



HAL
open science

Étude des composantes de la durabilité de systèmes de culture du Réseau Mixte Technologique "Systèmes de Culture Innovants": analyse des performances, étude des relations entre critères d'évaluation

Matthieu Hirschy

► To cite this version:

Matthieu Hirschy. Étude des composantes de la durabilité de systèmes de culture du Réseau Mixte Technologique "Systèmes de Culture Innovants": analyse des performances, étude des relations entre critères d'évaluation. Sciences agricoles. 2013. dumas-00943220

HAL Id: dumas-00943220

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00943220>

Submitted on 7 Feb 2014

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.



**AGROCAMPUS OUEST
CFR Rennes**

65 rue de Saint Brieu
CS 84215
35042 Rennes Cedex

INRA - Centre de Dijon

UE 115 - Domaine d'Epoisses
21110 Bretenière

Mémoire de Fin d'Études

**Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques,
Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage**

Année universitaire : 2012 - 2013

Spécialisation : Sciences et Productions Végétales

Option : Ingénierie des Agrosystèmes

**Etude des composantes de la durabilité de systèmes de culture du
Réseau Mixte Technologique « Systèmes de Culture Innovants »**

Analyse des performances – Etude des relations entre critères d'évaluation

Par : Matthieu HIRSCHY

Date : / / Signature

Bon pour dépôt (version définitive)
Autorisation de diffusion : Oui Non

Devant le jury :

Soutenu à Rennes, le 13/09/2013

Sous la présidence de : Philippe LETERME

Maître de stage : Violaine DEYTIEUX

Enseignant référent : Matthieu CAROF

Autres membres du jury : Eric JUSTES, Ingénieur de Recherche

Christophe LE MAY, Enseignant Chercheur

"Les analyses et les conclusions de ce travail n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST".

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Cadre lié à la confidentialité :

Aucune confidentialité ne sera prise en compte si la durée n'en est pas précisée.

Préciser les limites de la confidentialité ⁽²⁾ :

Confidentialité absolue : oui non

(ni consultation, ni prêt)

Si oui 1 an 5 ans 10 ans

Le maître de stage⁽⁴⁾,

Cadre lié à la diffusion du mémoire :

A l'issue de la période de confidentialité et/ou si le mémoire est validé diffusable sur la page de couverture, il sera diffusé sur les bases de données documentaires nationales et internationales selon les règles définies ci-dessous :

Diffusion de la version numérique **du mémoire** : oui non

Référence bibliographique diffusable⁽³⁾ : oui non

Résumé diffusable : oui non

Mémoire papier consultable sur place : oui non

Reproduction autorisée du mémoire : oui non

Prêt autorisé du mémoire papier : oui non

.....
Diffusion de la version numérique **du résumé** : oui non

↳ Si oui, l'auteur⁽¹⁾ complète l'autorisation suivante :

Je soussigné(e) _____, propriétaire des droits de reproduction dudit résumé, autorise toutes les sources bibliographiques à le signaler et le publier.

Date :

Signature :

Rennes, le

L'auteur⁽¹⁾,

L'enseignant référent
ou son représentant

(1) auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(2) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(3) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé.

(4) Signature et cachet de l'organisme

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma maîtresse de stage, Violaine Deytieux, d'avoir toujours souhaité partager ses connaissances pour m'aider à mener à bien ce mémoire, ainsi que de m'avoir accordé toute sa confiance.

Je remercie l'ensemble des agriculteurs que j'ai pu rencontrer lors de mes enquêtes, pour le temps qu'ils ont accepté de me consacrer et pour les discussions que nous avons pu avoir. Il est certain que leur participation toujours volontaire à ce travail a grandement participé à sa réalisation.

Je remercie les expérimentateurs des systèmes de culture innovants étudiés, de s'être investis dans ces évaluations, jusqu'à libérer de leur temps pour rencontrer les agriculteurs. Leur connaissance des régions considérées, leur implication dans ce travail et les échanges que nous avons pu avoir ont sans aucun doute été primordiales dans le bon déroulement du projet.

Aussi, je remercie l'ensemble des personnes avec qui j'ai pu être en contact durant toute la durée de mon mémoire, pour leur disponibilité et leur intérêt pour le travail mené. Leurs lumières sur les nombreuses questions que j'ai pu leur soumettre ont été déterminantes et riches d'enseignement.

Il va sans dire que je remercie aussi l'ensemble du personnel de l'Unité Expérimentale, pour leur bonne humeur, à table ou ailleurs et de m'avoir fait apprécier ses moments passés dans cette contrée qui m'était alors inconnue. Il est certain que la moutarde aura maintenant un goût d'Epoisses pour moi.

Table des matières

Introduction	1
1 / Cadre d'étude de l'analyse de systèmes de culture innovants	2
1.1 Contexte des évaluations multicritères de systèmes de culture	2
1.2 Objectifs de travail	3
2 / Méthodes d'évaluation multicritère de systèmes de culture innovants et d'analyse des relations entre critères d'évaluation	4
2.1 Echantillon de systèmes de culture étudiés	4
2.1.1 Des systèmes de culture innovants	4
2.1.2 Systèmes de culture de référence représentatifs des pratiques locales dominantes	6
2.2 Evaluation des composantes de la durabilité des systèmes de culture	9
2.2.1 Quels critères d'évaluation retenir ?	9
2.2.2 Des critères caractérisés par des indicateurs	10
2.2.3 Outil de caractérisation des indicateurs retenus : CRITER 2.0	11
2.2.4 Bases de paramétrage et définition des situations de production sous CRITER 2.0	11
2.3 Analyse de la contribution des systèmes aux composantes de la durabilité	12
2.3.1 Caractérisation des performances des systèmes de culture innovants	12
2.3.2 Analyses transversales des performances des SdC et relations entre critères d'évaluation	13
3 / Caractérisation des performances atteintes par les systèmes expérimentaux et étude de relations entre critères	14
3.1 Des systèmes innovants et performants	14
3.1.1 Une amélioration contrastée des performances sociales	14
3.1.2 Une limitation des impacts négatifs des pratiques culturelles sur l'environnement	15
3.1.3 Des performances économiques en demi-teinte	20
3.2 De meilleures performances, déterminées par les stratégies de gestion	21
3.3 Analyse transversale des relations entre critères d'évaluation	22
4 / Discussion	24
4.1 Une méthode de référence pertinente mais sensible ?	24
4.2 Quelles limites aux indicateurs utilisés et améliorations à apporter ?	25
4.3 Acceptabilité des innovations et des évolutions de pratiques culturelles par les agriculteurs	25
4.4 Un travail appelant à être poursuivi	26
Conclusion	26
Références bibliographiques	27
Annexes	30

Index des Figures

Figure 1 : Carte des dispositifs testés en expérimentation dans le cadre du RMT SdCi et dispositifs innovants retenus	4
Figure 2 : Temps de travail (h/ha/an) des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	14
Figure 3 : Nombre de passage (/ha/an) contenant au moins un produit phytosanitaire toxique T, T+ ou Xn des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	14
Figure 4 : Notes INDIGO® du maintien du statut organique du sol des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	15
Figure 5 : Indices de fréquence de traitements totaux des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	16
Figure 6 : Quantités d'azote volatilisées (kg d' NH_3 /ha/an) sous forme ammoniacale des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	17
Figure 7 : Quantités de protoxydes d'azote (kg d' N_2O /ha/an) émises par les SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	17
Figure 8 : Notes INDIGO® du risque de perte de matière active dans l'air des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	18
Figure 9 : Notes INDIGO® du risque de perte de matière active dans les eaux superficielles des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	19
Figure 10 : Notes INDIGO® du risque de perte de matière active dans les eaux profondes des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	19
Figure 11 : Quantité de nitrates lessivés (kg d' NO_3^- /ha/an) des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	19
Figure 12 : Consommation énergétique (GJ/ha) des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	20
Figure 13 : Efficacité énergétique (%) des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	20
Figure 14 : Marges semi-nettes moyennes (€/ha/an) obtenues par les SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	21
Figure 15 : Efficacité économique (%) des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés	21
Figure 16 : Relation entre les critères Dépendance aux énergies fossiles et Rentabilité économique, en pourcentage de leur référence	22
Figure 17 : Relation entre les critères Charge de travail et Rentabilité économique, en pourcentage de leur référence	22
Figure 18 : Relation entre les critères Pression des produits phytosanitaires et Rentabilité économique, en pourcentage de la référence	23
Figure 19 : Relation entre les critères Dépendance aux énergies fossiles et Toxicité pour l'applicateur, en pourcentage de leur référence	23

Index des Tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des situations de production identifiées et SdCi concernés	5
Tableau 2 : Description des types de sol, successions culturales et objectifs des SdCi expérimentaux	5
Tableau 3 : Stratégies de gestion mobilisées par les SdCi expérimentaux retenus	6
Tableau 4 : Stratégies de gestion mobilisées par les SdC-LoDo	9
Tableau 5 : Critères d'évaluation et indicateurs retenus	10

Glossaire

DPU	Droit à paiement unique
IFT	Indice de fréquence de traitement
IPAMPA	Indice des prix d'achat des moyens de production agricole
PI	Protection intégrée
RA	Région agricole
RMT SdCi	Réseau Mixte Technologique « Système de culture Innovant »
SD	Semis direct
SdC	Système de culture
SdCi	Système de culture innovant
SdC-LoDo	Système de culture Local Dominant
SSP	Service de la statistique et de la prospective
TCS	Techniques culturales simplifiées

Introduction

L'objectif premier de l'agriculture est de pouvoir garantir une alimentation en quantité suffisante et de qualité, à la fois aux agriculteurs et à ceux qui en dépendent. L'évolution des pratiques agricoles tant de par les connaissances acquises que de par les technologies nouvelles développées, a alors suivi un processus constant d'innovations. Toutefois, durant la seconde moitié du XX^{ème} siècle, le modèle agricole a été amené à se transformer en profondeur grâce au progrès technique, en évoluant en une agriculture productiviste (Viaux, 1999). Les moyens disponibles, cohérents avec l'objectif de production, reposaient alors sur le développement de la mécanisation, l'utilisation d'intrants favorisée par les avancées de l'industrie agrochimique et le progrès de l'amélioration variétale. Bien qu'atteignant l'objectif fixé par les politiques agricoles, ce modèle d'agriculture intensive est depuis fortement remis en question, tant par l'opinion publique que par les scientifiques (Bertrand et al., 2005). La prise de conscience par l'ensemble des acteurs des impacts négatifs qu'il implique sur l'environnement, comme la dégradation de la qualité des eaux, par la présence de nitrate, ou des risques pour la santé humaine dus à la présence de résidus de pesticides dans les denrées consommables, justifie la nécessité, évoquée depuis près de 20 ans, de faire évoluer les systèmes de culture mis en œuvre aujourd'hui (Meynard et Girardin, 1991).

Les enjeux pour l'agriculture actuelle sont ainsi plus pluriels qu'ils ne l'étaient les précédentes décennies : le contexte socio-économique impose aux exploitants agricoles de concilier production, rentabilité, préservation de l'environnement et des ressources. Le renouvellement des objectifs du modèle agricole actuel doit aussi tenir compte d'enjeux émergents, tels que la prévision d'une augmentation importante de la demande mondiale en production végétale et animale (World Bank, 2007) mais aussi s'adapter aux décisions politiques (Van Ittersum et Koning, 2010). Ces décisions peuvent être instaurées à l'échelle européenne, comme la Directive Nitrates, ou nationale, avec par exemple l'objectif de diminuer de 50%, d'ici 2018 en France, l'utilisation de produits phytosanitaires (Plan Ecophyto 2018), alors même que l'on constate l'apparition d'impasses techniques (stabilisation de l'évolution des rendements, problèmes de résistances aux pesticides).

Parallèlement à l'évolution des enjeux auxquels l'agriculture doit faire face, les évolutions des connaissances agronomiques, écologiques et de enjeux a conduit les agronomes à considérer le champ cultivé comme faisant partie d'un agro-écosystème (Colnenne et al., 2012) et à raisonner à l'échelle du système de culture (Doré et al., 2006). De plus, des solutions techniques et agronomiques existent afin de limiter l'usage d'intrants dans les exploitations, de maîtriser les pressions biotiques ou de réduire les impacts de l'agriculture sur l'environnement. Toutefois, tous les systèmes de culture, selon leur contexte socio-économique, ne font pas face aux mêmes enjeux (Meynard, 2008). Il est donc nécessaire de pouvoir tester et évaluer la faisabilité de mise en œuvre de systèmes de culture innovants adaptés aux contextes régionaux associés, tout en identifiant les déterminants qui rendent certains systèmes de culture plus performants que d'autres, afin de répondre aux enjeux de durabilité, localement et globalement.

Dans un premier temps seront mobilisés des éléments bibliographiques permettant de replacer les expérimentations au champ de systèmes de culture innovants dans un contexte d'évaluation multicritère de la durabilité et seront définis les objectifs de ce travail. La démarche suivie et les moyens mis en œuvre pour atteindre ses objectifs seront alors détaillés dans une seconde partie, qui laissera ensuite place aux résultats obtenus ainsi qu'aux réflexions et améliorations méthodologiques qu'ils soulèvent.

1 / Cadre d'étude de l'analyse de systèmes de culture innovants

1.1 Contexte des évaluations multicritères de systèmes de culture

Tendre à une agriculture durable s'inscrit dans une démarche plus générale de développement durable, consistant à répondre "aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs" (Rapport Brundtland, 1987). Il découle de cette définition le besoin de pouvoir concilier à la fois les enjeux environnementaux, économiques et sociaux selon les contextes de production et pédoclimatiques considérés. C'est pour répondre à ces enjeux réactualisés que les agriculteurs et les acteurs du monde agricole innove. L'innovation est considérée comme un processus collectif et itératif (Hatchuel et al., 2006 ; Meynard, 2008), élaborée à partir d'allers retours fréquents entre des étapes de conception et d'évaluation (Lançon et al., 2008). Elle peut être initiée dans une démarche d'amélioration de l'existant suite à des initiatives d'agriculteurs (Petit et al., 2012) ou à l'issue d'atelier de conception (Mischler et al., 2008) ou alors émerger d'une conception de novo qui s'appuie sur des connaissances théoriques (Lançon et al., 2008 ; Meynard, 2006), pouvant mobiliser un groupe de travail et s'appuyer sur l'utilisation de modèles (Jeuffroy et al., 2008). Ces deux démarches sont bien souvent complémentaires, l'expérimentation au champ de systèmes de culture pouvant faire suite à la caractérisation des prototypes de systèmes de culture les plus prometteurs suite à des évaluations *a priori* (Reau et al., 2012).

Appliquer ces démarches à l'échelle du système de culture permet d'adopter une échelle spatiale suffisamment précise pour prendre en compte les impacts des choix des cultures et des techniques culturales et à une échelle temporelle suffisamment longue pour pouvoir juger des performances économiques, sociales et environnementales qui impliquent des processus de longue durée (Doré et al., 2006 ; Papy, 2008 ; Craheix et al., 2012). Le système de culture est considéré comme l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Il se définit par la nature des cultures et leur succession et les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures (Sébillotte, 1990).

Il est important de soumettre les systèmes de culture innovants expérimentés à une évaluation (Debaeke et al., 2008). Cela permet tout d'abord de déterminer la capacité de ces systèmes à atteindre les objectifs initiaux qui leur sont assignés, comme des objectifs techniques et économiques pour l'agriculteur (Nolot et Debaeke, 2003) ou répondant à des enjeux locaux variés. Ensuite peut être évaluée leur contribution au développement durable, grâce à la caractérisation de performances économiques, environnementales et sociales, au-delà des résultats techniques et des objectifs fixés par rapport à une ou plusieurs problématiques précises (Deytieux et al., 2012). Une évaluation des systèmes de culture expérimentés permet aussi de s'assurer de leur cohérence agronomique en analysant la capacité des stratégies de gestion à atteindre les résultats agronomiques visés.

Une telle démarche d'évaluation facilite par la même occasion l'appropriation des innovations par les agriculteurs (Le Gal, 2009). Elle fournit aussi des bases concrètes de réflexion aux acteurs du monde agricole, qu'ils soient issus de la recherche, du développement et de la formation (Deytieux et al., 2012). Il est aussi permis d'adapter les évaluations en fonction des enjeux et des objectifs auxquels sont confrontés ces différents acteurs et les agriculteurs, comme cela est le cas avec des outils d'évaluation multicritère (Giteau, 2010 ; Omon, 2010). L'évaluation engagée nécessite ainsi de se placer à une échelle annuelle et pluriannuelle (Debaeke et al., 2008), permettant d'apprécier les performances d'une combinaison de techniques, des effets de précédents et cumulatifs des cultures et ses

différents effets sur les composantes de l'agrosystème (Deytieux et al., 2012). Mobilisant des critères d'évaluation relatifs à l'ensemble des composantes que l'on souhaite évaluer, l'évaluation est alors multicritère. Les résultats obtenus sont aussi replacés sur l'ensemble du temps de la succession culturale et la variabilité intra-annuelle est prise en compte en évaluant plusieurs parcelles où est mis en place le même système de culture dans un même contexte pédoclimatique.

De nombreux systèmes de culture innovants ont ainsi été expérimentés au champ, entre autres en système de grande culture et selon différents niveaux de rupture (Ecophyto Tome VIII, 2009). Certains de ces systèmes ont déjà fait l'objet d'évaluations multicritères avec différents outils (Nolot et Debaeke, 2003 ; Bertrand et al., 2005 ; Colnenne David et al., 2012) et des indicateurs permettant de quantifier les résultats et performances de systèmes et de synthétiser les données obtenues ont été choisis. Ces indicateurs permettent ainsi de caractériser des critères synthétiques, facilement calculables et simples à interpréter (Nolot et Debaeke, 2003 ; Castoldi et Bechini, 2010), sur lesquels peuvent être élaborés des jugements, positifs ou négatifs (Lançon et al., 2008). En agrégeant ces critères se référant aux 3 piliers de la durabilité, à l'aide de méthodes d'aide à la décision multicritères déjà établies, il a été possible d'évaluer les performances des systèmes de culture (Castoldi et Bechini, 2010 ; Omon, 2010). Toutefois, ces méthodes prennent en considération des critères pouvant présenter des relations particulières entre eux, selon les stratégies de gestion adoptées par les systèmes. Il est par exemple possible de relier une diminution de l'usage de pesticides à une baisse de la consommation énergétique d'un système diversifié (Boissinot et al., 2011) ou d'en améliorer l'efficacité dans le cadre de l'agriculture biologique (Deike et al., 2008). Certains critères pouvant toutefois être antagonistes, l'utilisateur doit donc, au travers des méthodes utilisées, faire des choix selon les priorités voulues en attribuant des poids différents à chacun des critères sélectionnés (Sadok et al., 2008). Mais les méthodes habituellement utilisées pour décrire la durabilité des systèmes de culture ne permettent pas de prendre en compte les interactions qui existent entre eux (Castoldi et al., 2010). La majorité des méthodes d'évaluation de la durabilité sous-estiment donc les interactions entre les indicateurs (Binder et al., 2010), à l'exception d'approches, telle SSP (Sustainable Solution Space), plus intégratives, qui prennent en compte les interactions entre indicateurs pour définir un espace de durabilité qui fait le compromis entre l'ensemble des critères considérés (Castoldi et al., 2010 ; Binder et al., 2010). Il faudrait alors ne pas considérer chaque critère indépendamment les uns des autres lors d'une évaluation multicritère, étant donné les relations qui peuvent exister entre eux, mais plutôt raisonner l'évaluation selon l'ensemble de ces relations, en cherchant à optimiser les performances des systèmes de culture.

1.2 Objectifs de travail

Dans le but de contribuer à la conception innovante répondant à des enjeux économiques, environnementaux et sociaux pour des systèmes en grande culture et polyculture élevage, de nombreux systèmes de culture expérimentaux ont été élaborés et regroupés au sein du Réseau Mixte Technologique « Systèmes de Culture Innovants » (RMT SdCi) créé en 2007 dans le cadre du CASDAR 7103 « Systèmes de culture innovants ». Les objectifs qui lui sont assignés sont de 1) mettre en place un réseau multi-local et pluriannuel d'expérimentations au champ de systèmes de culture innovants (SdCi) pour évaluer leurs conditions de réussite sur le terrain et leurs performances de durabilité, 2) finaliser et rendre opérationnelle une démarche de conception – évaluation de SdCi pour identifier les plus prometteurs et 3) créer un réseau de compétences pour communiquer les résultats obtenus et accompagner à la transition des systèmes de culture vers le développement durable (Petit et al., 2012). Plus spécifiquement, les objectifs du réseau expérimental sont de tester la

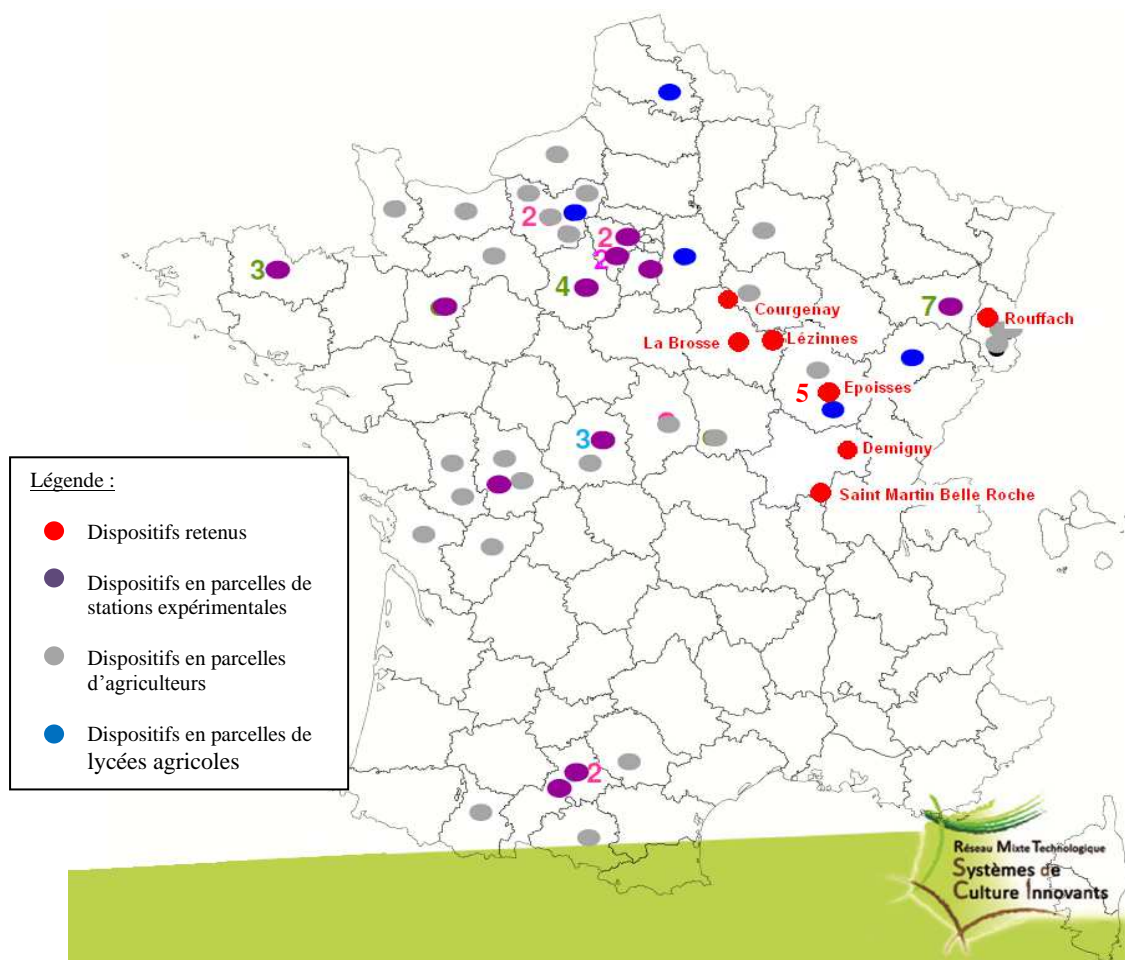


Figure 1 : Carte des dispositifs testés en expérimentation dans le cadre du RMT SdCi et dispositifs innovants retenus

Les chiffres correspondent au nombre de SdCi testés au sein d'un même dispositif si plus d'un SdCi testé par dispositif

faisabilité technique et agronomique des systèmes expérimentaux ainsi que produire des connaissances sur ces systèmes et leurs performances via des analyses transversales, selon leurs objectifs et différentes composantes de la durabilité.

Ce travail consistera dans un premier temps à procéder à l'évaluation multicritère d'un échantillon de systèmes de culture innovant appartenant au RMT SdCi, afin de caractériser leurs performances selon différentes composantes de la durabilité et leurs objectifs puis d'identifier quels sont les déterminants de ces performances. Etant donné les éventuelles relations entre les critères d'évaluation étudiés, les indicateurs caractérisés seront ensuite mobilisés afin d'étudier les relations pouvant exister entre les différents critères d'évaluation. Il s'agit alors de s'intéresser à la forme de leur relation et de déterminer si des critères d'évaluation sont antagonistes ou non, afin de parvenir à les concilier au mieux.

2 / Méthodes d'évaluation multicritère de systèmes de culture innovants et d'analyse des relations entre critères d'évaluation

2.1 Echantillon de systèmes de culture étudiés

2.1.1 Des systèmes de culture innovants

2.1.1.1 Systèmes de culture innovants retenus

Les 44 dispositifs expérimentaux que compte le RMT SdCi permettent de tester 70 SdCi. Ces systèmes ont été classifiés à dire d'experts dans une typologie proposée par le RMT SdCi, permettant de différencier les systèmes selon 3 grands types : systèmes conduits en production intégrée (PI) en grande culture (PI GC), en production intégrée en synergie avec l'élevage (PI Elv) ou systèmes à haute performance énergétique (HP NRJ).

Pour cette étude, un nombre restreint de SdCi a été sélectionné. Il s'agit de systèmes ayant suffisamment de campagnes réalisées en expérimentation pour qu'au moins une succession culturale ait été complétée et sur un nombre suffisant de parcelles afin qu'au moins plusieurs cultures différentes de la succession soient conduites la même année et au mieux que l'ensemble des cultures soient présentes chaque année (permet de prendre en compte la variabilité inter- et intra-annuelle des performances des systèmes de culture).

Ainsi, 7 SdCi ont été sélectionnés (Figure 1) :

➤ Saint Martin Belle Roche (71), Demigny (71), Lézennes (89) et Courgenay (89) : ces systèmes expérimentaux sont conduits chez des agriculteurs volontaires souhaitant s'impliquer dans une démarche d'innovation. Ils sont mis en place et suivis annuellement par des conseillers de la Chambre d'Agriculture départementale correspondante, afin d'accompagner l'agriculteur dans ses prises de décisions annuelles et ses interventions quotidiennes. Son rôle est aussi d'assurer la synthèse annuelle du dispositif, confrontant les itinéraires pratiqués aux objectifs et aux règles de décision élaborées au début de l'expérimentation. Ces systèmes ont pour caractéristique de s'adapter à la capacité d'évolution des agriculteurs impliqués, en fonction du matériel disponible et de la logique entrepreneuriale de l'exploitation.

	Systèmes de culture innovants concernés	Caractéristiques majeures
Situation de production n°1	Demigny Epoisses	Terres à bons potentiels de rendement Succession majoritairement Colza-Blé-Orge hiver, cultures les plus rémunératrices Accès à des filières de production de cultures de diversification (Maïs, Soja, Moutarde, etc...) Pression adventice maîtrisable par les herbicides, pressions des autres bioagresseurs maîtrisées par application de produits phytosanitaires
Situation de production n°2	Courgenay Lézinnes La Brosse	Terres superficielles des Plateaux de Bourgogne (environ 25 cm), potentiels de rendements moyens voire faibles Forte pression adventices, pressions des autres bioagresseurs maîtrisées Succession majoritairement Colza-Blé-Orge hiver, cultures les plus rémunératrices Accès possible aux filières de diversification mais toutes les cultures ne sont pas possibles à conduire Introduction de cultures de printemps de plus en plus courantes chez les agriculteurs
Situation de production n°3	Saint Martin Belle Roche Rouffach	Terres profondes à bons potentiels de rendements Pressions biotiques modérées, exceptée la présence de Chrysomèle (Rouffach en zone focus et Saint Martin Belle Roche à proximité d'une zone focus), enherbement maîtrisé Accès à des filières de production (Soja, etc...) mais maintien des cultures les plus rémunératrices (Maïs grain et Blé), poussant à une simplification des successions (alternance Maïs grain - Blé ou monoculture Maïs grain) Concurrence de la vigne (et d'ateliers d'élevage à Saint Martin Belle Roche) Disponibilité en eau (irrigation à Rouffach et Saint Martin Belle Roche en bord de Saône)

Tableau 1 : Caractéristiques des situations de production identifiées et SdCi concernés

SdC expérimentaux (typologie - dép.)	Type de sol dominant (nb de parcelles)	Durée	Succession culturale du SdCi	Objectifs des systèmes de culture expérimentaux
Saint Martin Belle Roche (PI GC - 71)	Limon argilo battant profond drainé (4)	2007 - 2013	Colza – Blé tendre – Maïs grain – Maïs grain – Blé tendre	- Maintenir le niveau de production - Maîtriser les adventices - Réduire l'utilisation de produits phytosanitaires (en particulier insecticides)
Demigny (PI GC - 71)	Limon battant drainé (4)	2004 - 2013	Soja/Tournesol/Maïs grain – Blé tendre – Colza – Blé tendre – (Maïs grain)	- Réduire les impacts négatifs des pratiques culturales sur l'environnement - Conserver le temps libre de l'agriculteur - Maintenir un revenu acceptable (330 €/ha de MB en contexte de prix bas)
La Brosse (PI Elv - 89)	Argilo-calcaire superficiel (9)	2008 - 2013	Pois hiver – Colza – Blé tendre – Orge hiver – Chanvre – Blé tendre – Orge printemps	- Réduire la pression des bioagresseurs sur le système - Réduire les impacts négatifs des pratiques culturales sur l'environnement - Maintenir la rentabilité du système
Lézinnes (PI GC - 89)	Argilo-calcaire superficiel (6)	2004 - 2009	Colza – Blé tendre – Orge printemps/Tournesol – Blé tendre – Orge hiver	- Réduire les impacts négatifs des pratiques culturales sur l'environnement - Améliorer la gestion des adventices - Maintenir la rentabilité économique - Libérer du temps de travail
Courgenay (PI GC - 89)	Terre crayeuse (4)	2006 - 2013	Pois hiver – Colza – Blé tendre – Orge printemps – Tournesol – Blé tender	- Améliorer la gestion des adventices - Diminuer l'utilisation de produits phytosanitaires - Maintenir un revenu acceptable
Epoisses (PI GC - 21)	Argilo-limoneux profond drainé et irrigué (2 parcelles pour chaque système)	2001 - 2012	S1 : Raisonné Colza – Blé tendre – Orge hiver	- Maximiser les résultats économiques - Maîtriser la flore adventice
			S2 : PI avec techniques culturales simplifiées (cf. bas de page)	- Limiter le temps de travail - Réduire la dépendance aux herbicides, tout en maîtrisant la flore adventice - Réduire la pollution des eaux par les herbicides - Améliorer le bilan énergétique
			S3 : PI sans désherbage mécanique (cf. bas de page)	- Réduire la dépendance aux herbicides tout en maîtrisant la flore adventice - Améliorer le bilan énergétique
			S4 : PI avec désherbage mécanique (cf. bas de page)	- Réduire fortement de la dépendance aux herbicides, tout en maîtrisant la flore adventice - Améliorer le bilan énergétique
			S5 : PI sans désherbage chimique (cf. bas de page)	- Aucun herbicide de synthèse, tout en maîtrisant la flore adventice - Améliorer le bilan énergétique
Rouffach (HP NRJ - 68)	Sablo argilo limoneux profond drainé et irrigué (3)	2009 - 2013	Mg – So – Bth	- Maintenir une marge aussi importante que celle d'une monoculture de Maïs - Réduire l'utilisation d'énergie fossile - Limiter les pertes de nitrates - Limiter l'utilisation de produits phytosanitaires - Libérer 8 semaines de temps libre par an

Tableau 2 : Description des types de sol, successions culturales et objectifs des SdCi expérimentaux

*Principe des successions systèmes S2-S3-S4-S5 : Colza – Céréale – Céréale – Cult. Printemps(semis précoce) – Cult. Printemps (semis tardif) et ajout d'une légumineuse

➤ Les systèmes d'Epoisses (21), de Rouffach (68) et de La Brosse (89) sont respectivement conduits sur l'Unité Expérimentale d'Epoisses (INRA) les exploitations des Lycées Agricoles de Rouffach et de La Brosse. N'étant pas mis en place chez des agriculteurs, ces systèmes peuvent s'accorder un niveau de rupture par rapport à l'actuel plus important et ainsi suivre des règles de décision plus contraignantes et ambitieuses (arrêt de désherbage chimique, introduction de culture de vente marginales, etc...).

De plus, et contrairement aux 6 autres dispositifs qui correspondent chacun à un SdCi testés en particulier, le site d'Epoisses héberge 5 systèmes de culture avec des objectifs et des schémas décisionnels différents. Le choix a été fait de considérer l'ensemble de ces 5 systèmes, y compris celui ayant été mis en place pour servir de référence aux 4 autres. De plus, on différenciera les systèmes S2 et S4 en S2-TCS (en techniques culturales simplifiées) et S4-Bett (culture de Betterave sucrière) avant 2006 et S2-SD (en semis direct) et S4-Maïs (Betterave remplacée par Maïs grain) après 2006.

2.1.1.2 Des systèmes de culture expérimentaux et des situations de production contrastés

Le RMT SdCi étant un réseau national, les dispositifs qui y en font partis reflètent la diversité des situations de production du paysage agricole français. La situation de production est définie comme la combinaison des composantes physiques, chimiques et biologiques d'une parcelle donnée (quelle que soit la culture qui y est conduite) ainsi que de son environnement socio-économique (Aubertot et Robin, soumis). Chacun des systèmes expérimentés est ainsi caractérisé par une situation de production qui lui est unique. Les systèmes innovants retenus dans le cadre de ce travail ont ainsi pu être classés selon 3 grands types de situation de production (Tableau 1), en se limitant ici à leurs caractéristiques pédoclimatiques et à leur environnement socio-économique (principalement accès aux filières de production).

A ces aspects inhérents à la localisation géographique des dispositifs s'ajoute la diversité des systèmes de culture rencontrés, tant de par les objectifs (Tableau 2) qui leurs sont assignés que de par les stratégies de gestion mises en œuvre et les itinéraires techniques réalisées par l'agriculteur ou l'expérimentateur. En effet, enrichis par la participation de nombreux acteurs issus d'organismes de recherche, de développement agricole ou de formation par le biais de lycées agricoles, ces systèmes retenus sont conduits selon des stratégies de gestion variées, définies en fonction leur situation de production et des enjeux locaux auxquels ils sont confrontés. Les stratégies de gestion mobilisées par ces systèmes innovants sont présentées en Tableau 3.

2.1.1.3 Collecte des données des systèmes de culture innovants

Des informations générales concernant les objectifs assignés aux différents SdCi ainsi que les stratégies de gestion utilisées ont été obtenus à partir des documents centralisés par le RMT SdCi

Les données complètes d'itinéraires techniques réalisés par les agriculteurs et les techniciens pour ces systèmes innovants ont été obtenues grâce aux synthèses annuelles des bilans de campagnes fournies par les expérimentateurs de chacun de ces systèmes, ainsi que par les données précédemment saisies dans l'outil INDIGO® (Bockstaller et Girardin, 2008) dans le cadre de précédents projets dans le cadre du RMT SdCi.

	Stratégies de gestion mobilisées	Saint Martin Belle Roche	Demigny	Courgenay	Lézennes	La Brosse	Rouffach	S1	S2-TCS	S2-SD	S3	S4-Bett	S4-Maïs	S5
Echelle de la succession	Alternance cultures hiver/printemps	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
	Introduction de légumineuses en culture principale		X	X		X	X		X	X	X	X	X	X
Interculture	Cultures intermédiaires	X		X	X	X	X		X	X	X	X		
	Légumineuses en interculture	X		X	X	X			X	X	X			
	Mode de destruction	Labour		Labour / Broyage	Chimique	Labour	Mécanique / Chimique		Chimique	Chimique / Broyage	Labour / Broyage	Labour		
Travail du sol	Type de travail du sol	Labour	TCS	Labour	TCS	Labour	TCS + SD	Labour	TCS	SD	Labour	Labour	Labour	Labour
	Fréquence de labour	1/1		1/2		2/7		1/1			1/2	1/3	1/3	1/2
Semis	Variétés résistantes aux maladies	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X	X
	Retard date de semis	X		X	X	X			X	X	X	X	X	X
	Diminution densité de semis			X	X	X	X							
Fertilisation	Fractionnement des apports	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Apports organiques	X	X			X								
	Objectif de rendement Blé (qt/ha)	88	65	85	55	60	70	85	75	75	75	75	75	75
Gestion des adventices, maladies et ravageurs	Faux semis	X	X	X	X	X	X		X		X	X	X	X
	Désherbage mécanique			1	1	1	2					2	2	2
	Désherbage sur rang						X					X		
	Traitement bas volume		X (dès 2009)											
	Lutte biologique					X	X				X		X	
Irrigation	Intensité de recours						2		1			1	1	1
Récolte	Devenir des résidus	Enf + Exp	Enf+Exp	Enf	Enf	Enf + Exp	Mulch	Enf	Enf	Mulch	Enf	Enf	Enf	Enf
	Fréquence export pailles	2/5	1/2			5/7								

Tableau 3 : Stratégies de gestion mobilisées par les SdCi expérimentaux retenus

Légende :

X : Présence

Case vide : Absence

Type de travail du sol :

Labour

TCS : Travail du sol simplifié

SD : Semis direct

Intensité de recours à l'irrigation :

Case vide : Aucune

1 : Occasionnelle

2 : Systématique

Désherbage mécanique :

Case vide : Aucun

1 : Occasionnel

2 : Systématique

Devenir des résidus :

Enf : Enfouis

Exp : Exportés

Mulch : Mulchés

2.1.2 Systèmes de culture de référence représentatifs des pratiques locales dominantes

2.1.2.1 Choix de la méthode pour définir un système de culture de référence

2.1.2.1.1 Multiplicité des références possibles

Afin de mettre en œuvre une évaluation concrète, qu'elle soit *a priori* ou *a posteriori*, et dont les résultats puissent être mobilisables et comparables, il est nécessaire de définir en plus du dispositif testé, un système de culture qui lui serve de référence. Ce système de référence permettra aussi d'apprécier les améliorations apportées par le système innovant, d'autant plus si ces deux systèmes atteignent des performances variées. Aussi, le recours à une référence est utile afin de pouvoir communiquer sur les résultats obtenus et permettent de mener une analyse transversale des données.

Les évaluations menées auparavant ont pu mobiliser comme référence un système de culture initial avant la mise en place des expérimentations, actualisé ou non à dire d'experts, un système de culture témoin conduit en parallèle du système de culture testé ou bien un système de culture représentatif des pratiques locales construit à dire d'experts (Debaeke et al., 2008). Le choix de ces systèmes en tant que référence peut apporter des biais, par exemple liés à l'évolution des pratiques agricoles et des technologies (choix variétal, machinisme) et de la modification de la situation de production dans le territoire concerné (évolution des filières) étant donné que le système innovant est conduit temporellement après sa référence. S'ajoute aussi le biais climatique si les deux systèmes ne sont pas conduits les mêmes années, le biais du dire d'expert ainsi que le biais, pour les systèmes conduits en parallèle, de la modification des pratiques de l'agriculteur, qui peut tendre à reproduire pour le système de référence les pratiques culturelles dont il a recours pour l'innovant.

La caractérisation d'un système de culture chez un agriculteur situé dans la même situation de production que le SdCi auquel il sera associé permet ainsi de ne pas générer ces biais, étant donné que l'on peut disposer des campagnes réalisées sur la même période temporelle que celle de l'expérimentation et que l'agriculteur n'est pas influencé par les pratiques culturelles réalisées lors de la conduite du SdCi.

2.1.2.1.2 Une référence représentative des pratiques locales dominantes : SdC-LoDo

Dans ce travail, il a été souhaité avec recours à une méthode unique de référence de définition des systèmes de référence afin de ne pas introduire de biais supplémentaire et d'identifier des systèmes de référence représentatifs des pratiques agricoles les plus courantes dans les régions agricoles (RA) où se situent les systèmes étudiés. Ces systèmes seront appelés SdC-LoDo, pour Local Dominant. Afin de pouvoir intégrer les différentes situations de production selon la localisation des systèmes étudiés, on associera un SdC-LoDo pour chaque système de culture innovant testé. De tels systèmes de référence permettent ainsi de :

- Repositionner les performances des systèmes de culture innovants par rapport à la réalité agricole des RA où se situent les dispositifs, afin de prendre en compte les caractéristiques des situations de production qui leur sont associées ;
- Mettre en évidence les déterminants de performance qui relèvent des stratégies de gestion adoptées par les SdCi et les SdC LoDo ;
- Intégrer la variabilité interannuelle des performances des systèmes de référence en considérant des itinéraires techniques réalisés année par année.

2.1.2.2 Caractérisation des systèmes de culture de référence SdC-LoDo

2.1.2.2.1 Analyse des données de statistiques agricoles

Afin de caractériser les pratiques locales dominantes, une première analyse a été menée sur la base des données des Enquêtes Pratiques Culturelles 2006, du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la pêche à l'échelle nationale. Ces enquêtes sont effectuées tous les 5 ans par le Service de la Statistique et de la Prospective (SSP), avec pour objectifs de décrire et caractériser les pratiques culturelles des agriculteurs pour ensuite analyser leurs impacts sur l'environnement. Ces enquêtes ciblent une parcelle de l'exploitation, sur laquelle est conduite une des cultures identifiée comme étant majoritairement cultivée dans le département de l'exploitation (ex : Colza, Blé tendre d'hiver et Orge d'hiver en Côte d'Or, correspondant aux dispositifs d'Epoisses et de Demigny).

Dans l'objectif d'adopter une échelle spatiale permettant de caractériser des pratiques agricoles locales dominantes, plus précise et pertinente que l'échelle départementale proposée par les données des Enquêtes Pratiques Culturelles, on se base sur la délimitation du territoire en régions agricoles (RA). Ce zonage effectué en 1946 permet de subdiviser le territoire national en des zones d'agriculture homogènes. On fait aussi l'hypothèse que chaque RA ainsi définie correspond à une situation de production homogène.

Afin de fournir des bases d'identification des systèmes de référence, ces données sont exploitées afin de déterminer pour chacune des RA des dispositifs concernés, la succession culturelle majoritaire sur la période 2001-2005, ainsi que le type de travail du sol prédominant (présence et fréquence de labour) lorsque la significativité des données le permet.

2.1.2.2.2 Détermination des SdC-LoDo par implication des expérimentateurs locaux

Dans le cadre de l'action d'évaluation des SdCi du RMT SdCi, les expérimentateurs en charge du suivi des dispositifs expérimentaux ont été sollicités dans la recherche des SdC-LoDo à associer à leur SdCi testé. En effet, forts de leur expertise de la situation de production locale et des pratiques culturelles qui y sont conduites, leur connaissance du terrain et d'une partie des agriculteurs de la RA ciblée a été mise à contribution afin d'identifier un ou plusieurs agriculteurs répondant aux critères de choix suivants. L'agriculteur doit :

- Cultiver des parcelles dans des conditions pédoclimatiques les plus semblables que possible à celles du dispositif d'expérimentation ;
- Avoir mis en œuvre la succession culturelle majoritairement suivie sur la RA (identifiée lors de l'analyse des données Enquêtes Pratiques Culturelles 2006) et ce sur plusieurs parcelles de son exploitation afin qu'au moins chaque couple précédent-suivant de la succession soit présent à chaque campagne. Ceci permettra de prendre en compte la variabilité inter-annuelle des performances du SdC-LoDo ;
- Avoir des pratiques représentatives des pratiques culturelles, les plus courantes dans la région agricole considérée (des indications sur le travail du sol seront apportées par l'analyse des données des Enquêtes Pratiques Culturelles 2006) ;
- Disposer de l'ensemble des données relatives à ses itinéraires techniques, au minimum sur une succession culturelle et au mieux sur toutes les campagnes

- couvrant la période considérée par le dispositif, grâce à des enregistrements informatiques ou manuscrits.

Après échanges avec les agriculteurs proposés et l'expérimentateur, un seul agriculteur est retenu comme disposant sur son exploitation d'un système de culture considéré comme représentatif des pratiques locales dominantes.

2.1.2.3 Recueil et traitement des données des SdC-LoDo sur la base d'enquêtes terrain

2.1.2.3.1 Guide d'enquête et informations recueillies

L'ensemble des données relatives au système de culture de référence identifié est recueilli lors d'une enquête chez l'agriculteur, en présence ou non de l'expérimentateur. Les objectifs de cette rencontre sont de 1) comprendre le fonctionnement d'ensemble de l'exploitation et la situation de production dans laquelle elle évolue, 2) recueillir l'ensemble des données des itinéraires techniques associées aux parcelles conduites selon le système de culture que l'on souhaite caractériser.

2.1.2.3.1.1 Fonctionnement de l'exploitation et caractérisation de la situation de production

Afin de pouvoir replacer l'évaluation multicritère des systèmes de culture innovants et de référence dans une réalité agricole locale, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement de l'exploitation, à savoir la succession des prises de décisions en vue d'atteindre des objectifs, dans l'environnement socioéconomique, pédoclimatique et biotique local (Capillon et Manichon, 1988).

Les enjeux agricoles majeurs de chaque situation de production, qu'il s'agisse des filières agricoles existantes, des réglementations qui s'y appliquent et des pressions biotiques qui s'exercent sur le milieu ont été explicités durant une phase de discussion avec l'agriculteur et l'expérimentateur.

L'exploitation est ensuite considérée dans sa globalité, comme déterminante des orientations majeures et des choix techniques associés au SdC-LoDo en fonction de sa situation de production. Un questionnaire d'enquête sur le fonctionnement global de l'exploitation en lien avec sa situation de production a permis de conduire l'entretien avec les agriculteurs identifiés (**Annexe I**).

2.1.2.3.1.2 Recueil des données du SdC-LoDo

Choix des parcelles :

L'évaluation ne portant que sur un système de culture précisément identifié, seules quelques parcelles de l'exploitation sont enquêtées afin de recueillir les données techniques nécessaires. Le choix des parcelles du SdC-LoDo à considérer se fait en concertation avec l'agriculteur et l'expérimentateur, en se fondant sur la connaissance qu'ils ont respectivement de leur parcellaire, du dispositif expérimental, de la situation de production et selon différents critères de choix :

- Etant donné qu'il est possible de rencontrer plusieurs systèmes de culture différents sur une exploitation (principalement du fait de caractéristiques pédologiques différentes), seules les parcelles conduites selon le système de culture identifié sont considérées ;

	Stratégies de gestion	Saint Martin Belle Roche	Demigny	Courgenay	Lézinnes	La Brosse	Rouffach	Epoisses
Echelle de la succession	Alternance cultures hiver/printemps	X		X			X	
	Introduction de légumineuses en culture principale							
Interculture	Cultures intermédiaires	X		X			X	
	Légumineuses en interculture	X		X				
	Mode de destruction	Labour / Fauche		Labour / Broyage			Labour	
Travail du sol	Fréquence de labour	1/1	1/3	3/8		1/3	1/1	1/1
	Type de travail du sol	Labour	Labour	Labour	TCS	Labour	Labour	Labour
Semis	Variétés résistantes aux maladies	X				X		
	Retard date de semis	X						
	Diminution densité de semis							
Fertilisation	Fractionnement des apports	X	X	X	X	X	X	X
	Apports organiques	X		X			X	
	Objectif de rendement Blé (qt/ha)	85	80	80	60	60	90	80
Gestion des adventices, maladies et ravageurs	Faux semis	X		X	X	X		X
	Désherbage mécanique							
	Désherbage sur rang							
	Traitement bas volume						X	
	Recours à la lutte biologique							
Irrigation	Intensité de recours						2	
Récolte	Devenir des résidus	Enf + Exp	Enf +Exp	Enf	Enf	Enf	Enf	Enf
	Fréquence export de pailles	1/2	1/3					

Tableau 4 : Stratégies de gestion mobilisées par les SdC-LoDo

Légende : X : Présence Case vide : Absence
Type de travail du sol : Labour TCS : Travail du sol simplifié SD : Semis direct
Intensité de recours à l'irrigation : Case vide : Aucune 1 : Occasionnelle 2 : Systématique
Désherbage mécanique : Case vide : Aucun 1 : Occasionnel 2 : Systématique
Devenir des résidus : Enf : Enfouis Exp : Exportés Mulch : Mulchés

- Ne sont retenues que les parcelles ayant un profil pédologique le plus semblable que possible à celui du site d'expérimentation. Dans l'hypothèse où les parcelles du dispositif ou de l'agriculteur enquêté ne soient pas homogènes, on choisit de retenir pour le SdC-LoDo des parcelles, permettant de représenter la diversité pédologique rencontrée dans le dispositif expérimental.

Recueil des données :

L'ensemble des informations relatives aux itinéraires techniques sont recueillies chez l'agriculteur (**Annexe II**). Celles-ci permettront entre autres de définir les stratégies de gestion mobilisées dans la conduite des SdC-LoDo (Tableau 4).

2.2 Evaluation des composantes de la durabilité des systèmes de culture

2.2.1 Quels critères d'évaluation retenir ?

L'évaluation d'un système de culture consistant à caractériser ses performances pour pouvoir les confronter aux objectifs qui lui sont initialement assignés au regard des stratégies de gestion mises en œuvre, les critères d'évaluation à utiliser se doivent d'être pertinents, faciles à obtenir, explicites, non redondants (Nolot et Debaeke, 2003) et sensibles aux différentes situations de production et stratégies de gestion rencontrées.

Dans ce travail, il a été choisi d'envisager une approche globale de la durabilité, en considérant des critères relatifs à l'ensemble des composantes de la durabilité (économique, sociale, environnementale) et adaptés à l'échelle du système de culture. Par l'analyse de l'ensemble des systèmes étudiés, ceci permettra d'appréhender l'ensemble des performances pouvant être atteintes par les différentes stratégies de gestion adoptées dans des situations de production variées.

2.2.1.1 Critères économiques

La capacité du système à être rentable sera ici appréciée dans un contexte de prix spécifié (Castoldi et al., 2010 ; Debaeke et al., 2008 ; Loyce et al., 2008). Ce critère de rentabilité étant déterminé à court terme, il sera complété par la caractérisation de la capacité du système à être pérenne, c'est-à-dire à dégager une marge suffisante pour être en capacité d'investir sur le long terme.

2.2.1.2 Critères sociaux

La modification des stratégies de gestion des systèmes de culture innovants ayant une incidence sur les types et fréquences d'interventions, la charge de travail annuelle de l'agriculteur est susceptible d'évoluer suite à l'adoption de nouvelles techniques culturales. Cette modification des techniques pouvant s'accompagner d'un changement de la stratégie de lutte chimique, et la manipulation de produits phytosanitaires pouvant présenter des risques pour la santé de l'applicateur selon les matières actives rentrant dans leur composition, le risque de toxicité phytosanitaire à court et long terme pour la santé humaine sera aussi évalué.

Dimension de la durabilité	Critère d'évaluation à l'échelle du système de culture	Indicateur (unité) – Modèle Pression-Etat-Réponse –	Méthode de calcul	Source de données	Hypothèses
Economique	Rentabilité économique	Marge semie nette (€/ha)	Produit Brut – Charges (Opérationnelle + Mécanisation) + DPU départemental	Indices IPAMPA Barème Entraide 2013 DPU départemental (2005)	DPU (différentes selon les départements) prises en compte car faisant partie intégrante des situations de production locales
	Pérennité économique du système	Efficienc e économique (%)	$(1 - \text{Charges totales} / \text{Marge semie nette}) * 100$	Indices IPAMPA, Barème Entraide 2013, DPU départemental (2005)	Si Marge semie nette \leq DPU, alors effienc e nulle
Sociale	Charge de travail	Temps de travail (h/ha)	$\sum (\text{nb de passage d'outil} * \text{performance de l'outil})$	Barème Entraide 2013	Main d'œuvre externe comprise. Ne prend pas en compte le temps d'observation et de préparation des interventions
	Risque de toxicité phytosanitaire pour l'opérateur	Toxicité humaine des produits phytosanitaires appliqués (nb d'expositions à des produits toxiques)	$\sum (\text{nb de passages de traitement phytosanitaire avec un produit classé Xn, T ou T+})$		Ne prend pas en compte l'utilisation d'adjuvants
Environnementale	Impacts des pratiques culturales sur la qualité de l'air	Quantité de protoxyde d'azote (N ₂ O) émis (kg d' N ₂ O/ha) – Pression –	$\sum (\text{Dose N apportée} * \text{coefficient de volatilisation})$	INDIGO® (I _{N2O})	
		Quantité d'ammoniac (NH ₃) volatilisé (kg d' NH ₃ /ha) – Pression –	$\text{Dose N apportée} * 0.0125 * \text{effet (sol} * \text{travail du sol} * \text{mode apport} * \text{irrigation})$	INDIGO® (I _{NH3})	
		Risque de transfert de Matières Actives dans l'air (note de 0 à 10) – Pression –	Estimé pour chaque produit appliqué, en fonction de sa dose, de ses caractéristiques physico-chimiques et de sa Dose Journalière Admissible	INDIGO® (I-phy)	
	Impacts des pratiques culturales sur la qualité de l'eau	Quantité de nitrates (NO ₃) lessivé (kg d' NO ₃ /ha) – Pression –	Risque de lessivage hivernal + Risque de lessivage printanier	INDIGO® (I _{NO3})	
		Risque de transfert de Matières Actives dans les eaux superficielles (note de 0 à 10) – Pression –	Estimé pour chaque produit appliqué, en fonction de sa dose, de ses caractéristiques physico-chimiques et de sa Dose Journalière Admissible	INDIGO® (I-phy)	
		Risque de transfert de Matières Actives dans les eaux profondes (note de 0 à 10) – Pression –	Estimé pour chaque produit appliqué, en fonction de sa dose, de ses caractéristiques physico-chimiques et de sa Dose Journalière Admissible	INDIGO® (I-phy)	
	Pression produits phytosanitaires	Indice de fréquence de traitement – Pression –	$\sum [(\text{Dose utilisée} / \text{Dose homologuée}) * (\text{Surface traitée} / \text{Surface parcelle})]$		$\text{IFT}_{\text{total}} = \text{IFT}_{\text{herbicide}} + \text{IFT}_{\text{fongicide}} + \text{IFT}_{\text{insecticide}} + \text{IFT}_{\text{molluscicide}} + \text{IFT}_{\text{régulateur}}$
	Maintien de la fertilité biologique des sols	Maintien du statut organique du sol (note de 0 à 10) – Etat –	$7 * (\text{apports moyens d'humus des 4 dernières cultures}) / (\text{apports moyens nécessaires pour maintenir une teneur d'humus satisfaisante à long terme})$	INDIGO® (I _{MO})	
	Dépendance aux énergies fossiles	Consommation énergétique totale (GJ/ha) – Pression –	$\sum [\text{consommation énergétique directe (machinisme} + \text{irrigation}) \text{ et indirecte (produits phytosanitaires} + \text{fertilisation} + \text{séchage grain})]$		Le poste séchage des grains ne concernent que le Maïs grain
	Valorisation de l'énergie fossile consommée	Efficienc e énergétique – Etat –	$[\text{Rendement} * \text{Pouvoir calorifique du produit(s) récolté(s)}] / (\text{Consommation totale d'énergie})$	Barème Entraide 2013	

Tableau 5 : Critères d'évaluation et indicateurs retenus

2.2.1.3 Critères environnementaux

- La caractérisation des pratiques agricoles en termes d'intensité d'utilisation de produits phytosanitaires ainsi que la dépendance des systèmes étudiés aux pesticides sera évaluée par un critère de pression des produits phytosanitaires appliqués.
- L'application au champ de produits phytosanitaires ainsi que d'engrais minéraux ou organiques est susceptible, selon la sensibilité du milieu, les intrants utilisés, les modes ou les dates d'apport de générer des pertes dans l'environnement et donc de causer des pollutions. Selon les processus considérés, les pertes peuvent se faire dans l'air ou l'eau :
 - Les pollutions de l'air sont le résultat d'émissions de composés volatiles, qu'il s'agisse de matières actives (Bockstaller et al., 1997) d'azote sous forme ammoniacale (NH_3) par volatilisation ou d'émissions de protoxydes d'azotes NO_2 (Cameron, 2013) ;
 - Selon les propriétés des matières actives appliquées suite à des traitements phytosanitaires, ces substances peuvent impacter la qualité des eaux superficielle ou profonde. Les pertes de nitrates (NO_3^-) suite à un phénomène de lessivage peuvent détériorer la qualité des eaux, quelle que soit leur profondeur (Cameron, 2013).

On peut ainsi considérer deux critères d'évaluation distincts suite à l'apport d'intrants azotés et de produits phytosanitaires au système de culture, permettant d'évaluer les impacts des pratiques sur la qualité de l'air et de l'eau.

- L'évaluation des impacts des pratiques culturales sur l'état du sol, en considérant l'ensemble des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, est complexe car nécessitant de considérer un grand nombre de processus. Boiffin et al. (1986) proposent alors de caractériser cet état du sol au travers du maintien de la fertilité biologique des sols, de par la succession culturale et certains éléments de l'itinéraire technique associé, éléments déterminants dans le maintien des fonctions biologiques de sols.
- Le recours à des intrants importés dans le système de culture (engrais, produits phytosanitaires, irrigation) ainsi que l'utilisation d'outils mécaniques nécessite la consommation d'énergie fossile. Ces recours sont variables et dépendants de la stratégie de gestion adoptée pour le système. Ils peuvent être évalués selon un critère de dépendance aux énergies fossiles. On considère alors l'ensemble des postes ayant une dépendance en énergie, que la consommation en soit directe ou indirecte. Toutefois, il est possible de relativiser la dépense énergétique du système de culture en fonction de la production d'énergie qu'il permet. On estime ainsi la capacité du système à transformer une unité d'énergie fossile en une production destinée à être valorisée en alimentation humaine ou animale ou énergétiquement (en biomasse).

2.2.2 Des critères caractérisés par des indicateurs

Les indicateurs étant des variables permettant de quantifier les critères d'évaluation, il est possible de déterminer pour chacun des critères d'évaluation retenus un ou plusieurs indicateurs (Tableau 5). L'échelle spatiale sur laquelle est évaluée la durabilité du système (parcellaire, exploitation, filière de production, etc...) étant à définir selon les objectifs visés (Bockstaller et al., 2008), on choisit de déterminer les indicateurs annuellement à l'échelle parcellaire et d'en effectuer une intégration pluriannuelle afin de les caractériser à l'échelle du

système de culture et ses éventuels effets cumulatifs (Debaeke et al., 2008). L'agrégation des données annuelles pour passer à l'échelle du système se fera dans le cas des indicateurs choisis par moyenne, pour considérer les performances à l'échelle du système.

On classifiera les indicateurs relatifs à la dimension environnementale selon le modèle Pression – Etat – Réponse (OCDE, dans CORPEN, 2006), qui se repose sur la notion de causalité : les activités humaines exercent des pressions sur le milieu dont l'état de l'environnement et des ressources naturelles sont alors modifiés et la société y apporte des réponses (financement de programmes ou actions). Le calcul de certains indicateurs de cette dimension environnementale, sont définis comme simples, car facilement calculables à l'aide de une ou plusieurs variables, alors que d'autres relèvent de règles formelles (du type « si...alors... »), permettant une évaluation plus précise des impacts de pratiques culturelles dépendant de phénomènes complexes (Bockstaller et al : sous presse).

2.2.3 Outil de caractérisation des indicateurs retenus : CRITER 2.0

Certains de indicateurs exposés précédemment ne pouvant être calculés facilement, l'ensemble des critères et indicateurs retenus pour évaluer les composantes de la durabilité des systèmes de culture seront caractérisés par l'utilisation du logiciel CRITER 2.0. Cet outil a été développé afin de faciliter le renseignement d'une partie des 39 critères basiques d'entrée nécessaires à MASC 2.0. Parmi les 57 indicateurs calculés par CRITER 2.0, 7 le sont à partir de la décomposition des algorithmes des modules I-Phy, I-N et I-Mo de l'outil INDIGO® (Bockstaller et Girardin, 2008).

Afin d'être un outil utilisable dans le cadre d'une large gamme de projets de caractérisation des performances de systèmes de culture, cet outil permet à l'utilisateur d'adapter les paramètres pédologiques, climatiques et économiques selon la situation de production dans laquelle il souhaite se placer. Ainsi, il a été possible d'adapter chacune des caractérisations des performances réalisées en considérant la situation de production propre à chacun des couples SdCi/SdC-LoDo.

2.2.4 Bases de paramétrage et définition des situations de production sous CRITER 2.0

2.2.4.1 Paramétrage des prix de vente des cultures et d'achats des intrants :

L'ensemble des prix de vente et d'achat des cultures et intrants ainsi que les données relatives au machinisme ont été paramétrés de manière identique pour l'ensemble des systèmes de culture évalués. Ces données sont en effet davantage déterminées par les stratégies de gestion élaborées à l'échelle de l'exploitation (achats d'intrants en fonction des opportunités du marché par exemple) et non relatives aux orientations prises à l'échelle du système de culture. Cette standardisation des prix de vente-achats et du parc matériel permet donc d'effectuer une comparaison cohérente des performances économiques et énergétiques entre des systèmes présents sur des sites différents. Toutefois, les montants des droits à paiement unique (DPU), variables à l'échelle départementale, ont été différenciés selon les systèmes étudiés.

Afin de limiter les effets de la fluctuation des prix de vente des cultures ainsi que les prix des semences (avec un traitement standard), des prix standards ont été fixés. Ils ont été déterminés à partir des indices des prix d'achats des moyens de production agricole (IPAMPA) mesurés par l'INSEE et moyennés sur la période allant de Janvier 2005 à Mars 2013 (**Annexe III**). On suppose que cette période intègre des scénarios de prix du plus faible au plus fort, hypothèse confirmée par un précédent travail sur la caractérisation de scénarios

de prix d'achat des engrais et de vente des cultures sur la période de 2001 à 2011 (Launais, 2011). Autant que faire se peut, ces indices sont mobilisés à un pas de temps mensuel (et annuel si les indices mensuels sont inexistant) afin d'améliorer la précision des prix fixés.

Les engrais minéraux et organiques disponibles sur le marché étant commercialisés par de nombreux fournisseurs, sous des formes et selon des compositions différentes, les prix de ces intrants ne sont pas forcément corrélés à leur composition en éléments fertilisants et sont très fluctuants selon les cours du marché. Afin de ne pas prendre en compte cet effet lié au produit utilisé et à la date d'achat, les prix des engrais apportés aux systèmes ont été raisonnés en fonction de leur composition en unités fertilisantes. De la même façon que les prix de vente des cultures et d'achats des semences, les coûts des unités fertilisantes NPK ont été déterminés à l'aide des indices IPAMPA de l'INSEE entre 2005 et 2013.

Les prix d'achats des produits phytosanitaires ont été déterminés sur la période 2007-2012 grâce à des bases de prix constatés chez les agriculteurs. Les coûts de l'utilisation d'un système d'irrigation et du fioul ont été déterminés à dire d'experts.

Les données de la consommation énergétique et des coûts liés au parc matériel utilisé ont été standardisées sur la base du Barème d'Entraide 2012-2013, en considérant une exploitation type de 150/200 ha de SAU et disposant de 3 tracteurs (90, 120 et 150 ch).

2.2.4.2 Paramétrages spécifiques à la situation de production étudiée :

Etant donné que l'on souhaite évaluer chaque couple "système innovant-référence" dans une situation de production qui lui est propre, chaque SdCi/SdC-LoDo est évalué dans un contexte pédoclimatique semblable. Le compartiment "sol" est standardisé en utilisant les données pédologiques d'une parcelle du système innovant, considérée comme intermédiaire parmi celles disponibles, ou élaborée à dire d'experts selon la disponibilité des données. Ceci permet de ne pas influencer les calculs des indicateurs par la variation des paramètres pédologiques inhérente à l'hétérogénéité des parcelles sélectionnées pour l'évaluation des deux systèmes.

La version disponible de CRITER ne permet pas de spécifier une année climatique pour chacune des années de la conduite du système et ne prend en compte qu'une année climatique pour l'ensemble des années de l'expérimentation. L'indicateur de la quantité d'azote perdue par lessivage étant la plus influencée par les conditions météorologiques renseignées, une année d'une série climatique caractérisant au mieux un risque moyen de lessivage des nitrates a été déterminée par un modèle simplifié de bilan hydrique à l'échelle de la parcelle et sur la période du 1^{er} août au 30 avril, considérée comme étant la période à risque de lessivage (discussion personnelle R. Reau). N'utiliser que l'année climatique identifiée permet donc de caractériser un risque moyen de lessivage dans une situation météorologique commune à toutes les conduites d'un même système de culture (**Annexe IV**). On utilisera les données pédologiques des parcelles des SdCi.

2.3 Analyse de la contribution des systèmes aux composantes de la durabilité

2.3.1 Caractérisation des performances des systèmes de culture innovants

L'objectif de cette analyse est de caractériser les performances des différentes composantes de la durabilité des systèmes de culture au travers des critères d'évaluation retenus. Pour chacun des couples SdCi/SdC-LoDo il sera possible de mettre en évidence les différences de performances constatées grâce aux indicateurs calculés par CRITER 2.0, en considérant l'effet du changement de la stratégie de gestion de l'innovant par rapport à la référence, sans

interaction possible avec la situation de production dans laquelle se trouvent chacun des couples. Des fiches synthétiques des performances des systèmes innovants par rapport à celles de leur référence sont élaborées et destinées aux expérimentateurs et agriculteurs rencontrés (**Annexe V**).

De plus, les systèmes de culture présentent des performances qui sont dépendantes de combinaisons systèmes de production*stratégies de gestion différentes. On cherchera donc à déterminer si des stratégies de gestion similaires dans des situations de production différentes permettent d'atteindre les mêmes performances, ou bien si elles sont plutôt dépendantes de la situation de production et non influencées par les stratégies de gestion mises en œuvre. Pour ce faire seront confrontés, pour de mêmes critères d'évaluation, l'ensemble des systèmes de culture de l'échantillon, SdCi ou SdC-LoDo.

Afin de mettre en évidence une possible détermination des performances en fonction de la situation de production, chaque SdCi sera identifié selon la situation de production de laquelle il dépend (Tableau 1).

2.3.2 Analyses transversales des performances des SdC et relations entre critères d'évaluation

Les méthodes actuelles d'évaluation de la durabilité reposent sur la sélection et le calcul d'indicateurs et de critères adaptés à l'évaluation souhaitée, pouvant éventuellement être pondérés et agrégés par une méthode multicritère d'aide à la décision (MCDA), pour obtenir une valeur synthétique de contribution à la durabilité (Colomb et al., 2009 ; Castoldi et Bechini, 2010). Elles adoptent différentes échelles spatiales, temporelles, abordent une ou plusieurs dimensions de la durabilité et peuvent être plus ou moins en capacité de proposer des systèmes alternatifs (Carof et al., 2013). Toutefois, selon les objectifs de l'évaluation, il est possible que l'on cherche à améliorer conjointement des indicateurs présentant des antagonismes. Les méthodes agrégeant les critères d'évaluation ne mettent alors pas en évidence de telles relations. La confrontation de critères basiques représentant différentes dimensions de la durabilité permet ainsi d'apporter des connaissances supplémentaires sur les relations existantes entre les critères, tout en caractérisant des systèmes de culture conciliant au mieux leurs performances. Ces critères seront exprimés en % de la référence afin de pouvoir visualiser les améliorations ou dégradations des performances des SdCi par rapport à leur SdC-LoDo.

Préalablement, l'ensemble des corrélations 2 à 2 entre les critères d'évaluation retenus a été testé par un test des corrélations de Spearman (mise en évidence de relations de type non affine) dont les résultats sont présentés en **Annexe VI**.

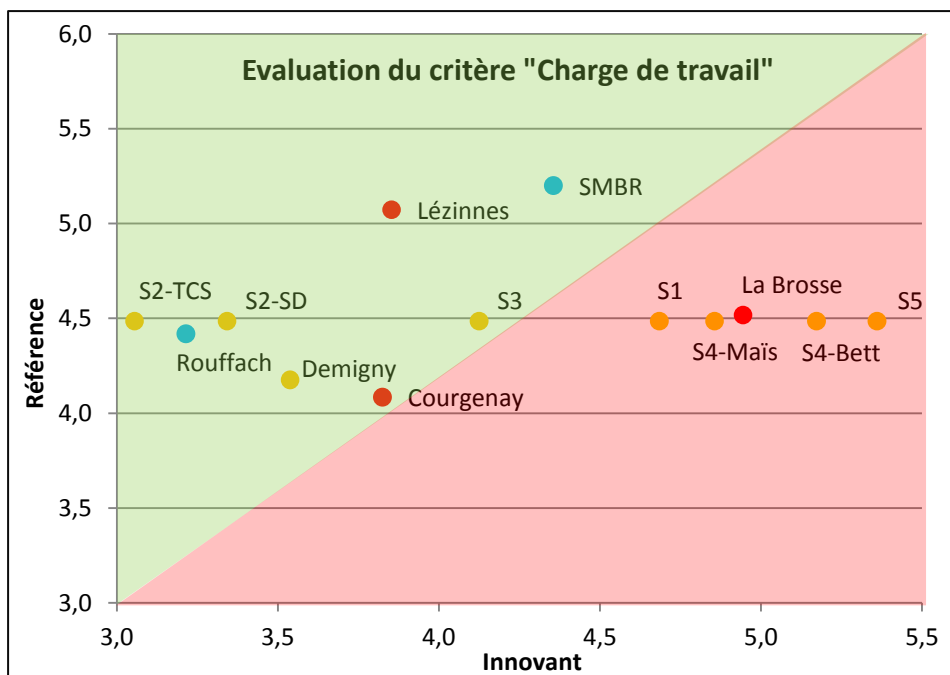


Figure 2 : Temps de travail (h/ha/an) des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

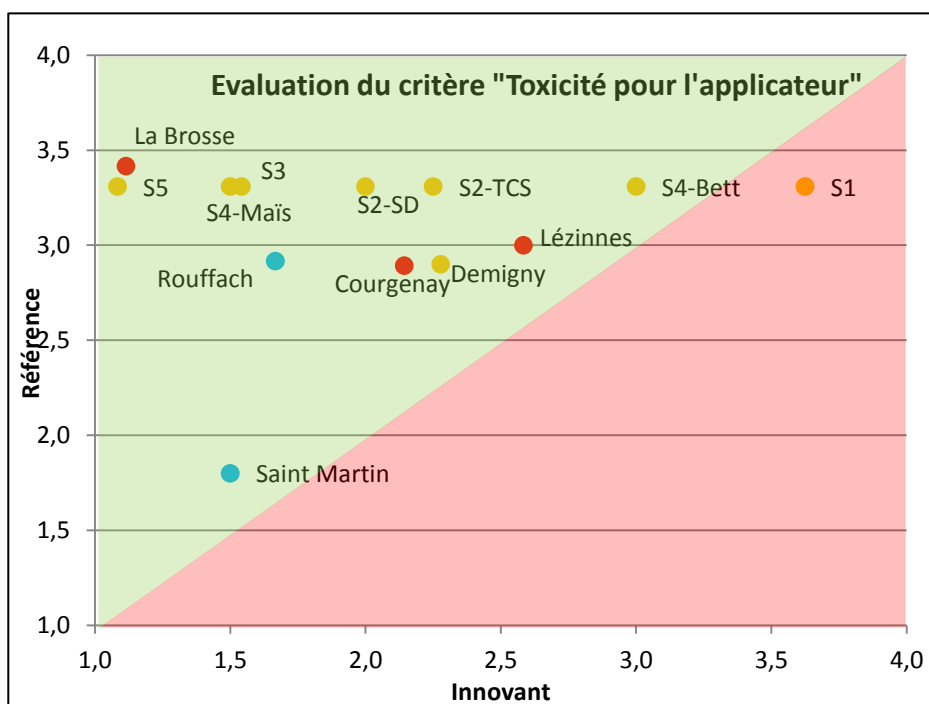


Figure 3 : Nombre de passage (/ha/an) contenant au moins un produit phytosanitaire toxique T, T+ ou Xn des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

Situations de production (Tableau 1) : n°1 ● n°2 ● n°3 ●

3 / Caractérisation des performances atteintes par les systèmes expérimentaux et étude de relations entre critères

3.1 Des systèmes innovants et performants

3.1.1 Une amélioration contrastée des performances sociales

3.1.1.1 Des évolutions de charge de travail déterminées par les stratégies mobilisées

La charge de travail des SdC pour l'agriculteur est évaluée à partir du temps de travail moyen nécessaire annuellement. Les systèmes innovants de Rouffach, S2-TCS et SD2-SD parviennent à atteindre un temps de travail compris entre 3h/ha et 3h30min/ha grâce à une stratégie de travail du sol simplifié (Figure 2). Ces systèmes remplissent ainsi l'un de leur objectif, à savoir la diminution de la charge de travail à l'échelle du système. Ceci est permis par le non-labour et la diminution du nombre de passages de travail superficiel du sol. Au contraire, les systèmes ayant une stratégie de gestion des adventices favorisant le recours au désherbage mécanique augmentent le temps de travail nécessaire à la conduite du système par rapport à leur référence. Le S5 par exemple qui se caractérise par la non utilisation d'herbicides et une diminution du nombre de passages de traitements phytosanitaires (IFT total = 1) (Annexe VII) est le système le plus contraignant avec un temps de travail moyen de 5h20min/ha. Ce système est aussi pénalisé par la conduite de Luzerne qui, de par ses opérations de récolte, augmente le temps de travail (environ 9h/ha/an pour cette culture contre 4h30min/ha/an en moyenne pour les autres cultures de ce système). De plus, le temps de travail supplémentaire nécessaire aux interventions de désherbage mécanique (herse étrille, houe rotative, binage) n'est pas compensé par la réduction du nombre d'interventions de traitements phytosanitaires au champ. Ceci s'explique par des outils de désherbage mécanique avec des performances de travail plus faibles par rapport à des interventions de pulvérisation. De plus, les traitements phytosanitaires ne sont jamais totalement abandonnés, nécessitant ainsi pour l'agriculteur de faire à la fois des interventions de désherbage mécanique et des traitements phytosanitaires.

Les systèmes de Demigny, Lézinnes et Saint Martin Belle Roche parviennent aussi à améliorer leur temps de travail par rapport à leur référence respective. Ils se positionnent selon des valeurs de temps de travail intermédiaires, de 3h30min/ha/an à 4h30min/ha/an, entre les systèmes aux stratégies de travail du sol simplifié et ceux favorisant le désherbage mécanique. Ceci s'explique par le passage en non labour pour l'innovant de Demigny et 1 ou 2 travaux superficiels en moins pour Lézinnes et Saint Martin Belle Roche, mais ces stratégies n'ont pas été élaborées dans un souhait de gain de temps.

3.1.1.2 Une diminution des risques de toxicité pour les agriculteurs

Pour l'ensemble des systèmes innovants (excepté le S1 conçu pour servir de référence aux 4 autres systèmes du dispositif d'Epoisses), on constate une diminution du nombre d'applications annuelles de produits phytosanitaires contenant au moins un produit classé nocif, toxique ou très toxique par rapport à la référence (Figure 3).

Les systèmes innovants sont plus en capacité de limiter les risques de toxicité pour les applicateurs car les valeurs atteintes par l'indicateur sont comprises entre 1 et 3,75 applications/ha/an alors qu'elles sont entre 2,75 et 3,5 applications/ha/an pour les SdC-LoDo. Toutefois, le couple SdCi/SdC-LoDo de Saint Martin Belle Roche présente des valeurs comprises entre 1,5 et 1,8, ce qui s'explique par la conduite de Maïs grain dans une situation de production permettant à ces systèmes de se passer d'insecticides contre la Chrysomèle (au

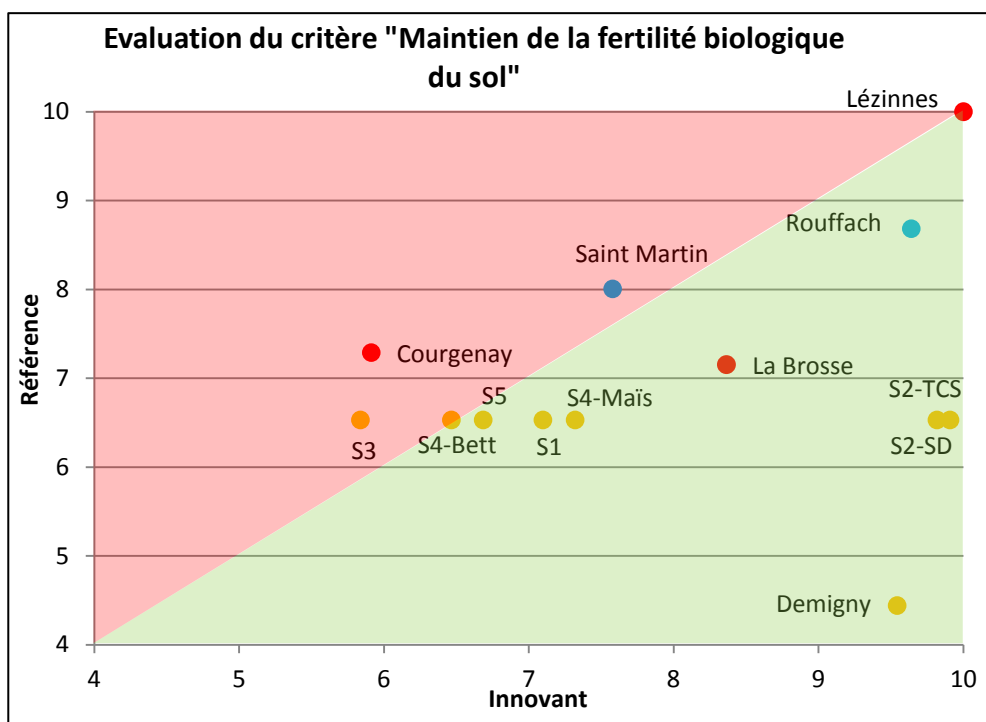


Figure 4 : Notes INDIGO® du maintien du statut organique du sol des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

Situations de production (Tableau 1) : n°1 ● n°2 ● n°3 ●

contraire des systèmes de Rouffach).

Les meilleures performances sont atteintes par les systèmes limitant leur recours aux produits phytosanitaires grâce à des stratégies de gestion visant à privilégier le désherbage mécanique et/ou la diversification des cultures introduites par rapport aux systèmes de référence : SdCi de La Brosse, S4-Maïs, S3, S2-TCS/SD et Rouffach. Le S4-Bett se distingue par la conduite de Betterave Sucrière, peu concurrentielle contre les adventices et pour laquelle a été pratiqué 7 traitements contenant au moins 1 produit classé toxique (en particulier liés au désherbinage).

Les SdCi de Demigny, Courgenay et Lézennes ont des valeurs proches de leurs références malgré la diminution de leurs IFT totaux (respectivement 50, 35 et 15 %) (**Annexe VII**). Ces systèmes sont en effet en mesure de limiter leurs recours soit aux insecticides, fongicides ou herbicides ainsi que leurs doses appliquées, mais les matières actives encore utilisées sont celles pour lesquelles les risques de toxicité sont les plus importants. Le SdCi de Courgenay se distingue surtout par l'arrêt du recours aux régulateurs.

3.1.2 Une limitation des impacts négatifs des pratiques culturales sur l'environnement

3.1.2.1 Une meilleure maîtrise de la fertilité des sols

Les performances des systèmes, vis-à-vis du critère de maintien de la fertilité des sols, renseigné par l'indicateur du maintien du statut organique, sont principalement déterminées par le type de travail du sol pratiqué, et la fréquence des apports organiques (Figure 4).

Les notes INDIGO[®] obtenues pour cet indicateur (comprises entre 0 à 10, 7 étant une note acceptable) sont comprises entre près de 6 et 10 pour les SdCi et les SdC-LoDo.

Les systèmes innovants conduits avec une stratégie de travail du sol simplifié (non labour ou semis direct) présentent une amélioration de leur performance par rapport à leur référence, avec des notes proches du maximum atteignable pour une note INDIGO[®] (i.e. 10). La fréquence du labour est aussi déterminante. Le système de La Brosse voit ainsi sa performance améliorée par la réalisation de 2 labours successifs (avant Chanvre et Orge de Printemps) sur les 7 années de sa succession au lieu d'un labour sur les 3 années de la succession de sa référence. Ce SdCi procède aussi à un export des pailles de céréales, au contraire de sa référence, augmentant la quantité de résidus minéralisables.

La présence ou non d'apports organiques, plus que leur fréquence d'apports, permet de discriminer les systèmes dans un même couple SdCi/SdC-LoDo, mais ce critère a un impact plus modéré sur le maintien du statut organique que le type de travail du sol réalisé. Ainsi le système innovant de Courgenay est moins performant que sa référence (respectivement note 6 et 7,3), car seul le SdC LoDo reçoit de la matière organique une fois sur chacune de ses parcelles. De même, les systèmes de Saint Martin Belle Roche qui apportent des boues de laiterie près d'une année sur deux parviennent chacun à atteindre une proche de 8 alors qu'ils pratiquent tous les deux un labour systématique.

Dans une moindre mesure, la diversité des cultures conduites ainsi que les rendements réalisés permettent d'expliquer les résultats obtenus. Pour les systèmes d'Epoisses, le S3 est pénalisé par des rendements en céréales plus faibles que la référence, alors que le S4-Maïs est avantagé par la conduite de Maïs grain apportant d'avantage de résidus organiques à la récolte. Cependant, ce Maïs est irrigué ce qui est supposé favoriser la minéralisation de la matière organique. Le S1 quant à lui suit la même succession que la référence mais réalise de

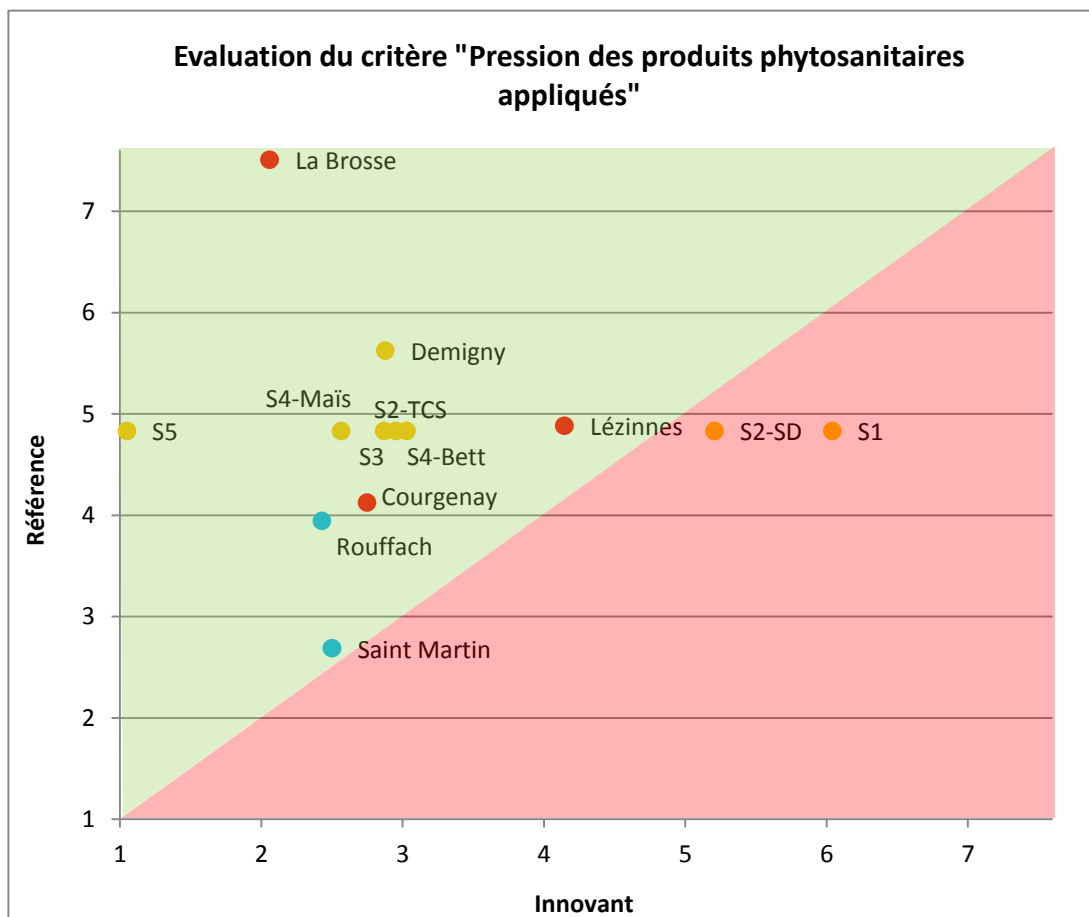


Figure 5 : Indices de fréquence de traitements totaux des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

Situations de production (Tableau 1) : n°1 ● n°2 ● n°3 ●

meilleurs rendements, augmentant ainsi les restitutions des résidus de culture et donc sa performance.

3.1.2.2 Une diminution du recours aux produits phytosanitaires

Seuls les systèmes S1 et S2-SD ont eu un recours plus important aux produits phytosanitaires que leur référence (Figure 5). Le S1 ne remettant pas en cause la lutte chimique contre les adventices, il lui est permis d'avoir un recours intensif aux traitements phytosanitaires (IFT total de 6) (Annexe VII) afin d'assurer la productivité des variétés productives introduites dans le cadre d'une succession culturale courte (3 ans). Le S2-SD n'a recours qu'à une lutte chimique contre les adventices, mais raisonné selon des critères écotoxicologiques, qui ne transparaissent pas dans l'indicateur IFT, afin de limiter l'impact environnemental des produits appliqués. Toutefois, son IFT total de 5,2, supérieur à sa référence, est le résultat des applications importantes de molluscicides suite au non travail du sol, d'insecticides sur Colza et par la destruction chimique de l'interculture avant Sorgho en 2008 qui est comprise dans la lutte chimique de ce système.

Les systèmes innovants S4-Maïs, S4-Bett, S5, La Brosse et de Courgenay qui ont adopté une stratégie de gestion des adventices par désherbage mécanique parviennent à réduire leurs IFT herbicides d'au moins 50 %. De plus, l'introduction de cultures de diversification et un travail superficiel du sol plus fréquent permettent d'accentuer la réduction des doses appliquées, qu'il s'agisse d'herbicides, fongicides, insecticides ou régulateurs. Ainsi, le système innovant de La Brosse, grâce à l'introduction d'Orge de Printemps, de Pois d'hiver et Chanvre (qui n'a nécessité aucun traitement sur l'ensemble des campagnes) parvient à réduire de 80 % son IFT total. Ce système innovant a de plus eu recours à du Contans WG (produit de lutte biologique mais pris en compte dans le calcul de l'IFT). De la même manière, le S5 pour lequel le recours aux herbicides est interdit parvient à remplir son objectif de 0 herbicide et réduit de même les applications d'autres produits phytosanitaires de 80 % grâce à la diversification de sa succession (Lupin Blanc de printemps, Triticale, Tournesol, Sorgho). Ce système profite particulièrement de la conduite de Luzerne pour laquelle aucun traitement phytosanitaire n'a été effectué. Ce résultat est cohérent avec de précédentes études ayant établi un lien entre la réduction de l'IFT et la diversification des cultures par l'introduction de cultures de printemps et de prairies (Boissinot et al., 2011) et l'augmentation du travail superficiel du sol (Munier-Jolain et al., 2008). La succession du système innovant de Rouffach, limitant le retour du Maïs grain à 1 tous les 3 ans, lui permet de réduire l'utilisation d'insecticide sur Maïs grain malgré sa présence en zone de confinement Chrysomèle. Toutefois, la diversification des cultures de ce système innovant ne permet pas de réduire l'IFT herbicide par rapport à sa référence (IFT herbicide de 2).

Pour le système innovant de Saint Martin Belle Roche, la réduction de l'IFT herbicide, permise par l'adoption de seuils de tolérance du salissement de la parcelle plus souple, est compensée par l'introduction de Colza, nécessitant l'application d'insecticides plus d'une année sur deux. Le système de Lézinnes parvient quant à lui à diminuer son recours aux insecticides grâce à un délai de retour du Colza allongé (1 année sur 5 au lieu d'une année sur 3 pour sa référence), mais le passage occasionnel d'outils de désherbage mécanique et la diversification de la succession culturale ne permet pas de diminuer l'IFT herbicide.

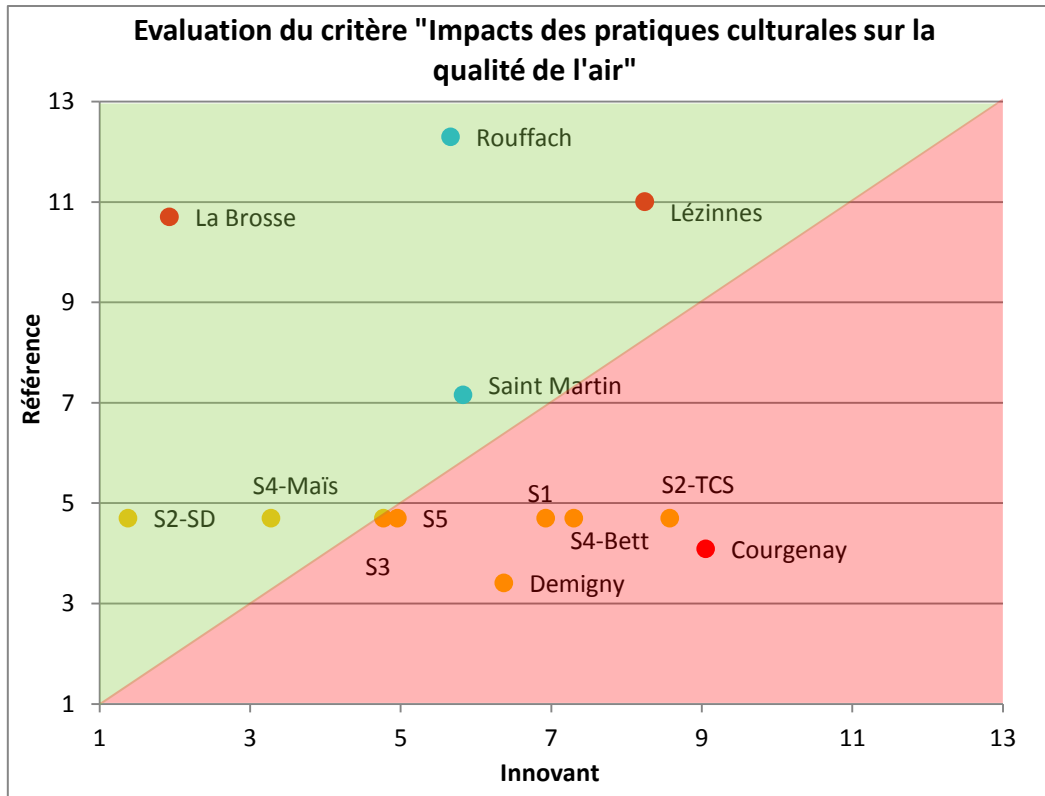


Figure 6 : Quantités d'azote volatilisées (kg d' NH_3 /ha/an) sous forme ammoniacale des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

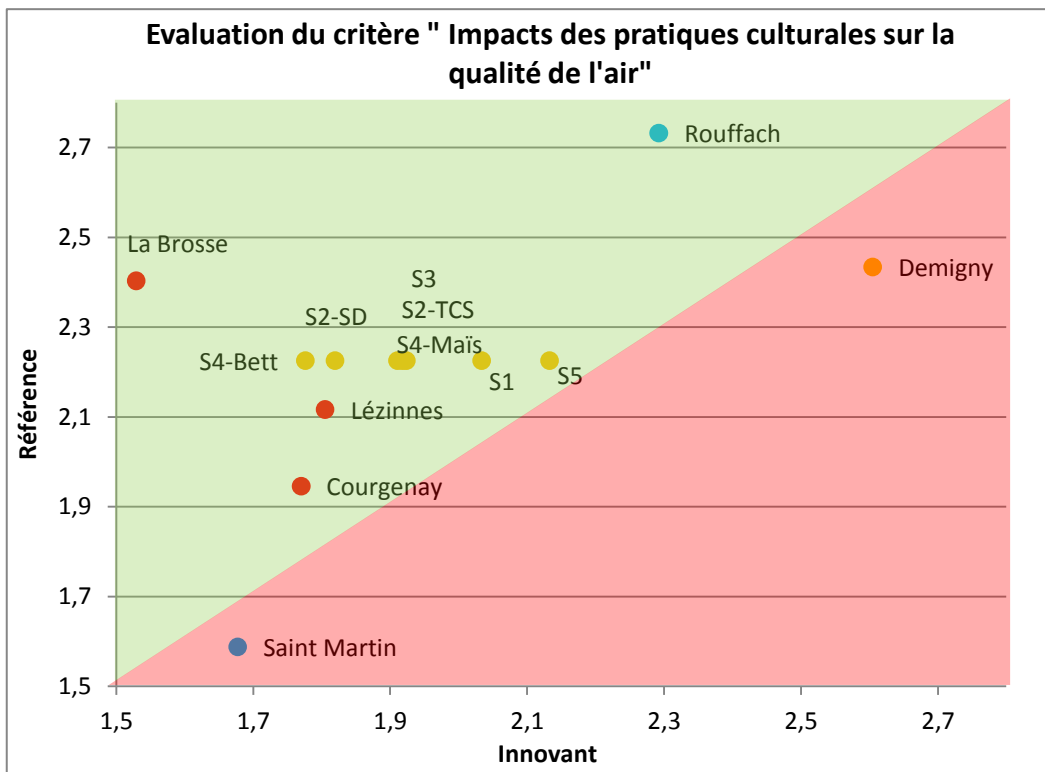


Figure 7 : Quantités de protoxydes d'azote (kg d' N_2O /ha/an) émises par les SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

Situations de production (Tableau 1) : n°1 ● n°2 ● n°3 ●

3.1.2.3 Des risques de pollution de l'air peu maîtrisés

3.1.2.3.1 Une volatilisation d'azote sous forme ammoniacale non raisonnée dans les stratégies de gestion des systèmes

L'ensemble des systèmes innovants, exceptés ceux de Demigny et de Saint Martin Belle Roche, se caractérise par une stratégie de réduction de la fertilisation azotée minérale, cohérente avec des objectifs de rendements moindres et l'introduction de culture nécessitant moins d'apports azotés (légumineuse ou cultures peu exigeantes comme le Tournesol). Les systèmes de référence apportant entre 160 et 180 uN/ha/an (organique et minéral), les SdCi grâce à leurs stratégies parviennent à réduire ces apports d'au moins 20 %, comme c'est le cas à Lézennes et jusqu'à 50 % à Rouffach et La Brosse. Ainsi les innovants améliorent les pertes d'azote par volatilisation sous forme ammoniacale. Le S3 améliore sa performance par rapport au S1 car apportant respectivement 165 et 104 uN/ha/an contre 180 pour leur référence. Toutefois le S1, malgré une fertilisation azotée moindre que sa référence voit sa performance dégradée, étant donné que la référence a un recours moindre à l'apport d'azote sous forme de solution liquide. De même, on constate pour le S2-TCS des pertes de l'ordre de 8,6 kg d' NH_3 /ha/an contre 1,4 kg d' NH_3 /ha/an pour le S2-SD du fait que le premier a été conduit de 2001 à 2006 et le second de 2007 à 2012. Or on constate que jusqu'à 2006, les apports d'azote pour les systèmes d'Epoisses étaient majoritairement effectués sous forme de solution liquide alors qu'ils se font maintenant avec de l'ammonitrate dont le coefficient de volatilisation est moindre. Cette différence n'est pas visible pour les autres systèmes d'Epoisses car analysés sur l'ensemble de la période 2001-2012, mais l'analyse des données annuelles reflète bien la tendance observée précédemment.

L'influence de la forme de l'apport se retrouve aussi dans la bonne performance du système innovant de La Brosse qui perd 1,9 kg d' NH_3 /ha/an contre 10,7 pour sa référence qui utilise de la solution liquide, soit une réduction de 82 % des quantités d' NH_3 volatilisées, alors que la diminution de la réduction de la fertilisation azotée n'est que de 50 %. De même pour le système innovant de Courgenay qui a peu recours à des apports sous forme d'ammonitrate au contraire de sa référence qui obtient ainsi une meilleure performance.

Les performances constatées sur la quantité d'azote perdue sous forme ammoniacale sont donc moins déterminées par les stratégies de gestion mises en œuvre, que par la forme d'apport. La forme de l'apport est pourtant un élément peu raisonné à l'échelle des systèmes étudiés et dans les schémas décisionnels, car dépendante du matériel disponible dans les exploitations et des opportunités d'achats.

3.1.2.3.2 Des émissions de protoxydes d'azote satisfaisantes pour les SdCi et les SdC-LoDo

Les systèmes de Courgenay, Saint Martin Belle Roche, et d'Epoisses (sauf S2-TCS et S2-SD) suivant des stratégies de gestion consistant à pratiquer un labour au moins tous les 4 ans et à diminuer leurs apports d'engrais azotés se distinguent de leur référence par des quantités d' N_2O émises plus faibles, entre 1,5 et 2 kg d' N_2O /ha/an (Figure 7).

Malgré la diminution de sa fertilisation azotée, le système innovant de Rouffach est pénalisé par rapport à l'ensemble des autres systèmes innovants qui ont tous recours à une fertilisation azotée plus importante. Ceci s'explique par une irrigation systématique, qui accroît le risque d'émissions de N_2O dû à une humidité du sol plus importante ainsi que par un travail du sol en non labour. Il parvient tout de même à améliorer cette performance par rapport à sa référence qui a recours à une fertilisation azotée plus importante. De même, le système innovant de Demigny présente des émissions d' N_2O plus élevées que sa référence du

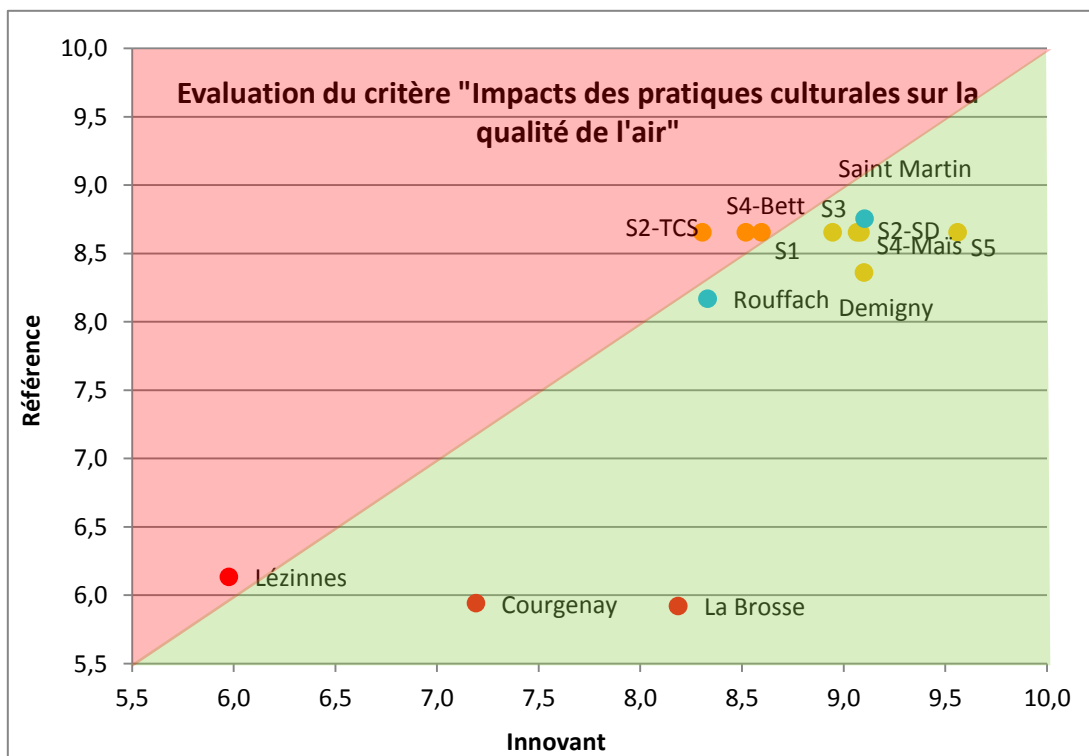


Figure 8 : Notes INDIGO® du risque de perte de matière active dans l'air des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

Situations de production (Tableau 1) : n°1 ● n°2 ● n°3 ●

fait du non labour et d'une fertilisation azotée plus importante (160 uN/ha/an contre 155 en référence), alors qu'il réalise des rendements plus faibles en Blé et Colza ce qui augmente les risques d'émissions de N₂O suite à l'augmentation des reliquats.

Toutefois, malgré les différences constatées entre ces différents systèmes, les quantités d'N₂O émises sont toutes comprises entre 1,5 et 3 kg/ha/an. D'après les valeurs seuils proposées par Bockstaller et Girardin (2006) pour discréditer les valeurs des quantités d'N₂O émises, l'ensemble de systèmes, innovants ou de référence obtiennent des notes INDIGO[®] comprises entre 7 et 9, c'est-à-dire des valeurs acceptables à bonnes.

3.1.2.3.3 Une amélioration des risques de pertes de matières actives dans l'air

Le risque de pollution de l'air suite à l'application de produits phytosanitaires est évalué grâce à un indicateur INDIGO[®] de maîtrise des pertes de matières actives dans l'air (Figure 8). L'ensemble des SdCi étant parvenu à réduire leur IFT, on constate qu'il en va de même de l'amélioration de la performance pour cet indicateur (qui dépend de la composition des produits utilisés). On constate qu'il est d'autant plus difficile d'améliorer cet indicateur dès lors que la référence atteint une bonne performance (entre 8 et 10). Les SdCi n'ont donc pas recours à des produits à moins bons profils écotoxicologiques que leur référence. Les systèmes étudiés introduisant peu de régulateurs et de molluscicides (excepté le S2-SD dont la performance n'est pas dégradée), les produits les plus à risques sont les herbicides, les fongicides et les insecticides.

De plus, les systèmes présents dans la situation de production 2 (Tableau 2) présentent des notes inférieures (comprises entre 6 et 8,2) à celles des autres systèmes, malgré des améliorations par rapport à leur référence (excepté le système innovant de Lézennes). L'enherbement étant un problème majeur pour ces systèmes, les systèmes de Courgenay et de La Brosse ont plus recours que les autres systèmes à des produits ayant de moins bons profils écotoxicologiques, étant donné que leurs IFT totaux ne sont pas sensiblement supérieurs à ceux des autres systèmes (Annexe VII). Le système innovant de Lézennes quant à lui ne parvient pas à réduire ce risque, malgré une diminution de son IFT total de 4,9 à 4.

D'après les valeurs seuils proposées par Bockstaller et Girardin (2006), seul Lézennes ne parvient pas à obtenir une note acceptable (inférieure à 7).

3.1.2.4 Des risques de pollution de l'eau complexes à évaluer

3.1.2.4.1 Une amélioration des risques de pertes de matières actives dans les eaux

De la même manière que l'indicateur de risque de pertes de matières actives dans l'air, des notes INDIGO[®] ont été déterminées pour évaluer ces risques pour les eaux profondes et superficielles (Figure 9 et Figure 10). Comme précédemment, on constate une amélioration de l'ensemble des performances des systèmes innovants, à l'exception du S1 et de Saint Martin Belle Roche. Le S1 se caractérise en effet par un IFT total supérieur à celui de sa référence (6 contre 4,8), du fait d'un recours accru aux herbicides, tout comme le SdCi de Saint Martin Belle Roche. De plus, les systèmes innovants qui améliorent le plus leurs performances par rapport à leur référence (exemple : S5, S2-TCS) sont ceux qui réduisent le plus leur IFT herbicides. Les risques de pertes de matières actives dans l'air ou l'eau sont en effet particulièrement dépendants de l'usage d'herbicides (exemple : Triallate, Diclofop-méthyl, Trifluraline). Le S5 ayant un IFT herbicide nul de par sa stratégie de gestion des adventices grâce au recours à l'ensemble des techniques de la PI (désherbage mécanique, diversification des cultures et dates de semis, etc...) parvient en effet à obtenir la meilleure performance (note de 9,5) sur l'ensemble des risques de perte de matières actives évalués.

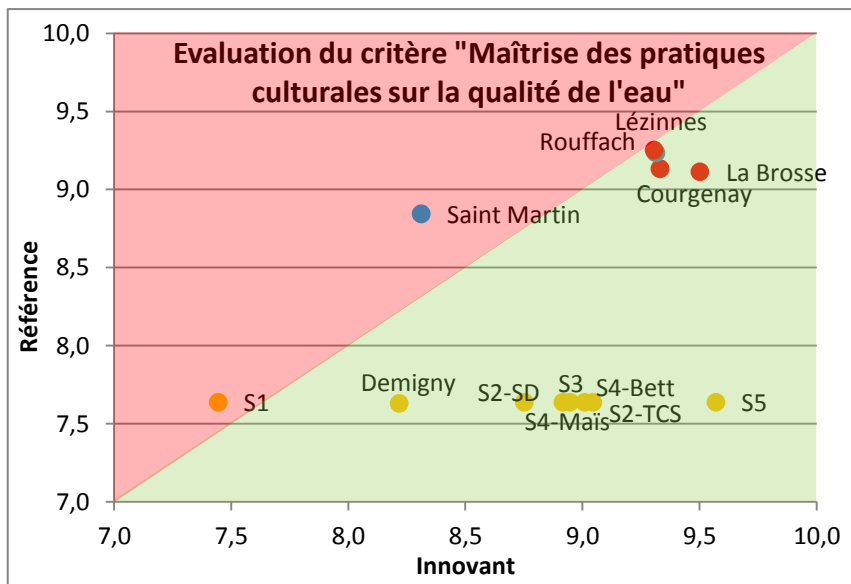


Figure 9 : Notes INDIGO® du risque de perte de matière active dans les eaux superficielles des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

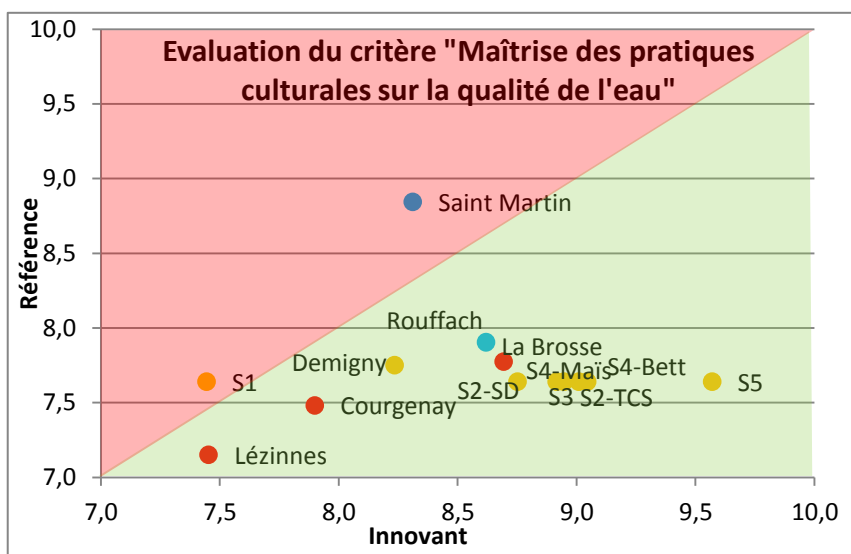


Figure 10 : Notes INDIGO® du risque de perte de matière active dans les eaux profondes des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

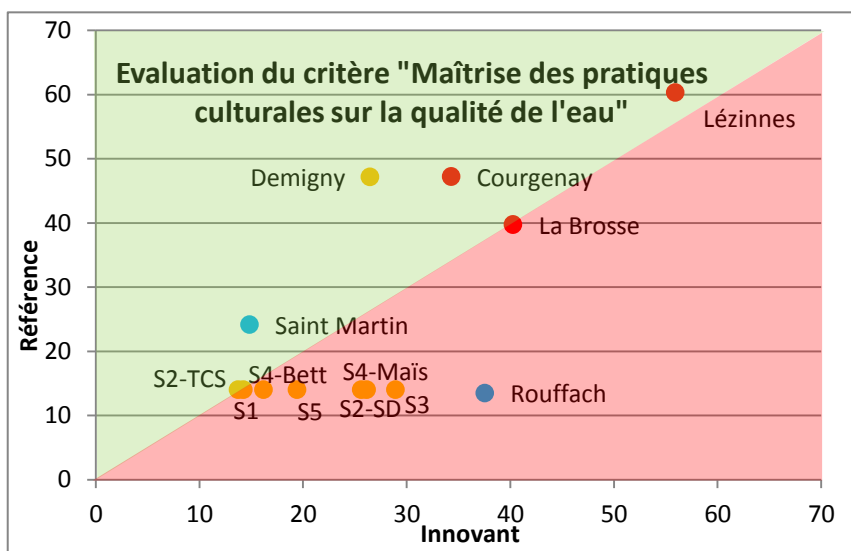


Figure 11 : Quantité de nitrates lessivés (kg d'NO₃⁻/ha/an) des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

Situations de production (Tableau 1) : n°1 ● n°2 ● n°3 ●

De plus, et toujours d'après les valeurs seuils proposées par Bockstaller et Girardin (2006), l'ensemble des couples SdCi et SdC-LoDo se caractérisent par des notes acceptables.

3.1.2.4.2 Des pertes de nitrates résultant de phénomènes complexes

Le risque de pertes de nitrates dans les eaux a été évalué grâce aux quantités de nitrates lessivés (kg d' NO_3^- /ha/an) (Figure 11). Cette quantité est estimée par le calcul des quantités lors du lessivage de printemps et l'estimation du risque de lessivage hivernal.

A partir des résultats obtenus, il n'a pas été possible d'identifier précisément les déterminants des performances obtenues. Les valeurs calculées dépendent de la quantité totale d'azote apportée à la culture, en fonction de la date du premier apport, du taux de couverture de la culture, du bilan post récolte (et donc du rendement réalisé), de la fréquence des apports humiques et d'un coefficient de lessivage (dépendant de données climatiques). Il est complexe de déterminer le rôle de chacune de ces variables. Des simulations ont aussi prouvé la forte dépendance du résultat à la série climatique utilisée, pouvant faire quadrupler les quantités lessivées à l'échelle du système selon la série considérée. De plus, par confrontation avec des données mesurées sur les parcelles du SdCi de Rouffach, les valeurs calculées par CRITER 2.0 leur sont supérieures d'un facteur 2.

Une analyse plus approfondie des données reste cependant nécessaire.

3.1.2.5 Amélioration des performances énergétiques par les SdCi

3.1.2.5.1 Des consommations énergétiques réduites

L'indicateur consommation énergétique permettant d'évaluer la dépendance du système en énergie fossile dépend de postes de consommation directe (mécanisation, irrigation, séchage du grain) ou indirecte par l'introduction d'intrants dans le système (poste fertilisation et phytosanitaire).

La diversification des cultures permet de réduire significativement, voire de faire des impasses de fertilisation azotée dans le cas de légumineuses, qu'elles soient conduites en interculture ou comme cultures de vente. Ainsi, le système innovant de La Brosse parvient à diminuer sa consommation énergétique de 45 % par rapport à sa référence, grâce à une fertilisation azotée minérale réduite par l'introduction de Chanvre, Orge de Printemps et Pois d'hiver. De même, l'adoption d'objectifs de rendements plus faibles, comme c'est le cas pour les systèmes d'Epoisses, participe à la diminution de la consommation énergétique liée à la fertilisation.

Les systèmes innovants S2-TCS, S2-SD, de Lézennes et de Demigny ayant pour stratégie la limitation des recours au travail du sol parviennent à obtenir une diminution significative d'au moins 20% de la consommation énergétique du poste mécanisation, qui s'explique par le non de labour et la réduction du travail superficiel du sol. Au contraire, les stratégies de désherbage mécanique ont pour conséquence d'augmenter le nombre d'interventions de travail du sol en particulier pour les systèmes S5, S4-Maïs et S4-Bett.

La conduite de Maïs grain est pénalisante en termes de consommation énergétique pour les systèmes les pratiquant du fait de l'opération de séchage réalisée par les organismes stockeurs et systématique si l'humidité du grain est supérieure à la norme de 15 %. Les systèmes innovants de Rouffach et de Saint Martin Belle Roche parviennent toutefois à améliorer le poste séchage par rapport à leur référence suite à l'allongement du délai de retour du Maïs grain (1 an sur 3 à Rouffach et 2 ans sur 5 à Saint Martin Belle Roche).

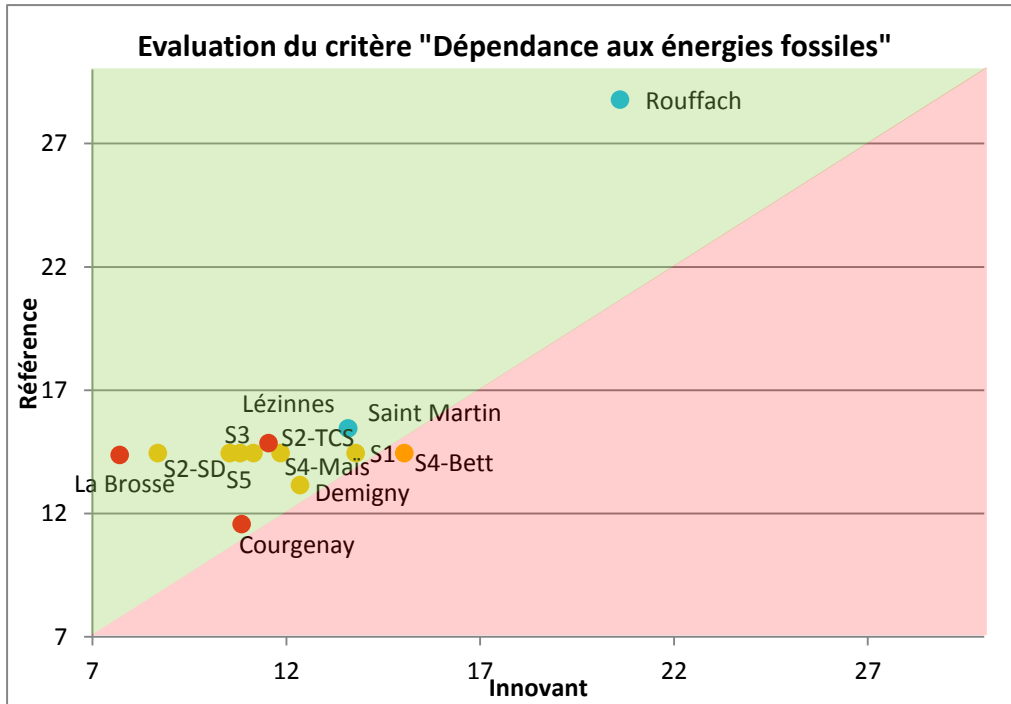


Figure 12 : Consommation énergétique (GJ/ha) des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

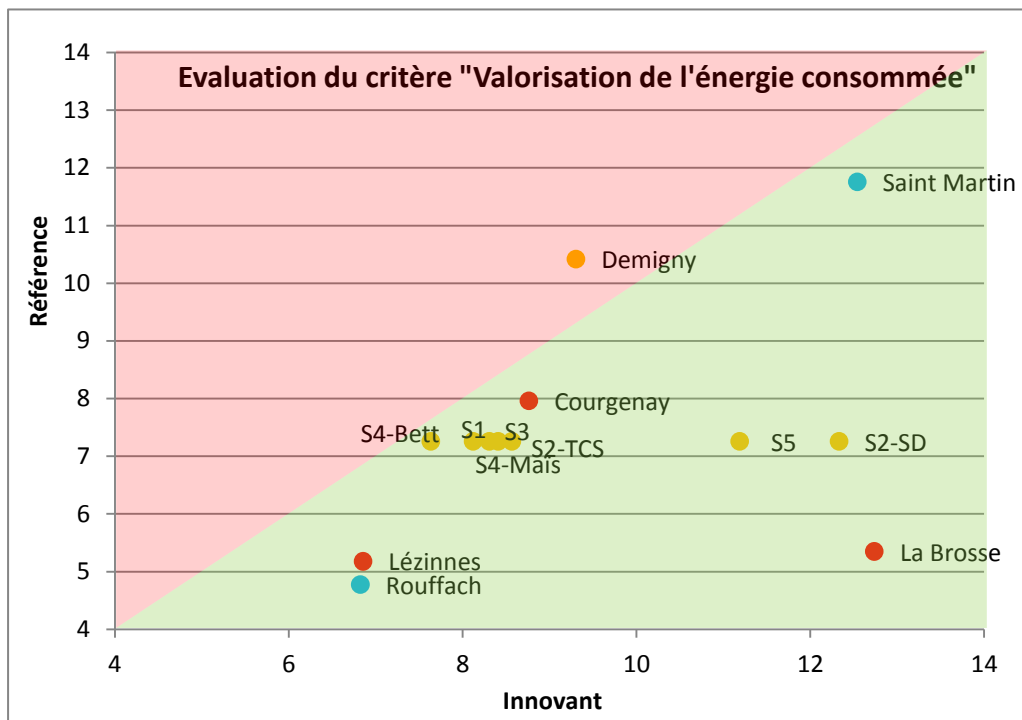


Figure 13 : Efficacité énergétique (%) des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

Situations de production (Tableau 1) : n°1 ● n°2 ● n°3 ●

Le recours à l'irrigation est le poste affectant le plus les performances énergétiques, d'autant plus que le système innovant de Rouffach ne limite pas les quantités d'eau apportées par rapport à la référence (près de 200 mm/ha/an) et que le S4-Bett et le S4-Maïs introduisent des cultures irriguées, à savoir la Betterave sucrière et le Maïs grain, absentes des successions de leur référence.

3.1.2.5.2 Des SdCi plus efficaces énergétiquement

Les systèmes ayant introduits des cultures de diversification, comme Courgenay, Lézinnes, Rouffach et les systèmes d'Epoisses (sauf S1), se caractérisent par une diminution de leur production énergétique en grains. Les produits des cultures ayant sensiblement la même valorisation énergétique à masse égale, une diminution de la culture de céréales (qui fournissent des quantités de produits plus importantes grâce à des rendements plus importants que les oléagineux, par exemple), réduit le produit énergétique du système. Toutefois ces systèmes innovants parvenant à limiter leur consommation d'énergie fossile par rapport à leur référence, leur efficacité énergétique se voit améliorée (Figure 13). De plus, les différences de rendements constatées pour une même culture dans les couples SdCi/SdC-LoDo ne sont pas non plus assez significatives pour suffisamment réduire leur production énergétique.

La stratégie visant à exporter les pailles permet d'améliorer les efficacités énergétiques des systèmes qui la pratiquent (La Brosse, Demigny et Saint Martin Belle Roche). Le couple des systèmes de La Brosse se distingue tout particulièrement étant donné que le SdC-LoDo n'a recours à aucun export alors que l'innovant exporte les pailles de l'ensemble de ces céréales (Blé, Orge hiver et printemps), soit 4 campagnes sur les 7 de la succession culturale.

3.1.3 Des performances économiques en demi-teinte

3.1.3.1 Marge semi-nette :

Les marges semi-nettes obtenues présentent des variations importantes selon les différents couples SdCi/SdC-LoDo (entre 50 et 600 €/ha/an pour les innovants et de 150 à 430 €/ha/an en référence) (Figure 14). La diversification des cultures conduites par les systèmes innovants est un élément déterminant permettant d'expliquer les performances atteintes par ces systèmes, mais pouvant avoir une influence positive ou négative. De même, la diminution des charges opérationnelles grâce aux stratégies de gestion adoptées par certains systèmes, en particulier vis-à-vis de la fertilisation suite la diminution des apports azotés, influence les marges semi-nettes constatées.

Les systèmes de Lézinnes et de Saint Martin Belle Roche parviennent à maintenir des produits bruts similaires voire supérieurs à ceux de leur système de référence tout en réduisant à la fois leurs charges mécaniques et opérationnelles. La culture de Colza est particulièrement déterminante pour ces systèmes, car introduite à Saint Martin Belle Roche avec des rendements compris entre 30 et 43 qt/ha, dégagant des marges semi-nettes supérieures à celles du Maïs grain. A Lézinnes, des rendements de Colza et d'Orge hiver supérieurs à ceux réalisés par la référence permettent aussi d'améliorer le produit brut du système innovant.

Au contraire de ces précédents systèmes, les innovants conduits à Demigny et La Brosse diminuent leurs produits bruts par rapport à leur référence. Pour Demigny, cette baisse s'explique par la conduite de Soja aux rendements variables (entre 15 et 27 qt/ha) ainsi que la diminution des rendements des céréales à pailles et Colza par rapport à la référence (rendements moyens obtenus de 65 qt/ha en innovant contre 80 qt/ha pour la référence). Toutefois, la diminution des charges liées à la fertilisation de ce système innovant ne permet

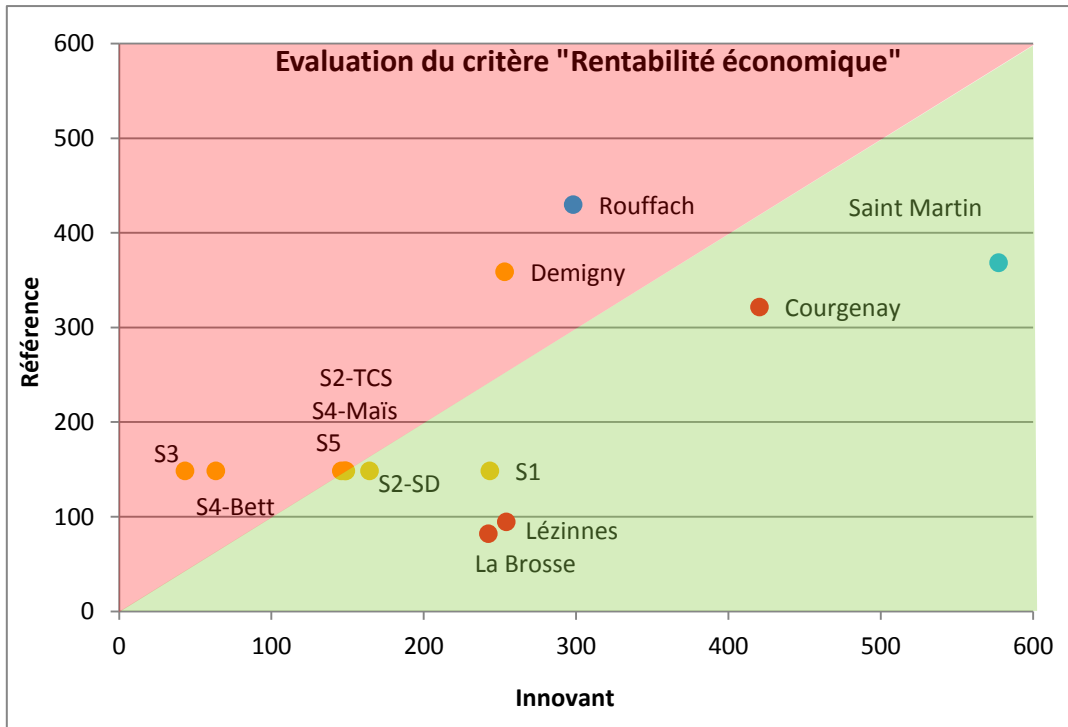


Figure 14 : Marges semi-nettes moyennes (€/ha/an) obtenues par les SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

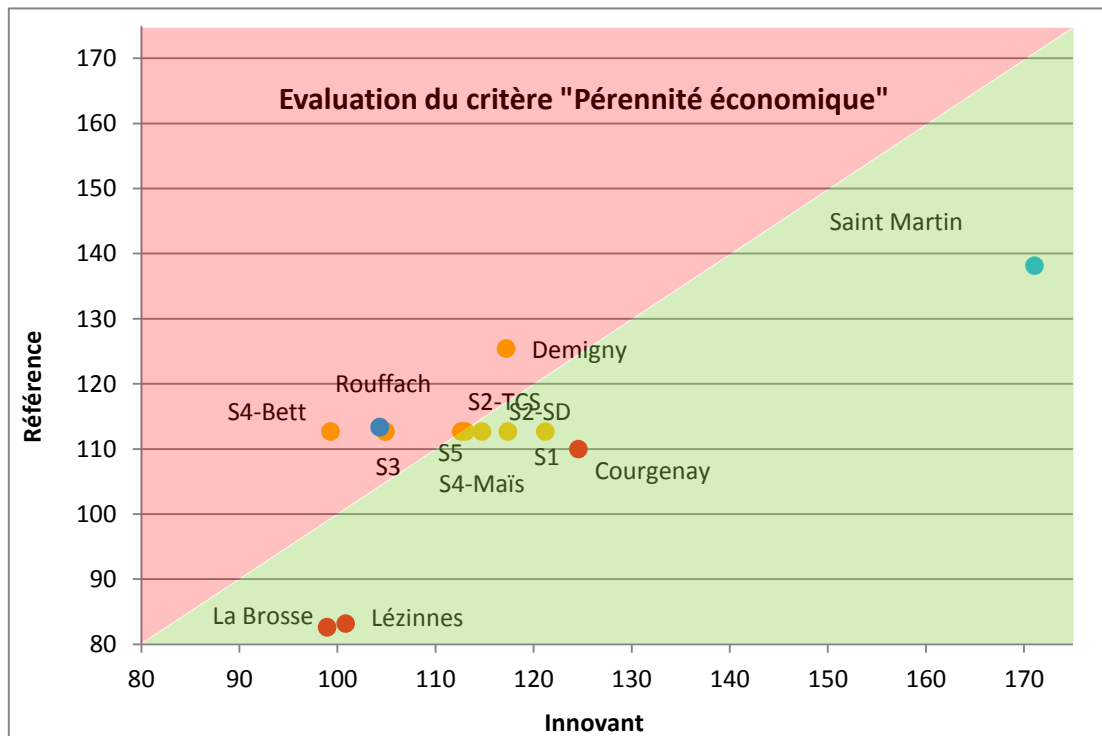


Figure 15 : Efficience économique (%) des SdC-LoDo par rapport aux SdCi associés

Situations de production (Tableau 1) : n°1 ● n°2 ● n°3 ●

pas de compenser la diminution des produits bruts. Au contraire, le système innovant de La Brosse parvient à diminuer de 25 % l'ensemble de ses charges totales, lui permettant ainsi d'améliorer sa marge semi-nette, passant de 82 €/ha pour sa référence à 242 €/ha.

Le système innovant de Rouffach est quant à lui affecté par l'introduction de Blé et de Soja revenant chacun tous les 3 ans dans la succession, cultures dont la rentabilité avec une irrigation systématique est moindre que celle du Maïs grain. Les 3 Blés récoltés sur cet essai affectent aussi la marge semi-nette par des rendements compris entre 53 et 70 qt/ha, malgré la diminution des charges opérationnelles, passant de 970 €/ha pour la référence à 810 €/ha.

Les systèmes innovants d'Epoisses (sauf le S1) se caractérisent par des marges semi-nettes inférieures à celle de leur référence. Ceci s'explique par la diversité des cultures qui y sont conduites, en particulier le Sorgho, la Féverole, le Lupin Blanc ou la Luzerne, cultures moins rentables économiquement et dont la maîtrise n'est parfois pas suffisante pour assurer un produit brut similaire. On constate de plus que le S4-Bett ne dégage une marge semi-nette que de 63,5 €/ha/an contre près de 150 €/ha/an pour sa référence, malgré la conduite de Betterave Sucrière dont les produits bruts sont de l'ordre de 2000 €/ha. Ceci s'explique pour la conduite de la Betterave par un recours important à l'irrigation ainsi que des charges mécaniques élevées dues aux interventions de désherbage spécifiques à cette culture. Ce système souffre aussi de mauvaises campagnes de récolte de Féverole d'hiver et de printemps. Ces systèmes étant expérimentés sur un domaine de l'INRA, ils ne sont pas menés selon un objectif prioritaire de rentabilité comme cela est plus souvent le cas dans les systèmes expérimentés chez des agriculteurs.

3.1.3.2 Un maintien de la pérennité économique des systèmes innovants

On constate que les systèmes de référence de La Brosse et Lézennes ont des efficacités économiques proches de 80 % (Figure 15). Ceci s'explique par des produits bruts faibles (de l'ordre de 750 €/ha/an) du fait de leur situation de production (terres superficielles limitant les rendements). La diminution des charges totales mobilisées par les systèmes innovants associés, permise par une diminution des charges opérationnelles de 40 % (réduction de la fertilisation) pour La Brosse et des charges mécaniques de 20 % (réduction des interventions du travail superficiel du sol) pour Lézennes, améliore les efficacités économiques de ces systèmes innovants. Toutefois ces SdCi et SdC-LoDo restent très dépendants des DPU dont ils bénéficient (252 €/ha), sans lesquels ils ne pourraient pas dégager de marges semi-nettes positives.

Au contraire, le couple SdCi/SdC-LoDo de Saint Martin Belle Roche se caractérise par une très bonne efficacité économique, permise par la conduite régulière de Maïs grain. Le système innovant parvient en plus à limiter de 15 % ses charges totales, améliorant ainsi de 25 % son efficacité grâce à un produit brut identique à celui de sa référence (1335 €/ha/an). Toutefois le couple de systèmes de Rouffach, malgré la conduite de Maïs grain, n'atteint pas ces performances du fait de son recours systématique à l'irrigation. De plus l'innovant ne parvient pas à compenser la diminution de 25 % de son produit brut par la réduction de 17 % de ses charges totales, d'où sa moins bonne performance par rapport à sa référence.

3.2 De meilleures performances, déterminées par les stratégies de gestion

On constate tout d'abord que les performances atteintes par l'ensemble des systèmes de culture innovants se distinguent de celles atteintes par leur référence respective. La variabilité de ces performances semble avant tout déterminée par les stratégies de gestion mises en œuvre à l'échelle du système. La diversification des cultures par l'introduction de

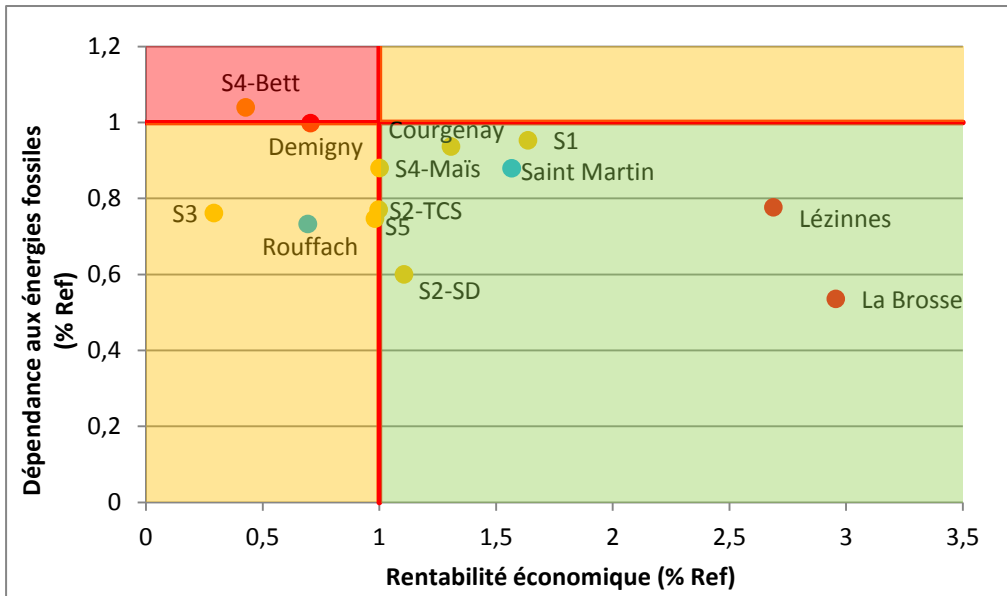


Figure 16 : Relation entre les critères Dépendance aux énergies fossiles et Rentabilité économique, en pourcentage de leur référence

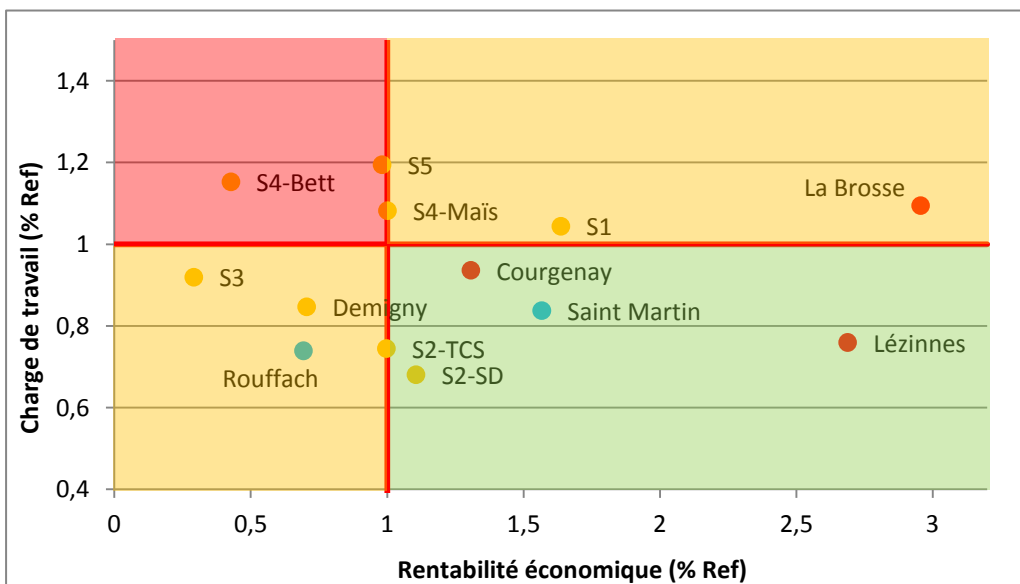


Figure 17 : Relation entre les critères Charge de travail et Rentabilité économique, en pourcentage de leur référence

0 critère amélioré 1 critère amélioré 2 critères améliorés

Situations de production (Tableau 1) : n°1 ● n°2 ● n°3 ●

légumineuses, prairies et l'alternance cultures de printemps/hiver, l'adoption d'une stratégie de désherbage mécanique ou de travail du sol superficiel plus intensif influencent tout particulièrement les performances constatées. Entre autres, ces stratégies ont pour conséquence de limiter les apports de fumure à l'échelle du système et d'en limiter la consommation énergétique.

La variabilité des performances caractérisées pour cet échantillon des SdCi du RMT SdCi n'est que peu influencée par les situations de production dans lesquelles se trouvent les couples SdCi/SdC-LoDo. Elles s'expriment par la possibilité de conduire du Maïs grain ou d'avoir recours à l'irrigation (SdC de Rouffach et d'Epoisses), ou bien par des situations à plus faibles potentiels de rendement (SdC de Lézinnes, La Brosse et Courgenay).

3.3 Analyse transversale des relations entre critères d'évaluation

Parmi les corrélations effectivement significatives mises en évidence (**Annexe VI**), la majorité d'entre elles sont des corrélations entre des critères non indépendants entre eux (exemple : entre IFT total et les risques de perte de matières actives ou entre l'efficacité économique et la marge semi-nette). Certaines d'entre elles, significatives ou non, sont détaillées ci-dessous.

3.3.1.1 Gagner en rentabilité en limitant la dépendance énergétique ?

D'après Philippe Viaux (1999), « l'optimisation économique des assolements ne tient pas assez compte des économies de charges permises par la conduite d'une rotation équilibrée ». Il peut tout aussi bien s'agir de charges liées à l'utilisation d'intrants que dépendantes des interventions mécaniques réalisées. Ainsi, sous réserve de maintenir le produit brut, des stratégies de gestion permettant de diminuer la consommation énergétique, dépendante des charges affectées au système, pourraient permettre une amélioration de la marge semi-nette dudit système. On retrouve cette tendance par une corrélation négative (-0.14), mais non significative (p-value = 0.64), existante entre les indicateurs évaluant la rentabilité économique et la dépendance du système aux énergies fossiles. Les systèmes innovants parvenant à diminuer leur consommation énergétique ont ainsi tendance à augmenter leur marge semi-nette. A partir de la Figure 16, on s'aperçoit que les systèmes innovants de La Brosse et de Lézinnes parviennent mieux à améliorer conjointement ces 2 critères, ce qui peut s'expliquer par la réduction conjointe des charges de mécanisation (limitation des interventions de travail du sol) et de la fertilisation réalisée, et à des rendements peu dégradés par rapport à leur référence, voir améliorés dans le cas de Lézinnes.

3.3.1.2 Une relation floue entre charge de travail et rentabilité du système

Dans les objectifs assignés aux SdCi les plus souvent cités reviennent le maintien d'un revenu économique acceptable ainsi que l'augmentation ou la conservation du temps libre de l'agriculteur.

Il n'existe pas de corrélation significative entre ces deux critères (p-value = 0.95). On peut toutefois constater que les systèmes innovants limitant le plus le temps de travail nécessaire à leur conduite par rapport à leur référence (Demigny, Rouffach, S2-TCS et S2-SD, Lézinnes) parviennent à dégager des marges semi-nettes supérieures ou égales à celles de leur référence (Figure 17), et comprises entre 250 et 300 €/ha/an. De plus, les systèmes augmentant leur charge de travail ne parviennent pas à dégager une rentabilité supérieure à leur référence (excepté La Brosse). Il s'agit particulièrement de systèmes ayant un recours important au désherbage mécanique, à savoir le S5, S4-Maïs et S4-Bett. Ce dernier système ne parvient à améliorer ces 2 critères conjointement, du fait de la culture de la Betterave

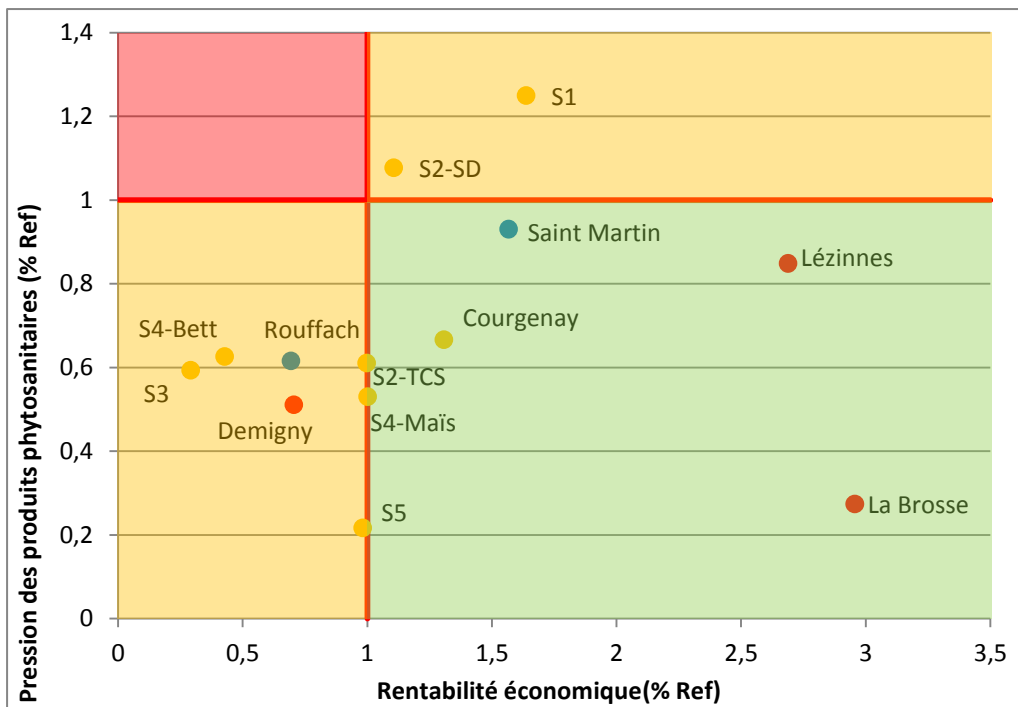


Figure 18 : Relation entre les critères Pression des produits phytosanitaires et Rentabilité économique, en pourcentage de la référence

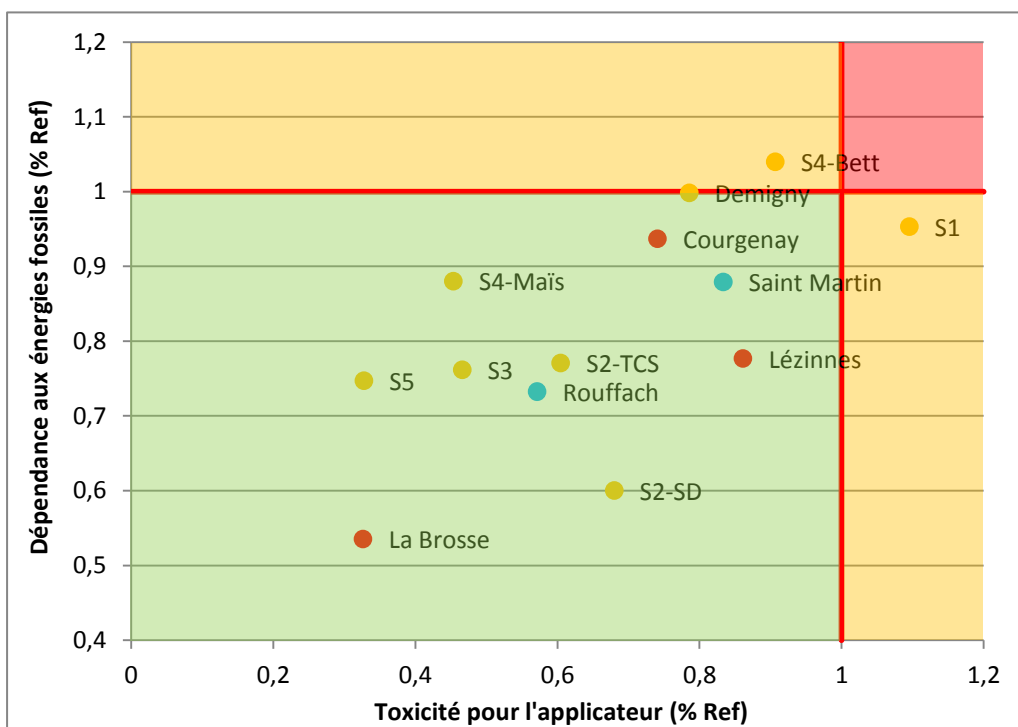
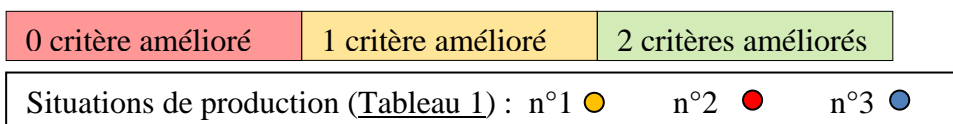


Figure 19 : Relation entre les critères Dépendance aux énergies fossiles et Toxicité pour l'opérateur, en pourcentage de leur référence



Sucrière (en moyenne 9 h/ha de travail pour sa conduite) et à cause de cultures aux rendements réduits notamment.

Ainsi, ne pas pouvoir distinguer de relation entre ces 2 critères peut être imputé à des combinaisons de stratégies de gestion différentes entre les SdCi, telle la pratique du désherbage mécanique et le travail du sol simplifié du sol, stratégies ayant des répercussions inverses sur l'évolution de la charge de travail et dont aucune d'entre elles ne donne de garantie sur la rentabilité du système.

3.3.1.3 Une relation entre IFT total et marge semi-nette à l'encontre des préjugés ?

La diminution du recours aux pesticides est souvent associée à la crainte de dégrader la rentabilité du système. Pourtant, la relation entre les critères de rentabilité économique et de pression des produits phytosanitaires est ici non significative (p-value = 0.25 et coefficient de corrélation = 0.34). On constate en effet que l'ensemble des systèmes innovants (sauf S1 et S2-SD) parviennent à réduire leur IFT total par rapport à leur référence, mais certains voient leur marge semi-nette dégradée (par exemple S3 et Rouffach) alors que d'autres parviennent à l'améliorer (comme La Brosse et Lézinnes) ([Figure 18](#)). La limitation des quantités de produits phytosanitaires appliquées est négligeable dans les diminutions des charges opérationnelles constatées, alors que le recours au désherbage mécanique en tant que substitution ou en complément de la lutte chimique contre les adventices augmente les charges mécaniques. Toutefois, d'autres stratégies de gestion influençant les différences de charges totales entre SdCi et SdC-LoDo et les produits bruts étant majoritairement stables, il n'a pas été possible ici de distinguer de combinaisons de stratégies de gestion expliquant la variabilité des marges semi-nettes constatées.

3.3.1.4 Une combinaison de stratégies de gestion pour réduire les risques de phytotoxicité pour l'applicateur

On peut constater une corrélation positive (0.70) et significative (p-value = 0.007) entre l'indicateur du nombre de passages avec au moins un produit à risque appliqué nocif pour les applicateurs et la consommation énergétique totale du système. La relation entre ces deux indicateurs est du type linéaire et croissant, ce qui signifie que l'amélioration d'un indicateur implique l'amélioration du second ([Figure 19](#)). Le risque de toxicité pour l'applicateur est d'autant plus faible que la consommation énergétique du système l'est. Les systèmes les plus performants par rapport à leur référence étant ceux de La Brosse, Epoisses (sauf S4-Bett) et Rouffach, il semble que plusieurs stratégies de gestion permettent de réduire le risque pour de toxicité phytosanitaire. En effet, certains de ces systèmes ont mis en œuvre des stratégies de gestion des adventices par désherbage mécanique et réduction de doses de produits phytosanitaires, d'autres sont orientés vers des stratégies de travail du sol simplifié. La réduction de la fertilisation de ces systèmes, par la diversification des cultures introduites et des objectifs de rendements plus faibles participent aussi à cette réduction de la consommation énergétique. Par rapport à leur référence, l'ensemble de ces stratégies de gestion permettent donc de réduire conjointement la dépendance des systèmes aux produits phytosanitaires ainsi le risque pour la santé de l'applicateur (l'IFT total et le nombre de passage avec au moins un produit toxique étant significativement corrélé : 0.76 pour p-value = 0.0027).

De plus, les systèmes conciliant au mieux ces 2 critères, à savoir La Brosse, les SdCi d'Epoisses (sauf S4-Bett) et Rouffach sont des systèmes conduits au sein de l'INRA ou de Lycées Agricoles. Ceux-ci peuvent ainsi se permettre des niveaux de rupture par rapport à l'actuel plus importants que ne peuvent le faire les agriculteurs conduisant les systèmes expérimentaux dans le cadre de leur exploitation.

4 / Discussion

4.1 Une méthode de référence pertinente mais sensible ?

Dans ce travail, il a été délibérément choisi de considérer comme référence aux SdCi des systèmes représentatifs des pratiques locales dominantes dans chacune des régions agricoles, choix justifié par des choix méthodologiques et clairement identifiés. La mobilisation des expérimentateurs locaux, grâce à leur connaissance de leur secteur, a pu assurer la fiabilité de la sélection des agriculteurs disposant de tels systèmes. Cette référence utilisée prend une place importante dans l'évaluation car elle permet de caractériser les performances des SdCi par rapport à des systèmes situés dans les mêmes situations de production. Il est donc intéressant de se questionner sur la pertinence du choix effectué. En effet, la majorité des agriculteurs identifiés sont impliqués dans des groupes de travail visant à améliorer leurs pratiques et/ou suivis par les Chambres d'Agriculture. Impliqués dans ces démarches volontaires, ils sont ainsi plus susceptibles d'avoir modifié leurs pratiques, s'écartant des pratiques dominantes que l'on cherche à identifier. C'est pourquoi il est nécessaire de pouvoir repositionner les pratiques culturelles mises en œuvre sur les SdC-LoDo par rapport aux pratiques des RA. Ceci peut être permis par l'utilisation de l'échantillon statistique ayant permis d'identifier la succession culturale et le type de travail du sol dominants des RA. Par le calcul d'indicateurs basiques, tels que le nombre de passages de travail du sol, les IFT ou les quantités de fumure NPK apportées sur l'ensemble des données des enquêtes Pratiques Culturelles 2006, il est ainsi possible de repositionner les valeurs de ces indicateurs du SdC-LoDo par rapport à l'ensemble des valeurs obtenues par région. Ceci permettrait de s'assurer qu'elles sont proches des valeurs moyennes de l'ensemble de l'échantillon de parcelles enquêtées au cours de ces enquêtes. De plus, ce travail s'appuyant sur des données récoltées en 2006, il serait intéressant de réaliser ce même travail afin de déterminer si les SdC-LoDo sont toujours représentatifs des pratiques locales dominantes avec les données des enquêtes Pratiques Culturelles 2011. Il s'agirait là d'une méthode statistique permettant de valider le choix d'un SdC-LoDo, complémentaire à l'avis du conseiller ayant sélectionné l'agriculteur.

Le choix des parcelles des agriculteurs suivant le SdC-LoDo identifié et qui sont à retenir lors de l'évaluation est aussi primordiale. En effet, la variabilité des pratiques mises en œuvre annuellement, pouvant par exemple s'expliquer par des conditions météorologiques exceptionnelles ou par des opportunités d'achats d'intrants, influence fortement les performances du système pour une même parcelle. Ainsi l'on peut, au sein d'un même SdC, disposer de parcelles aux performances significativement différentes. Un exemple en est une parcelle du SdC-LoDo Rouffach devant être conduite en Blé une année donnée. Suite à un accident climatique, celle-ci a été replantée en Maïs grain, occasionnant des charges opérationnelles nettement supérieures à la moyenne des autres parcelles du SdC-LoDo (cette campagne fut aussi exceptionnelle pour le SdCi). Le recours à la saisie de l'ensemble des itinéraires techniques sous CRITER 2.0 (coûteux en temps), nécessite de limiter le nombre de parcelles considérées lors de l'exploitation des résultats mais accroît d'autant le risque de surestimer ou sous estimer certaines performances des SdC-LoDo du fait de la variabilité interannuelle de pratiques, en fonction des contraintes climatiques ou de l'exploitation.

Ceci soulève la question de la sensibilité des performances selon la référence utilisée. Il serait intéressant de travailler à la détermination de cette sensibilité, en confrontant les performances de plusieurs SdC-LoDo pour un même SdCi afin de préciser si l'utilisation d'un seul SdC-LoDo par SdCi reste pertinente ou s'il serait préférable de considérer un ensemble de SdC-LoDo plus stable vis-à-vis de la variabilité des performances des SdC et des pratiques.

4.2 Quelles limites aux indicateurs utilisés et améliorations à apporter ?

Les indicateurs qui ont été utilisés dans ce travail, ont permis de mettre en évidence des stratégies de gestion particulièrement déterminantes dans les performances atteintes par les systèmes de culture innovants. S'agissant d'indicateurs simples, il est évident que certains paramètres, difficilement estimables, n'ont pu être pris en compte. La protection intégrée nécessitant de suivre régulièrement l'état de la parcelle afin d'adapter les interventions en fonction des états du milieu, on peut s'attendre à un temps d'observation des parcelles accru par rapport à des systèmes plus conventionnels, temps supplémentaire qui n'est pas comptabilisé dans le temps de travail du système. La charge de travail nécessaire à l'installation de l'irrigation n'a pas non plus été considérée alors qu'elle représente une contrainte majeure en période sèche, tout comme l'organisation du travail qu'elle nécessite. De même, le coût financier de l'utilisation d'adjuvants n'a pas été pris en compte. Utilisés pour améliorer l'efficacité des traitements, ils ne sont pas systématiquement ajoutés aux bouillies des traitements et encore moins enregistrés par l'ensemble des agriculteurs.

Afin d'affiner l'analyse effectuée, il serait aussi intéressant de disposer d'indicateurs apportant des informations plus précises sur les itinéraires techniques réalisés, comme le temps de travail accordé annuellement aux traitements phytosanitaires ou au travail profond du sol, ou bien la part du poste fertilisation dans les charges totales (approché ici par les quantités de fumure apportées). L'utilisation de tels indicateurs, intermédiaires à ceux déjà mobilisés, permettraient d'améliorer la compréhension des déterminants des performances.

De plus, les performances n'ont été caractérisées que dans un contexte de prix fixés et selon une seule série climatique, ne prenant pas en compte la volatilité des prix ni la sensibilité aux conditions météorologiques des systèmes. Il serait intéressant de tester d'autres scénarios afin d'étudier la robustesse des SdCi face à des situations économiques et climatiques différentes.

4.3 Acceptabilité des innovations et des évolutions de pratiques culturelles par les agriculteurs

Dans un contexte socio-économique morose, il est possible de se demander quelle pourrait être l'acceptabilité d'une transition vers la PI pour les agriculteurs. En se basant sur les SdCi d'Epoisses, Nicolas Munier-Jolain (2008) affirme que les principes de la PI peuvent limiter la faisabilité et l'acceptabilité des systèmes, en particulier par la création des tensions dans le calendrier de travail. Ceci n'est pas anodin au regard des objectifs assignés aux SdCi, visant souvent une réduction de la charge de travail. De même, l'argument financier est régulièrement mis en avant et l'introduction de culture à faible marge est redoutée par les agriculteurs. Toutefois, d'après ce travail, tous les systèmes introduisant des cultures de diversification et conduit selon la PI ne sont pas forcément pénalisés économiquement par rapport aux SdC-LoDo. Se posent par contre la question de l'accès aux filières de diversification, qui est couramment évoqué en tant que facteur limitant lors des discussions avec les agriculteurs, en particulier dans les régions hors des grands bassins de production.

Les essais systèmes du RMT SdCi n'ayant pas pour vocation d'être immédiatement reproductibles en exploitation, ils permettent ainsi de tester la faisabilité d'une combinaison de techniques culturales, de règles de décision et de successions culturales pouvant être remobilisées par les agriculteurs. Toutefois, une évolution graduelle entre des systèmes conventionnels et ceux recourant à la PI présente un risque de création de systèmes intermédiaires, ne correspondant pas à des optimums économiques et environnementaux

(Munier-Jolain, 2008), d'où l'importance d'insister sur le raisonnement des pratiques à l'échelle du système de culture et non technique par technique.

4.4 Un travail appelant à être poursuivi

Dans le cadre d'un travail plus complet sur la caractérisation des déterminants des performances des SdCi, il serait intéressant d'effectuer une analyse multidimensionnelle afin de pouvoir mettre en évidence des typologies de SdCi obtenant des combinaisons semblables de performances. L'analyse qui s'en suivra pourrait essayer de déterminer si les SdC ayant les mêmes profils de performances sont déterminés par des stratégies de gestion semblables. L'influence des situations de production pourra aussi être analysée. Ce travail a été réalisé à titre exploratoire à partir de l'échantillon disponible, mais son interprétation n'a pas pu être pertinente du fait du faible nombre d'individus disponible (13 SdCi + 13 SdC-LoDo pour près d'une quinzaine de variables à expliquer). L'étude du suivi des règles de décisions (respect de la règle et écart au décisionnel), élaborés par les expérimentateurs avec les agriculteurs, peut aussi être source d'information. En effet la connaissance des raisons pour laquelle on constate un écart au décisionnel informe des limites des techniques mises en œuvre ou de leur faisabilité dans certaines situations de production.

Conclusion

Un des rôles du RMT SdCi et de ses expérimentateurs est de participer à l'évaluation des systèmes de culture innovants testés au champ et considérés comme étant les plus prometteurs en termes de contribution aux différentes composantes de la durabilité, afin de répondre aux enjeux majeurs de l'agriculture d'aujourd'hui et de demain.

En prenant pour référence des systèmes de culture définis comme étant représentatifs des pratiques agricoles locales dominantes à l'échelle d'une région agricole, il a été possible de caractériser les performances de critères d'évaluation des composantes de la durabilité. Les performances environnementales sont tout particulièrement améliorées, les systèmes de culture innovants parvenant à réduire les pressions qu'exercent leurs pratiques culturales sur l'environnement (IFT, consommation énergétique). Les performances économiques et sociales restent satisfaisantes mais des critères comme la rentabilité économique ou la charge de travail peuvent être dégradés par rapport aux références considérées.

On a pu constater que ces performances sont fortement déterminées par les stratégies de gestion adoptées à l'échelle du système de culture et sur la modification des pratiques culturales qu'elles engendrent. Des stratégies de désherbage mécanique, diversification des cultures, permettant la réduction de l'introduction d'intrants à l'échelle du système sont particulièrement décisives. Les situations de production dans lesquelles se situent les systèmes innovants se révèlent être moins déterminantes pour les performances constatées.

Ces stratégies de gestion sont autant d'éléments de réponse mobilisables par les agriculteurs selon les problématiques et enjeux auxquels ils sont confrontés. Certains ont d'ailleurs déjà recours à ces stratégies, en ayant eux même développé une démarche d'innovation sur leurs systèmes de culture. L'introduction de cultures de diversification en est un exemple, encouragée par les impasses techniques auxquels font face les agriculteurs.

La multiplication de ces évaluations multicritères s'avèrerait aussi être une source d'information riche en enseignement dans une démarche de boucle d'innovation, car permettant d'adapter les règles de décision élaborées à la faisabilité de chacune des stratégies de gestion et des pratiques culturales innovantes mises en œuvre à l'échelle système.

Références bibliographiques

- Aubertot J.-N., Robin M.-H. (soumis). Injury Profile SIMulator, a qualitative aggregative modelling framework to predict crop injury profile as a function of cropping practices, soil, climate and field environment.
- Bertrand M., Guichard L., Meynard J.-M., Picard D., Saulas P. (2005). Conception de systèmes de culture durables et innovants en grand culture. Le cas de l'essai de longue durée de « La Cage » à Versailles. Évaluation environnementale et durabilité de techniques et de pratiques agricoles «éco-compatibles» : Actes du 10^e Colloque du Secrétariat international francophone pour l'évaluation environnementale (Angers, 22 juin 2005). <http://www.sifee.org/Actes/actes_angers_2005/actesangers.htm> (consulté le 20/04/2013)
- Binder C.-R., Feola G., Steinberger J.-K. (2010). Considering the normative, systemic and procedural dimensions in indicator-based sustainability assessments in agriculture. *Environmental Impact Assessment Review*, n°30, pp.71-81.
- Bockstaller C., Girardin P., Van der Werf H.-M.-G. (1997). Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *European Journal of Agronomy*, n°7, pp.261-270.
- Bockstaller C., Girardin P. (2008). Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO[®]. 119p.
- Bockstaller C., Guichard L., Makowski D., Girardin P., Plantureux S., (sous presse), « Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A methodological review », *Agronomy for Sustainable Development*.
- Boiffin J., Kéli Zagbahi J., Sebillotte M. (1986). Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : application du modèle de Hénin-Dupuis. *Agronomie*, n°5, pp.437-446.
- Boissinot F., Mézière D., Bretagnolle V., Munier-Jolain N. (2011). Réduire l'usage des herbicides en grandes cultures, *Phytoma - La Défense de Végétaux*, n°649, pp.39-44.
- Brundtland G.H., 1987. Notre Avenir à Tous, Rapport de la Commission mondiale sur l'Environnement et le Développement. 349p. <http://www.diplomatie.gouv.fr/fr> (Consulté le 02/05/2013).
- Cameron K.-C., Di H.-J., Moir J.-L. (2013). Nitrogen losses from soil/plant system : a review. *Annals of Applied Biology*, n°162, pp.145-173.
- Capillon A., Manichon H. (1991). Guide d'étude de l'exploitation agricole à l'usage des agronomes. Relance Agronomique, ADEPRINA-APCA, pp.173-187.
- Carof M., Colomb B., Aveline A. (2013). A guide for choosing the most appropriate method for multi-criteria assessment of agricultural systems according to decision-makers' expectations. *Agricultural Systems*, n°115, pp.51-62.
- Castoldi N., Bechini L. (2010). Integrated sustainability assessment of cropping systems with agro-ecological and economic indicators in northern Italy. *European Journal of Agronomy*, n°32, pp.59-72.
- Castoldi N., Schmid A., Bechini L., Binder C.R. (2010). Trade-off analysis for agro-ecological indicators : application of Sustainable Solution Space to maize cropping systems in northern Italy. 9th European IFSA Symposium, Vienne, 4-7 Juillet 2010, pp.850- 860.
- Colnenne David C., Grandeau G., Doré T. (2010). Systèmes de culture innovants : Vers la performance environnementale, *Perspectives Agricoles*, n°372, pp.34-37.
- Colnenne David C., Grandeau G., Doré T. (2012). Concilier performances environnementales et rendements élevés : premières évaluations de systèmes de culture innovants sous contraintes. *Le courrier de l'environnement de l'Inra*, n°62, pp.5-18.

- Colomb B., Angevin F., Bergez J.-E., Blouin M., Carpy-Goulard F., Glandières A., Prieur L. (2009). Using MASC to evaluate the sustainability of cropping systems : Application to multi-criteria assessment of organic cropping system in Southern France. AgSAP Conference, Egmond aan Zee, pp. 448-449.
- CORPEN, 2006. Des indicateurs AZOTE pour gérer des actions de maîtrise des pollutions à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire, Paris, Ministère de l'Ecologie et du Développement durable, 113p.
- Craheix D., Angevin F., Bergez J.-E., Bocksatller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Doré T. (2012). MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. Innovations Agronomique n°20, pp.35-48.
- Debaeke P., Petit M.-S., Bertrand M., Mischler P., Munier-Jolain N., Nolot J.-M., Reau R., Verjux N. (2008). Evaluation des systèmes de culture en stations et en exploitations agricoles : où en sont les méthodes ? Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?, Reau R., Doré T. (eds.), Ed. Educagri, pp.149-168.
- Deike S., Pallutt B., Christen O. (2008). Investigations on the energy efficiency of organic and integrated farming with specific emphasis on pesticide use intensity. European Journal of Agronomy, n°28, pp.461-470.
- Deytieux V., Vivier C., Minette S., Nolot J.-M., Piaud S., Schaub A., Lande N., Petit M.-S., Reau R., Fourrié L., Fontaine L. (2012). Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle. Innovations Agronomiques, n°20, pp.49-78.
- Doré T., Jeuffroy M.-H., De Tourdonnet S. (2006). La connaissance du fonctionnement du champ cultivé, base de l'évolution des systèmes de culture. L'agronomie aujourd'hui, Doré T., Le Bail M., Martin P., Ney B., Roger-Estrade J. (eds), Ed. Quae, pp.43-56.
- Giteau J.-L., Heddadj D., Fisson C. (2010). Evaluation multicritère de systèmes de culture innovants en Bretagne à l'aide de MASC. Le modèle MASC et ses utilisations pour l'évaluation de la durabilité de systèmes de culture, Paris, 9 et 10 mars 2010, pp.9-10.
- Hatchuel A., Le Masson P., Weil B. (2006). Les processus d'innovation. Conception innovante et croissance des entreprises. Hermès, Paris
- INRA (2009). Tome VIII : Inventaire des dispositifs d'acquisition de référence existants. Ecophyto R&D Vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires
- Jeuffroy M.-H., Bergez J.-E., David C., Flénet F., Gate P., Loyce C., Maupas F., Meynard J.-M., Reau R., Surleau-Chambenois C. (2008). Utilisation de modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétales : bilan et perspectives. Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?, Reau R., Doré T. (eds.), Ed. Educagri, pp.11-27.
- Lançon J., Reau R., Cariolle M., Munier-Jolain N., Omon B., Petit M.-S., Viaux P., Wery J. (2008). Méthodes d'évaluation en réseau d'itinéraires techniques potentiellement innovants : nouveaux acquis opérationnels. Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?, Reau R., Doré T. (eds.), Ed. Educagri, pp.91-107.
- Launais M. (2011). Evaluation multicritère de systèmes de culture innovants expérimentés en Bourgogne. Mémoire de fin d'étude, Agrocampus Ouest, Rennes, 94p.
- Le Gal P.-Y. (2009). Agronomie et conception de systèmes de production innovants : concepts, démarches et outils. Symposium international « Agriculture durable en région Méditerranéenne, Rabat, 14-16 mai 2009.
- Meynard J.-M., Girardin P. (1991). Produire autrement. Le courrier de la Cellule Environnement, n°15, pp.1-19.

- Meynard, J-M. (2008). Produire autrement, réinventer les systèmes de culture. Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?, Reau R., Doré T. (eds.), Ed. Educagri, pp.11-27.
- Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (2008). Ecophyto 2018. 21 p. <http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/PLAN_ECOPHYTO_2018.pdf>. (consulté le 21/03/2013)
- Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (2013). Directive Nitrates. 6 p. <http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Directives_nitrates.pdf> (consulté le 28/08/2013)
- Mischler P., Hocdé H., Triomphe B., Omon B. (2008). Conception de systèmes de culture et de production avec les agriculteurs : partager les connaissances et les compétences pour innover. Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?, Reau R., Doré T. (eds.), Ed. Educagri, pp.109-128.
- Munier-Jolain N., Deytieux V., Guillemain J.-P., Granger S., Gaba S. (2008). Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la Protection Intégrée contre la flore adventice en grandes cultures, Innovations Agronomiques n°3, pp.75-88.
- Nolot J.-M., Debaeke P. (2003). Principles and tools for the design, management and evaluation of cropping systems. Cahiers Agricultures, vol 12, n°6, pp.387-400.
- Omon B., Lagaise B., Reau R. (2010). Evaluation de systèmes de culture pratiqués par des agriculteurs innovants de l'Eure. Le modèle MASC et ses utilisations pour l'évaluation de la durabilité de systèmes de culture, Paris, 9 et 10 mars 2010, pp.7-8.
- Papy F. (2008). Le système de culture : un concept riche de sens pour penser le futur. Cahiers Agricultures, vol. 17, n°3, pp.263-269.
- Petit M.-S., Reau R., Deytieux V., Schaub A., Cerf M., Omon B., Guillot M.-N., Olry P., Vivier C., Piaud S., Minette S., Nolot J.-M. (2012). Systèmes de culture innovants : une nouvelle génération de réseau expérimental et de réseau de compétences. Innovations Agronomiques n°25, pp.99-123.
- Reau R., Monnot L.-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, n°20, pp.5-33.
- Sadok W., Angevin F., Bergez J.-E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Doré T. (2008). Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems : implications for using multi-criteria decision –aid methods. A review. Agronomy Sustainable Development, n°28, pp.163-174.
- Sébillotte M. (1990). Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. Les systèmes de culture, Combe L., Picard D., INRA, 196p.
- Van Ittersum M.K., Koning N. (2010). Will the world have enough to eat? Proceedings of Agro 2010, the XI ESA Congress, Montpellier, August 29th – September 3rd, Wery J., Shili-Touzi I., Perrin A. (eds) , Agropolis International Editions, pp.33-34.
- Viaux P. (1999). Une 3ème voie en Grande Culture – Environnement – Qualité – Rentabilité. Ed. Agrodécisions, 211 p.
- World Bank (2007). World Bank Development Report 2008 : Agriculture for Development. Washington, DC, 390 p.

Annexes

Annexe I : Questionnaire d'enquête soumis aux agriculteurs ayant un SdC-LoDo	31
Annexe II : Données techniques recueillies chez les agriculteurs ayant un SdC-LoDo	33
Annexe III : Paramétrage du prix d'achat des semences, des unités fertilisantes et de vente des cultures	34
Annexe IV : Modèle de caractérisation du risque de lessivage moyen par SdCi	35
Annexe V : Exemple d'une des synthèses d'évaluation réalisée	36
Annexe VI : Résultats du test de corrélation de Spearman pour les critères retenus et test de significativité associé	39
Annexe VII : Détails des Indices de Fréquence de Traitements des couples SdCi/SdC-LoDo	40
Annexe VIII : Tableau des valeurs à l'échelle du système des indicateurs utilisés, pour les SdCi (ligne bleue) et les SdC-LoDo (ligne banche)	41

Annexe I: Questionnaire d'enquête soumis aux agriculteurs ayant un SdC-LoDo

Fonctionnement d'ensemble de l'exploitation

Ce questionnaire rapide a pour but de caractériser l'exploitation enquêtée pour son système de culture local dominant afin de pouvoir en cerner les objectifs et la logique de production. Les données techniques précisées annuellement pour chaque parcelle du système de culture ciblé seront détaillées dans un autre document.

Dispositif associé :

1/ Situation géographique et identification

- Nom de l'agriculteur
- Age et niveau de formation
- Adresse
- Contact
- Petite Région Agricole
- SAU STH SFP

2/ Productions

- Motivations et priorités accordées à chaque atelier (si plusieurs)

Productions végétales

Cultures	Surface moyenne cultivée	Terrains	Destination	Rendements moyens et extrêmes

1

- Evolutions récentes

- Evolutions envisagées par l'agriculteur

- Priorités et objectifs de production

Productions animales

Ateliers et races	Effectifs moyens	UGB

- Evolutions récentes

- Evolutions envisagées par l'agriculteur

- Priorités et objectifs de production

2

3/ Appareil de production

Terrains et parcellaires

Terrains	Aménagements	Surface	Atouts et inconvénients

- Nombre de parcelles
- Répartition du parcellaire
- Projets d'aménagements

Main d'œuvre, calendrier de travail

- Nombre d'UTA familiales Salariés
- Partage de matériel, entraide, recours à une ETA
- Projets de l'agriculteur
- Exigences personnelles de l'agriculteur

Matériel, équipement et bâtiments

- Aménagements et investissements récents, projets

4/ Environnement socio-économique

- Débouchés des productions (courantes et atypiques) dans la région
- Recours à des organismes de conseils, services, sensibilité aux lettres d'information
- Evolutions récentes du contexte dans la région
- Réglementation spécifique, MAE...
- Appréciation du contexte par l'agriculteur

5/ Pressions biotiques de la région

- Principaux bioagresseurs
- Difficultés particulières rencontrées
- Fréquences et sévérité des pressions biotiques

Annexe II : Données techniques recueillies chez les agriculteurs ayant un SdC-LoDo

Interculture précédente	<p>Semis : Culture Date de semis Densité à l'ha Outil utilisé</p> <p>Application d'herbicides : Nom du produit Date d'application Outil utilisé % surface traitée Dose et unité</p> <p>Travail du sol : Date Outil</p>
Travail du sol	Profondeur de travail du sol (semis direct/TCS/labour à 15-20-25-30-35 cm) Date Outil
Semis	Date Outil Objectif de rendement (t/ha) Type de semences (certifiées/fermes, traitement standard/haut de gamme/aucun) Variété et sensibilité à la fusariose Densité de semis
Fertilisation	Date Fertilisant Outil Dose Enfoui ou non sous 24h Surface fertilisée
Application de pesticides	Nom du produit Dose Date Outil Traitement de surface/incorporé % surface traitée
Irrigation	Date Quantité (mm) Fréquence
Récolte	Date Devenir des résidus Récolte plante entière/grain, tubercule, racine/paille Outil Humidité récolte (facultatif sauf pour récolte nécessitant un séchage) Rendement (t/ha)
Informations générales	Main d'œuvre occasionnelle (h/ha/an) Nb d'heures requises en conduite intensive

Annexe III : Paramétrage du prix d'achat des semences, des unités fertilisantes et de vente des cultures

Prix déterminés à partir des indices des prix d'achats des moyens de production agricole (IPAMPA), sur la période du 01/2005 au 03/2013 :

Prix de vente des cultures (€/t):

Blé tendre	131,5
Avoine	126,0
Triticale	130,7
Orge	130,1
Sorgho	140,5
Maïs	146,1
Colza	323,5
Lin*	393,5
Tournesol	330,4
Soja	251,3
Betterave	29,0
Moutarde **	708,5
Pois protéagineux	164,1

*Prix culture indexé sur le prix du colza (=colza+70)

**Prix culture indexée sur le prix du colza de l'année précédente (=2,19*colza)

Prix d'achats des semences (traitements standards) (€/dose) :

Ble tendre hiver	0,81
Orge hiver	0,88
Tournesol	199,60
Maïs grain	86,37
Pois proteagineux hiver/printemps	0,83
Feverole hiver/printemps	0,97
Lupin printemps	81,12
Soja	58,92
Chanvre	2,83
Colza hiver	13,13
Lin Oleagineux de Printemps	1,92
Luzerne Foin	6,56

Coût de l'unité fertilisante en €/U :

N : 0,99

P : 1,29

K : 1,2

Coût de l'unité fertilisante en €/U (dires d'experts) :

S : 0,5

Annexe IV : Modèle de caractérisation du risque de lessivage moyen par SdCi

Variabes d'entrées : Date (pas journalier), Précipitations (P), Evapotranspiration Penman-Monteith (ETP),

Variable de sortie : Cumul de lessivage annuel et mensuel

Succession des transferts dans le système eau-sol-air :

- 1 – Précipitation (j)
- 2 – Evapotranspiration (j)
- 3 – Remplissage/vidage de la RH (j+1)
- 4 – Lessivage (j+1)

Hypothèses :

- Période de lessivage : du 01/08 au 31/03
- RH = 0 mm au 01/08
- $RH_{max} = 2/3 * RU$
- Lessivage si $[RH(j-1) + P(j) - ETP(j)] > RH_{max}$

Une station météorologique a été attribuée à chaque système selon un critère de proximité.

Station météorologique (département)	Début de la série climatique	Arrêt de la série climatique
Champfongueil (71)	2004	2012
Bretenières (21)	1990	2012
Gif sur Yvette (91)	2000	2012
Colmar (68)	2002	2012

Sur l'ensemble de la série climatique des stations ont été déterminés les quantités lessivées annuelles médianes. Les quantités de lessivage mensuelles des 2 ou 3 années climatiques les plus proches de cette médiane sont confrontées à la moyenne du lessivage sur la durée de la série climatique. L'année caractérisant au mieux la période de lessivage moyenne de la série, en termes de quantités et de période de risques) est retenue comme caractéristique.

Dispositif	Station associée	RH (mm)	Campagne climatique caractéristique
Epoisses	Bretenières	120	1996
Saint Martin Belle Roche	Champfongueil	150	2008
Demigny	Champfongueil	110	2008
Lézennes	Gif sur Yvette	60	2010
Courgenay	Gif sur Yvette	90	2010
La Brosse	Gif sur Yvette	45	2010
Rouffach	Colmar	110	2010

Annexe V : Exemple d'une des synthèses d'évaluation réalisée

Evaluation de la durabilité du système de culture innovant de Courgenay (89)

Dans le cadre du Réseau Mixte Technologique Systèmes de Culture Innovants créé en 2007, des systèmes de culture innovants sont évalués sur leur capacité à répondre à des enjeux émergents d'envergure locale et nationale. Ces évaluations ont pour objectifs de déterminer les performances des leviers agronomiques mis en œuvre afin de pouvoir produire et communiquer des connaissances permettant de mieux appréhender les techniques de la Protection Intégrée des cultures. Les évaluations sont réalisées à l'échelle du système de culture (combinaison d'une succession culturale et de techniques culturales), afin d'apprécier les effets cumulatifs des cultures et des techniques mises en œuvre.

Situation de production :

Situés dans la petite région agricole Champagne Crayeuse, les systèmes sont conduits sur des parcelles en sols superficiels limono-argileux, non drainés. Les pressions fongiques et exercées par les insectes sont aisément maîtrisées tandis que la gestion des adventices est plus délicate. Les dégâts d'oiseaux sur le Tournesol sont limitantes pour sa culture et risque d'anthracnose sur Pois. Une filière de production de chanvre existante mais peu rentable par rapport aux cultures rencontrées couramment.

Systèmes de culture évalués

Le dispositif expérimental dispose de 4 parcelles dont 3 sont conduites selon une succession Colza – Blé – Orge Printemps – Tournesol – Blé tendre – Pois hiver. Les objectifs définis pour ce système de culture sont de 1) **réduire la pression des adventices sur le système**, 2) **diminuer l'utilisation de produits phytosanitaires**, et 3) **maintenir un revenu acceptable** (1200 €/ha de marge brute pour le système).

Le système de culture de référence pris est conduit entre 2005 et 2012, sur 3 parcelles avec la succession Colza – Blé – Orge hiver – Colza – Blé – Tournesol – Blé – Orge hiver. Il a été identifié comme représentatif de la succession et des techniques culturales majoritairement pratiquées dans le secteur.

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Chemin Saint Maurice	Colza	Blé tendre	Orge printemps	Tournesol	Blé tendre	Pois hiver	Colza
La Roture	Orge printemps	Tournesol	Blé tendre	Pois hiver	Colza	Blé tendre	Orge printemps
La Réserve	Blé tendre	Orge printemps	Tournesol	Blé tendre	Pois hiver	Colza	Blé tendre

Tableau 1 : Succession culturale des parcelles du système innovant

	Innovant	Référence
Stratégie à l'échelle de la succession	Introductions cultures printemps Introduction d'une légumineuse	Introduction Tournesol
Interculture	Avant Tournesol : Moutarde (broyée) Avant Orge printemps : Vesce (labourée)	Avant Tournesol : Moutarde (labourée) ou Avoine rude (broyées)
Semis	Semis combiné Herse Rotative Semis Blé retardé de 10j Blé : variétés peu sensibles maladies et densité semis réduite Mélange variétal colza (10 % var. précoces)	Semis combiné Vibroculteur Variété céréales non choisies selon critère de sensibilité aux maladies
Travail du sol	Labour avant Pois, Orge P et Tournesol 1 ou 2 déchaumages vibro/cultivateur Roulages avant semis Pois, éventuellement Orge P et To	Labour avant Tournesol, Blé de Tournesol et Orge hiver De 1 à 4 déchaumages vibro/cultivateur
Fertilisation N P K	Fertilisation N pilotée par méthode des bilans Obj. rdt Blé : 80 qt/ha	Bore sur Colza et Tournesol Apports organiques occasionnels avant Colza Fertilisation N pilotée par plan de fumure Obj. rdt Blé : 80 qt/ha
Gestion des adventices	Désherbage mécanique (herse lourde, herse étrille et binage) Faux semis	Faux semis
Gestion des maladies/ravageurs	Impasse : fongicide sur Tournesol, insecticide sur Orge P et régulateur	36
Devenir des résidus	Toutes pailles broyées et enfouies	Toutes pailles broyées et enfouies

Tableau 2 : Principales stratégies de gestion des systèmes innovant et de référence

Caractérisation des performances atteintes par les systèmes

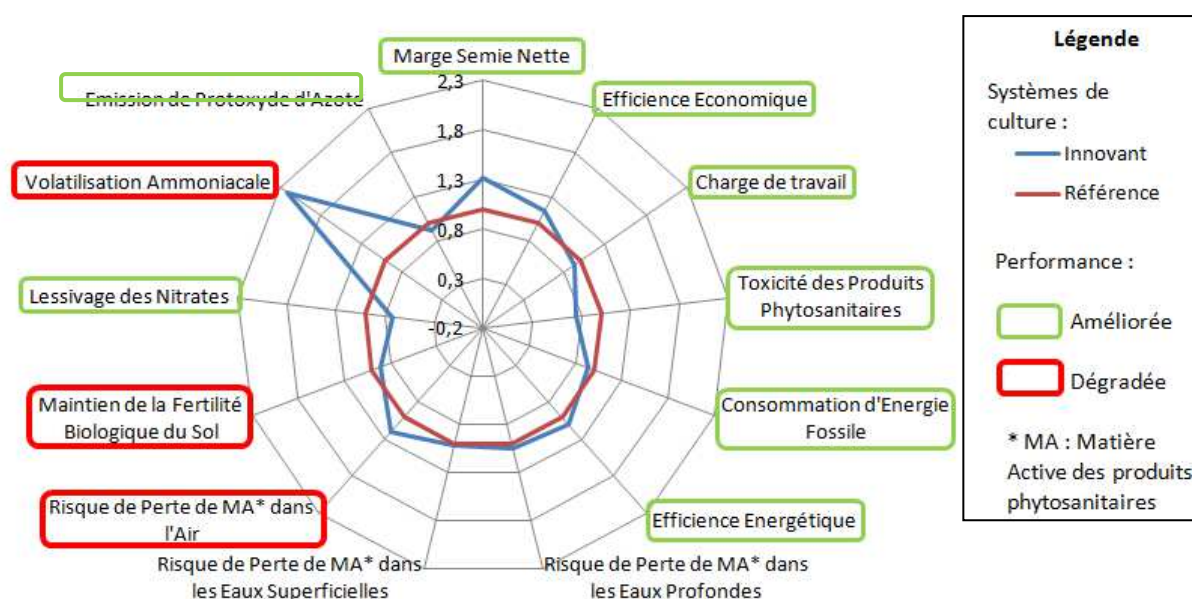


Figure 1 : Caractérisation des performances du système innovant par rapport à la référence (valeur = 1)

Performances environnementales :

- L'IFT total du système de culture innovant est réduit de 35 % par rapport à la référence, passant de 4,1 à 3,7. La réduction la plus importante est effectuée contre les adventices, avec un IFT abaissé de 50 % (0,85 en innovant au lieu de 1,8 en référence). Le système innovant bénéficie en effet de la conduite de 2 cultures de printemps contre 1 pour la référence, cultures moins de traitements d'herbicides sont nécessaires grâce à la couverture et au travail préalable au semis. La pratique du désherbage mécanique en innovant (binage, herse étrille et hersage lourd) permet aussi de limiter les apports d'herbicides. Toutefois, les risques de pertes de matières actives dans l'écosystème ne suivent pas la diminution de l'IFT et restent au moins semblables à la référence. En effet, les produits phytosanitaires utilisés dans le système innovant restent ceux pour lesquels les matières actives ont le plus d'impacts sur la pollution de l'air et de l'eau de par leur éco-toxicité. Il s'agit particulièrement des herbicides encore utilisés (ex. de produits commerciaux : Allié, Archipel, Illoxan CE, Prowl 400...).

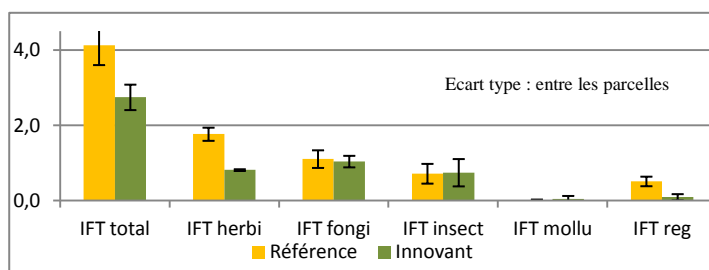


Figure 2 : Indices de fréquence de traitements (IFT) selon les cibles visées

- Le maintien de la fertilité biologique du sol estimé pour le système innovant est légèrement inférieur à celui du système innovant, ce qui s'explique par le fait que chaque parcelle de référence a bénéficié d'un épandage de matière organique entre 2006 et 2012, améliorant le statut humique du sol. La différence reste toutefois minime étant donné que les deux systèmes pratiquent des labours fréquemment et ont des rendements similaires (cf. Figure 5).

- La consommation d'énergie du système innovant est légèrement diminuée, de 7 % par rapport à la référence, en particulier grâce aux postes produits phytosanitaires, cohérent avec la baisse constatée de l'IFT, et fertilisation. En effet, les quantités d'azote et de phosphore apportées ont été diminuées de 30 % chacune, passant par exemple de 157 uN/ha/an en moyenne pour la référence à 111 uN/ha/an pour l'innovant (en prenant en compte la culture du Pois d'hiver n'ayant pas besoin de fertilisation azotée), améliorant le bilan annuel moyen d'azote mais dégradant ceux du phosphore et du potassium. De plus, le système innovant ayant moins recours à un travail profond du sol mais effectuant du désherbage mécanique, sa consommation d'énergie liée au poste mécanique est à la hauteur de celle de la référence.

Les produits énergétiques des deux systèmes n'étant pas significativement différents du fait de rendements moyens semblables (cf. Figure 5), la plus faible consommation énergétique du système innovant lui accorde une meilleure efficacité énergétique, supérieure de 10 % à la référence.

- En système innovant, les pertes de nitrate par lessivage sont réduites de 27 % par rapport à la référence, passant de 47 à 35 kg d'N/ha/an perdu. Cette écart se justifie par la mise en place de couverts hivernaux avant les cultures de printemps, offrant

une couverture du sol dès fin août et par la conduite du Pois d'hiver ne nécessitant pas de fertilisation azotée, ce qui limite les risques de pertes sous forme de nitrate. La limitation de la fertilisation réduit aussi le risque de lessivage des nitrates durant la période hivernale. Toutefois, on constate une augmentation de 120 % de la quantité d'azote perdue par volatilisation sous forme ammoniacale par le système innovant par rapport à la référence. Ceci réside dans le fait que les apports azotés de l'innovant font préférentiellement sous forme de solution liquide alors que la référence privilégie des apports d'ammonitrates, ayant un coefficient de volatilisation moindre. Le système innovant ayant des apports azotés plus faibles que ceux de la référence, se rapprochant d'un bilan azoté à l'équilibre, et limitant donc la surfertilisation, les émissions de protoxyde d'azote se retrouvent être inférieure de 10 % à la référence. Le travail du sol n'a ici pas d'influence car les labours reviennent assez fréquemment pour ne pas limiter les émissions.

Performances sociales :

On ne constate qu'une diminution de 10 % de la charge de travail du système innovant (3h40min /ha/an) par rapport à la référence (4h20min /ha/an) étant donné la charge de travail nécessaire au désherbage mécanique qui se substitue au désherbage chimique, et cela malgré un nombre de passages de travail du sol avant semis plus important pour la référence (au moins 1 travail superficiel supplémentaire). De plus, la diminution du nombre de doses de produits phytosanitaires présentant un risque pour la santé de l'opérateur (-25 % par rapport à la référence) n'est pas équivalente à la diminution de l'IFT total, ce qui signifie que les produits appliqués restent les plus à risque en termes de toxicité humaine.

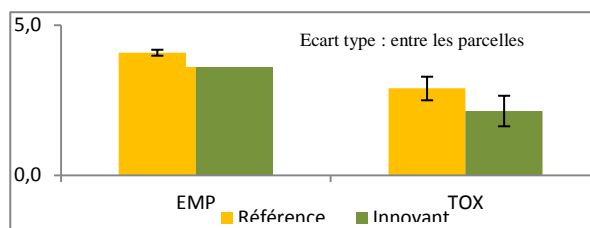


Figure 3 : Charge de travail (h/ha/an) et toxicité des produits phytosanitaires (nombre de doses toxiques appliquées/ha/an)

Performances économiques :

La marge semie nette du système innovant est supérieure de 30 % à la référence, passant de 315 à 420 €/ha/an en moyenne. Cette augmentation s'explique par des produits bruts semblables entre les deux systèmes du fait de rendements non significativement différents et une diminution des charges totales de l'innovant de 16 % par rapport à la référence due à une réduction de 20 % des charges opérationnelles liées au poste fertilisation. En effet, les quantités d'azote et de phosphore apportées sont plus faibles pour le système innovant, car étant toutes deux inférieures de 30 % à la référence. Les charges mécanisation ne sont pas significativement différentes entre les deux systèmes. L'efficacité économique du système innovant est ainsi améliorée de 14 % par rapport à la référence, passant en moyenne de 110 à 125 €/ha/an de recette (aides non comptabilisées) pour 100 €/ha/an investit dans la conduite du système.

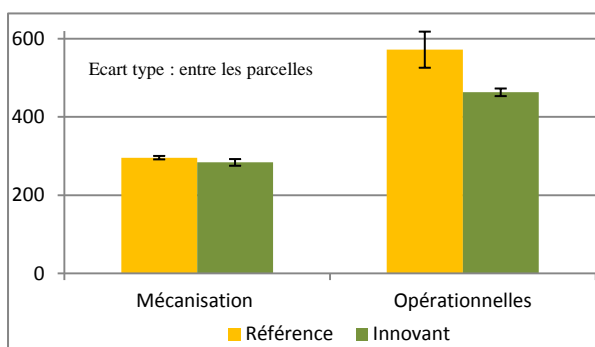


Figure 4 : Répartition des charges totales (€/ha/an)

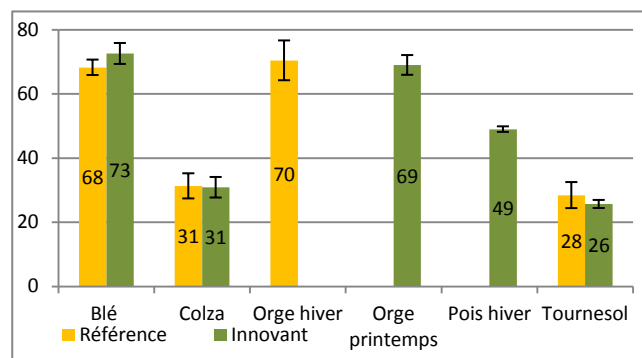


Figure 4 : Rendements moyens observés (qt/ha) des systèmes innovants et de référence, d'après les campagnes considérées

Prix d'achat des semences

Blé tendre : 0.8 €/kg
 Colza : 13.1 €/kg
 Orge hiver : 0.9 €/kg
 Maïs grain : 86.4 €/500 000 gr
 Soja : 58.9 €/150 000 gr
 Tournesol : 199.6 €/150 000 gr

Prix de référence utilisés (données INSEE de 2005 à 2012)

Valeurs des unités fertilisantes (€/U)

N : 0.99 P : 1.29
 K : 1.2 S : 0.5

Prix de vente des cultures (€/qt)

Blé tendre : 131.5
 Colza : 323.5
 Orge hiver : 130
 Maïs grain : 146
 Soja : 251
 Tournesol : 330

Annexe VI : Résultats du test de corrélation de Spearman pour les critères retenus et test de significativité associé

Coefficients de corrélation de Spearman :

	CEN.tot	EEN	EFF	EMP	IFT.Fongi	IFT.herbi	IFT.Insect	IFT.Mollu	IFT.total	MPA	MPEP	MPES	MSN	MSO.Indigo	Qt.MN20	Qt.MFNH3	Qt.MFNO3	TOX
CEN.tot	1.00	-0.93	-0.14	0.29	0.27	0.03	0.40	0.10	0.23	-0.09	-0.35	-0.18	-0.14	-0.25	0.46	0.73	-0.49	0.70
EEN		1.00	0.15	-0.15	-0.26	-0.07	-0.21	0.12	-0.20	0.02	0.40	0.24	0.26	0.29	-0.53	-0.71	0.52	-0.63
EFF			1.00	-0.15	-0.56	-0.12	-0.12	0.25	0.39	0.12	-0.60	-0.53	0.93	-0.14	0.14	-0.19	-0.56	0.16
EMP				1.00	-0.35	-0.71	0.16	0.02	-0.47	0.41	0.25	0.29	-0.02	-0.32	0.08	0.19	0.04	-0.19
IFT.Fongi					1.00	0.37	-0.03	0.14	0.76	-0.31	-0.75	-0.73	0.53	-0.27	0.09	-0.02	-0.48	0.69
IFT.herbi						1.00	0.12	0.20	0.62	-0.71	-0.27	-0.29	-0.05	0.30	-0.02	-0.14	0.05	0.51
IFT.Insect							1.00	0.81	0.42	-0.33	0.18	0.27	-0.05	-0.26	-0.12	0.43	0.07	0.38
IFT.Mollu								1.00	0.48	-0.41	0.08	0.17	0.34	-0.18	-0.26	-0.03	0.10	0.24
IFT.total									1.00	-0.68	-0.46	-0.45	0.34	-0.26	-0.04	0.01	-0.19	0.76
MPA										1.00	-0.05	-0.03	0.11	0.10	0.32	0.24	-0.27	-0.55
MPEP											1.00	0.96	-0.55	0.16	-0.38	-0.16	0.64	-0.53
MPES												1.00	-0.51	0.14	-0.23	0.02	0.44	-0.42
MSN													1.00	0.02	-0.01	-0.30	-0.45	0.14
MSO.Indigo														1.00	-0.08	-0.20	0.01	-0.22
Qt.MN20															1.00	0.55	-0.52	0.19
Qt.MFNH3																1.00	-0.54	0.43
Qt.MFNO3																	1.00	-0.52
TOX																		1.00

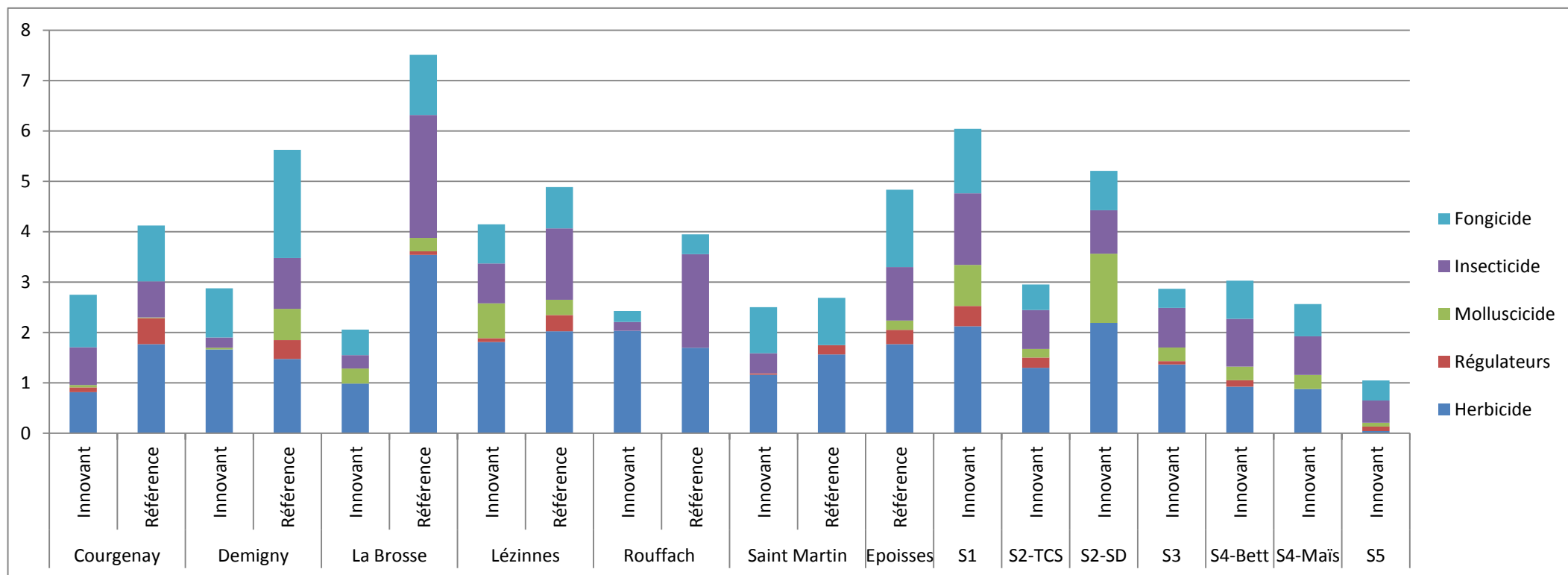
Corrélation significative : Positive

 Négative

P-values (significativité à 5%) associées au test de corrélation de Spearman :

P	CEN.tot	EEN	EFF	EMP	IFT.Fongi	IFT.herbi	IFT.Insect	IFT.Mollu	IFT.total	MPA	MPEP	MPES	MSN	MSO.Indigo	Qt.MN20	Qt.MFNH3	Qt.MFNO3	TOX
CEN.tot		0.0000	0.6545	0.3440	0.3737	0.9149	0.1809	0.7543	0.4481	0.7752	0.2466	0.5656	0.6415	0.4048	0.1173	0.0050	0.0858	0.0073
EEN			0.6158	0.6158	0.3839	0.8305	0.4936	0.7003	0.5171	0.9574	0.1809	0.4262	0.3943	0.3344	0.0607	0.0067	0.0707	0.0205
EFF				0.6286	0.0463	0.8305	0.7074	0.4094	0.1876	0.7074	0.0306	0.0640	0.0000	0.6545	0.6415	0.5291	0.0463	0.6031
EMP					0.2466	0.0061	0.5905	0.9502	0.1076	0.1618	0.4048	0.3344	0.9574	0.2886	0.7890	0.5291	0.8866	0.5411
IFT.Fongi						0.2159	0.9290	0.6541	0.0024	0.3064	0.0033	0.0045	0.0607	0.3637	0.7752	0.9432	0.0985	0.0095
IFT.herbi							0.6940	0.5047	0.0235	0.0067	0.3737	0.3440	0.8585	0.3249	0.9574	0.6415	0.8585	0.0780
IFT.Insect								0.0008	0.1497	0.2713	0.5656	0.3737	0.8585	0.3943	0.7074	0.1440	0.8305	0.1944
IFT.Mollu									0.0936	0.1642	0.7956	0.5774	0.2500	0.5650	0.3936	0.9218	0.7543	0.4201
IFT.total										0.0103	0.1124	0.1223	0.2547	0.3839	0.8866	0.9858	0.5291	0.0027
MPA											0.8725	0.9149	0.7208	0.7343	0.2799	0.4262	0.3637	0.0490
MPEP												0.0000	0.0518	0.5905	0.2014	0.6031	0.0178	0.0607
MPES													0.0743	0.6545	0.4481	0.9574	0.1329	0.1557
MSN														0.9432	0.9716	0.3249	0.1223	0.6545
MSO.Indigo															0.7890	0.5053	0.9716	0.4706
Qt.MN20																0.0490	0.0707	0.5291
Qt.MFNH3																	0.0546	0.1383
Qt.MFNO3																		0.1383
TOX																		

Annexe VII : Détails des Indices de Fréquence de Traitements des couples SdCi/SdC-LoDo



Annexe VIII : Tableau des valeurs à l'échelle du système des indicateurs utilisés, pour les SdCi (ligne bleue) et les SdC-LoDo (ligne blanche)

Dispositif	Système	Effizienz économique	Marge semi-nette (€/ha)	Temps de travail(h/ha)							Maîtrise des parties de matières actives dans l'eau profonde	Maîtrise des parties de matières actives dans l'eau profonde	Maîtrise des parties de matières actives dans l'air	Risque toxicologique pour l'applicateur	Effizienz énergétique	Consommation énergétique totale (GJ/ha)	Maintien du statut organique du sol	Quantité NO3 lessivée (kg d'NO3/ha)	Quantité NH3 lessivée (kg d'NH3/ha)	Quantité N2O lessivée (kg d'N2O/ha)
				IFT Total	IFT herbi	IFT fongé	IFT insect	IFT mollu	IFT régu											
Courgenay	Référence	110,0	321,7	4,1	4,1	1,8	1,1	0,7	0,0	0,5	7,5	9,1	5,9	2,9	8,0	11,6	7,3	47,2	4,1	1,9
Courgenay	Innovant	124,6	420,4	3,8	2,7	0,8	1,0	0,7	0,0	0,1	7,9	9,3	7,2	2,1	8,8	10,8	5,9	34,3	9,1	1,8
Demigny	Référence	125,4	359,2	4,2	5,6	1,5	2,1	1,0	0,6	0,4	7,8	7,6	8,4	2,9	10,4	13,2	4,4	47,2	3,4	2,4
Demigny	Innovant	117,2	253,2	3,5	2,9	1,7	1,0	0,2	0,0	0,0	8,2	8,2	9,1	2,3	9,3	13,1	9,5	26,4	6,4	2,6
Epoisses	Référence	112,7	148,7	4,5	4,8	1,8	1,5	1,1	0,2	0,3	7,6	7,6	8,7	3,3	7,3	14,5	6,5	14,0	4,7	2,2
S1	Innovant	121,2	243,5	4,7	6,0	2,1	1,3	1,4	0,8	0,4	7,4	7,4	8,6	3,6	8,1	13,8	7,1	14,2	6,9	2,0
S2-TCS	Innovant	114,8	148,3	3,3	3,0	1,3	0,5	0,8	0,2	0,2	8,8	8,8	9,1	2,0	8,6	11,1	9,9	13,7	8,6	1,9
S2-SD	Innovant	117,4	164,5	3,1	5,2	2,2	0,8	0,9	1,4	0,0	9,0	9,0	8,3	2,3	12,3	8,7	9,8	25,6	1,4	1,8
S3	Innovant	104,9	43,3	4,1	2,9	1,4	0,4	0,8	0,3	0,1	8,9	8,9	8,9	1,5	8,4	11,0	5,8	28,9	4,8	1,9
S4-Bett	Innovant	99,3	63,5	5,2	3,0	0,9	0,8	0,9	0,3	0,1	9,0	9,0	8,5	3,0	7,6	15,0	6,5	16,2	7,3	1,8
S4-Maïs	Innovant	113,1	148,9	4,9	2,6	0,9	0,6	0,8	0,3	0,0	8,9	8,9	9,1	1,5	8,3	12,7	7,3	26,1	3,3	1,9
S5	Innovant	112,6	146,0	5,4	1,0	0,0	0,4	0,4	0,1	0,1	9,6	9,6	9,6	1,1	11,2	10,8	6,7	19,4	5,0	2,1
La Brosse	Référence	82,6	82,0	4,5	7,5	3,5	1,2	2,4	0,3	0,1	7,8	9,1	5,9	3,4	5,3	14,4	7,2	36,5	10,7	2,4
La Brosse	Innovant	98,9	242,5	4,9	2,1	1,0	0,5	0,3	0,3	0,0	8,7	9,5	8,2	1,1	12,7	7,7	8,4	40,2	1,9	1,5
Lézennes	Référence	83,2	94,6	5,1	4,9	2,0	0,8	1,4	0,3	0,3	7,2	9,2	6,1	3,0	5,2	14,9	10,0	60,4	11,0	2,1
Lézennes	Innovant	100,8	254,2	3,9	4,1	1,8	0,8	0,8	0,7	0,1	7,5	9,3	6,0	2,6	6,9	11,5	10,0	55,9	8,2	1,8
Rouffach	Référence	113,3	429,9	4,3	3,9	1,7	0,4	1,9	0,0	0,0	7,7	9,2	8,0	2,9	4,8	28,1	8,4	14,3	12,3	2,7
Rouffach	Innovant	104,3	298,1	3,2	2,4	2,0	0,2	0,2	0,0	0,0	8,6	9,3	8,3	1,7	6,8	20,6	9,6	37,5	5,7	2,3
Saint Martin	Référence	138,1	368,5	5,2	2,7	1,6	0,9	0,0	0,0	0,2	8,8	8,8	8,8	1,8	11,8	15,5	8,0	24,2	7,2	1,6
Saint Martin	Innovant	171,1	577,4	4,4	2,5	1,2	0,9	0,4	0,0	0,0	8,3	8,3	9,1	1,5	12,5	13,6	7,6	14,8	5,8	1,7



Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage
Spécialisation : Sciences et Productions Végétales
Option : Ingénierie des Agrosystèmes
Enseignant référent : Matthieu CAROF

Auteur : Matthieu HIRSCHY

Date de naissance : 15/05/1990

Nb pages : 78

Annexes : VIII

Année de soutenance : 2013

Organisme d'accueil : INRA UE 115 Domaine d'Epoisses

Adresse : Domaine Expérimental d'Epoisses
21110 Bretenière

Maître de stage : Violaine DEYTIEUX

**Etude des composantes de la durabilité de systèmes de culture du Réseau Mixte Technologique
« Systèmes de Culture Innovants »**

Analyse des performances – Etude des relations entre critères d'évaluation

Study of the components of sustainability in innovative cropping systems tested in the « innovative cropping systems » Joint Network of Technology

Analysis of performances – Study of the links between evaluation criteria

Résumé :

Depuis plusieurs décennies, l'Agriculture est confrontée à de nouvelles problématiques dont les enjeux sont multiples, qu'ils soient économiques, sociaux et environnementaux et sont parfois difficiles à concilier.

Le réseau expérimental du Réseau Mixte Technologique « Systèmes de Culture Innovants » fédère des expérimentations de systèmes de culture innovants. Il s'agit de tester au champ leur faisabilité technique et agronomique, d'évaluer leurs performances selon leurs objectifs et différentes composantes de la durabilité, ainsi que de produire des ressources utiles à l'action.

L'évaluation multicritère de 11 de ces systèmes testés dans des situations de production différentes vise à identifier les déterminants de leurs performances et à étudier les relations qui peuvent exister entre critères d'évaluation. Des systèmes représentatifs des pratiques culturelles locales dominantes sont déterminés afin de servir de référence.

Ces évaluations montrent l'importance des stratégies de gestion : la diversification des cultures, associée à la pratique du désherbage mécanique, par exemple sont particulièrement déterminants dans l'amélioration des critères environnementaux mais impliquent des performances économiques et sociales contrastées. Peu de relations entre critères d'évaluation ont été identifiées.

Ces premiers résultats sont à compléter par l'analyse transversale de l'ensemble des systèmes de culture innovants du réseau.

Abstract :

Since several decades, Agriculture is facing new issues of whom the economic, social and environmental stakes may be to difficult to reconcile.

The « innovative cropping systems » Joint Network of Technology gathers cropping systems experimented in field, in order to test their agronomical and technical feasibility, assess their performances according to their objectives and several components of sustainability.

The multicriteria evaluation of 11 of those innovative cropping systems, tested in different contexts of production is aiming for identifying the determinants of their performances and to study the links which could exist between the criteria of evaluation. Cropping systems identified as typical of the local agricultural practices are used as reference.

Those evaluations show the importance of the strategies of management : mechanical wedding combined with crops diversification, for example, are particularly important in the improvement of environmental criteria, but may be more prejudicial on social and economical performances. Few links between criteria have been identified.

Those first results have to be completed by a wider cross-sectional analysis of the innovative cropping systems of the network.

Mots-clés : Système de culture innovant, Evaluation multicritère, Performances, Durabilité