fait ? Est-ce que l'essai serait reconduit sur la même rotation ?

Connaissances mobilisées :

- *Quelles sont les sources d'informations et de conseils que vous mobilisez autour de la technique du SDSC ?*

Relances : *Comment les mobilisez-vous ? Comment les avez-vous adaptés à votre contexte ? Etes-vous satisfait ? Qu'est-ce qui vous a manqué ?*

- *Connaissez-vous des agriculteurs qui ont déjà expérimenté le SD ? sans herbicide ? avec la mobilisation d'un couvert végétal ?*

Relances : *en AB ou en conventionnel ? Avez-vous des informations sur le déroulement de ces essais ? Qu'est-ce qui vous a intéressé ? Qu'est-ce qui au contraire vous a dérangé ? Avez-vous mobilisé certains enseignements de ces expériences chez vous ?*

- *Avez-vous déjà participé à des journées techniques, des formations relatives au SD ?*

Relances : *Suivez-vous les travaux qui ont pu être menés dans d'autres régions ou d'autres pays ? Qu'est-ce qui vous a semblé intéressant ? Etes-vous abonné à des revues traitant de ce sujet ? Lesquelles ? Suivez-vous des informations sur cette thématique via des sites/réseaux internet ? Lesquels ? Qu'est-ce que vous avez appris grâce à ces moyens d'informations et d'échanges ? Qu'est-ce qui vous a servi pour mettre en place vos pratiques/essais en SD ?*

IV) Echange de connaissances et préparation de la conception d'itinéraires techniques innovants

→ *présentation des supports techniques comme base de discussion : brochures, photos, vidéos, compte-rendus de précédents essais, compte-rendus d'essais de producteurs innovants*

L'entretien est terminé. Je vous remercie pour le temps que vous m'avez accordé. Est-ce qu'il y aurait d'autres éléments que nous n'avons pas abordés pendant l'entretien ou sur lesquels vous souhaitez revenir ? Auriez-vous des conseils de contacts d'agriculteurs à me conseiller qui pratiquent/expérimentent du SD/SDSC sans herbicide ou qui sont intéressés par le sujet ?

Annexe 14 : Caractérisation du profil des agriculteurs-expérimentateurs

AE	Objectifs principaux de l'exploitation	Contraintes principales	Perception de l'AE/SDSC sans herbicide au début de la démarche	Expérience	Date des essais
TR*	-gain de temps sur les cultures (activité élevage) -protéger le sol : limiter la perturbation du sol -limiter l'utilisation d'intrants	-préoccupation vis-à-vis de l'interdiction du glyphosate (prise de risque /pas de solution de rattrapage)	-défis technique et intéressé de développer ses K -préoccupation politique si interdiction du glyphosate, -convaincu de l'intérêt des TCSL qu'il pratique pour améliorer la qualité des sols mais il reste sceptique sur la possibilité de pratiquer du SDSC sans herbicide -curiosité : pour lui, semer sous des biomasses importantes de couvert peut représenter une solution si le couvert est maîtrisé par roulage.	Oui (essais de SD avec herbicide)	2018
GA	-améliorer ou maintenir les rendements, -plus d'autonomie et optimiser la fertilisation -construire une rotation et associer les cultures, -optimiser la gestion des prairies, -transformation d'huiles végétales, -améliorer la qualité du sol, -gérer les adventices et limiter le temps de travail -améliorer les rendements et optimiser le revenu	-zone défavorisée (vallonné); -îlot de parcelles éloigné de l'EA; -beaucoup de cailloux	-curiosité et l'envie de tester dans ses conditions; -le SD n'est pas une conviction mais un défis technique et piste d'amélioration de ses pratiques; -souhait de développer ses K en échangeant avec la recherche et d'autres acteurs	non	2018
BA	-développer ses K pour optimiser ses pratiques via des échanges et des essais -défis techniques et matériels	-charge de travail (seul sur l'exploitation), -sol sableux, terrain séchant	-défis technique mais il est sceptique de l'application du SDSC à l'échelle de l'EA en AB -il aime expérimenter et échanger avec des acteurs pour développer ses K (il réalise des essais sur les TCSL en en AB depuis 2005 avec l'ISARA)	oui (2 essais en 2005 et 2008)	2016 2017 2018
SE*	-améliorer et stabiliser la MO du sol qui a été épuisée par d'anciennes pratiques en arboriculture -réduire la consommation d'énergie	-faible disponibilité de matériel, -très peu de surface	-sceptique de la viabilité du SD en bio mais il veut augmenter la MO du sol. la gestion des adventices est un frein important mais il souhaite améliorer ses K en échangeant pour enrichir ses sols avant la reprise des terres par son fils - défis technique, curiosité et convictions personnelles	Non	2017
JA*	-optimiser l'organisation du travail -expérimenter des alternatives innovantes -se diversifier et augmenter la marge; -mise en place d'une trieuse -pratiquer des TCSL ou du SD	-sans irrigation, -faible MO des sols, pas d'élevage	-défis technique -convaincu des bénéfices que le SD peut apporter (sol, temps de travail) -envie de progresser dans le SD, développer ses K -évaluer la viabilité économique de la technique -il était dans la démarche de l'expérimenter sur son EA	non	2018
JU	-économies, augmenter les rendements et la MB -tester le maraîchage, -installer un atelier poulailler, -semier du pois et de l'orge en SD -maîtriser les adventices	-difficultés financières -important problème de gestion de l'ambrosie sur l'EA; -faible disponibilité du matériel	-curiosité mais pas forcément une conviction et reste sceptique quant à l'application de la technique à l'échelle de l'EA et de sa viabilité économique -intéressé pour l'expérimenter chez lui, produire des références et échanger sur le sujet	Non	2018
VA	-dégager du temps -optimiser le revenu -se diversifier	-charge de travail liée aux nombreuses activités (grandes cultures, élevage, légumes)	-développer ses K sur la technique mais il reste sceptique car il travaille avec l'ISARA depuis plus de 10 ans sur des essais de TCSL en AB qui sont confrontés à de fortes infestation d'adventices. Pour lui, ne pas travailler le sol en AB n'est pas possible dans son contexte. Il garde en mémoire 2 essais menés dans l'Ain en SDSC bio où le maïs a perdu plus de 50 % de rendement (semé sous luzerne)	Non	2018

*AE pratiquant des TCSL

TCSL : Techniques culturales sans labour ; EA : Exploitation agricole ; MB : Marge brute ; K : connaissances ; AB : Agriculture biologique ; SDSC : Semis direct sous couvert végétal ; MO : Matière organique

Annexe 15 : Exemple de grille d'évaluation complétée par les participants aux visites d'essais

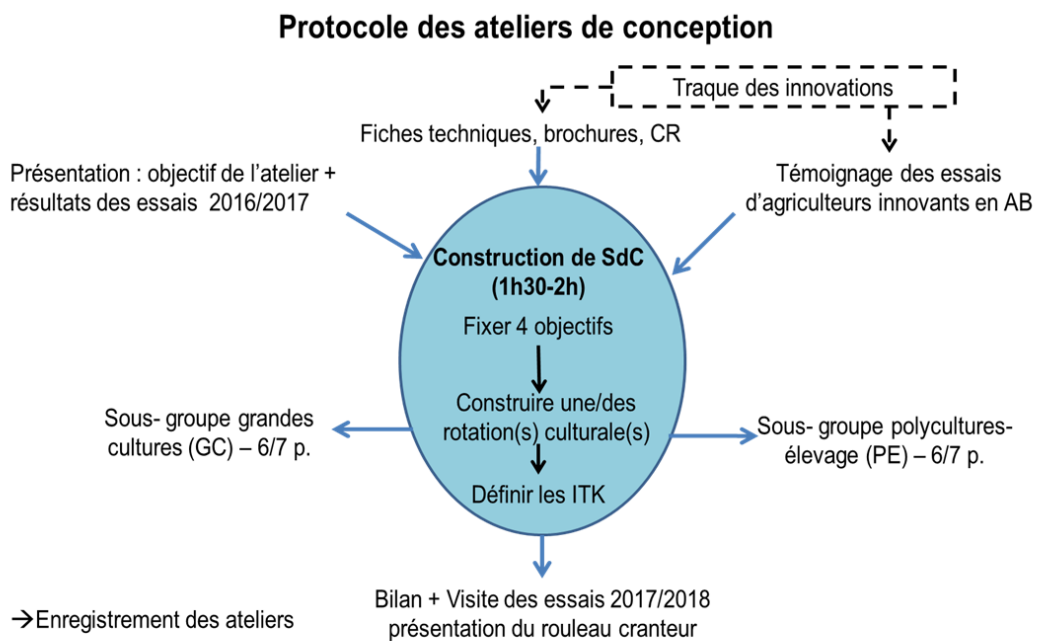
Evaluation de la performance du couvert végétal – Fin mars Fiche 2/4

Couvert végétal	Parcelles seigle	Parcelle triticale	Parcelle mélange
Stade du couvert (cf. Fiche Echelle Zadoks)			
% de recouvrement du sol (Echelle de 1 à 100%) 1= sol nu, inter rangs visibles 100= sol non visible			
Satisfaction du niveau de recouvrement (note de 1 à 6)	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6
Homogénéité au niveau de la parcelle considérée	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6
Hauteur du couvert (cm)			
Satisfaction de la hauteur du couvert fin mars (note de 1 à 6)	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6
Développement du couvert fin mars	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6
Densité du couvert	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6
Vigueur du couvert	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6	☹️☐☐☐☐☐☐ 1 2 3 4 5 6
Estimation visuelle de la biomasse du couvert (T MS/ha) (cf. fiche : outil d'estimation visuelle)			

1= performance faible, peu satisfaisant ; 3-4= performance moyenne ou acceptable, 6= performance satisfaisante ou élevée

Commentaires particuliers :

Annexe 16 : Protocole des rencontres collectives axées sur des ateliers de conception



Annexe 17 : Exemple d'une partie de la grille d'analyse utilisée pour comparer le processus de recherche conjoint avec d'autres démarches participatives basées sur des expérimentations conduites en milieu rural

Indicateurs d'évaluation	Recherche conjointe praticiens-chercheurs (ISARA) (2016-2018) (Vincent-Caboud et al., 2018)	Développement participatif d'une technique innovante (1993-1997) (Petersen et al., 1999)	L'approche champ-école paysanne (CEP) au Kasai Occidental (2003-NA) (Ngalamulume Tshiebue, 2010)	Recherche participative sur l'agriculture de conservation (1999-2000) (Astatke et al., 2003)	Conception en partenariat de systèmes agricoles innovants (CPSAI) (2005-2015) (Vall et al., 2016)	Farmer Participatory Research (FPR) (1994-1998) (Vongkasem et al., 2001)
Objet de l'étude	Semis direct sous couvert végétal sans herbicide	Semis direct sans herbicide	Amélioration des pratiques locales sur la gestion des cultures	Minimiser le travail du sol	Gestion de la fumure organique des cultures (2005-2015)	Limiter l'érosion des sols
Lieu	Europe, France (Lyon)	Amérique du S., Brésil, (Paraná)	Afrique, Congo, Kasai Occidental	Afrique, Ethiopie	Afrique, Burkina Faso	Asie, Thaïlande
Production de connaissances	Forces : production de K scientifiques (Vincent-Caboud et al., 2019b, 2019a, 2017) et empiriques ; prise en compte de la variabilité intersites Faiblesses : valorisation scientifique de toutes les données limitée; des thématiques de K peu développées (semoirs, ravageurs, rotation, etc.)	Forces : production de K empiriques ; les mêmes praticiens expérimentent chez eux plusieurs années (observation des couverts/cultures selon le climat) Faiblesses : pas de résultats quantitatifs pour une valorisation scientifique	Forces : production de K empiriques ; échanges de praticiens à praticiens Faiblesses : K valorisables dans la communauté scientifique limitées	Forces : K empiriques et scientifiques Faiblesses : Les variabilités présentes entre les exploitations agricoles peuvent affecter les résultats donc nécessitent de développer des modèles statistiques plus complexifiés	Forces : K scientifiques et empiriques ; K actionnables par les praticiens Faiblesses : valorisation scientifique difficile (processus long et itératif de la démarche)	Forces : K empiriques et scientifiques Faiblesses : valorisation scientifique limitée
Performances des innovations testées	Forces : Le temps de travail est réduit de plus de la moitié vs les pratiques locales ; la consommation de carburant est réduite ; la gestion des adventices est améliorée par la présence de seigle Faiblesses : Les rendements sont plus faibles que les pratiques locales ; variabilité des résultats forte en fonction du contexte pédoclimatique	Forces : amélioration des performances agronomique (+56% de gain de rendement pour les haricots noirs et 60% pour le maïs) ; réduction de l'érosion du sol observée par les praticiens ; plus de revenus Faiblesses : Impact des aléas climatiques sur les essais parfois difficiles à mener si fortes précipitations (2/3 années)	Forces : performances élevées des variétés améliorées en CEP ; protection des cultures grâce à une lutte contre des ravageurs améliorée (punaises, vers, bruches, etc.) mobilisant des solutions peu coûteuses et respectueuses de l'environnement Faiblesse : domaine de validité des résultats obtenus/faible nombre de répétitions	Forces : moins de consommation d'énergie vs les pratiques locales, moins de perturbation du sol Faiblesses : l'avantage des techniques testées sur le rendement n'est pas toujours vérifié vs les pratiques locales (variabilité) ; plus de temps de travail	Forces : moins de temps de travail et meilleure efficacité de production de fumure organique des innovations Faiblesses : NA	Identification par les praticiens des options les plus performantes en termes de rendement, de revenu et de perte de sol ; réduction des pertes de sol vs les pratiques locales
Innovation et créativité	Forces : ITK sans herbicide, avec couverts et sans travail du sol pour semer la culture ; exploration au champ de différents facteurs ; une diversité de leviers innovants proposés par	Forces : 36 expérimentations menées ; seulement 4/36 des essais où une solution de rattrapage herbicide a été utilisée ; diversité de types de couverts végétaux testés	Forces : L'implication des agriculteurs libère leur créativité Faiblesses : degré d'innovation vs les pratiques locales ; les essais reposent	Forces : prise en compte des contraintes des praticiens en expérimentant chez eux des techniques ; créativité favorisée par les visites d'essais (suggestion d'une	Forces : flexibilité du processus (à chaque boucle, un collectif d'acteur évalué, reproblématise et ajuste) ; prise en compte de l'avis	Forces : diversité de techniques testées en fonction des intérêts des praticiens qu'ils choisissent et adaptent chez eux Faiblesses : La liste

Indicateurs d'évaluation	Recherche conjointe praticiens-chercheurs (ISARA) (2016-2018) (Vincent-Caboud et al., 2018)	Développement participatif d'une technique innovante (1993-1997) (Petersen et al., 1999)	L'approche champ-école paysanne (CEP) au Kasaï Occidental (2003-NA) (Ngalamulume Tshiebue, 2010)	Recherche participative sur l'agriculture de conservation (1999-2000) (Astatke et al., 2003)	Conception en partenariat de systèmes agricoles innovants (CPSAI) (2005-2015) (Vall et al., 2016)	Farmer Participatory Research (FPR) (1994-1998) (Vongkasem et al., 2001)
Enrollement des acteurs	<p>les praticiens, émergence d'un processus d'amélioration continue de rouleaux</p> <p>Faiblesses : des ITK en rupture vis-à-vis du contexte local mais un degré d'innovation limité comparé aux K Nord-Américaines ; faible diversité de couverts testés après 3 ans</p>	<p>Faiblesses : innovations limitées par les contraintes des exploitations (matériels, coûts, etc.), prise de décision influencée par la charge de travail dans les pratiques quotidiennes qui sont priorisées</p>	<p>souvent sur la modification d'un seul facteur technique au sein des pratiques (ex : variété, fertilisation, etc.):</p>	<p>diversité de changements)</p> <p>Faiblesses : degré de créativité par les praticiens limité, les essais sont conçus sur la base d'une technique d'abord testée en station expérimentale puis discutée avec les praticiens avant de la tester chez eux</p>	<p>de différents acteurs</p> <p>Faiblesses : la diversité d'acteurs peut stimuler l'innovation mais aussi la limiter si les intérêts sont trop divergents et complexifier la gestion du processus</p>	<p>d'options proposées par les chercheurs dans laquelle les praticiens doivent choisir celles qu'ils veulent tester peut restreindre leur créativité ; au début, les praticiens exprimaient moins leurs idées par manque de confiance mais ils étaient plus force de proposition à la fin</p>
	<p>Forces : de plus en plus de praticiens volontaires pour mener des essais (26 % des praticiens non AE ayant participé aux rencontres collectives sont prêts à mener une recherche conjointe ou initier leurs essais) ; forte participation des acteurs aux échanges collectifs ; intérêts des praticiens stimulés par les visites d'essais, les ateliers et l'auto-construction d'outils</p> <p>Faiblesses : la majorité des AE n'a été intégrée que dans une année d'essai</p>	<p>Forces : de plus en plus de praticiens impliqués dans des essais chaque année ; intérêt croissant des praticiens pour la technique (stimulé par des formations), des journées d'évaluation des essais et de partage d'expériences entre praticiens ; plus de 400 agriculteurs impliqués dans les échanges sur 3 ans</p> <p>Faiblesses : Prise de risque pour les praticiens (temps passé à concevoir, conduire l'essai)</p>	<p>Forces : effet d'entraînement observé avec des voisins non membres des CEP mettant en place les pratiques développées</p> <p>Faiblesses : faible restitution des K développées aux autres agriculteurs du groupe au sein de la démarche ; certains praticiens ne reviennent pas dans leur groupe initial</p>	<p>Forces : intérêts des agriculteurs à observer des nouvelles techniques dans leur contexte ; intérêts de participer au processus de recherche en intégrant leurs idées et leurs références ; évaluation collective pour prendre en compte les objectifs des praticiens</p> <p>Faiblesses : flexibilité d'une année sur l'autre limitée (lors de l'évaluation et de la mise en place des nouveaux essais pour permettre leur analyse statistique)</p>	<p>Forces : plus d'initiatives d'essais des voisins (21% des agriculteurs non expérimentateurs ont initié des essais) ; développe la capacité des acteurs à co-construire les solutions à leurs problèmes</p> <p>Faiblesses : La recherche de compromis entre les acteurs au cours de la conception est parfois perçue comme une restriction de liberté dans les prises de décision</p>	<p>Forces : les praticiens sont formés ; le processus permet la sensibilisation des praticiens à la problématique de l'érosion du sol et favorise leur engagement dans des essais grâce à l'organisation de démonstrations</p> <p>Faiblesses : interaction sur les parcelles expérimentales entre praticiens et chercheurs limités pendant les essais (essais éloignés des chercheurs, peu de temps disponibles)</p>
	<p>Forces : apprentissage de tous les acteurs sur les couverts et les végétaux, évolution des points de vue</p> <p>Faiblesses : des thématiques de connaissances peu développées ; rapport limité apprentissage/coût du processus itératif</p>	<p>Forces : partage entre chercheurs et praticiens d'approches de gestion innovantes de l'agroécosystème ; capitalisation des innovations des praticiens</p> <p>Faiblesses : peu de connaissances acquises sur la rotation, des blocages matériels</p>	<p>Forces : apprentissage des praticiens élevé de méthodes d'expérimentations ; apprentissage sur des petites modalités techniques : variétés, fertilisation, etc.</p> <p>Faiblesses : les praticiens doivent suivre une méthode défini pouvant limiter leur créativité</p>	<p>Forces : apprentissage élevé des chercheurs grâce à la multiplicité des sites (généricité des K).</p> <p>Apprentissage des praticiens qui s'approprient les K scientifiques en les testant chez eux</p> <p>Faiblesses : valorisation des K empiriques limitée (praticien impliqué à titre consultatif)</p>	<p>Forces : apprentissage des praticiens et des chercheurs par la confrontation des points de vue (prise de décision après des consensus)</p> <p>Faiblesses : rapport limité entre les apprentissages et le coût du processus itératif</p>	<p>Forces : apprentissage élevé des praticiens qui sont formés et grâce à des parcelles de démonstration de méthodes de lutte contre l'érosion du sol</p> <p>Faiblesses : apprentissage social limitée car peu d'interaction sur le terrain entre praticiens et chercheurs</p>

Indicateurs d'évaluation	Recherche conjointe praticiens-chercheurs (ISARA) (2016-2018) (Vincent-Caboud et al., 2018)	Développement participatif d'une technique innovante (1993-1997) (Petersen et al., 1999)	L'approche champ-école paysanne (CEP) au Kasaï Occidental (2003-NA) (Ngalamulume Tshiebue, 2010)	Recherche participative sur l'agriculture de conservation (1999-2000) (Astatke et al., 2003)	Conception en partenariat de systèmes agricoles innovants (CPSAI) (2005-2015) (Vall et al., 2016)	Farmer Participatory Research (FPR) (1994-1998) (Vongkasem et al., 2001)
Changement des pratiques, adoption et promotion de l'innovation	<p>Forces : plus d'initiatives d'essais et d'auto-construction de rouleaux adaptés au contexte ; des praticiens prêts à tester « conjointement » des essais à l'échelle de la rotation</p> <p>Faiblesses : peu de recul sur la démarche donc pas d'adoption ni de changements après en moyenne 1.5 ans ; les essais à l'échelle annuelle et factoriels ne permettent pas de considérer l'ensemble de la complexité du SDSC sans herbicide en particulier vis-à-vis de la maîtrise de la rotation ; processus itératif long</p>	<p>Forces : augmentation du nombre d'essais menés par les praticiens ; augmentation de la taille des essais sur les exploitations agricoles chaque année</p> <p>Faiblesses : pas d'adoption reportée car faible recule encore sur la démarche (3 ans d'essais)</p>	<p>Forces : Evolution des pratiques observée, meilleurs appropriations des changements par les praticiens</p> <p>Faiblesses : les financements limités de ce type d'approche affectent son fonctionnement et la pérennisation de la démarche</p>	NA	<p>Forces : amélioration de l'efficacité de la production de fumures organiques dans les exploitations (grâce à la mise en pratique observée des solutions) et diminution du temps de travail de 12 à 9h/j</p> <p>Faiblesses : processus long ; coût de la démarche</p>	<p>Forces : favorise la diffusion de nouvelles techniques ; adoption des options identifiées comme étant les plus efficaces par les voisins des parcelles pilotes expérimentales présentes dans les 2 villages étudiés (300ha et 50ha en fonction du village de pratiques mobilisant ces options pour réduire l'érosion du sol) ;</p> <p>Faiblesses : Processus long et coût de la démarche</p>
Types d'expérimentation	Chez les praticiens, essais multi sites au sein d'un processus itératif, semis de culture de printemps (soja, maïs) sous des couverts d'hiver	Essais conçus par les praticiens et chez eux, essais, essais multi sites, en majorité des semis de culture de printemps (haricot noir, maïs) sous des couverts d'hiver ou association maïs/soja en SD	Essais collectifs chez des praticiens volontaires (variétés, fertilisation, lutte contre les ravageurs, etc.)	Essais conçus collectivement entre chercheurs et groupe de praticiens volontaires puis testés chez les praticiens (dispositif formel)	Essais menés chez des producteurs et en stations expérimentales (processus itératif)	Essais menés chez des producteurs
Conception	Par les praticiens et les chercheurs	Par les praticiens après discussion avec des chercheurs	Par les praticiens avec l'aide de facilitateurs qui apportent des K	Par les chercheurs avec l'aide des praticiens (discussion autour des 1 ^{ier} résultats obtenus en stations)	Collectif d'acteurs (chercheurs, agriculteurs, conseillers)	Par les praticiens et les chercheurs (formation des praticiens)
Gestion de l'essai	Par les praticiens et les chercheurs	Par les praticiens avec l'aide des chercheurs	Par le collectif de praticiens impliqués	Par les agriculteurs et les chercheurs	Collectif d'acteurs (chercheurs, agriculteurs, conseillers)	Par les agriculteurs

Title : Cover crop-based no tillage without herbicide: technical itinerary design, experimentation and evaluation between farmers and researchers

Abstract : Cover crop-based no tillage (CCNT) appears to be an alternative to preserve soil, reduce labor and limit fuel consumption. The CCNT represents a major challenge to manage weeds by replacing soil tillage and herbicides use with the maintaining of cover crops on the soil surface. However, practicing this technique raises issues regarding the farmers' constraints (e.g., cover crops management, equipment). A literature study and an online survey carried out with 271 farmers, show that knowledge on this matter is limited and restricted to certain area of validity. Among the identified knowledge, the cover crop and equipment choices are the first success factors but gaps of knowledge have also been observed (e.g., cover crop/cash crop combination, equipment). A participatory research was carried out with seven farmers in Auvergne-Rhône-Alpes region to design, experiment and evaluate performances techniques integrating CCNT without herbicide. This participative work, aiming to produce knowledge and improve the spread of the innovation, led to the creation of technical itineraries on soybean plantings into rolled cover crops. Several factors have been studied including the type of cover crop, the cover crop sowing date, the method of cover crop rolling and the soybean row spacing. Despite inferior yields, this participative process permitted to identify more performant techniques than local practices in terms of on agronomic (e.g., weed management improved by rye specie), economic (e.g., rye/triticale mixture reduce costs), organizational (e.g., better access to roller crimper) and environmental (e.g., twice less mechanical interventions on field) dimensions. This participative study directed the research issues by fostering the trials evolution towards thematics that are poorly documented (e.g., cash crop row spacing, cultivars). The research approach has also both fostered the trials initiatives carried out by farmers and resulted in the self-construction of four tools to improve cover crops management. However, the research process is long as well as expensive and this approach does not allow the observation of any changes in the farmers' practices after only three years.

Keywords : Empirical knowledge ; innovative design ; arable crop ; participatory approach ; organic farming ; conservation agriculture

Titre : Semis direct sous couvert végétal sans herbicide : conception, expérimentation et évaluation conjointes d'itinéraires techniques entre praticiens et chercheurs

Résumé : Le semis direct sous couvert végétal (SDSC) apparaît comme une alternative pour protéger les sols, réduire le temps de travail et limiter la consommation de carburant. Le SDSC constitue un enjeu majeur pour maîtriser les adventices en substituant le travail du sol et les traitements herbicides par le maintien d'un couvert sur le sol. Cependant, sa mise en pratique soulève des questions liées aux contraintes des praticiens (ex : gestion des couverts, équipements). Une étude bibliographique et une enquête, menée auprès de 271 praticiens, montrent que les connaissances sur ce sujet sont faibles et leur domaine de validité est restreint. Parmi les connaissances identifiées, le couvert et le choix du matériel sont les premiers facteurs de réussite mais des manques de connaissances ont été relevés (ex : type de combinaison couvert/culture, réglage des outils). Une recherche conjointe a été menée avec sept praticiens en Auvergne-Rhône-Alpes afin de concevoir, expérimenter et évaluer des techniques performantes intégrant du SDSC sans herbicide. Ce travail conjoint, visant à produire des connaissances et améliorer la diffusion de l'innovation, a permis de définir des itinéraires techniques sur du soja semé sous couvert roulé. Plusieurs facteurs ont été étudiés, incluant le type de couvert, sa date de semis et son mode de roulage ainsi que l'inter-rang de la culture. Malgré des rendements inférieurs, la recherche conjointe a permis d'identifier des techniques plus performantes sur le plan agronomique (ex : maîtrise des adventices améliorée par la présence de seigle), économique (ex : mélange seigle/triticales réduit les charges), organisationnel (ex : facilité d'accès à des rouleaux) et environnemental (ex : deux fois moins d'interventions) que les pratiques locales. Ce travail conjoint a permis d'orienter les questions de recherche en les faisant évoluer vers des thématiques peu documentées (ex : inter-rang, variétés). La démarche a aussi encouragé les initiatives d'essais des praticiens et a permis l'auto-construction de quatre outils permettant de gérer les couverts. Cependant, nous montrons que le processus est long et coûteux et ne permet pas à l'issue de 3 ans de percevoir des changements dans les pratiques.

Mots-clés : connaissances empiriques ; conception innovante ; grandes cultures ; approche participative ; agriculture biologique ; agriculture de conservation