

Performances, solutions techniques et conception de systèmes de culture pour accompagner le développement des techniques culturales simplifiées

Landé N.¹, Sauzet G.¹, Le Ny F.¹, Leclech N.², Denis M.³, Labreuche J.⁴, Aubertot J.N.⁵, Descorps C.⁵, Mestries E.¹, Dumans P.¹, Petit M.S.⁶, Flénet F.¹

¹ CETIOM, avenue L. Brétignières, 78850 Thiverval-Grignon

² Chambre régionale d'agriculture de Lorraine, 9 rue de la Vologne, 54520 Laxou

³ Vivescia, 12 rue Bégand, BP 601, 10088 Troyes Cedex

⁴ Arvalis-Institut du végétal, Station expérimentale, 91720 Boigneville

⁵ INRA – Toulouse, UMR 1248 AGIR, BP 52627, 31326 Castanet Tolosan Cedex

⁶ RMT « systèmes de culture innovants » – Chambre régionale d'agriculture de Bourgogne, 3 rue du Golf, 21800 Quetigny

Correspondance : lande@cetiom.fr

Résumé

La part du non labour en grandes cultures s'est fortement développée pendant la dernière décennie en France. Si certains agriculteurs y cherchent des avantages économiques de réduction de charges et de temps de travail, d'autres citent des atouts environnementaux comme la préservation physique des sols et leur activité biologique. Cependant, l'abandon du labour pour les techniques culturales simplifiées (TCS) voire le semis direct peut présenter des risques s'il n'y a pas une adaptation intégrée de l'itinéraire technique des cultures et des systèmes de culture.

Ainsi, ce projet a cherché d'une part, à évaluer les systèmes de culture existants en travail réduit du sol chez les agriculteurs et à identifier les solutions agronomiques mises en œuvre pour pallier (i) l'absence de travail du sol et (ii) les effets collatéraux afin de pérenniser ces techniques.

D'autre part, ce projet a testé en expérimentations (a) des solutions techniques d'adoption des TCS pour dégager des performances et des précautions à l'échelle de la culture et (b) des prototypes de systèmes de culture en TCS pour évaluer à long terme leurs performances et leur durabilité.

Partenaires du projet : CETIOM, la coopérative Vivescia, les Chambres d'agriculture de Lorraine, Arvalis-Institut du Végétal, l'INRA et le RMT "Systèmes de culture innovants"

Mots-clés : techniques culturales simplifiées (TCS), semis direct, système de culture, multicritère.

Abstract: Reduced tillage: survey, experimentations, assessment, solutions and new cropping systems in order to give keys to develop reduced tillage farming

Reduced tillage in cash crops has grown during the past ten years in France. Some farmers are looking for input costs and labour time reduction, others are looking for environmental benefits such as soil conservation. However dropping out tillage may involve some risks. It seems necessary to work at two scales: crop management and crop rotation in order to succeed in reduced tillage conversion.

This project assessed on-farm reduced tillage cropping systems and identified technical solutions applied by farmers. On another hand, this project carried out on-field experimentations to evaluate reduced tillage performances, sustainability and scope of validity at crop scale and rotation scale.

Keywords: reduced tillage, direct sowing, cropping systems, sustainability assessment

Introduction

Le non-labour en grandes cultures se développe en France. Le pourcentage des surfaces concernées est passé, toutes cultures confondues, de 21 % en 2001 à 34 % en 2006 (Chapelle-Barry, 2008). Chez les principales grandes cultures d'hiver, le non labour est pratiqué sur une surface équivalente à celle qui est labourée (cf. Figure 1).

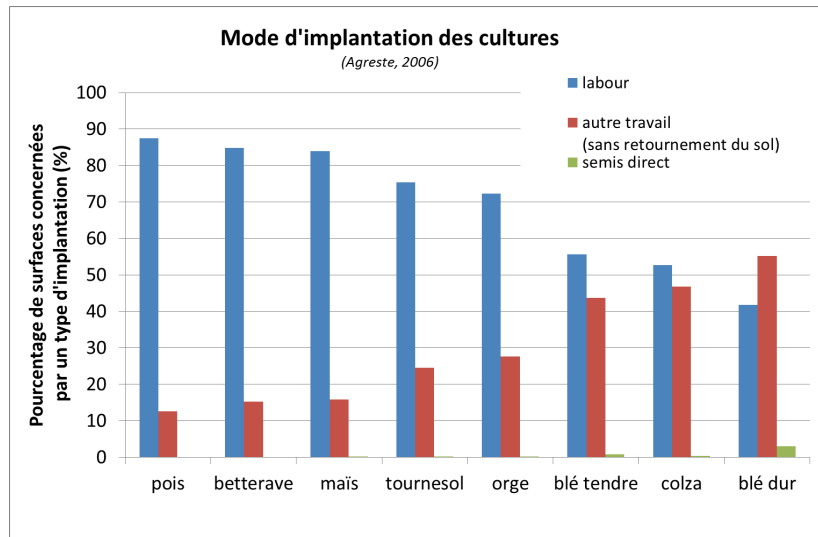


Figure 1 : Répartition des modes d'implantation des principales grandes cultures en France (Agreste, 2006)

Mais il existe encore une grande disparité dans la mise en œuvre de cette technique.

Variabilité des fréquences et des techniques. Cette technique est rarement exclusive. Seulement 11% des surfaces ont en effet été cultivées sans labour en continu durant ces 5 dernières années. Sous la dénomination du non-labour existent plusieurs techniques : techniques culturales simplifiées, semis direct, travail du sol localisé (strip-till, décompactage...) (Labreuche *et al*, 2007).

Variabilité dans les cultures concernées. L'absence de labour est plus fréquente en colza et blé tendre (respectivement 47 et 44 % en 2006) qu'en tournesol, maïs grain, betterave industrielle ou pois protéagineux (25, 16, 15 et 13%) (Agreste, 2006). Un mauvais enracinement est en effet plus à craindre en cultures d'été.

Variabilité parmi les exploitations françaises. Les exploitations agricoles de grandes tailles ont plus recours au non-labour que les petites structures, pour des raisons de manque de main d'œuvre par unité de surface.

Variabilité dans les motivations des agriculteurs. Les résultats d'enquêtes montrent en effet que la principale motivation des agriculteurs pour abandonner le labour est le gain de temps (Labreuche *et al*, 2007). L'économie (charges de mécanisation et de carburant) et l'agronomie (les sols lourds sont peu adaptés au labour) arrivent en deuxième position dans les préoccupations des agriculteurs. La réduction de la battance et de l'érosion, ainsi que l'augmentation de l'activité biologique et du taux de matière organique sont citées en troisième (Labreuche *et al*, 2007).

La simplification du travail du sol peut présenter des risques s'il n'y a pas une adaptation intégrée de l'itinéraire technique des cultures et des systèmes de culture : problèmes d'enracinement, résidus de culture laissés à la surface du sol qui peuvent favoriser les ravageurs et la production d'inoculum primaire pour différentes maladies et, par ailleurs, conduire à une mauvaise levée et limiter l'efficacité des herbicides à action racinaire, difficultés de désherbage des graminées adventives et des vivaces, diminution de la fourniture en azote du sol. L'objectif du projet CASDAR 8008 REDUSOL (2009-2011) était de contribuer à la mutation des pratiques agricoles par la maîtrise de la réduction du travail du sol

pour améliorer la durabilité des systèmes de culture en France. Pour évaluer et pérenniser les techniques de travail réduit du sol (TCS : Techniques Culturales Simplifiées) dans les systèmes de culture, le projet s'est décomposé en plusieurs volets :

1- D'une part, **une étude de l'existant** a été menée pour évaluer les performances de systèmes de culture en travail réduit du sol ayant une antériorité dans cette technique. Cette étude a cherché à identifier les solutions agronomiques mises en œuvre par des agriculteurs pour pallier (i) l'absence de travail du sol et (ii) les effets collatéraux afin de pérenniser ces techniques culturales simplifiées. Cette étude a été réalisée, en 2010, en partenariat avec l'association BASE et le club « Techniques de conservation des sols de Vivescia » regroupant des agriculteurs mettant en œuvre ces TCS depuis au moins 5 ans.

2- D'autre part, **des expérimentations** ont été mises en place pour tester :

- des solutions techniques d'amélioration des performances des TCS (couverts végétaux, choix des espèces et des variétés, date et densité de semis...) pendant deux à trois ans pour dégager des résultats et des précautions pour les agriculteurs et leurs conseillers. Ces expérimentations ont été réalisées par les différents partenaires du projet : la coopérative Vivescia, la Chambre d'agriculture de Lorraine, Arvalis-Institut du Végétal, l'INRA et le CETIOM.

- des prototypes de systèmes de culture en TCS conçus et implantés pour évaluer à long terme la pertinence et la durabilité des TCS. Ce dernier point se poursuit dans un second projet (PHYTO-SOL (ECOPHYTO-EXPE)) piloté par le CETIOM jusqu'en 2016.

1. Techniques culturales simplifiées chez les agriculteurs : définition, performances, limites et solutions identifiées

1.1 Définition des techniques culturales simplifiées (TCS)

Les itinéraires techniques sans labour recouvrent une grande diversité de pratiques de travail du sol ayant comme seul point commun l'absence de retournement du sol associé au passage de la charrue. Dans cet article, nous avons fait le choix de classer les techniques culturales sans labour (TCSL) selon l'opération la plus profonde qu'elles font intervenir. On distingue ainsi :

- le travail superficiel avec travail profond sans retournement : l'opération de travail profond consiste généralement en un décompactage ou plus rarement en une opération de pseudo-labour réalisée avec un chisel travaillant entre 20 et 30 cm.

- le travail superficiel : il ne fait intervenir que des opérations réalisées à moins de 15 cm de profondeur destinées au déchaumage, aux faux semis ou à la préparation du lit de semences.

- le semis direct : l'implantation des cultures se fait sans travail du sol préalable. Les semences sont positionnées sous terre par des semoirs spéciaux à disques ou à dents qui travaillent le sol uniquement sur la ligne de semis et à une faible profondeur (2 à 10 cm). Plus rarement, le semis direct est réalisé à la volée.

Certaines techniques souvent combinées au semis permettent un travail du sol par bandes de 10 à 15 cm de large (strip-till), et à une profondeur variable (Le Ny, 2010).

1.2 Performances, limites et solutions au travers d'une enquête d'agriculteurs expérimentés en TCS

L'acquisition de références sur le non-labour nécessite d'explorer une large gamme de stratégies et d'options agronomiques dans les systèmes de culture construits autour de la réduction du travail du sol, dans le but de vérifier la pertinence des réponses que peuvent apporter ces TCS. Une étude a été

menée pour vérifier un certain nombre d'hypothèses sur l'effet du travail du sol et sa réduction, et de préciser les systèmes dans lesquels les TCS sont mises en œuvre. Il ne s'agissait pas de comparer le travail réduit au labour, mais d'évaluer, dans leur diversité, différentes techniques regroupées en trois classes (décrites en 1.1) et autant que possible d'identifier ce qui détermine leurs performances. L'évaluation a permis de tirer des conclusions sur les performances des systèmes selon les pratiques de travail du sol qu'ils font intervenir. L'objectif était également de mettre en évidence certaines difficultés rencontrées dans les systèmes étudiés et d'identifier des stratégies innovantes afin de proposer d'éventuelles solutions aux problèmes soulevés. Cela a orienté les travaux d'expérimentation menés dans le projet dans le but de confirmer la pertinence des innovations techniques identifiées (Le Ny, 2010).

1.2.1 – Matériel et méthodes

Une enquête a été réalisée en 2010 auprès de 19 exploitants agricoles, sur 32 systèmes de cultures, soit environ 160 parcelles (rotations minimales de 5 ans) (Figure 2) :

- pour évaluer les performances de ces techniques en travail réduit du sol sur les composantes économiques, environnementales et sociales de la durabilité,
- pour identifier les solutions agronomiques complémentaires conçues par les agriculteurs pratiquant ces techniques.

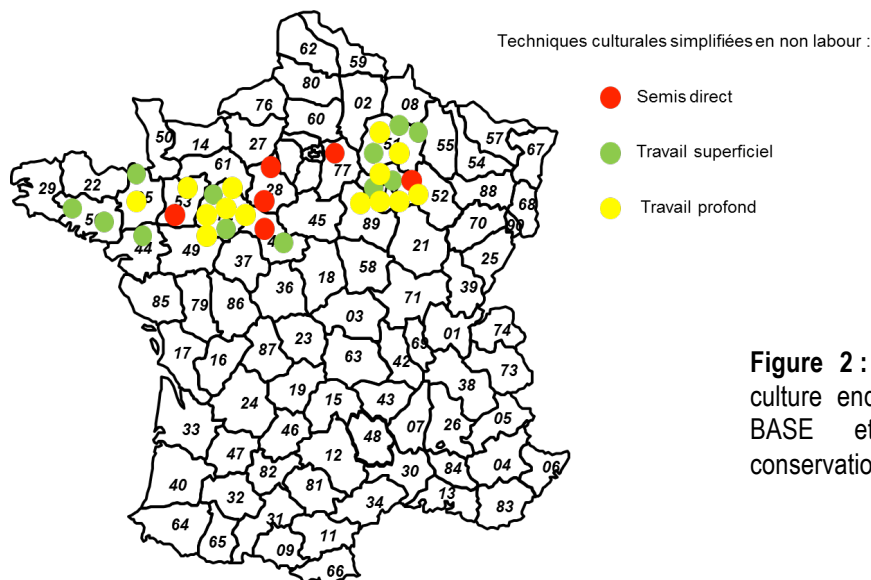


Figure 2 : Répartition des systèmes de culture enquêtés (réseaux d'agriculteurs : BASE et Club « Techniques de conservation des sols de Vivescia »)

Echantillonnage

Le public d'agriculteurs échantillonnés pour l'enquête a été choisi au sein de deux réseaux d'échange sur les techniques sans labour : BASE (Bretagne Agriculture Sol et Environnement) et le Club « Techniques de conservation des sols de Vivescia ».

Les deux réseaux, en particulier BASE, envisagent la réduction du travail du sol dans le cadre de l'agriculture de conservation qui, si elle regroupe des formes très diverses d'agriculture, implique les principes de base suivants formalisés par la FAO : perturbation minimale et couverture maximale du sol, rotations de cultures et de couverts adaptées.

L'objectif était de constituer un échantillon qui soit le plus diversifié possible pour couvrir une large gamme de techniques, dans des contextes pédoclimatiques et de systèmes d'exploitation variés. Par sa localisation géographique, BASE rassemble une grande proportion d'exploitations de polyculture-élevage, tandis que le Club « Techniques de conservation des sols de VIVESCIA » regroupe pour l'essentiel des céréaliers (Champagne-Ardenne).

Un critère essentiel pour appartenir à l'échantillon était de pouvoir justifier d'une ancienneté minimum de 5 ans en non-labour (non travail du sol dans le cas du semis direct) et d'une certaine homogénéité des pratiques sur une période suffisamment longue dans le but de caractériser des systèmes relativement stables (éviter des transitions du type travail superficiel vers semis direct au sein d'un système). Cette stabilité des pratiques est assez difficile à obtenir au sein de groupes d'agriculteurs toujours en phase d'apprentissage et d'essais (H. Brives, com. perso.). Les agriculteurs sollicités devaient par ailleurs être en mesure de décrire précisément les itinéraires techniques réalisés plusieurs années en arrière et d'avoir des analyses de sol à jour.

Au final, un groupe de 19 agriculteurs (8 éleveurs et 11 céréaliers) répartis sur 10 départements a été constitué (Figure 2) avec un à trois systèmes de culture par exploitation, soit 32 systèmes de cultures (Le Ny, 2010).

Questionnaire

Le questionnaire d'enquête couvre une présentation générale de l'exploitation (systèmes de culture, type de sol), la technique de travail du sol de l'agriculteur, les facteurs déclenchants qui ont motivé l'abandon du labour et la trajectoire suivie depuis (S. de Tourdonnet, com. perso.). Une parcelle représentative du ou des systèmes majeurs de l'exploitation est ensuite choisie, sur laquelle toutes les opérations culturales depuis la récolte du précédent, et incluant la gestion des résidus et l'interculture, sont recensées. En correspondance avec les interventions culturales réalisées, un inventaire détaillé du parc matériel est dressé. Pour chaque système, le nombre d'années prises en compte, en général en remontant depuis la campagne 2008/2009, est fonction de la longueur de la rotation pratiquée (Le Ny, 2010).

Outils et références

Les performances des systèmes de culture enquêtés ont été calculées à l'aide du logiciel SYSTERRE® développé par Arvalis-Institut du végétal en partenariat avec le Réseau Mixte Technologique « Systèmes de Culture Innovants ». Il permet, à partir d'un enregistrement des données d'itinéraires techniques, de calculer à l'année et à la parcelle un ensemble de résultats technico-économiques, d'indicateurs de pratiques, et de bilans environnementaux. D'autres performances, qualitatives ou plus spécifiques à la problématique étudiée, ont été calculées à partir des données d'enquête à l'aide du tableur Excel.

Le prix des intrants provient pour l'essentiel de l'Index des prix et des normes agricoles 2006-2007 ou directement de l'agriculteur. Le prix du carburant a été fixé à 0,8 €/L. Le prix de l'eau a été établi sur la base de la redevance annuelle payée par les agriculteurs irrigants. Rapporté à une surface d'un hectare, le coût du millimètre d'eau s'élève à 0,12 € (soit 0.012€/m³). Le prix de vente des produits récoltés correspond au prix réel perçu par l'agriculteur. Dans la mesure où l'évaluation se fait à l'échelle du système de culture et pas à l'échelle de l'exploitation, il était nécessaire d'attribuer un prix aux intrants produits sur l'exploitation ainsi qu'aux produits autoconsommés (cas de la paille dans les exploitations de polyculture-élevage). Le prix des engrais de ferme (fumier, lisier, compost, etc.) a été calculé sur la base de leur teneur en azote, phosphore et potasse.

Du fait du délai de minéralisation, ce choix surestime la valeur fertilisante de l'engrais de ferme épandu. Toutefois, l'approche pluriannuelle adoptée pour l'évaluation permet de gommer cet effet (Le Ny, 2010).

1.2.2 – Résultats

Les résultats de l'évaluation sont présentés en différenciant trois types de travail du sol : travail superficiel complété par un travail profond (noté « travail profond »), travail superficiel et semis direct (SD). Dans le cas du travail profond, le pseudo-labour (travail du sol sans retournement avec mélange des horizons pratiqué à plus de 15 cm) n'étant pas une pratique rencontrée parmi les agriculteurs

enquêtés, l'opération de travail profond classique correspond au décompactage (travail profond sans retournement ni mélange).

Les résultats pour chaque système consistent en la moyenne des résultats annuels pour toutes les années constituant la séquence rotationnelle étudiée, rapportés à une surface d'un hectare. Pour certains indicateurs, le type de rotation pratiqué ou le type de sol de chaque système sont indiqués lorsque ces paramètres sont jugés importants à prendre en compte dans l'hypothèse testée. Pour les rotations, les systèmes ont été regroupés en trois catégories selon les cultures rencontrées : COP (rotations à base de céréales et oléo-protéagineux), COP + maïs (rotations qui incluent la culture du maïs) et COP + indus. (rotations intégrant les cultures industrielles : betterave, pomme de terre, chanvre, légumes industriels). Les sols ont été regroupés en trois classes de comportement : profond hydromorphe (sols limoneux, limono-argileux et argileux) / profond séchant (sols limono-sableux) / superficiel séchant (craies superficielles, sols argilo-calcaires et sableux). Dans certains cas, les résultats des systèmes sont dissociés selon qu'ils appartiennent à des exploitations de grandes cultures ou de polyculture-élevage, le but n'étant pas de comparer entre eux ces systèmes d'exploitation mais d'affiner l'analyse en tenant compte de contraintes qui leur sont propres.

La moyenne est indiquée sur les graphiques pour décrire une tendance mais doit être considérée avec précaution, la significativité des différences entre modalités étant rarement mise en évidence en raison de la dispersion des résultats (Le Ny, 2010).

Dans cette étude, le gain de temps en semis direct est confirmé : le temps global passé à l'hectare est en moyenne de 2h15 contre 4h pour l'ensemble travail profond + travail superficiel (Figure 3).

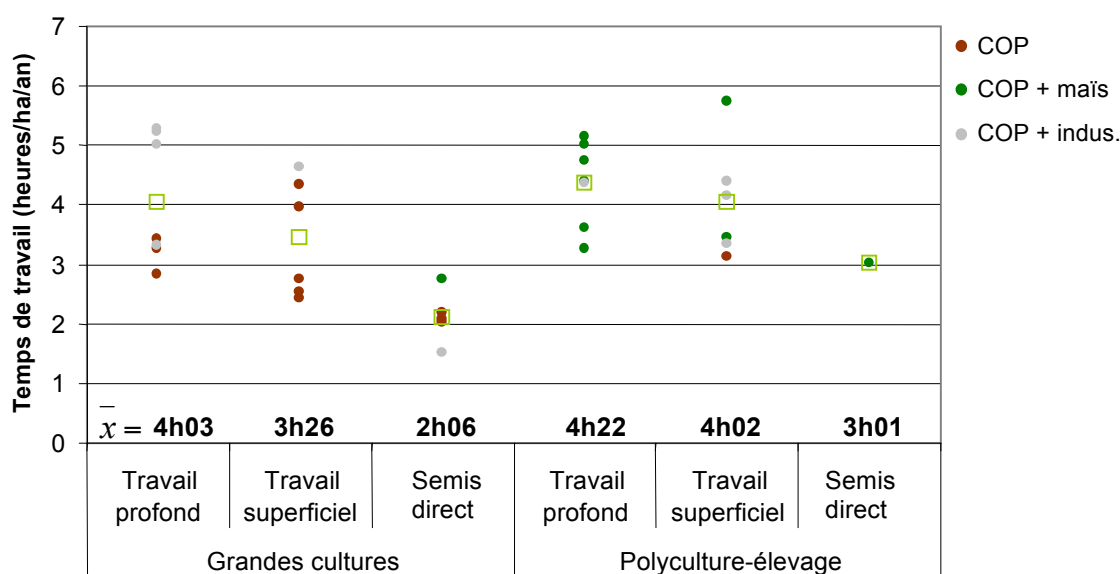


Figure 3 : Répartition du temps de travail moyen des systèmes de culture enquêtés selon leur travail du sol et leur système de production. (C = céréales, O = oléagineux, P = protéagineux, indus. = cultures industrielles (betterave, pomme de terre, chanvre, légumes industriels) - □ moyenne par catégorie)

Parmi les solutions techniques complémentaires aux TCS, le traitement en bas volume permet de réduire significativement le temps de pulvérisation. En mettant en œuvre cette technique et en n'implantant pas de couverts en interculture, un agriculteur en semis direct parvient à limiter le temps de travail à seulement 1h30/ha/an. Certaines techniques permettent aussi de réduire de façon significative le nombre de passages grâce à des opérations remplissant plusieurs fonctions. Par exemple, l'implantation en un passage avec déchaumage à l'aide de bêches roulantes travaillant à moins de 5 cm (outil Compil de Duro) permet de réaliser en une fois la préparation du lit de semences et le semis, voire la destruction du couvert précédent. Le semis est réalisé à la volée en adaptant une trémie frontale

devant les 4 trains de bûches roulantes. Une autre solution technique est le travail localisé uniquement sur la ligne de semis réalisé en même temps que le semis (technique du strip-till travaillant sur la ligne de semis) qui permet d'optimiser les passages (Landé et Le Ny, 2012).

Côté économie de matériel et de consommation fuel (Figure 4), le type de travail du sol a des répercussions importantes. Le semis direct enregistre les consommations de fuel, les charges de mécanisation et les coûts énergétiques les plus faibles, à l'inverse du passage répété d'outils en travail superficiel qui aboutit à des consommations de carburant plus élevées que dans bien des systèmes ayant recours au décompactage ! L'enquête révèle aussi que finalement le type de sol a peu de répercussions, les sols argileux pourtant réputés lourds et difficiles à travailler n'apparaissent pas plus pénalisants.

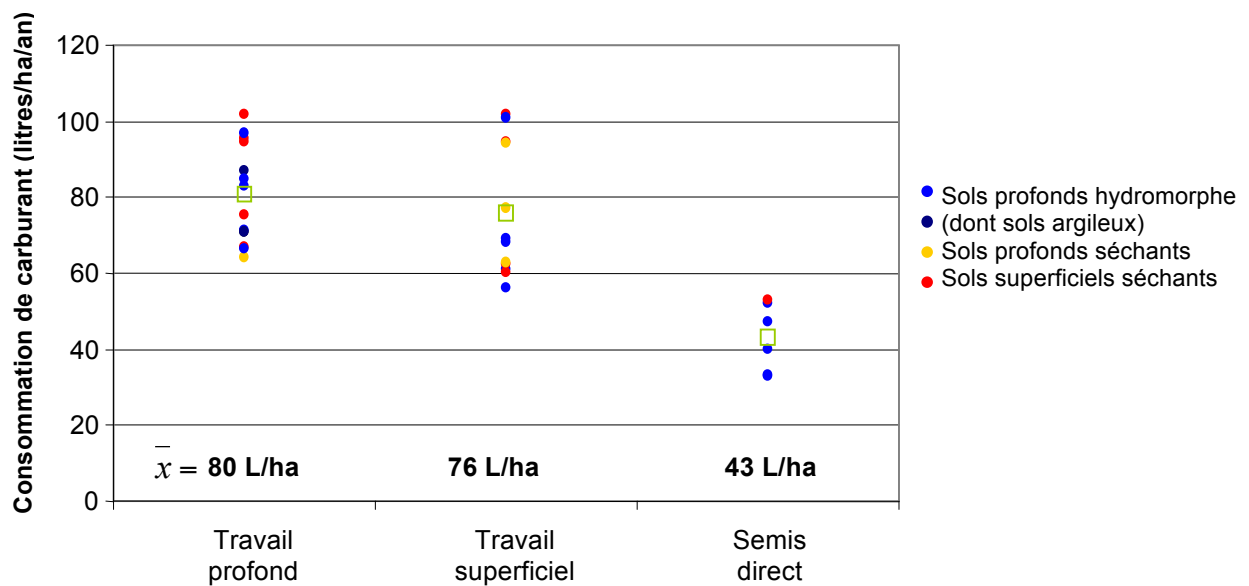


Figure 4 : Répartition de la consommation moyenne en carburant des systèmes de culture enquêtés selon leur travail du sol et leur type de sols (□ moyenne par catégorie)

Quant au coût du parc matériel, hormis pour le semis direct, l'enquête démontre que pour les autres techniques de réduction du travail du sol, ni la diversification des cultures ni le type de sol n'expliquent la variabilité des charges de mécanisation observée. Cet aspect relève davantage des choix comptables voire personnels de l'agriculteur. Cependant, la mutualisation du matériel spécifique au sein de CUMA ou l'achat en commun avec des voisins permettent de réaliser des économies de charges de mécanisation tout en favorisant le renouvellement et l'utilisation de matériels récents (Le Ny, 2010).

Une autre conclusion de cette enquête est que la réduction du travail du sol n'implique pas une augmentation des charges opérationnelles (semences, produits phytosanitaires ou engrais). Mais c'est avant tout le choix des cultures, notamment irriguées ou de printemps nécessitant l'implantation de cultures intermédiaires, qui augmente les coûts dans les systèmes de culture en travail superficiel et profond par rapport aux systèmes en semis direct où les agriculteurs favorisent les cultures d'hiver. Ainsi, la rentabilité des systèmes de culture dépend moins du travail du sol que de l'assolement pratiqué. Parmi les solutions techniques mises en œuvre par les agriculteurs enquêtés, la conduite successive de deux cultures dans l'année et, dans une moindre mesure, la valorisation des couverts d'interculture (fourrage) aboutit à un produit brut et à une marge brute plus élevés. En contrepartie, les charges de mécanisation et de temps de travail s'en retrouvent aussi plus importantes (Le Ny, 2010).

Côté performance en termes de rendement, l'objectif de rendement fixé en début de campagne est en général atteint par 97 % des enquêtés en travail profond, par 95 % des enquêtés en travail superficiel et

par 93 % des enquêtés pratiquant le semis direct mais avec une plus grande variabilité des résultats pour cette dernière technique. Les difficultés susceptibles de pénaliser le rendement en semis direct sont un démarrage plus lent à l'automne, notamment sur blé, et la présence des pailles en surface qui nuit à la levée du colza. Pour y faire face les agriculteurs enquêtés proposent l'apport d'azote localisé au semis, le passage du décompacteur devant le colza pour sécuriser l'implantation et stimuler la minéralisation, le broyage ou l'exportation des pailles du précédent du colza, l'utilisation du semoir à dents à la place du semoir à disques pour améliorer la qualité du semis lorsque les pailles sont laissées ou encore l'augmentation de la densité de semis (Le Ny, 2010).

Sur la protection des sols (couverture, réduction du tassement, matière organique), l'étude constate que les systèmes en semis direct assurent uniquement une couverture des sols plus importante, à cause de la proportion plus importante de cultures d'hiver dans leurs rotations. L'implantation de cultures intermédiaires, plus systématique en polyculture-élevage, aboutit aussi à une couverture du sol importante mais sans lien avec la réduction du travail du sol. L'utilisation de pneus basse pression est moins fréquente dans les systèmes en semis direct, car la structure des sols n'est plus préoccupante d'après les propos recueillis auprès des agriculteurs pratiquant le semis direct depuis longtemps et qui constatent une bonne portance de leurs sols. Concernant la matière organique, les systèmes en semis direct présentent des teneurs plus élevées dans les 30 premiers centimètres du sol d'après les analyses de sol fournies ou effectuées au moment de l'enquête. L'observation du fonctionnement des sols par des moyens empiriques constitue une part appréciée du travail des agriculteurs enquêtés (turricules de vers de terre, couleur de la terre). Cependant, de l'aveu de certains agriculteurs, notamment ceux qui pratiquent le semis direct, le travail du sol réduit voire supprimé les amène progressivement à perdre la connaissance fine de leurs sols (Le Ny, 2010).

L'enquête a révélé une grande variabilité interindividuelle de recours aux traitements phytosanitaires au sein de chaque catégorie de travail du sol (Figure 5). On note cependant l'absence en semis direct d'IFT (Indice de Fréquence de Traitement) aussi élevés que dans le cas du travail profond et superficiel, l'IFT total maximum étant inférieur à 6. Cette fréquence de traitement plus faible participe aux charges opérationnelles également inférieures constatées dans les systèmes en semis direct. Il est à souligner que, dans les trois catégories, des systèmes de culture parviennent à obtenir des IFT totaux faibles, de 3 ou moins.

L'IFT « Herbicides » révèle les pratiques variées de travail du sol. Le recours aux herbicides totaux (le plus souvent à base de glyphosate) appliqués en interculture est davantage utilisé en semis direct (où le travail du sol est proscrit) notamment lorsqu'on a recours à des couverts d'interculture avant les cultures de printemps. Compte tenu des difficultés d'implantation des cultures de printemps en semis direct, l'alternance de cultures d'hiver et de printemps destinée à lever la pression adventices (par rupture du cycle des adventices) est peu mise en œuvre. Le gaillet et le brome sont les adventices les plus souvent citées comme problématiques, en particulier en semis direct.

L'hypothèse d'augmentation du recours aux fongicides lié à la réduction du travail du sol (présence de résidus en surface, potentiels supports de contamination) n'est pas confirmée par l'enquête. Les résultats démontrent que la présence plus ou moins importante de résidus en surface (entre semis direct et TCS) ne fait pas varier le recours aux fongicides. De même, le recours aux anti-limaces ne présente pas de gradient d'augmentation avec un travail du sol plus en plus réduit jusqu'au semis direct. Les agriculteurs misent sur une régulation naturelle des populations, mais la lutte est rude pour les éviter à l'implantation, car c'est une période plus délicate en techniques de travail du sol réduit. Occasionnellement, le déchaumage est une alternative citée par les agriculteurs. Augmenter la densité de semis constitue aussi un levier pour faire face aux pertes dues aux ravageurs. D'autres agriculteurs se servent de couverts réputés appétibles pour les limaces, puis traités chimiquement juste avant l'implantation de la culture suivante (maïs), afin de détourner la pression des limaces le temps que la culture lève (Le Ny, 2010).

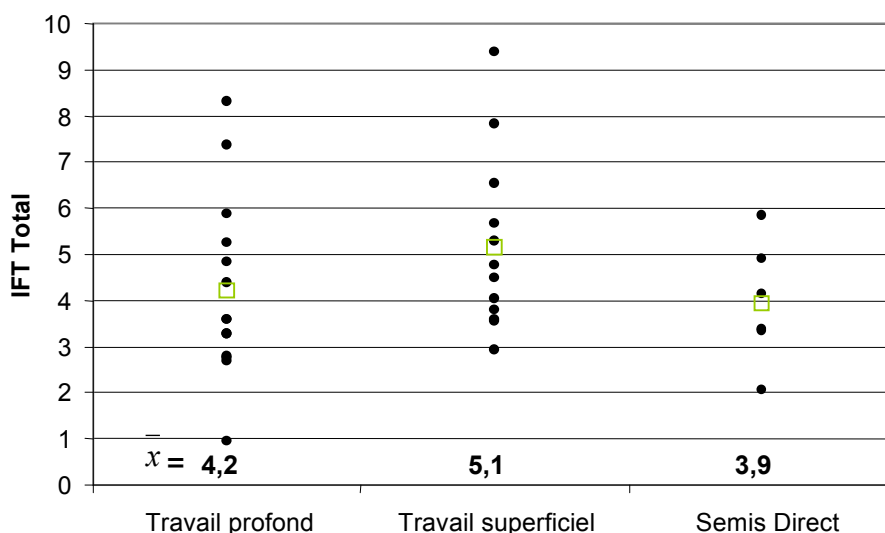


Figure 5 : Répartition de l'IFT moyen des systèmes de culture enquêtés selon leur travail du sol (\square moyenne par catégorie)

1.2.3 – Conclusions

En conclusion de cette enquête, les systèmes en semis direct sont, de manière générale, plus performants que les systèmes en travail profond et superficiel en ce qui concerne le temps de travail, le nombre de passages total, la consommation de carburant et les charges de mécanisation. On note toutefois une incertitude marquée sur le rendement qui révèle une part de risque plus grande prise dans ces systèmes de culture, et qui s'en ressent sur la marge brute.

La mise en œuvre du semis direct a un impact positif sur la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre, notamment en comparaison des systèmes travail du sol en grandes cultures. Le semis direct constitue donc une voie intéressante pour améliorer le rendement énergétique en grandes cultures. Le recours aux herbicides totaux est néanmoins assez élevé.

Rapportée au temps de travail annuel, ou encore à la consommation d'énergie globale, la pratique du décompactage n'apparaît pas particulièrement pénalisante. De manière générale, le travail superficiel se démarque peu du travail profond. Il faut néanmoins signaler que le passage du décompacteur est rarement systématique, ce qui limite l'impact de cette technique. Son utilisation précède surtout l'implantation de certaines cultures jugées sensibles au tassement comme le maïs ou le colza.

Enfin, le type de sol s'est finalement révélé peu discriminant. Mais il faut noter que moins un sol est travaillé (en profondeur notamment), moins l'effet du type de sol sera perceptible sur un certain nombre de points jugés a priori sensibles comme la consommation de carburant ou d'énergie. Ainsi, les sols argileux pourtant réputés lourds et difficiles à travailler ne sont pas plus pénalisants. A l'inverse, le type de rotation pratiqué s'avère prépondérant, tant sur le plan socio-économique qu'agro-environnemental (Landé et Le Ny, 2012).

2. Techniques culturales simplifiées : comment les améliorer ?

2.1 Expérimentations en parcelles agriculteurs : faisabilité

La Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine a mené des expérimentations en grandes parcelles chez des agriculteurs pour comparer des systèmes de culture en travail du sol conventionnels pour la région (labour ou TCS) par rapport au semis direct sous couvert (SDSC) afin de tester la faisabilité opérationnelle de cette technique pour différentes cultures (Figure 6 et Tableau 1).

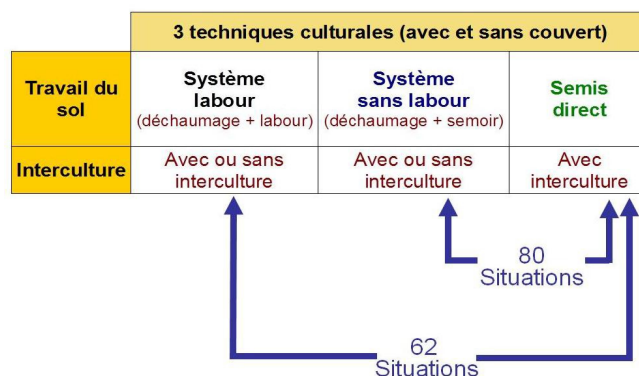


Figure 6 : Comparaison des techniques culturales expérimentées chez des agriculteurs

Cette comparaison a permis de faire une évaluation technique, économique et environnementale des pratiques agricoles et permet aujourd'hui de tester les adaptations nécessaires des techniques innovantes de semis direct sous couvert (SDSC) pour ne pas pénaliser les cultures et limiter l'usage de produits phytosanitaires et plus particulièrement d'herbicides plus fréquemment employés dans cette technique.

| Année | Blé | Colza | Orge de printemps | Orge d'hiver | Triticale | Pois de printemps | Féverole de printemps |
|-------|-----|-------|-------------------|--------------|-----------|-------------------|-----------------------|
| 2009 | 13 | 6 | 3 | 2 | 1 | | |
| 2010 | 9 | 2 | 2 | 3 | | 1 | |
| 2011 | 3 | 3 | | 2 | | 1 | 1 |

Tableau 1 : Répartition par culture et par an des essais menés par la Chambre régionale de Lorraine.

En complément des suivis classiques annuels sur cultures, des profils racinaires, des analyses de sols, des comptages de lombrics et des piégeages de carabes ont permis de faire un bilan de l'évolution des sols sous les différentes techniques et d'évaluer l'impact sur la biodiversité. Enfin, une enquête auprès d'agriculteurs du réseau a également permis de capter l'impact social et les freins et motivations liées à la technique du semis direct sous couvert (SDSC).

Les résultats mettent en évidence les avantages et les écueils de la technique du semis direct sous couvert : si les performances économiques sont intéressantes, cette technique reste très sensible au type de sol et nécessite aussi une adaptation des itinéraires techniques des cultures vis-à-vis de la fertilisation ou du désherbage.

Dans les sols hydromorphes ainsi que pour la culture du colza, la technique montre clairement ses limites, la baisse de la productivité n'est pas compensée par la diminution des dépenses opérationnelles et fixes. Dans ces situations où le labour reste la technique la plus pratiquée, les pertes de rendement du semis direct sous couvert par rapport au labour sont évaluées en moyenne entre 10 et 20% suivant les cultures, pouvant atteindre dans certaines situations d'argiles lourdes jusqu'à 45%. La culture ressortant dans les essais comme la plus sensible à la technique est le colza. Les producteurs citent également très couramment l'orge d'hiver comme peu adaptée au SDSC. Pour ces deux cultures comme pour les autres cultures testées, on observe des pertes de pieds plus élevées en SDSC de 5 à 17% en moyenne : présence de pailles et problèmes accrus de ravageurs en sont les principales explications. Dans les situations où les pailles sont exportées, le comportement des cultures est bien meilleur. Cette présence de pailles est surtout pénalisante pour le colza qui est aussi une des cultures les plus affectées par les problèmes de limaces et de souris. Pour les autres cultures, notamment le blé, les résultats technico-économiques sont encourageants et le semis direct sous couvert atteint les

mêmes niveaux de résultats que les conduites classiques. Ainsi, on n'observe pas l'amélioration des rendements qui était attendue après la période de transition dans les situations moins favorables au SDSC. On ne note pas non plus d'effet bénéfique ou négatif des conditions climatiques d'une année à l'autre (Leclech, 2012a et b).

Des résultats économiques répondant aux attentes. Une analyse économique sur l'ensemble des situations expérimentées a permis de compléter les résultats techniques évoqués ci-dessus. Trois scénarii de prix des graines (bas, moyens, élevés) ont été utilisés pour le calcul des marges, alors que le calcul des charges est basé sur les coûts réels des intrants pour les charges opérationnelles et sur le barème d'Entraide pour les charges de mécanisation. En moyenne, les charges opérationnelles sont très proches quel que soit le système. Seules les charges liées au glyphosate, à l'adaptation de la dose d'azote et aux semences de couverts augmentent légèrement ce poste en SDSC. Concernant les charges de mécanisation et de main d'œuvre, l'objectif de réduction est clairement atteint, -30% en moyenne par rapport au labour, -22% par rapport au TCS. Les économies se font essentiellement sur le travail du sol et le semis, avec, entre autres, des économies conséquentes de consommation de carburant et une réduction du temps de travail de 23 min/ha à 1h34 /ha selon les cultures. Ainsi, pour 100 ha de cultures classiques de la région, ce sont 137 heures de tracteur économisées par rapport à un système avec labour. La rentabilité globale des systèmes en SDSC est du niveau de celle des systèmes classiques dans l'ensemble des scénarii de prix. En effet, malgré des marges brutes globalement inférieures (rendement légèrement affecté et charges opérationnelles plus élevées), les économies de mécanisation et de main d'œuvre procurent des marges nettes similaires au labour ou au TCS dans la majorité des situations (Leclech, 2012a et b).

Un bilan azoté à optimiser. Le sol se comportant différemment en système de semis direct sous couvert, la gestion de la fertilisation doit évoluer afin d'optimiser le bilan azoté. Les résultats du réseau mettent en évidence des reliquats sortie hiver plus importants en SDSC, mais aussi une minéralisation plus tardive. Ceci implique de recalibrer la stratégie de fertilisation en SDSC en tenant compte de cette évolution du sol et des apports liés aux couverts végétaux, soit une modification de la stratégie de gestion de l'azote, avec une adaptation des doses et du fractionnement.

Les expérimentations analytiques (essais date-dose N, localisation P au semis, essais couverts) sont encore trop récentes et on manque donc du recul suffisant pour donner un conseil précis (voir essais analytiques § 2.2) (Leclech, 2012a et b).

Un outil pour la gestion des adventices à améliorer par la prise en compte de la rotation. Le non travail du sol affecte aussi le comportement des adventices. Si en théorie, celui-ci doit limiter la levée des mauvaises herbes par des conditions défavorables à la germination des graines, les résultats des essais mettent en évidence une pression des adventices différente selon le système, et pas toujours à l'avantage du SDSC. En ce qui concerne la pression des dicotylédones problématiques des systèmes expérimentés (géraniums, matricaire, gaillet, euphorbe...), elle est globalement moins forte en SDSC qu'en labour ou en TCS. Par contre, on observe l'apparition d'une dicotylédone spécifique du SDSC, la grande berce, mais aussi d'une graminée, la vulpie. Ainsi, durant les premières années des essais, les IFT augmentent en semis direct sous couvert : en moyenne, l'IFT herbicide des systèmes en SDSC est supérieur de 0.5 par rapport au labour et de 0.2 par rapport aux TCS. Cette augmentation est essentiellement due à l'utilisation de glyphosate (destruction des couverts et nécessité de semer sur sol propre). *A contrario*, les herbicides utilisés lors du cycle de végétation sont comparables aux techniques classiques. On note, et cela de manière récurrente, la diminution de la pression des graminées adventices (bromes et vulpins), hormis la vulpie, par rapport aux TCS mais une augmentation de ces adventices par rapport au labour. L'utilisation du SDSC peut donc être un outil supplémentaire pour la gestion des adventices à condition également de modifier les rotations et d'intégrer de nouvelles cultures. C'est le point de vue partagé par les agriculteurs du réseau, enquêtés en juin 2010, qui sont prêts à faire évoluer leurs rotations (Leclech, 2012a et b).

Moins de problèmes de limaces ? Si les premières années, la pression ravageurs, et notamment limaces, s'est fortement fait sentir dans les systèmes sans travail du sol, la campagne 2009 a montré une réduction de l'utilisation d'anti-limaces sur la plupart des sites en semis direct : effet année ou régulation par les carabes ? Comme le laissent supposer les résultats des piégeages carabes réalisés dans le réseau en 2010, en semis direct sous couvert, les populations sont plus conséquentes qu'en agriculture classique. Ce type de résultats est à confirmer par des travaux complémentaires pour limiter l'utilisation des molluscicides (Leclech, 2012a et b).

De nouvelles solutions à expérimenter. Les techniques de l'agriculture de conservation sont en mouvement. Pour répondre au problème de structure des sols et des résultats insatisfaisants sur colza, de nouveaux outils voient le jour : le strip-till, la localisation du trafic, la permaculture... Leur pertinence vis-à-vis des objectifs techniques et environnementaux mérite d'être évaluée (Leclech, 2012a et b).

2.2 Adapter les itinéraires techniques en travail réduit du sol

En vue d'améliorer l'implantation des cultures en travail réduit du sol, différents points de l'itinéraire technique ont été étudiés. Les partenaires du projet se sont répartis les expérimentations (Tableau 2)

| semis direct Versus travail du sol | 2009 | 2010 | 2011 |
|--|------------|------------------|-------------------|
| 1-Comparaison des comportements variétaux | Blé, Colza | Blé, Colza | Blé, Colza |
| 2-Couverts associés en Semis direct | Colza | Colza, Tournesol | Colza, Tournesol |
| 3-Technique d'ameublissement et strip-till | Colza | Blé | Colza |
| 4-Fertilisation : Azote, Phosphore, Potassium | Blé | Blé, Colza | Blé |
| 5-Gestion des résidus en TCS vis-à-vis du phoma du tournesol | | | Tournesol |
| 6-Transfert de produits phytosanitaires | Blé | Orge, Colza | Blé, Orge, Colza. |

Tableau 2 : Répartition des essais analytiques menés par les partenaires pour accompagner les itinéraires techniques en travail du sol réduit ;

2.2.1 - Existe-t-il des variétés plus ou moins adaptées au semis direct en blé et en colza ?

5 essais en colza et 6 essais en blé menés de 2009 à 2011 par la coopérative Vivescia en Champagne-Ardenne ont été mis en place sous deux modalités comparées de travail du sol : semis direct et travail du sol profond. En colza, il est observé des écarts de comportement entre les variétés quand elles sont conduites en Semis Direct. La hauteur de végétation est réduite, le cycle de croissance au printemps est un peu retardé. Certaines variétés de colza semblent pénalisées avec la réduction du travail du sol (DK CABERNET, TOTEM et ALBATROS). Ces essais ne permettent pas d'identifier le ou les traits qui les différencient des autres variétés. Par contre, il semble que certaines variétés de colza sont à éviter dans les parcelles non encore structurées pour le Semis Direct (sol tassé, minéralisation réduite au printemps). Une technique simple peut permettre de lever cette contrainte. Elle consiste à fissurer le sol avant l'implantation du colza (ameublissement sans bouleverser le sol, technique du strip till) (voir §2.2.3). En blé, il n'est pas apparu de variétés pénalisées ou plus adaptées au Semis Direct parmi les variétés testées. Même si la hauteur de végétation est réduite, le cycle de croissance au printemps est un peu retardé, ce qui permet de semer un peu plus tôt pour assurer une bonne implantation à l'automne.

En conclusion, on constate que le Semis Direct a pour effet de retarder de quelques jours la croissance de printemps du colza et du blé. La hauteur de végétation est aussi un peu réduite, diminuant certainement un peu le risque de verse (Denis, 2012).

2.2.2 - Les couverts associés en colza améliorent-ils l'implantation en semis direct ?

Ce sujet a été travaillé par deux partenaires du projet, d'une part par la coopérative Vivescia en Champagne-Ardenne et par le CETIOM en champagne berrichonne.

En Champagne-Ardenne

L'objectif des travaux était d'identifier les espèces de légumineuses qui présentaient le plus d'intérêt sur le plan du potentiel de rendement, de l'azote et du désherbage pour un colza implanté en Techniques culturales simplifiées (TCS). Les couverts et le colza sont semés à la même date, le plus souvent par deux passages du semoir : le couvert dans un premier temps, puis le colza. Il est mis en place deux essais de comparaisons d'espèces associées au colza à l'automne 2010 et 2011, sur trois types de sols selon les années (limon argileux, limon sain et craie). En 2011, un réseau de 10 parcelles d'agriculteurs est venu compléter l'analyse, où il était comparé un colza avec et sans légumineuses. Des comparaisons de doses d'azote pour le colza sont mises en place en 2011 (6 modalités). La dose de fertilisation du témoin (colza pur) a été calculée à partir de la méthode des bilans (réglette azote CETIOM). Toutes les implantations sont en TCS. Les parcelles avec des légumineuses ont été désherbées avec du Novall (Denis M. *in* Compte rendu final CASDAR (Landé, 2012)).

Les quelques expériences d'agriculteurs des années précédentes montrent que le colza présente un développement nettement inférieur quand il est associé à d'autres plantes (jusqu'à moins 50% en terme de hauteur). Cependant, la taille du colza est malgré tout suffisante pour résister aux froids hivernaux habituels de l'Est de la France. Les essais 2010 et 2011 montrent que dans les conditions des automnes 2009 et 2010 plus humides (pluies importantes à partir du 15 Août), la croissance du colza n'est pas systématiquement concurrencée par les légumineuses associées.

Les résultats des essais 2010 et 2011 de la coopérative Vivescia en Champagne-Ardenne montrent que les couverts associés au colza apportent systématiquement un gain de rendement. C'est surtout marqué pour le pois fourrager, la féverole et le mélange de féverole + lentille. La légumineuse la moins performante semble être la lentille. Le rendement de la lentille a été probablement pénalisé par une forte infestation de matricaires.

Ces résultats sont confirmés par le réseau d'agriculteurs en 2011. Ils montrent que les mélanges de légumineuses apportent systématiquement un gain de rendement.

Cet écart est de 2.7 q/ha en moyenne sur 5 sites fertilisés en azote à la dose optimum selon la méthode du bilan (dose calculée sur la base d'un colza seul), et 0.9 qx/ha pour le témoin sans azote sur quatre sites.

Les différents essais ont montré que les légumineuses implantées sur la deuxième quinzaine d'août sont globalement des espèces longues à s'installer. En conséquence, elles ne couvrent pas suffisamment vite le sol pour empêcher les adventices de lever. Une forte infestation de matricaires a été observée sur un sol de limon en 2010, ainsi qu'une levée importante de mercuriales en terre de craie en 2011. Une levée de géranium a été notée dans une parcelle d'argilo-calcaire moyen où la lentille semée à 60 kg/ha a malgré tout limité leur développement à l'automne. Cette technique est à proscrire dans les parcelles à fort risque d'enherbement en dicotylédones, du fait du nombre réduit de produits sélectifs sur légumineuses. Dans ces conditions, un programme de désherbage à base de Novall sera conseillé (Denis M. *in* Compte rendu final CASDAR (Landé, 2012)).

En conclusion, pour cette région, dans les conditions de ces deux années 2010 et 2011 où la pluviométrie de la fin de l'été et de l'automne est élevée, les légumineuses n'ont pratiquement pas limité le développement du colza. Ce ne sera probablement pas le cas les années à pluviométrie plus faible. La présence du couvert ne permet pas de réduire significativement la levée des adventices. Les valeurs de reliquat d'azote minéral à la sortie de l'hiver derrière les légumineuses restent à un niveau suffisamment bas pour ne pas risquer des pertes par lixiviation. Les rendements montrent que les

légumineuses libèrent de l'azote pour la croissance du colza au printemps. Les doses d'engrais d'azote minéral pourraient ainsi être réduites. En considérant l'azote comme non limitant, d'autres phénomènes semblent être en jeu car le rendement du colza est plus élevé quand la dose d'azote n'est pas réduite. D'autres années seront nécessaires pour consolider ces résultats dans la région Champagne-Ardenne (Denis M. *in* Compte rendu final CASDAR (Landé, 2012)).

En champagne berrichonne

Le CETIOM a mis en place de 2009 à 2011 des essais comparant l'implantation de colzas seuls à des colzas associés implantés en semis direct dans le Berry. Les couverts et le colza sont semés à la même date en un passage de semoir. Les essais ont été menés sur 2 types de sols argilo-calcaire et limon sableux (Sauzet, 2012).

Les résultats montrent que pour trois années climatiques contrastées, il n'y a pas de concurrence avec le colza pour les espèces sélectionnées et aux densités retenues (pas de pertes de rendement) : lentille, gesse, vesce, fenugrec, féverole... Il faut toutefois veiller à choisir au sein des gammes spécifiques et variétales celles qui sont suffisamment gélives pour éviter un recours accru aux herbicides pour leur destruction. D'un point de vue pratique, le semis du colza et du couvert doit être légèrement plus précoce, c'est à dire 4-5 jours avant les dates normales, notamment en sols argileux, pour laisser le temps aux deux cultures de se développer et augmenter la sensibilité du couvert au gel. Il convient également de mélanger les couverts pour faire varier les tailles des graines et ainsi éviter une stratification dans les caisses du semoir, mais aussi pour assurer au moins une levée d'un couvert quelles que soient les conditions de levée de l'année et pour jouer sur la complémentarité des bénéfices des couverts (Sauzet, 2012 ; Landé et Sauzet 2012).

Les résultats démontrent que l'on obtient autant de rendement en colza associé avec des itinéraires techniques bas intrants (moins d'azote et moins d'herbicides) qu'en colza seul. Les réductions de doses de fertilisation azotée minérale au printemps peuvent facilement s'envisager autour de 30 unités sans impact sur le rendement selon les trois années de référence acquises au CETIOM pour les couverts de légumineuses sélectionnés.

Les résultats sont plus irréguliers sur la capacité des couverts à concurrencer les adventices. Une année sur les trois années d'essais, il a été observé une réduction du biovolume de géraniums. Mais une des clefs principales pour gérer le géranium est, avant tout, l'implantation en semis direct. Cependant, au regard de ces trois années de recul, le CETIOM propose de réduire de moitié les doses d'herbicides de prélevée, plutôt dans un souci de préserver le couvert à l'automne, en attendant de poursuivre les essais sur d'autres flores. D'un point de vue économique, la réduction des intrants (30 unités d'azote et herbicides) compense le coût de la semence des légumineuses associées. Les performances économiques sont alors identiques, voire améliorées (Sauzet, 2012 ; Landé et Sauzet 2012).

On peut conclure que cette technique innovante aujourd'hui permet au colza d'être plus régulier face aux aléas climatiques : le rendement d'un colza associé semble plus stable malgré des conditions climatiques très variées rencontrées dans les essais (sécheresse du printemps 2011, sécheresse de l'automne 2009). Cette technique innovante permet aussi au colza de maintenir son potentiel avec des charges opérationnelles réduites (Sauzet, 2012 ; Landé et Sauzet 2012).

Ces essais menés dans deux régions françaises (Champagne-Ardenne et Berry) ouvrent des pistes intéressantes sur l'accompagnement du semis direct en colza par des plantes associées à l'automne mais demandent à être confortées dans d'autres contextes pédo-climatiques.

2.2.3 - Les techniques d'ameublissement (décompactage) et le strip-till améliorent-elles l'implantation en TCS ?

Ce sujet a été travaillé par deux partenaires du projet, d'une part par la coopérative Vivescia en Champagne-Ardenne et, d'autre part, par la Chambre régionale d'Agriculture de Lorraine.

En Champagne-Ardenne

Deux essais ont été menés entre 2009 et 2011 sur limon argilo-sableux et sur argile (monoculture de blé) en colza, blé et escourgeon. Les modalités comparées étaient un ameublissement de la parcelle par un décompactage entre 20 et 35 cm avant une implantation (avec ou sans culture intermédiaire) en TCS versus une implantation classique avec une préparation de sol sur 15 cm.

Les résultats mis en évidence varient selon le type de sol. L'ameublissement profond en limon argilo-sableux a permis un meilleur enracinement dans ces parcelles drainées. Le gain de rendement obtenu avec un ameublissement systématique à l'implantation de chaque culture a été conséquent les deux premières années, un peu moins la troisième. Inversement en sol argileux, les modalités (ameublissement ou non) ne présentent pas de comportement différent vis-à-vis de la structure du sol. La présence du radis en interculture a permis d'obtenir un lit de semence plus ressuyé en automne 2010, et d'améliorer ainsi la qualité du semis du blé en TCS. Les profils culturaux réalisés à l'automne 2011 montrent qu'à l'entrée de l'hiver, la fissuration est encore bien visible dans la modalité « ameublissement + radis » par rapport à un « ameublissement seul ». Cet écart devrait retarder la prise en masse du sol avec les pluies hivernales.

Les conclusions montrent qu'une intervention mécanique d'ameublissement déclenchée sur un diagnostic de zone d'imperméabilité ou de compaction permet de retrouver un potentiel de rendement normal pour la parcelle. L'état structural favorable n'est pas stable dans le temps, cette opération doit être renouvelée plusieurs fois (après trois ans d'essai, le nombre n'est pas encore déterminé). Sur le plan économique, l'ameublissement coûte 50 euros/ha au premier passage, puis 30 euros au bout de trois ans. Le besoin de puissance diminue, signe de l'évolution de la structure du sol. L'ajout d'un couvert comme le radis permet de retarder la fermeture des fissures par un double effet : colonisation par les racines et dessèchement du sol.

Il faudra cependant encore plusieurs années de travaux sur ces essais pour répondre aux questions sur la fréquence d'ameublissement et sur le couplage d'un couvert associé à cette technique d'ameublissement (Denis M. *in* Compte rendu final CASDAR (Landé, 2012)).

En Lorraine

Sur la campagne 2010/2011, trois essais d'évaluation du strip-till sur colza (1 essai) et sur maïs (2 essais) ont été mis en place par la Chambre de Moselle, la Chambre de Meurthe-et-Moselle et la Chambre de Lorraine. Ces essais sur la technique du strip-till ont permis d'acquérir les premières références sur les performances techniques (enracinement, pression adventices, rendement) de cette nouvelle technique qui, en région Lorraine, pourra être utilisée sur maïs et colza, mais également tournesol. Les résultats ont montré un effet favorable de cette technique de travail du sol sur le développement du pivot et l'absorption d'azote à l'automne du colza. (Leclech N. *in* Compte rendu final CASDAR (Landé, 2012)).

2.2.4 - Comment faut-il ajuster la fertilisation en TCS : fractionnement, positionnement et pertes?

Un essai sur l'adaptation du fractionnement de la fertilisation azotée du blé tendre au semis direct sous couvert a été mis en place par la Chambre de Moselle durant trois ans. Les résultats montrent que dans cette situation, en sol profond limoneux, l'adaptation de la fertilisation azotée du blé en semis direct sous couvert passe par une adaptation de la dose et du fractionnement. Sur les trois années, les conditions climatiques ont fortement affecté et remis en cause la dose optimale à apporter, notamment On note tout de même, un coefficient apparent d'utilisation (CAU) de l'azote en SDSC légèrement inférieur à celui mesuré en labour mais proche de celui mesuré en TCS. Il en résulte une modification de la stratégie de gestion de l'azote. En ce qui concerne le fractionnement, la meilleure stratégie a consisté à moduler en deux apports précoces ou trois apports la dose optimale d'azote. En effet, les apports tardifs en semis direct sous couvert (SDSC) affectent négativement le potentiel du blé compte

tenu d'un réchauffement plus tardif des sols induisant un décalage de la minéralisation au printemps (Leclech, 2012a).

Dans le cadre d'un site instrumenté à Ludelage avec des bougies poreuses, les premiers résultats sur les nitrates sont prometteurs pour les techniques culturales simplifiées : les pertes de nitrates sont réduites 5 années sur 6 pour le système en semis direct avec couverts d'interculture par rapport à un labour. Par exemple, lors d'un hiver à fort drainage comme l'hiver 2006-2007, le SDSC a permis de limiter les pertes de nitrates d'une quinzaine de pourcents. Malgré des quantités d'eau drainées plus élevées en semis direct sous couvert, cette réduction des transferts s'explique par des concentrations en nitrates plus faibles dans l'eau récupérée sous ce système (Leclech, 2012c).

Concernant les essais menés sur la fertilisation localisée phosphatée sur blé, en 2008/09 on n'observe pas de différence de rendement quelles que soient les modalités de fertilisation localisée de phosphore au semis. Sur colza en 2009/10, les conclusions sur le rendement sont identiques au blé. Par contre, la modalité avec une fertilisation localisée au semis par quelques unités d'azote augmente le développement du colza à l'automne, sans impact cette année-là sur le rendement (Leclech, 2012c).

2.2.5 - Faut-il gérer les résidus de culture laissés en surface par les TCS pour réduire la pression maladie (Phoma) en Tournesol ?

Trois réseaux de parcelles ont été suivis en 2010 dans la région Midi-Pyrénées :

- un réseau « Phoma » suivi par le CETIOM, avec des pratiques de travail du sol classiques (labour avant tournesol) : 7 parcelles en 2010 (zone Lauragais, 31) ;
- un réseau régional coordonné par la CRA Midi-Pyrénées « non labour » qui a pour objectif d'évaluer l'effet à long terme des pratiques simplifiées sur la qualité de l'implantation des cultures (stabilité structurale du sol, teneur en MO) : 10 parcelles en 2010 (départements 31, 11, 32 et 09).
- deux parcelles sur le site INRA d'Auzeville-Tolosane ont également été étudiées en 2012. Dans chaque parcelle, quatre modalités étaient étudiées : interculture avec culture intermédiaire ou sol nu pour deux techniques d'implantation (TCS et labour).

Ces réseaux ont fait l'objet d'enquêtes auprès des agriculteurs pour le recueil de leurs pratiques et d'observations en culture. Aucune modification de pratique de travail du sol n'a été demandée aux agriculteurs pour cette étude. Le CETIOM et l'INRA de Toulouse ont effectué des observations de production d'inoculum de *Phoma macdonaldii* (*Leptosphaeria lindquistii*) sur les résidus de tournesol restés en surface suite à la récolte (Descorps, 2011 et 2012).

Les résultats montrent qu'il n'existe pas de différence significative dans la production d'inoculum de phoma sur ces résidus quel que soit le mode d'implantation de la culture suivante (travail superficiel ou semis direct) : la pression maladie est la même pour les tournesols implantés l'année suivante à proximité de ces parcelles. Cependant, ces résultats sont à conforter par une deuxième année d'étude avant de permettre de construire un modèle de prédiction d'épidémie. Cette étude a néanmoins permis de mettre au point une méthode opérationnelle de quantification du nombre de périthèces de phoma du tournesol (*Phoma macdonaldii* (*Leptosphaeria lindquistii*)) par unité de surface de résidus grâce à une estimation visuelle de la surface de résidus porteuse de périthèces (Descorps, 2011, 2012).

2.2.6 - A-t-on des comportements de transferts de pesticides différents en TCS ?

Une expérimentation sur l'impact de la technique de travail du sol sur la qualité de l'eau a été conduite pendant six ans sur un site expérimental muni d'un dispositif de bougies poreuses en Lorraine par la Chambre régionale d'agriculture de Lorraine. Sur ce site, les transferts de produits phytosanitaires et d'azote étaient évalués sous deux conduites de travail du sol (semis direct sous couvert et labour) à l'aide de ce dispositif. En complément, deux autres sites régionaux équipés de bougies poreuses ont également été réorientés vers la thématique réduction de travail du sol sur colza (comparaison labour / TCS) et orges d'hiver (comparaison avec ou sans décompacteur) en 2010/11.

Les résultats montrent que pour les transferts d'herbicides, les conclusions sont variables selon le type de molécule et le type de sol. En 2008/09 à Ludelage, le bromoxynil provenant d'une application de First 0.4L/ha le 20 octobre 2008 se retrouve dans les eaux à partir du 6 février sous labour et seulement à partir du 28 mars sous semis-direct et à une concentration deux fois inférieure au labour. *A contrario* pour une application de glyphosate à 720 g/ha le 18 septembre 2009 à Rollainville avant orge d'hiver, on n'observe aucune différence de concentration au cours des différents prélèvements de l'automne et de l'hiver entre le semis-direct, le labour ou autres TCS. Enfin, sur ce même site l'année suivante, les concentrations de propyzamid liées à l'application de Kerb Flo 1.8l/ha le 10 novembre sont relativement élevées en techniques simplifiées et nulles sous labour.

Si, au final, l'évaluation du comportement des nitrates dans l'eau est aisément mesurable et nous permet de mettre en évidence l'intérêt du non travail du sol et de la couverture permanente pour limiter leurs pertes en sol limoneux profond, les conclusions sont bien différentes pour les molécules herbicides. Le travail du sol rentre en compte, mais avec des effets différents et contradictoires liés aux autres facteurs impactant le transfert, comme les caractéristiques intrinsèques des molécules, le type de sol, la période d'application, la dose et le climat. Autant de facteurs plus ou moins difficiles à maîtriser pour limiter les pollutions diffuses de produits (Chambre régionale d'Agriculture de Lorraine, 2012).

2.3 Tester de nouveaux systèmes de culture en TCS

Pour poursuivre l'évaluation des techniques culturales simplifiées et de leurs impacts à une autre échelle que l'itinéraire technique des cultures (cf. 2.2), le projet a conçu et expérimenté des systèmes de culture en TCS pour évaluer les performances de ces techniques à plus long terme.

Les partenaires CETIOM et Arvalis-Institut du végétal ont ainsi conçu par expertise et modélisation puis implanté quatre essais pluriannuels répartis sur trois régions : Midi-Pyrénées, Centre et Nord-Pas de Calais.

L'objectif de ces dispositifs expérimentaux était de mettre au point des systèmes de culture en travail réduit du sol et d'évaluer sur le long terme d'une part leur faisabilité et d'autre part leurs performances.

Compte-rendu de la durée du projet (3 ans) au regard du temps nécessaire de conception et de d'implantation, les résultats présentés par la suite ne sont que partiels et ne présagent pas des performances finales, mais permettent déjà de dégager les points positifs et les limites en terme de faisabilité de ce type de systèmes de culture en travail réduit du sol, voire d'envisager des adaptations pour pérenniser ces techniques.

2.3.1 – Gestion comparée de l'enherbement en système de culture en labour et en TCS

Cet essai a été conçu et mis en place par Arvalis institut du végétal en 2009 en région Midi-Pyrénées à Montesquieu Lauragais (31) pour au moins six ans. Il compare six rotations (Tableau 3) pour évaluer la complémentarité entre travail du sol (labour, TCS), désherbage mécanique et allongement de la rotation pour lutter contre l'enherbement.

Les premiers résultats révèlent les limites de la faisabilité technique de certaines alternatives. Sur blé d'hiver, le désherbage mécanique n'a pas toujours pu être réalisé lors d'automnes ou hivers humides, faute de période favorable au passage des outils (exemple, campagne 2009/2010). En conséquence, les adventices ont été contrôlées par un désherbage chimique. Lors d'années plus favorables, le désherbage mécanique a pu être réalisé mais son efficacité incomplète a obligé à réaliser des désherbages chimiques de rattrapage, par exemple sur l'anthesis durant la campagne 2010/2011. En non labour, le désherbage chimique a dû être renforcé pour contrôler à la fois les adventices graminées

et dicotylédones, contrairement à la modalité labour dans laquelle le désherbage a été ciblé sur les dicotylédones.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--|---|---|---|
| Système | Conventionnel Labour | Conventionnel Non-labour | Désherbage alternatif Rotation courte | Désherbage alternatif rotation courte + couverts | Désherbage alternatif rotation longue | Désherbage alternatif rotation longue + couverts |
| Rotation | Tournesol - blé | Tournesol - blé | Tournesol - blé | Tournesol - blé | Sorgho - Tournesol - Blé Pois - Colza - Blé | Sorgho - Tournesol - Blé - Pois - Colza - Blé |
| Travail du sol | labour + TSL | TSL | labour + TSL | TCS | TCS | TCS |

Tableau 3 : Modalités testées pour comparer différentes techniques de travail du sol et de rotations pour lutter contre l'enherbement – essai pluriannuel (6 ans – 2009/2014)

Pour le tournesol, les techniques « alternatives » se montrent plus faciles à mettre en œuvre. Le désherbage localisé sur le rang (herbi-semis) n'a pas posé de problème particulier mais doit être complété par le passage d'un binage dans l'inter rang.

Ce dernier bénéficie de conditions de ressuyage de sol au printemps plutôt favorables. Avant tournesol, il faut veiller à la destruction complète des cultures intermédiaires qui peuvent potentiellement monter à graines dans la culture, en particulier en non labour. Cet essai se poursuivra au-delà de ce projet pour effectuer une rotation complète (Labreuche J. *in* Compte rendu final CASDAR (Landé, 2012)).

2.3.2 – Pérennisation des TCS dans différents contextes pédo-climatiques.

Ces essais ont été conçus et mis en place par le CETIOM en 2009 en région Centre dans le Berry à Murs et Villedieu sur Indre (36) et en 2010 à Doignies (59) dans le Nord-Pas de Calais. Ces systèmes de culture comparent une rotation régionale dominante à une rotation en TCS incluant des modifications de la succession culturale pour s'adapter au travail réduit du sol dans différents contextes pédo-climatiques (Tableau 4). L'objectif était de concevoir puis d'évaluer des systèmes de culture en TCS pérennes et performants.

| Sites | Contexte pédoclimatique | Système de culture « témoin régional » | Système de culture « innovant » : <i>en travail réduit du sol voire semis direct</i> |
|--------------------------|--|---|--|
| Villedieu sur Indre (36) | Argilo-calcaire superficiel, Climat continental | Blé – Orge – Colza | Pois – Colza – Blé – Orge – Tournesol – Blé |
| Murs (36) | Limon sableux moyen, Climat continental | Blé – Orge – Colza – Tournesol – Blé | Féverole – Colza – Blé – Tournesol – Blé |
| Doignies (59) | Limon battant profond, Climat océanique | Blé – Betterave – Blé – Colza – Blé – Pois | Lin – Betterave – Blé – Féverole – Colza – Blé |

Tableau 4 : Présentation des essais « systèmes de cultures » comparés, mis en place de 2009 à 2016

La mise au point de ces systèmes de culture a été réalisée par une conception par prototypage à dire d'experts (Vereijken, 1997; Lançon et al., 2007) faisant appel à des champs d'expertises variés (experts « cultures » au sein des instituts techniques, experts thématiques (sol, gaz à effet de serre, énergie, eau, agronomie systémique...) au sein de l'INRA et d'Agrotransfert, et des experts techniques (expérimentateurs, conseillers de Chambre d'Agriculture...)). Cette conception a été appuyée par l'usage de modèles pour simuler des situations et accompagner la construction des rotations innovantes en techniques culturales simplifiées (ex : INDIGO®, AMG-SIMOS®).

Les prototypes de systèmes de culture innovants produits ont été mis en expérimentation dans trois lieux pédo-climatiques contrastés : argilo-calcaires superficiels et limons sableux moyens en région Centre sous climat continental, et limons profonds battants en région Nord-Pas de Calais sous climat océanique. Le suivi des essais est assuré par deux équipes expérimentales : mise en œuvre des itinéraires techniques avec notamment application des règles de décision, et enregistrement des observations agronomiques.

Compte tenu de la date d'implantation des expérimentations, après deux années de récolte (2010 et 2011), les seules données exploitables sont celles des dispositifs en région Centre. L'évaluation nécessite au moins une année supplémentaire pour le site du Nord qui a seulement été implanté en 2010. L'évaluation de ces prototypes porte à la fois sur (i) la faisabilité opérationnelle de la réduction du travail du sol d'un point de vue agronomique et (ii) sur les performances de ces systèmes de culture vis-à-vis d'un certain nombre d'indicateurs de durabilité.

Faisabilité opérationnelle de la réduction du travail du sol

Les cultures s'implantent bien en TCS dans l'ensemble grâce à une bonne structure, voire en semis direct pour certaines cultures comme le colza, le blé et l'orge. D'autres cultures comme le tournesol, la féverole et le pois nécessitent un travail du sol minimum pour assurer un bon contact terre-graine dans un lit de semence légèrement affiné. Une hausse de la densité de semis est à envisager pour pallier des levées plus aléatoires en TCS (blé, pois).

La gestion des adventices est correcte dans l'ensemble, excepté en colza où la succession pois/colza en TCS montre des limites dans la gestion de l'enherbement dicotylédone et où la solution du désherbage mécanique a été proscrite pour ne pas toucher au sol. Dans ces conditions, le semis direct permet de réduire l'enherbement de géraniums. Cependant (i) la présence d'adventices très développées après la récolte du pois d'hiver (peu couvrant à l'automne), (ii) un lit de semence asséché par le système racinaire superficiel du pois et (iii) la volonté de ne pas recourir à un usage trop important d'herbicides totaux, créent des conditions peu favorables à la réussite de l'implantation en semis direct du colza qui suit. A l'avenir, il faudra trouver un compromis entre travail du sol et désherbage mécanique. Par ailleurs, en limons sableux, les TCS gèrent difficilement l'anhrisque et le ray-grass.

Les systèmes en TCS sont réputés moins performants vis-à-vis de l'usage de la ressource d'éléments minéraux. Les sols non ou peu travaillés se réchaufferaient plus lentement (Chassot *et al.*, 2001), ne fournissant pas une ressource minérale en adéquation avec les besoins des cultures. Cependant, l'introduction de légumineuses en tant que culture de rente, en tant que couverts d'interculture ou en association avec des cultures de rente notamment en colza (Landé, 2011) a permis de réduire les doses d'engrais azoté minéral apporté dans les rotations en TCS.

En 2012, ces premiers résultats orientent nos essais vers une adaptation de certains itinéraires techniques :

- pour l'implantation du pois, un travail minimum du sol reste indispensable pour améliorer la levée et la qualité d'enracinement;
- pour le choix des couverts d'interculture, on privilégiera des espèces courtes en hauteur dans l'espoir de semer en direct dans ces couverts les cultures d'hiver (céréales, colza), ce qui permettra de limiter l'utilisation d'herbicides en interculture et dans la culture d'hiver;
- les TCS provoquent une recrudescence de mulots dont les galeries ne sont pas détruites par un travail du sol. Un léger travail du sol devrait résoudre ce point.

Evaluation des performances de ces systèmes de culture en techniques culturales simplifiées

L'évaluation des performances de ces systèmes de culture portent sur un panel d'indicateurs complété par une évaluation de la durabilité totale pour juger de la pérennité de ces prototypes (Locquet, 2011).

La durabilité totale a été évaluée, pour les deux premières années des essais, à l'aide du logiciel MASC® version 1.0 développé par l'INRA (Sadok et al., 2009) qui intègre les 3 piliers du développement durable (économie, environnement, société). Les indicateurs complémentaires ont été calculés à partir des données réelles mesurées en expérimentation ou de modèles (INDIGO® (Bockstaller et al., 1997), EGES®).

| Suite à 2 ans d'essais : Performances établies en année 2011 | Argilocalcaire | | | Limon sableux | | écart |
|--|---|--|-------|---|---|-------|
| | système témoin <i>colza / blé / orge</i> | système innovant <i>pois / colza / blé / orge / tournesol / blé</i> | écart | système témoin <i>colza / blé / orge / tournesol / blé</i> | système innovant <i>féverole / colza / blé / tournesol / blé</i> | |
| durabilité (MASC® version 1.0) (obj : 100%) | 40% | 60% | | 40% | 60% | |
| dont croissance économique | 100% | 100% | | 100% | 100% | |
| dont développement social | 50% | 50% | | 50% | 50% | |
| dont protection de l'environnement | 25% | 75% | | 50% | 75% | |
| temps de travail (minutes/ha) | 121 | 78 | - 43 | 93 | 74 | - 19 |
| nombre de passages | 16 | 10 | - 6 | 12 | 10 | - 2 |
| % rendement par rapport au témoin | 100% | 94% | - 6% | 100% | 84% | - 16% |
| marge brute (euros/ha) | 1069 | 910 | - 159 | 955 | 790 | - 165 |
| charges opérationnelles (euros/ha) | 408 | 290 | - 118 | 350 | 321 | - 29 |
| charges de mécanisation (euros/ha) | 260 | 191 | - 69 | 200 | 162 | - 38 |
| taux de couverture annuel | 76% | 79% | + 3% | 67% | 67% | - |
| IFT | 5,4 | 4,2 | - 1,2 | 4,2 | 4,4 | + 0,2 |
| dont IFT herbicide | 3,4 | 2,7 | - 0,7 | 2,6 | 3,1 | + 0,5 |
| dont IFT fongicide | 0,6 | 0,4 | - 0,2 | 0,9 | 0,5 | - 0,4 |
| dont IFT insecticide | 1,5 | 1,1 | - 0,4 | 0,5 | 0,8 | + 0,3 |
| dose d'engrais minéral azoté | 170 | 108 | - 62 | 118 | 86 | - 32 |
| rendement énergétique (produit/cout) | 5,8 | 8,8 | + 3,0 | 8,6 | 8,9 | + 0,3 |
| émissions Gaz à effet de serre (kg eq CO2/ha) | 2588 | 1724 | - 864 | 2003 | 1509 | - 494 |

Tableau 6 : Indicateurs de performances de deux essais "systèmes des cultures" de la région Centre après deux ans de rotation (résultats 2011). Essais prévus sur 5 et 6 ans (2009 à 2014 et 2015)

Les premières conclusions vis-à-vis de la performance des systèmes de culture en travail réduit montrent des tendances intéressantes sur une amélioration de la durabilité globale des systèmes innovants, notamment du point de vue de l'environnement. Les émissions de GES et le bilan énergétique indirectement liés à la réduction d'usage d'azote minéral montrent des évolutions positives dans le système innovant en travail réduit du sol comparé au témoin (Tableau 5). En revanche, la protection phytosanitaire variant de façon aléatoire en fonction des lieux et des systèmes, ne permet pas de dégager une tendance au bout de deux ans. Ce point reste à approfondir sur la durée des essais (6 et 5 ans). Du point de vue socio-économique, en systèmes innovants, le temps de travail et le rythme des passages se réduisent, tout comme les charges opérationnelles et mécaniques. Cependant, le résultat économique est affecté de façon conjoncturelle en 2011 par de moindres rendements et par l'introduction de cultures moins rentables (ex : protéagineux).

Ces résultats sont des premières tendances qui ouvrent aussi des questions à la Recherche :

- sur les méthodes statistiques pour traiter les indicateurs au cours du temps : a-t-on à faire à des répétitions ? Comment comparer les évolutions ?
- sur les méthodes de calcul des indicateurs : les logiciels utilisés (INDIGO®, EGES®) ne possèdent pas toujours des domaines de validité nécessaires aux innovations en travail réduit du sol. Un lien fort a été développé au cours de ce projet avec les programmeurs de ces logiciels pour intégrer ces nouveaux éléments.

- sur l'interprétation de ces performances : quels sont les liens entre les performances et les actes techniques mis en œuvre ? Comment évaluer leurs impacts à l'échelle d'un système ?

Les essais se poursuivent jusqu'en 2016 dans le cadre d'un projet financé par l'ONEMA pour l'appel d'offre ECOPHYTO EXPE – 2012 sous le nom de « PHYTO-SOL ».

En conclusion

Les activités menées dans ce projet ont été complémentaires. Elles ont permis de faire un état des lieux de l'existant chez les agriculteurs et d'évaluer ces techniques en expérimentations à l'échelle de la culture et de la rotation. Si les travaux à l'échelle de l'itinéraire technique ont dégagé des modes opératoires opérationnels et performants, les essais rotationnels sont encore en cours pour évaluer à plus long terme les performances et la pérennité des techniques culturales simplifiées. Au-delà des articles cités, ce projet a aussi mis l'accent sur le transfert et la communication en direct des acquis techniques auprès des agriculteurs, conseillers et étudiants avec plus de 120 interventions en salle ou au champ, soit plus de 6 200 personnes sensibilisées sur le sujet des TCS en 3 ans.

Remerciements aux agriculteurs enquêtés du réseau BASE et du club « Techniques de conservation des sols de Vivescia »

Références bibliographiques

- AGRESTE, Pratiques culturales 2006, <http://agreste.maapar.lbn.fr/ReportFolders/ReportFolders.aspx>
- Bockstaller C., Girardin P., Van der Werf H.G.M., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *European Journal of Agronomy* 7, 261–270.
- Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine. 2012. Programme d'étude sur sites bougies poreuses 2005-2011 : Impact de pratiques agricoles sur le transfert de produits phytosanitaires dans les eaux. Plaquette technique, avril 2012, 6p.
- Chapelle-Barry C. 2008. Dans le sillon du non-labour. *Agreste Primeur* 207, février 2008, 4 p.
- Chassot A., Stamp P., Richner W., 2001. Root distribution and morphology of maize seedlings as affected by tillage and fertilizer placement. *Plant and Soil* 231, 123-135.
- Denis M., 2012. 3 ans d'essais en Champagne-Ardenne : Les variétés de colza pas toutes égales face au semis direct. *Perspectives Agricoles*, juin 2012, 390, 19-20.
- Descorps C., Hébrard C., Rakotonindraina T., Dechamp-Guillaume G., Mestries E., Aubertot J.N., 2012. Advances in *Phoma macdonaldii* (*Leptosphaeria lindquistii*) epidemiology. In : Proc. 18th International Sunflower Conference ISA, February 27– March 1, Mar del Plata & Balcarce, Argentina, 199-204.
- Descorps C., 2011, Quantification de l'effet du travail du sol sur la quantité et les caractéristiques des résidus de tournesol, et la capacité du phoma du tournesol (*Leptosphaeria lindquistii*) à produire un inoculum primaire. Rapport d'études INRA. 143p.
- EGES - http://www.eges.arvalisinstitutduvegetal.fr/index.php#utm_source=ARVALISinfos&utm_medium=SITE&utm_content=EGES&utm_campaign=ARTICLE
- Labreuche J., Le Souder C., Castillon P., Ouvry J.F., Réal B., Germon J.C., de Tourdonnet S., 2007. Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturales Sans Labour (TCSL) en France. ADEME-ARVALIS Institut du végétal-INRA-APCA-AREAS-ITB-CETIOM-IFVV, 390p.
- Lançon J., Wery J., Rapidel B., Angokaye M., Gérardaux E., Gaborel C., Ballo D., Fadegnon B., 2007. An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 101-110.

- Landé N., 2012. Maîtrise de la réduction du travail du sol pour améliorer la durabilité des systèmes de culture - projet REDUSOL. Compte rendu final du projet CASDAR 8008. 62p.
- Landé N., 2011. Sustainability assessment of oilseed rape in reduced tillage cropping system in France. In : Proc 13th International Rapeseed Congress, GC IRC, June 5-9, Prague, Czech Republic, p 59.
- Landé N., Le Ny F., 2012. Davantage de réduction de charges en semis direct mais plus d'incertitudes. Perspectives Agricoles, juin 2012, 390, 14-18.
- Landé N., Sauzet G., 2012. Associer son colza à un couvert gélif : une technique à manier avec précaution. Perspectives Agricoles, juin 2012, 390, 54-58.
- Leclech N., 2012a. 6 ans d'essais en Lorraine : le semis direct sous couvert performant à condition d'adapter les intrants. Perspectives Agricoles, juin 2012, 390, 22-28.
- Leclech N., 2012b. Rapport de l'évaluation des performances de parcelles agricoles conduites en Techniques Culturelles Simplifiées sur 6 ans en Lorraine, <http://www.cra-lorraine.fr>.
- Leclech N., 2012c. Les impacts environnementaux des TCS en cours d'évaluation en Lorraine. Perspectives Agricoles, juin 2012, 390, 29-30.
- Le Ny F., 2010. Evaluation de la durabilité de systèmes de culture innovants vis-à-vis du travail du sol, Mémoire de fin d'études d'ingénieur, CETIOM, AgroCampus Ouest – Rennes, 54p + annexes.
- Locquet R., 2011. Evaluation des performances et de la durabilité de systèmes de culture en travail du sol réduit. Mémoire de fin d'études Master 2, CETIOM, Université de Picardie - Amiens, 55p + annexes.
- Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R, Messéan A., Doré T., 2009. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, DOI: 10.1051 /agro /2009006.
- Sauzet G., 2012. Le semis direct sous couvert temporaire : un système adapté à la culture du colza d'hiver. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, CETIOM, 118p + annexes.
- Vereijken P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming system. (IEAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy* 7, 235-250.