



HAL
open science

Stratégies de travail du sol économes en énergie dans les systèmes de culture en agriculture biologique : détection, élaboration, évaluation multicritères a priori

Mathilde Gerber

► To cite this version:

Mathilde Gerber. Stratégies de travail du sol économes en énergie dans les systèmes de culture en agriculture biologique : détection, élaboration, évaluation multicritères a priori. 2008. hal-02818626

HAL Id: hal-02818626

<https://hal.inrae.fr/hal-02818626v1>

Submitted on 6 Jun 2020

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.

Bourses d'expérimentation en Agriculture 2007-2008
Soutien du Conseil Régional de Lorraine



Stratégies de travail du sol économes en énergie
dans les systèmes de culture en agriculture
biologique : détection, élaboration, évaluation
multicritères *a priori*



Etude réalisée par Mathilde Gerber
Du 1^{er} novembre 2007 au 31 août 2008

Remerciements

L'heure est au bilan : je souhaite remercier tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette étude très enrichissante, tant sur le plan professionnel que personnel. En particulier :

Je remercie mes deux encadrants, Nadine Piboule du CGA de Lorraine pour son aide précieuse et sa sympathie et Xavier Coquil de l'INRA de Mirecourt pour son investissement, sa grande disponibilité et sa confiance, qui m'ont été indispensables pour mener à bien cette étude. Les diverses et précieuses recommandations m'ont été d'une grande utilité tout au long de cette étude. Merci également à la Région Lorraine d'avoir financé une partie de cette étude.

Je tiens particulièrement à remercier tous les agriculteurs que j'ai rencontré au cours de cette étude pour m'avoir accueilli chez eux, accordé de leurs temps si précieux et m'avoir tant appris : en Lorraine, Jacqueline et Bernard Hypolite, Michèle et Léopold Derr, Philippe Henri et Claude Choux ; hors région, Thierry Bonnier, Nicolas Supiot, Gérard Michaut, Dominique et Michel Jacquin, Gilles Billon, François Rigondet, Jean-Pierre Donnet, les membres du GAEC des Tours, Eric Petit, Henri Doublier, Christian Pierre et Manfred Wenz.

Un grand merci à tous les membres du groupe d'experts, Damien Foissy, de l'INRA de Mirecourt, pour ses nombreuses explications concernant différentes notions agronomiques et sa rigueur scientifique ; Emmanuel Hance et Richard Cherrier de la Chambre d'Agriculture de Lorraine, Yves Messmer d'ARVALIS, Jacques Delatte, agriculteur lorrain, pour m'avoir accordé de leurs temps, pour leurs conseils et pour les échanges d'expériences que nous avons pu avoir ; Joséphine Peigné de l'ISARA pour sa diligence face à mes interrogations, sa grande disponibilité et nos nombreux échanges. Merci également à André Blouet de l'INRA de Mirecourt pour son aide et sa pédagogie qui m'ont permis d'avancer au cours de cette étude.

Merci à tous les membres du groupe « Système de Culture » de l'INRA de Mirecourt, notamment Claude Bazard et Régis Thiery pour avoir su me guider dans mon étude mais aussi pour toutes ces discussions très riches. Je tiens également à remercier Claire Thierry pour l'invitation à différents travaux pratiques qui m'ont permis d'en apprendre beaucoup.

Je remercie également toutes les personnes que j'ai pu contacter lors de ce stage afin d'obtenir des informations concernant les agriculteurs, des articles, de l'aide face aux modèles utilisés et particulièrement Nathalie Colbach et Yann Tricault de l'INRA de Dijon que j'ai sollicité à plusieurs reprises et qui ont toujours répondu présents.

J'adresse mes remerciements à Catherine Mignolet pour m'avoir accueilli au sein de l'INRA de Mirecourt et pour m'avoir permis de réaliser cette étude dans les meilleures conditions. Enfin, je souhaite remercier toute l'équipe travaillant au sein de l'unité INRA de Mirecourt pour leur sympathie.

Sommaire

I. Introduction	1
1. Identification des marges de progrès intéressantes sur le plan énergétique en AB	1
2. L'intérêt agronomique des techniques sans labour en agriculture biologique	1
a. Les techniques sans labour (TSL) : intérêts agronomiques généraux	1
b. Les TSL en agriculture biologique	3
3. Les objectifs de l'étude	4
II. Matériels et méthodes	5
1. Les enquêtes	5
a. L'échantillonnage	5
b. L'entretien semi-directif enregistré	5
2. La construction de la typologie	5
3. La conception de stratégies, de RdD et évaluation <i>a priori</i> à l'aide de modèles	5
4. L'évaluation <i>a posteriori</i> de différentes modalités de travail du sol et les propositions de règles de décisions	6
III. Résultats	7
1. Description succincte des exploitations enquêtées	7
2. Construction de la typologie	7
3. Conception de stratégies et de RdD	8
a. Elaboration des stratégies à l'aide d'un groupe d'experts	8
b. Elaboration de règles de décisions	9
5. L'évaluation <i>a priori</i> des stratégies	11
a. Effet des pratiques agricoles sur les populations de vulpins des champs	11
b. Comparaison multicritères des stratégies de travail du sol	12
c. Proposition de règles de décision	13
IV. Discussion	14
1. Des enquêtes brossant une diversité de stratégies de travail du sol innovantes	14
2. Des stratégies et des règles de décision établies sur la base des connaissances expertes	14
3. Des modèles ne permettant pas d'évaluer la variété de stratégies de travail du sol conçus	15
4. La qualité des simulations	15
V. Conclusion	17
Bibliographie	18
Annexes	20

Tableau n°1 : Consommation moyenne d'énergie en grandes cultures (Bochu *et al.*, 2008)

	Agriculture biologique	Agriculture conventionnelle
Nb d'exploitations	13	70
SAU moyenne	63	129
EQF/ha SAU	300	499
EQF/tMS	91	102
% fioul	43 %	22 %
% électricité	21 %	10 %
% aliments	0 %	0 %
% fertilisation	6 %	46 %
% matériel	11 %	9 %
Teq CO2/ha SAU	1,46	3,66
TeqCO2/tMS	0,44	0,74
% CO2	71 %	64 %
% N2O	29 %	36 %

Tableau n°2 : Ventilation des consommations de carburant par opération pour les cultures annuelles, estimation SOLAGRO d'après la bibliographie disponible sur carburants et ITK, Bochu *et al.*, 2005

Litres/ha	Labour	TSL	SD
Déchaumages	10	10	5
Labour	25	0	0
Préparations + semis	20	15	8
Fertilisation + Traitements	15	17	17
Récolte + transport	30	30	30
Cumul carburant/ha	100	72	60

I. Introduction

1. Identification des marges de progrès intéressantes sur le plan énergétique en AB

La diminution des ressources pétrolières et le changement climatique imposent de se poser les questions d'économies d'énergie et de diminution des émissions de gaz à effet de serre. D'une manière générale, la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par hectare sont en moyenne moins importantes en agriculture biologique qu'en agriculture conventionnelle (Wechselberger *et al.*, 1999 ; Rissoud et Bochu, 2002). Ces différences s'expliquent par la moindre intensivité des techniques en AB, l'absence de recours aux intrants de synthèse (engrais minéraux et produits phytosanitaires) consommateurs d'énergie et une plus grande autonomie alimentaire des systèmes d'élevage. Cependant, il faut noter une grande variabilité de la consommation qui dépend principalement du type de productions (Bochu *et al.*, 2008).

Lorsque l'on s'intéresse aux grandes cultures (GC), l'efficacité énergétique est la même qu'en agriculture conventionnelle, mais la consommation énergétique par unité de surface est moindre. La consommation d'énergie des exploitations en grandes cultures AB s'élève en moyenne à 300 EQF/ha SAU et 91 EQF par tonne de matière sèche vendue. Le principal poste de consommation d'énergie est le fioul carburant devant l'électricité (pour ceux qui irriguent) et l'amortissement énergétique du matériel. En grandes cultures conventionnelles, la fertilisation est le premier poste de consommation d'énergie devant le carburant et l'amortissement du matériel (tableau n°1). Les émissions de gaz à effet de serre sont plus importantes dans ces systèmes. Kustermann *et al.* (2008) expliquent cette différence par l'élaboration des produits phytosanitaires et de l'azote minéral. Les systèmes de cultures biologiques présentent ainsi des marges de progrès qui portent sur la consommation de carburant.

Ainsi, nous intéressés aux consommations d'énergie directe, nous souhaitons identifier les pertes les plus coûteuses dans l'itinéraire technique (ITK). D'après des études menées par Bochu *et al.* (2005), la consommation de carburant pour une culture de céréales conventionnelle est d'environ 80-90 litres/ha (l/ha) récolte comprise se répartissant de la façon suivante : 25 l/ha (20 à 30) pour le labour, 35 l/ha pour les autres opérations culturales (déchaumage, semis, fertilisation, traitements phytosanitaires...) et 20-30 l/ha pour la récolte (moissonneuse batteuse + paille). Le labour est donc une des principales opérations de travail du sol consommatrice de carburant. Les modalités de travail du sol simplifiées engendrent des économies de carburants plus ou moins fortes, (i) de l'ordre de 30% en techniques sans labour (TSL), soit une consommation moyenne de l'ITK d'environ 70 l/ha et (ii) de l'ordre de 50 % en semis direct ou semis sous couvert, soit une consommation de carburant d'environ 30-50 l/ha, la principale opération restante étant la récolte (tableau n°2). Ces valeurs indicatives sont sujettes à de fortes variations selon les sols, les cultures, les choix de machines et l'état des parcelles. Ces consommations ont été retenues à partir d'une compilation des exemples de consommations des ITK et de la bibliographie. Elles sont établies plutôt pour des rotations céréalières, et tiennent compte des différences de pratiques culturales entre labour et non-labour.

Somme toute, le labour semble être un poste très coûteux : par sa suppression une marge de progrès potentielle apparaît pour l'amélioration du bilan énergétique des systèmes de cultures biologiques.

2. L'intérêt agronomique des techniques sans labour en agriculture biologique

a. Les techniques sans labour (TSL) : intérêts agronomiques généraux

Les différentes techniques de travail du sol ont largement été étudiées ces dernières années, majoritairement en agriculture conventionnelle en raison des spécificités des modes de production en agriculture biologique.

Impacts des TSL sur les propriétés du sol

Les différentes modalités de travail du sol entraînent des modifications au niveau des propriétés physiques des sols qui vont se répercuter sur leur fertilité. Concernant la stabilité structurale, désignant la cohésion des agrégats d'un sol et sa résistance à l'effet désagrégant de la pluie, elle est liée à la texture du sol et à sa teneur en matière organique. La matière organique se compose d'êtres vivants en décomposition, de colloïdes (MO très fine et stable) et d'une partie soluble. Les TSL conduisent à une accumulation de la matière organique à la surface du sol, donc à une amélioration de la stabilité structurale dans cette couche supérieure (Rasmussen, 1999).

L'augmentation de la teneur en matière organique du sol provoque ainsi une diminution de la densité apparente, une augmentation de la rétention en eau, de la capacité d'échange cationique et de la stabilité

des agrégats (Chenu, 2000). Néanmoins, au printemps, le réchauffement est plus lent et les échanges gazeux sont limités. L'activité microbienne est alors modifiée, la minéralisation ralentie, ce qui se traduit par une augmentation du stock d'azote potentiellement minéralisable (Le Souder *et al.*, 2007). Au final, les quantités d'azote minéral libérées entre labour et non-labour sont équivalentes. De son côté, le stock de carbone a tendance à augmenter dans les systèmes en non-labour (Rasmussen, 1999), mais cette augmentation n'est pas continue : chaque système atteint un équilibre, avec un stock de carbone plus important en TSL qu'en labour (West et Post, 2002). Le phosphore et le potassium sont peu mobiles dans le sol et se fixent à la matière organique. L'accumulation de la matière organique dans les horizons de surface en TSL entraîne une accumulation de ces éléments nutritifs en surface, ce qui augmente potentiellement le risque de ruissellement (Vuilloud *et al.*, 2006). Toutefois, la présence des résidus de cultures en surface assure une couverture du sol qui atténue l'impact des gouttes de pluie et protège le sol de l'érosion hydrique (Labreuche *et al.*, 2007).

Concernant le pH, les TSL conduisent à une acidification des horizons de surface, du fait de la quantité importante d'acides humiques libérés lors de la dégradation de la matière organique (Arshad, 1999). Une diminution du pH de plus de 0,5 peut être observée sur des essais de longues durées (6-8 ans) (Rasmussen, 1999). L'amendement calcaire serait donc nécessaire en TSL. Malgré l'effet bénéfique des TSL sur les propriétés physiques du sol, elles peuvent entraîner un nombre de passages d'outils de travail du sol plus important, ce qui peut induire des phénomènes de tassement et une mauvaise infiltration. Dans ce sens, des travaux ont démontrés une augmentation de la densité apparente en TSL du à l'intensité du nombre de passages, notamment en sol limoneux (Rasmussen, 1999).

Le travail du sol, notamment le retournement, modifie les propriétés physiques et nutritionnelles des habitats des lombrics (destruction des galeries, changement de température et d'humidité, incorporation et dilution de la matière organique). Des travaux ont démontrés l'augmentation du nombre de vers de terre sous un travail réduit et superficiel (Rasmussen, 1999; Tebrügge et Düring, 1999). De plus, d'autres pratiques peuvent influencer le développement de vers de terre : les apports d'amendements organiques et l'implantation d'intercultures les favorisent alors que l'application de produits phytosanitaires et la compaction du sol par les engins les perturbent (Cluzeau *et al.*, 2001). Les lombriciens ont un rôle très important dans le sol : tout d'abord, leur activité a un impact sur la teneur et la distribution du carbone organique dans le sol ce qui permet de réguler l'activité microbienne et d'agir sur le cycle des éléments minéraux en augmentant la biodisponibilité de l'azote et du phosphore (Peres, 2003). De plus, par la création de galeries, ils ont un rôle sur le transfert de l'eau et de l'air dans le profil, ainsi que sur la densité du sol. Enfin, leurs galeries permettent aux plantes un meilleur enracinement. Les lombriciens sont ainsi considérés comme de bons indicateurs de la composante biologique du sol pour leur sensibilité et réactivité aux contraintes physiques, chimiques et biologiques (Peres, 2003).

Les quantités de microorganismes du sol varient sous l'effet des modifications du milieu (Diosma *et al.*, 2006). En effet, en situation de non labour, les microorganismes se concentrent en surface à proximité de la matière organique, leur principale source trophique. En labour, l'activité microbienne est diluée sur toute la couche travaillée. Ainsi, Piovaneli *et al.* (2006), émettent l'hypothèse que la stratification de l'activité et de la biomasse microbienne est liée à la stratification du carbone dans le profil. Les microorganismes permettent de dégrader les substrats et de mettre à disposition des plantes des éléments nutritifs. Ainsi, leur quantification permet une bonne mesure de la dynamique des nutriments dans le sol (Nannipieri *et al.*, 2003).

Impacts des TSL sur les cultures

Le travail du sol à une forte incidence sur la répartition des graines d'adventices dans le profil. Le labour, du fait de l'enfouissement des graines en profondeur, constitue une lutte mécanique préventive contre les mauvaises herbes (Jouy et Munier-Jolain, 2001 ; Marmarot, 2004). Ainsi, la quantité de graines ayant la capacité de germer est plus importante en TSL, ce qui augmente le potentiel de levée des adventives. Des travaux ont démontré que le stock semencier des espèces à graine de faible longévité et de courte dormance est augmenté par le non-labour à cause de l'absence de l'enfouissement. Par contre, celui des dicotylédones annuelles diminue progressivement avec le travail superficiel (Jouy et Munier-Jolain, 2001). Une baisse du stock semencier et de l'état de salissement est possible en TSL sous certaines conditions : par exemple, le mulch de surface peut limiter la germination des adventices en limitant la lumière ou en ayant un pouvoir allélopathique (Marmarot *et al.*, 2004). Plusieurs essais longue durée (Changins depuis 1969, Arvalis depuis 1970) mettent en évidence l'absence de différence de rendement entre labour et TSL lorsque les adventices sont maîtrisées (Labreuche *et al.*, 2004 ; Vuilloud et Mercier, 2004).

Tableau n°3 : Synthèse des points faibles et des points forts obtenus en grandes cultures dans le cadre du projet ADAR « optimisation du travail du sol en AB » (ITAB, 2007)

Modalités	Points faibles	Points forts
Labour « traditionnel »	Moins de lombriciens dus aux outils ; Dilution de la MO dans les 30 cm : visible dès la première année	Bonne gestion de l'enherbement ; meilleure structure du sol en profondeur, due au travail mécanique. Meilleure exploration racinaire, mais pas de différence de profondeur d'enracinement
Labour « agronomique »	Moins de lombriciens, dus aux outils	Meilleur compromis entre travail mécanique (gestion de l'enherbement, structure du sol) et dilution de la MO (seulement sur 20 cm)
Travail superficiel	Enherbement sur le site en Rhône-Alpes (mais moins important qu'en travail très superficiel)	Bon compromis entre préservation de la structure du sol (création d'une porosité par les dents) et préservation d'un gradient de MO (+ concentré en surface)
Travail très superficiel ou semis direct	Gestion difficile des vivaces, enherbement difficile à gérer ; légère reprise en masse non compensée par la vie du sol (racines, lombriciens)	Temps de travail diminué, meilleure infiltration de l'eau en surface et moins de battance sur le site breton, meilleure stabilité structurale sur le site angevin ; plus de lombriciens dus à la faible perturbation du sol les résidus et la couverture végétale en surface.

b. Les TSL en agriculture biologique

✚ Etat des lieux des connaissances sur l'utilisation des TSL en AB

La réduction du travail du sol en agriculture biologique est une thématique étudiée au niveau international. Globalement, les travaux sur les TSL en agriculture biologique présentent les mêmes résultats que ceux obtenus en conventionnel (Kouwenhoven *et al.*, 2002, Peigné, 2007). Emmerling, 2007, a étudié 3 modalités de travail du sol en AB (labour traditionnel, labour agronomique et travail superficiel) et a démontré que le travail du sol superficiel améliore (i) le taux d'humus de l'ensemble du profil, (ii) la densité et l'activité des vers de terre, mais les rendements sont légèrement inférieurs en raison de la concurrence des adventices (Emmerling, 2007). Des études américaines (Teasdale *et al.*, 2007) ont été réalisées afin de comparer les performances des systèmes conventionnels et biologiques dans des sols où la réduction du travail du sol est recommandée (sols sensibles à l'érosion). De 1992 à 2002, 4 modalités de non travail du sol ont été suivies sur des cultures de maïs, de soja et de blé : (i) un système conventionnel standard (CC), (ii) un système conventionnel avec mise en place de couverts végétaux (vesce avant le maïs, seigle avant le soja) et apports d'intrants limité (NT), (iii) un système de semis direct sous couvert vivant de Coronille bigarrée (légumineuse pérenne) avec apports d'herbicides et d'azote (CV) et (iv) un système biologique avec travail superficiel, implantation de couverts végétaux, apport de compost et désherbage mécanique (OR). Les résultats ont aboutis à diverses conclusions : (i) en année sèche, CV et OR ne sont pas convaincants car la compétition entre le maïs et les adventices ou le couvert de Coronille bigarrée est trop importante ; (ii) OR et CV ont des rendements moyens de maïs inférieur à CC et NT (respectivement de 28 et 12%) ; (iii) En 9 ans d'expérimentation, les rendements n'ont pas évolué en CC et NT, contrairement à ceux de OR et CV, qui ont augmenté de 18 à 19 %. De plus, des études réalisées entre 2003 et 2005 ont démontrés que, sans apport extérieur d'azote, la disponibilité en azote du sol pour la plante est plus importante en OR et CV que dans NT. A long terme, le système conduit en agriculture biologique, avec travail superficiel et maîtrise des adventices, préserve le mieux la fertilité du sol comparé au système conventionnel. Munkholm *et al.* (2001), pensent qu'à long terme, les conséquences du travail réduit en agriculture biologique seront plus avantageuse qu'en conventionnel en raison de l'effet conjoint rotation-matière organique-non labour. En effet, l'apport de matière organique plus important en AB et l'utilisation des rotations (alternance culture d'hiver/de printemps, cultures sarclées/non sarclées, céréales/légumineuses, mise en place d'interculture...) ont un effet non négligeable sur la qualité des sols ainsi que sur la gestion des adventices, qui reste l'enjeu principal. D'autres solutions, telles que les stratégies de désherbage mécanique, peuvent permettre de remédier en partie à ce problème (Peigné *et al.*, 2005). Cependant, cela induit un nombre de passages important, qui peut provoquer un tassement du sol et augmenter le coût énergétique. Le travail du sol n'est donc pas le seul déterminant pour la préservation de la fertilité des sols. La réussite des TSL dépend de différents facteurs, notamment des conditions d'implantation des cultures (préparation du lit de semences, stabilité structurale, résidus en surface n'entravant pas le contact sol/graine, absence d'adventices, bonne infiltration de l'eau) (Vulloud *et al.*, 2004). Marmarot (2004) constate que le salissement est plus lié à la stratégie générale de désherbage qu'à la modalité de travail du sol. Aucune étude n'a été entreprise sur l'évaluation globale des itinéraires techniques de travail du sol et la maîtrise des adventices en terme d'impact sur la qualité du sol (Peigné, 2007).

✚ Etudes mises en place à l'échelle française

Différentes structures réalisent des expérimentations en grandes cultures en agriculture biologique : plusieurs thèmes y sont abordés tels que l'impact des rotations et du travail du sol sur la gestion de l'enherbement, la sélection des variétés,... La CREAB (Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées) réalise par exemple des expérimentations en grandes cultures depuis quatre ans. Celles-ci ont pour objectifs de déterminer quelles sont les variétés de céréales et oléo-protéagineux adaptées aux conditions climatiques du Sud-Ouest et d'étudier les impacts des itinéraires techniques (engrais verts, rotations) sur la qualité des produits et sur la fertilisation des cultures (disponibilité en azote). Concernant le travail du sol, un projet national nommé « Optimisation du travail du sol en agriculture biologique » a été réalisé au cours des années 2005 et 2006. Ce projet consistait à étudier les effets d'itinéraires techniques de travail du sol sur la qualité du sol, la maîtrise des adventices et le rendement des cultures. Quatre modalités de travail du sol ont été étudiées sur trois sites différents (Bretagne, Isara Lyon et Esa Angers) : le labour traditionnel, le labour agronomique, le travail superficiel et le travail très superficiel (tableau n°3). Le travail superficiel à 15 cm présente les mêmes avantages agronomiques et environnementaux que le travail très superficiel avec cependant moins de problèmes de salissement. La modalité « travail du sol très superficiel » devait au départ consister à un semis sous couvert vivant, présentant de nombreux avantages supplémentaires (sol couvert, population lombricienne importante, racines structurantes) (Peigné *et al.*, 2008). Cependant, la mise en place a jusqu'à présent aboutit à des situations d'échecs. L'enjeu majeur est donc de savoir si cette technique est réalisable en AB, c'est pourquoi des essais se poursuivent afin de déterminer les conditions de réussite de cette technique.

3. Les objectifs de l'étude

La simplification du travail du sol suscite actuellement un intérêt grandissant auprès des agriculteurs biologiques (Calderan et Delaunois, 2006 ; Peigné et Gautronneau, 2007). En effet, ces derniers sont sensibles aux techniques sans labour pour des raisons agronomiques et environnementales, comme la limitation de la consommation énergétique dans une perspective de développement durable. L'utilisation de stratégies de travail du sol sans labour semble bénéfique pour la fertilité des sols ainsi que pour la qualité de l'air (séquestration du carbone). De plus, le cahier des charges de l'AB interdisant l'utilisation de produits phytosanitaires et d'engrais minéraux, les effets néfastes sur la qualité de l'eau et la consommation indirecte d'énergie fossile sont écartés. Ainsi, nous faisons l'hypothèse que l'utilisation de TSL en AB permettra de diminuer la dépense énergétique des systèmes de culture. Cependant, la gestion des adventices reste une problématique centrale. Le labour, technique de travail du sol coûteuse en énergie, semble le moyen le plus efficace de lutte contre les adventices. La substitution de ce travail par les TSL pourrait entraîner un nombre important de passages d'outils à dents, dont l'unité n'est pas coûteuse en énergie, mais qui entraînerait (i) une stratégie de travail du sol peu, voir pas, économe en énergie au pas de temps du système de culture et (ii) un tassement superficiel du sol en raison de la multiplication du nombre de passages d'engins. Ainsi, cette étude a pour objectif de concevoir et d'évaluer des stratégies de travail du sol d'un point de vue multicritères afin de déterminer si l'économie d'énergie en AB est conciliable avec la gestion des adventices et la préservation de la fertilité et de la stabilité structurale des sols.

Cette étude s'est déroulée en plusieurs étapes :

- (1) Avant de concevoir des stratégies de travail du sol potentiellement économes en énergie, il a été important de connaître les pratiques mises en œuvre par les agriculteurs, ayant innovés en ce sens. En effet, selon Girard (2006), il est nécessaire d'avoir une vision de « ce qui est » avant de concevoir « ce qui pourrait être ». La première étape a donc consisté à détecter la diversité des pratiques agricoles économes en énergie par le biais d'enquêtes chez les agriculteurs reconnus comme innovants sur ce plan et d'étudier ces pratiques en ayant une entrée ciblée sur le travail du sol.
- (2) Ces pratiques ont ensuite été typées, c'est-à-dire catégorisées afin d'obtenir une typologie « située », permettant de répondre à une question de développement (Girard, 2004). Celle-ci a consisté à définir un certain nombre de types afin de faciliter l'analyse, la classification et l'étude de réalités complexes (Perrot, 1990).
- (3) L'objectif de cette typologie a été d'établir, à partir d'objectifs préalablement définis (limitation de la consommation énergétique, de la banque d'adventices et du tassement du sol), différentes stratégies à évaluer *a priori* dans les conditions pédo-climatiques lorraines. Cette étape a été réalisée de manière participative, à l'aide d'un groupe d'experts.
- (4) Les stratégies établies ont été classées et sélectionnées sur la base d'une évaluation et *a priori* (gestion des adventices, stabilité structurale, consommation énergétique) à l'aide de modèles existants. La suite du travail consistera à tester, sur le dispositif de l'installation expérimentale de l'INRA de Mirecourt, trois stratégies de travail du sol satisfaisantes et retenues sur la base de l'évaluation *a priori*.

Les rotations : règles permettant d'établir cette rotation

Le matériel : condition d'utilisation, modifications particulières

Les itinéraires techniques : description des opérations de travail du sol en fonction des conditions pédo-climatiques, semis (date d'implantation et variétés utilisées), fertilisation, rendements

La gestion des adventices : caractéristiques, problème de lutte, remarque sur l'augmentation ou la diminution suite à un travail du sol

Encadré n°1 : Liste des thèmes à aborder au cours des enquêtes concernant les pratiques de travail du sol des agriculteurs rencontrés

II. Matériels et méthodes

1. Les enquêtes :

a. L'échantillonnage

Le premier objectif de cette étude a été d'obtenir une liste exhaustive d'agriculteurs répondant respectivement à trois critères : *(i)* pratique de l'agriculture biologique, *(ii)* exploitations céréalières et *(iii)* utilisation de pratiques innovantes de travail du sol à l'échelle de leur exploitation (TSL, semis direct sous couvert vivant,...). Il aurait pu être intéressant de rencontrer des agriculteurs ayant arrêté l'agriculture biologique ou ces pratiques innovantes en raison de problèmes rencontrés au niveau de leur Système de Culture (gestion des adventices, structure du sol, travail du sol trop gourmand en énergie...). La recherche s'est faite à l'aide de différents réseaux et organismes professionnels agricoles (Chambre d'Agriculture, GRAB,...) et selon la méthode « boule de neige » (Miles et Huberman, 2003), qui consiste à trouver un premier informateur répondant aux critères de sélection exigés et capable de désigner d'autres interlocuteurs répondant aux mêmes critères. Pour pallier à l'éventualité d'obtenir un échantillon interrogé homogène, le besoin de rencontrer un panel varié de stratégies de travail du sol a été précisé à l'informateur. Nous nous sommes restreint à la moitié Nord de la France, où les méthodes curatives de gestion des adventices (désherbage mécanique) sont plus difficiles à mettre en œuvre dans les systèmes de culture céréalières en raison des conditions climatiques.

b. L'entretien semi-directif enregistré

Il a permis d'aborder les pratiques des agriculteurs en évitant de trop les guider dans leurs réponses. Une question principale a été posée : « pouvez vous me décrire vos pratiques et outils de travail du sol à l'échelle d'une rotation ? ». Les agriculteurs ont construit alors leurs discours suivant leurs logiques. Une liste de thèmes à aborder au cours des enquêtes, concernant les pratiques de travail du sol, a permis toutefois de recadrer la discussion et d'obtenir un minimum d'informations comparables pour l'ensemble de l'échantillon (encadré n°1). Le guide d'entretien a été constitué de plusieurs parties : *(i)* une fiche de renseignement pour recenser les informations générales des exploitations (SAU, assolement, main d'œuvre), *(ii)* une liste de thèmes à aborder concernant les pratiques et les outils de travail du sol, et *(iii)* des questions ouvertes sur les problèmes rencontrés par les agriculteurs et sur leurs attentes. Chaque entretien, d'une durée moyenne de 3h (de 2 à 4h) a été enregistré afin de pouvoir assurer le guidage de l'entretien tout en s'assurant une collecte efficace et exhaustive des informations. Ces enregistrements n'ont pas donné lieu à une retranscription intégrale, car il ne s'agissait pas d'analyser le discours des agriculteurs mais plutôt de pouvoir caractériser leurs pratiques et les justifications de ces pratiques, en respectant leurs manières de s'exprimer.

2. La construction de la typologie

Une fiche de synthèse par agriculteur, explicitant ses pratiques et les justifications, a été extraite des enregistrements. Ces fiches constituent un matériau très riche, dont la lecture au cas par cas est assez aisée, mais dont il est difficile d'avoir une lecture transversale : ainsi nous avons réalisé une typologie des agriculteurs enquêtés sur la base des pratiques qu'ils mettent en œuvre. Selon Girard, (2004), cette phase est composée de deux étapes : *(i)* la formalisation d'attributs, c'est-à-dire de critères de diversité et *(ii)* leurs croisements pour définir des types. Les critères de diversité ont rendu compte des différentes modalités de pratiques mises en œuvre par les agriculteurs de l'échantillon selon un « axe de référence », soit un thème sur lesquelles portaient ces pratiques. Nous avons inscrit les différentes modalités entre deux attitudes extrêmes, révélatrices de deux logiques opposées. Nous avons ensuite croisé les critères de diversité pour examiner les cas proches et en extraire une description de types. Ces deux étapes ont été très itératives car la formalisation des axes n'a pu émerger que progressivement, dans un aller-retour entre les cas et la formalisation réalisée. Le processus de formalisation ne s'est arrêté que lorsque *(i)* les attributs définis et leurs modalités ont permis de décrire les traits marquants de chaque cas et *(ii)* les types construits comme combinaison de ces attributs ont été pertinents par rapport au problème posé.

3. La conception de stratégies, de RdD et évaluation *a priori* à l'aide de modèles

Un groupe de travail, constitué majoritairement d'experts lorrains spécialisés dans le travail du sol, a été mis en place afin *(i)* de discuter des différentes pratiques, outils et types de stratégies de travail du sol rencontrés et obtenus à partir des enquêtes et *(ii)* de concevoir des stratégies à évaluer *a priori*. L'évaluation *a priori* des stratégies assistée par modèle nécessite de définir les conditions pratiques de leur mise en œuvre (calendrier...). Cette étape a été réalisée en interaction avec les membres du groupe « Système de Culture » (SdC) de l'installation expérimentale de l'INRA de Mirecourt en définissant les conditions pratiques

de mise en œuvre de ces stratégies en fonction des conditions du milieu. Cette consultation a eu pour objectif de définir les règles d'utilisation des différents outils de travail du sol. L'évaluation a été réalisée en ayant recours au modèle Alomysys et des bases de données recensant les consommations énergétiques des opérations de travail du sol, en fonction des outils et de la puissance de traction. ALOMYSYS, développé par l'UMR BGA de Dijon (Colbach *et al.*, 2007), quantifie les effets des systèmes de culture sur le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides* Huds.), adventice fréquente et nuisible dans les systèmes de cultures. Ce modèle utilise en entrée la succession des cultures et les techniques culturales (dates, outils et profondeurs de travail du sol ; date et densité de semis ; fertilisation azotée, dates des brûlis, broyages et récolte). Il est couplé avec le modèle STICS qui détermine l'humidité et la température du sol à partir des données météorologiques de l'air et de l'ITK de la parcelle. Pour notre étude, nous avons utilisé les données météorologiques collectées sur la station de Mirecourt de 1995 à 2007, car elles présentaient de fortes variations d'une année à l'autre, ce qui a été intéressant pour tester la pertinence interannuelle des stratégies de travail du sol. Alomysys prédit, au pas de temps journalier, le nombre (*i*) de plantules de vulpins des champs levées, (*ii*) de plantes matures, (*iii*) d'épis, ainsi que la production de semences et le stock de semences viables dans le sol pour des conditions pédo-climatiques choisies. Ce modèle, couplé également avec SISOL (modèle de simulation de l'évolution du tassement du sol au sein des horizons travaillés, Roger-Estrade *et al.*, 2004), permet d'obtenir des sorties sur la structure du sol (degré de tassement de la parcelle). L'utilisation des bases de données de consommation énergétique a permis d'évaluer la consommation énergétique à l'échelle de la rotation. La base de données de l'INRA de Mirecourt a été mise à jour et validée avant d'être utilisée au cours de l'étude. Si les références d'un outil n'étaient pas disponibles dans cette base de données, nous avons eu recours à des données provenant de la base de données Simeq créée par Arvalis Institut du Végétal.

4. L'évaluation *a posteriori* de différentes modalités de travail du sol et les propositions de règles de décisions

Sur l'Installation expérimentale de l'INRA de Mirecourt, un essai analytique « travail du sol » a été mis en place depuis 2005 en collaboration avec la Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine (CRAL). Plusieurs stratégies de travail du sol sont comparées sur une même rotation : labour systématique, non labour systématique et permaculture. L'évaluation de ces stratégies, en place depuis 2005, a été amendée, au cours de ce travail, par l'évaluation de nouveaux critères tels que la population de lombrics, le tassement du sol, afin de compléter l'évaluation multicritères. Les trois stratégies comparées depuis 2005 seront modifiées et redéfinies de manière plus précise sur la base des stratégies testées *a priori* à l'aide de modèles. Ainsi, trois stratégies de travail du sol reconnues comme intéressantes du point de vue de la consommation énergétique, de la gestion des adventices et de la préservation de la structure du sol, seront comparées.

Tableau n°4 : Présentation des critères de diversité et de leurs modalités, rencontrés au cours des enquêtes et retenus dans le cadre de l'étude afin d'établir une typologie des pratiques de travail du sol.

critères de diversité	Diversité des modalités rencontrées au cours des enquêtes
gestion de la rotation	Tête de rotation pluriannuelle (trèfle ou luzerne), 90% cultures d'hiver, rotation longue (12ans) Tête de rotation pluriannuelle (trèfle ou luzerne), alternance culture de printemps/culture d'hiver, rotation de 6-9 ans Pas de rotation type, légumineuse ou colza devant blé, 2 ans de céréales, la suite selon la conjoncture Pas de tête de rotation pluriannuelle, alternance systématique culture de printemps/culture d'hiver pas de tête de rotation pluriannuelle, récolte d'1 culture par an, rotation courte
Mise en place de couverts végétaux durant l'interculture	Aucune interculture : les sols sont laissés à nu Repousses des cultures laissées après déchaumage Implantation systématique d'un couvert devant toutes les cultures de printemps Implantation systématique d'un couvert devant toutes les cultures d'hiver et de printemps Couvert végétal permanent
fréquence de travail du sol	Tous les 7-10 jours pendant l'interculture Toutes les 3 semaines pendant l'interculture Après récolte et pour la destruction de couvert Pas de travail du sol
intensité de travail du sol	Labour (charrue ou charrue déchaumeuse) : travail > 15 cm Travail superficiel >10 cm (actisol) Travail superficiel de 5 à 10 cm (néo-déchaumeur ou néo-cultivateur) Travail très superficiel à 4 cm (ecodyn, cultivateur) Semis direct
désherbage mécanique	Herse étrille+houe rotative+bineuse Herse étrille+bineuse Herse étrille Pas de désherbage mécanique
fertilisation	Compost de déchets verts (10-12 t tous les 3 ans) Compost de fumier de bovins (15 t tous les 3-4 ans sur 1 ou 2 types de culture) Farine de viande (1t) ou compost de fiente de volaille (2,5 t) sur 1 ou 2 types de cultures Pas d'apport extérieur (couverts végétaux ou tête de rotation (trèfle ou luzerne) restitués au sol)

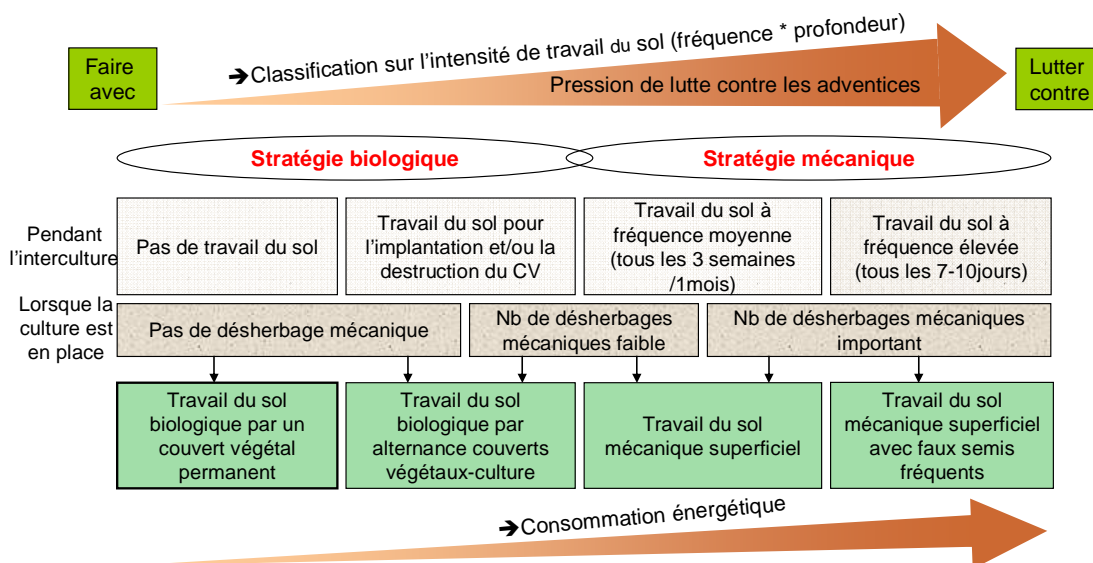


Figure n°1 : Diversité des stratégies de travail du sol rencontrées, classées en fonction de la relation des agriculteurs enquêtés aux adventices

III. Résultats

1. Description succincte des exploitations enquêtées

Au total nous avons rencontré douze agriculteurs provenant de la moitié Nord de la France. Les agriculteurs biologiques recourant aux techniques sans labour à l'échelle de l'ensemble de leurs exploitations sont peu nombreux. Un agriculteur pratiquait le labour de façon systématique, trois de façon ponctuelle. La majorité des agriculteurs rencontrés pratiquaient les TSL, deux agriculteurs pratiquaient le semis sous couvert vivant à l'échelle de leurs exploitations et trois autres réalisaient des essais (annexe n°1).

2. Construction de la typologie

A l'issue des enquêtes, les stratégies de travail du sol rencontrées ont été caractérisées selon un certain nombre de critères : gestion de la rotation, mise en place de couverts végétaux, fréquence de travail du sol, intensité de travail du sol, désherbage mécanique et fertilisation. Ces critères de diversité ont été essentiels à la réalisation de la typologie (tableau n°4). Par allègement, nous avons classé les stratégies de travail du sol rencontrées selon l'intensité de travail du sol pendant l'interculture et pendant la culture (figure n°1). L'intensité de travail du sol caractérise le couple « fréquence de passage d'outil x profondeur de travail de l'outil ». Dans le discours, l'intensité de travail du sol a été très clairement liée à la perception qu'avaient les agriculteurs de la présence d'adventices dans leurs parcelles de cultures, certains acceptant de « faire avec » ces adventices, d'autres souhaitant « lutter contre » afin de les éliminer.

D'un point de vue énergétique, le gradient de travail du sol ainsi dressé correspond à une variation de consommation de fioul croissant de 50 à 150 l de fuel/ha de SAU/an, récolte comprise. Bien sûr, l'intensité de travail du sol n'est certainement pas le seul facteur expliquant ces différences de consommations aux regards de la diversité des conditions de milieu et des systèmes de cultures en place chez les agriculteurs enquêtés. Les rendements sont très hétérogènes d'un agriculteur à l'autre, ceux-ci ne dépendent pas uniquement des pratiques de travail du sol, ils sont influencés par d'autres facteurs tels que les conditions pédo-climatiques, la fertilisation mais aussi la rotation (effet précédent,...).

Suite à ce travail, l'analyse a abouti à une classification des stratégies de travail du sol : nous avons différencié les stratégies biologiques, peu consommatrices en énergie, des stratégies mécaniques. Au final, nous avons obtenu 4 types de stratégies de travail du sol, à savoir, 2 stratégies « biologiques » et 2 stratégies « mécaniques ». Elles sont présentées dans l'ordre croissant de l'intensité du travail du sol (tableau n°5).

➤ **Stratégie biologique : couvert végétal permanent**

Elle repose sur l'activation de la vie biologique du sol (les plantes, les micro-organismes, les macro-organismes, l'humus...), en limitant les perturbations par des aérations répétées du sol lors d'opérations culturales. Ainsi, la permaculture tend à imiter la nature : le sol est toujours couvert de végétation et est ainsi protégé contre l'érosion éolienne et hydrique, contre le dessèchement par le soleil et contre l'envahissement par les adventices. Les interventions techniques se limitent au semis, à la récolte et à la fauche du couvert permanent (ex : trèfle). La compétition entre le couvert permanent et la culture en place est difficile à maîtriser. Ainsi, le contrôle du couvert est le facteur clé de réussite de cette stratégie.

➤ **Stratégie biologique : couvert végétal interculture**

Pour les concepteurs de ces stratégies, l'interculture est une période privilégiée pendant laquelle la production de biomasse permet de protéger et de structurer le sol et de recycler les reliquats d'éléments minéraux post-culture. La couverture permet également la nutrition et la protection de la vie du sol et de la faune sauvage. Pour remplir un rôle optimal, le couvert végétal doit être bien implanté et homogène : l'association de plusieurs espèces est souvent utilisée pour assurer une bonne couverture du sol, quelque soit les conditions climatiques. La gestion des couverts végétaux est importante : l'optimum est une implantation du couvert le jour de la moisson. Plus il est semé tôt, et plus il peut faire concurrence aux adventices, surtout si les espèces semées ont un développement rapide. Il faut un certain temps entre la destruction du couvert végétal et l'implantation de la culture suivante. En effet, le couvert doit se décomposer correctement afin qu'il ne concurrence pas la culture mise en place (faim d'azote). Le couvert peut être détruit (i) naturellement (choix d'un couvert gélif dans les zones soumises à des hivers rigoureux), (ii) à l'aide d'un rouleau faca (écrasement des végétaux) ou (iii) à l'aide d'un cultivateur travaillant superficiellement (à moins de 5 cm de profondeur). La culture suivante peut être implantée directement dans le couvert ; dans ce cas, le semis se fait obligatoirement avec un semoir adapté au semis direct afin de

Tableau n°5 : Description des stratégies de travail du sol rencontrées au cours de l'enquête

	Stratégie biologique : couvert végétal permanent	Stratégie biologique : couvert végétal interculture	Stratégie mécanique : travail du sol	Stratégie mécanique : faux semis fréquents
pratiques caractéristiques	<p>Rotation courte, récolte d'une culture par an</p> <p>Couvert végétal de trèfle nain (ou spontané) permanent</p> <p>pas de travail du sol ;semis direct : travail uniquement sur le rang ; pas de désherbage mécanique</p> <p>Pas d'apport de fertilisation extérieur (présence permanente de légumineuse)</p>	<p>Rotation courte, pas de tête de rotation pluri-annuelle, alternance systématique culture de printemps/culture d'hiver, rotation des couverts végétaux</p> <p>Implantation systématique d'un couvert végétal devant toutes les cultures de printemps et d'hiver</p> <p>Pas d'apport de fertilisation extérieur (le couvert permet de produire de la biomasse apportant des éléments nutritifs lors de sa décomposition)</p>	<p>Les méthodes préventives de lutte contre les adventices sont appliquées : rotation, observation de la structure du sol et réglage des outils et/ou de la profondeur du travail en fonction des observations</p> <p>travail du sol environ toutes les 3 semaines pendant l'interculture</p> <p>Apport de fertilisation extérieur animale ou végétale : compost de déchets verts ou de fumier de bovins, farine de viande ou compost de fientes de volailles</p>	<p>tête de rotation pluri-annuelle, rotation longue</p> <p>fréquence de travail du sol importante pendant l'interculture : tous les 7-10 jours ; travail superficiel de 5 à 10 cm</p> <p>Nombre de désherbage mécanique important (passage post-semis-pré-levée, sortie d'hiver, au printemps) et choix des outils (herse étrille, houe rotative, bineuse)</p>
Autres pratiques (découlant des pratiques dites « caractéristiques »)	<p>le trèfle doit être affaibli : il peut être broyé, fauché, affaibli avec un dynadrive ou les dents d'un vibroculteur</p>	<p>le couvert peut être détruit naturellement par le gel ou mécaniquement par un outil type rouleau faca qui écrase la végétation ou type cultivateur qui scalpe à profondeur régulière (4 cm)</p> <p>pas ou peu de désherbage mécanique (uniquement sortie hiver pour le réchauffement du sol)</p>	<p>La tête de rotation pluri-annuelle n'est pas mise en place systématiquement (terres argilo-calcaires). Cependant, dans ce cas, l'alternance culture de printemps/culture d'automne est strictement respectée</p> <p>Un travail plus en profondeur peut être utilisé : ameublisseur pour décompacter le sol aux endroits tassés</p> <p>Le matériel utilisé dépend de celui présent sur l'exploitation : néo-déchaumeurs, néo-cultivateur, actisol, charrue déchaumeuse, cultivateur...)</p>	<p>Pour une interculture longue, les couverts végétaux peuvent être mis en place ou les sols peuvent être laissés à nu</p> <p>Alternance culture de printemps/cultures d'hiver non respecté dans tous les cas (mauvaise implantation)</p> <p>apport de fertilisation extérieur possibles ou couverts végétaux et/ou tête de rotation contenant des légumineuses suffisants</p>
expertise des agriculteurs	<p>L'objectif d'un agriculteur est de sélectionner des variétés de blé capables d'être semées le 21 juin, lorsque la culture de blé de l'année précédente est en place. Dans ce cas, le couvert n'aura plus besoin d'être affaibli</p> <p>la variété doit être résistante. Elle doit être adaptée à "vivre en communauté"</p>	<p>il est important de semer le couvert végétal le plus tôt possible après la récolte pour profiter de l'humidité du sol</p>	<p>La charrue peut être utilisée lorsque la gestion des adventices devient difficile</p>	<p>En dernier recours, si les adventices sont trop développées, utilisation de la charrue Perrein pour enfouir les adventices et décompacter le sol en profondeur</p> <p>Possibilité de détruire la culture en place en sortie hiver si l'état de salissement est non tolérable : mise en place de vesce ou de sarasin</p>
Mots clés	<p>semis direct sous couvert vivant ; couverture permanente; objectif semer-récolter</p>	<p>alternance couvert végétal-culture ; destruction du couvert naturel ou mécanique;</p>	<p>travail du sol superficiel; méthodes préventives; outils polyvalents</p>	<p>faux-semis ; travail intensif du sol ; faible seuil de tolérance face aux adventices</p>

trancher la végétation et permettre la réalisation d'un semis favorable. Ainsi les interventions techniques se limitent au semis, à la récolte de la culture puis au semis de l'interculture et une éventuelle destruction du couvert.

➤ **Stratégie mécanique : travail du sol**

Ces stratégies sont essentiellement rencontrées sur des terres argilo-calcaires et/ou sous des conditions climatiques à faibles précipitations. Plusieurs travaux superficiels du sol sont effectués : déchaumage, faux semis, préparation du lit de semences. La profondeur de ces travaux peut varier de 5 à 15 cm selon le type de matériel présent sur l'exploitation (néo-déchaumeur, néo-cultivateur, actisol, cultivateur, vibroculteur...) et selon les objectifs de l'agriculteur (limitation de la consommation énergétique, aération du sol,...). Les outils travaillant plus en profondeur, tel que l'ameublisseur, ne sont pas indispensables. Le désherbage mécanique en post-semis est utilisé selon l'état de salissement toléré par l'agriculteur. Dans certains cas, la charrue est utilisée en dernier recours lorsque la gestion des adventices devient difficile.

➤ **Stratégie mécanique : faux semis fréquents**

Cette stratégie se base sur l'abondance de faux semis pour épuiser les adventices vivaces par extirpation et détruire les adventices annuelles qui se développent au stade plantule. L'outil à disques indépendants semble adapté pour cette stratégie car (i) il permet de travailler le sol rapidement (15 km/h) et (ii) sa polyvalence permet d'avoir un parc matériel réduit. Le niveau de tolérance des agriculteurs pratiquant cette stratégie vis-à-vis des adventices est très limité. Ainsi, le recours au désherbage mécanique en post-semis est fréquent (nombre de passages élevé, différents types d'outils : bineuse, houe rotative, herse étrille).

Un article dans la revue AlterAgri a permis de valoriser ce travail (annexe n°2).

3. Conception de stratégies et de R&D

a. Elaboration des stratégies à l'aide d'un groupe d'experts

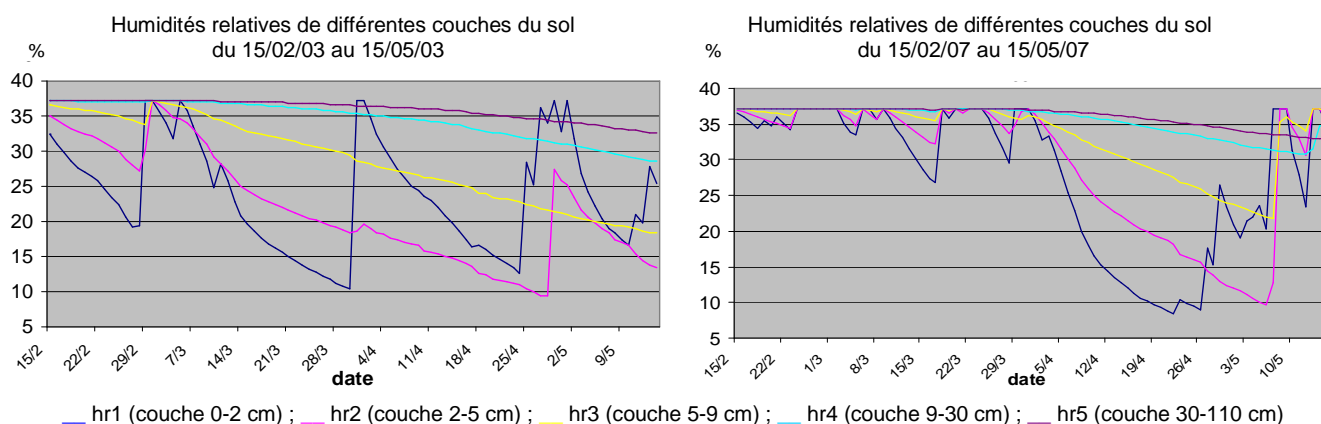
A partir de ces enquêtes, différentes stratégies de travail du sol potentiellement intéressantes dans les conditions pédo-climatiques Lorraines ont été élaborées en faisant appel à l'expertise d'un groupe majoritairement lorrain. Ce dernier était composé de Jacques Delatte, agriculteur lorrain, Joséphine Peigné de l'ISARA de Lyon, Emmanuel Hance et Richard Cherrier de la Chambre d'agriculture de Lorraine, Yves Messmer d'Arvalis Institut du Végétal, Nadine Piboule du CGA de Lorraine et de Damien Foissy et Xavier Coquil de l'INRA de Mirecourt. Ces stratégies ont été testées à l'aide de modèles sur un type de sol qualifié d'argile sur dolomie présent dans la parcelle de la petite fin (PF23) du domaine expérimental de l'INRA de Mirecourt (tableau n°6). Afin de se placer dans les conditions climatiques de Mirecourt, les simulations ont été réalisées sur la période climatique du 01/01/1995 au 31/12/2007 assurant des conditions très contrastées. Les données concernant l'humidité relative et la température des horizons du sol ont été obtenues à l'aide du modèle STICS, à partir de plusieurs données d'entrée : la texture du sol, la culture en place, la température de l'air, la pluviométrie et le rayonnement. Nous observons des conditions d'humidité relative du sol variables entre les années 2003 et 2007 données en exemple (graphique n°1). Au printemps 2003, la couche superficielle de 0-2 cm subit des alternances de périodes humides-périodes sèches ; la couche de 2 à 5 cm subit les mêmes trajectoires avec de plus faibles variations ; les couches plus profondes se dessèchent progressivement. En 2007, les observations ne sont pas similaires : le mois d'avril a été sec et le sol a subi d'importantes variations d'humidité au niveau de toutes les couches simulées : elle se sont desséchées rapidement.

Au départ, nous avons envisagé d'évaluer ces stratégies sur trois rotations culturales : une rotation de 6 ans, une rotation de 8 ans et une rotation de 12 ans, avec chacune pour tête d'assolement de la luzerne sur 3 ans. Faute de temps, nous avons restreint l'étude à la rotation pouvant poser le plus de difficulté en terme de gestion des adventices. La rotation retenue a été la rotation de 12 ans avec insertion de culture de printemps, rotation longue et très céréalière (figure n°2). Nous avons choisi de fixer la rotation dans le temps, afin de simplifier l'évaluation *a priori* des stratégies de travail du sol.

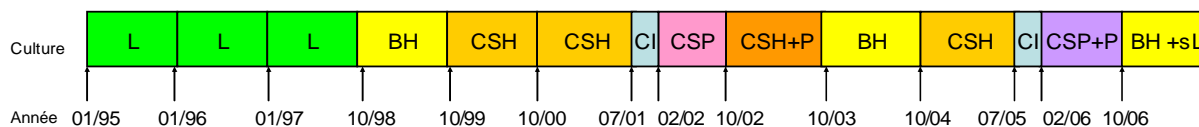
Seules les « stratégies mécaniques » de travail du sol ont été simulées à l'aide du modèle Alomysys. En effet, ce dernier n'a pas permis d'évaluer les « stratégies biologiques », par manque de paramétrages concernant (i) la compétition entre le couvert végétal et les adventices et (ii) la nature du couvert végétal (paramétrage par défaut = colza). Nous avons donc testé des stratégies « mécaniques » (i) avec labour systématique entre deux cultures annuelles et (ii) sans labour (tableau n°7). Afin d'obtenir des résultats proches et comparables en matière de population adventices, nous avons procédé à des simulations itératives afin d'ajuster le nombre de passages de désherbage mécanique en post-semis selon le salissement

Tableau n°6 : Analyse de sol de la parcelle Petite Fin (PF 23) du domaine expérimental de l'INRA de Mirecourt, utilisé lors des simulations

Composition en éléments fins		Autres caractéristiques	
Argile (< 2 µm)	322 g/kg	Matière Organique	2,56 %
Limons fins (2-20µm)	343 g/kg	pH	7,17
Limons grossiers (20-50µm)	202 g/kg		
Sables fins (50-200µm)	103 g/kg		
Sables grossiers (200-2000 µm)	30 g/kg		



Graphique n°1 : Comparaison des humidités relatives (hr) des différents horizons du sol sur la même période, du 15/02 au 15/05 en %, simulées par STICS



Légende : L: luzerne ; BH : blé hiver; CSH : culture secondaire hiver ; CSP : culture secondaire printemps ; P: protéagineux; CI : culture intermédiaire ; sL : semis luzerne

Figure n°2 : Présentation de la rotation testée dans le cadre de l'évaluation a priori des stratégies de travail du sol.

Tableau n°7 : Présentation des modalités de travail du sol à évaluer a priori, conçues à l'aide du groupe d'experts

labour	itinéraires avec labour		itinéraires sans labour
	systématique		-
désherbage bineuse mécanique herse étrille	fixé par itérations (si vulpins matures à la récolte >400 pieds/m ²)		fixé par itérations (si vulpins matures à la récolte >400 pieds/m ² après insertion des désherbages mécaniques)
pour l'implantation de culture d'automne	déchaumage superficiel+labour mi-août+reprise de labour		4 opérations superficielles (variation de la profondeur de travail)
	labour mi-juillet+reprise de labour		7 opérations superficielles (variation de la profondeur de travail)
pour l'implantation de culture de printemps	déchaumage+travail superficiel+culture intermédiaire+labour fin décembre+reprise de labour		déchaumage+travail superficiel+culture intermédiaire gélive+semis direct

des parcelles à la récolte à 400 pieds de vulpin/m² au maximum. Ces itérations sont signalées dans le tableau n°7.

b. Elaboration de règles de décisions

L'enjeu de ce travail a été de définir les conditions pratiques de mise en œuvre de stratégies de travail du sol à évaluer au cours d'années climatiques très contrastées. Ainsi le paramétrage des stratégies de travail du sol dans les modèles STICS et Alomysys a nécessité de définir les conditions de réalisation des pratiques. Ces conditions de réalisation et le déroulement concret de ces pratiques ont été définis sous la forme de règles de décisions (RdD) (Sebillote et Soler, 1990). Dans le cadre de ce travail, ces RdD ont été obtenues à partir de l'expertise des membres du groupe « système de culture » de l'INRA (i) en les consultants directement et (ii) au travers de l'analyse des pratiques agricoles qu'ils ont mis en œuvre au cours des années 2004 à 2007, années durant lesquelles l'installation expérimentale était déjà exploitée suivant le cahier des charges de l'agriculture biologique.

🚧 Pratiques de fertilisation organiques dans les rotations testées

D'après les membres du groupe « Système de Culture », « la fertilisation organique (i) ne doit pas être apportée derrière luzerne ou prairie et (ii) doit être apportée sur les parcelles tous les 2 ans s'il n'y a pas d'implantation de couverts végétaux. La quantité de fertilisation organique épanchée dépend de la quantité disponible sur l'Installation expérimentale et du nombre de parcelles à fertiliser ».

Nous avons ainsi défini des règles de décisions applicables aux parcelles du domaine expérimental de l'INRA de Mirecourt concernant les apports de matière organique :

- Toutes les 2 années de culture a lieu l'implantation d'un couvert intermédiaire ou un apport de fertilisation organique ; en dernière année de rotation ou derrière une prairie ou luzerne, il n'est pas nécessaire d'apporter de fertilisation particulière. Sur la rotation de 12 ans, 2 apports ont été placés, un en 6^{ème} et un en 9^{ème} année de rotation.
- La moyenne d'apport de fertilisation organique est de l'ordre de 20 T/ha.

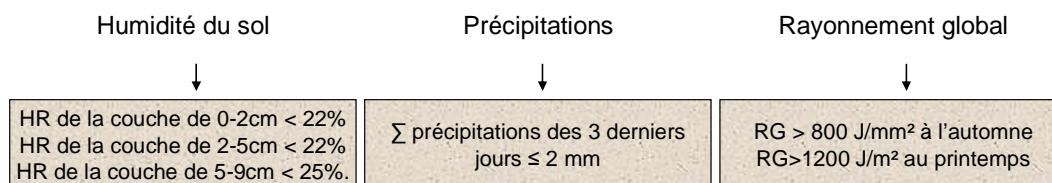
🚧 La date d'implantation et date de récolte des cultures

A dire d'experts, « il est important que le sol soit ressuyé pour l'implantation d'une culture ».

D'après les sorties de STICS et les itinéraires culturaux réalisés à Mirecourt de 2004 à 2007, nous avons traduit « sol ressuyé » par :

- Humidité relative du sol (HR) (i) de la couche de 0-2 cm < 22%, (ii) de la couche de 2-5 cm < 22%, et (iii) de la couche de 5-9 cm < 25%
- Aucune précipitation les jours précédents le semis : au maximum \sum précipitations des 3 derniers jours ≤ 2 mm)
- Rayonnement global élevé pendant la période d'implantation : RG > 800 J/mm² à l'automne, RG > 1200 J/m² au printemps.

Conditions rencontrées pour l'implantation d'une culture sur le domaine expérimental de l'INRA de Mirecourt, obtenues à l'aide de la consultation d'experts :



Selon les dires de la majorité des agriculteurs rencontrés au cours des enquêtes, « le semis doit être réalisé le plus tard possible afin d'éviter au maximum le développement d'adventices dans la culture ». Cependant, sur le domaine expérimental de l'INRA de Mirecourt, les membres du groupe « systèmes de cultures » nous ont indiqué qu'« il est difficile de semer après de 20/10 car les conditions de sol sont souvent défavorables ». Ainsi, nous avons choisi des dates d'implantation de céréales d'hiver et de mélanges céréales/protéagineux d'hiver à partir du 25/09 puis déterminer la limite extrême en fonction des conditions de sol. Les dates d'implantation des céréales de printemps et des mélanges céréales/protéagineux de printemps ont été placés le plus tôt possible à partir du 20/02 jusqu'au 25/03.

Pour la récolte, les experts nous ont affirmé que le sol a un potentiel de ressuyage rapide. Il est nécessaire d'attendre 1 à 2 jours derrière des précipitations selon (i) la quantité de pluie tombée, (ii) la température de l'air et (iii) le rayonnement global qui permet de sécher la culture. La récolte de l'orge d'hiver a lieu une semaine avant celle du blé, des autres cultures d'hiver et de l'orge, soit du 01/07 au 10/07 ; la récolte des cultures de printemps a lieu environ une semaine après celle du blé, soit du 25/07 au 01/08.

Le travail du sol

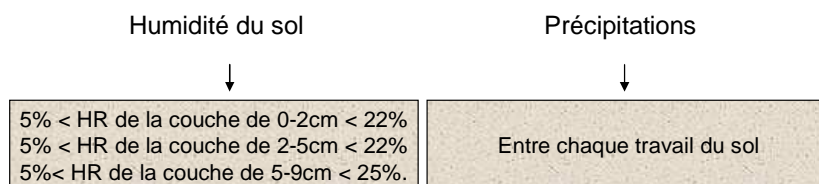
D'après les membres du groupe « Système de Culture », « *le premier travail du sol doit être réalisé au minimum 2 jours après la moisson, soit le temps nécessaire à la récolte de la paille. Si des précipitations importantes ont lieu après la moisson, il faut attendre que le sol soit ressuyé* ». Le rayonnement global et les températures étant plus importantes à cette période, la durée de ressuyage est moins longue. « *En condition optimale, le sol ne doit être ni trop humide, ni trop sec afin que le matériel puisse réaliser un travail efficace* ».

Ainsi, avec l'appui des itinéraires culturaux réalisés à Mirecourt de 2004 à 2007, nous traduisons ces recommandations par :

- (i) 5% < humidité relative du sol (HR) de la couche de 0-2 cm < 22%, (ii) 5% < HR de la couche de 2-5 cm < 22%, et (iii) 5% < HR de la couche de 5-9 cm < 25%
- Il est préférable que des précipitations aient lieu entre chaque travail du sol, afin de réaliser le maximum de faux semis.

Conditions rencontrées pour le travail du sol superficiel en interculture sur le domaine expérimental de l'INRA de Mirecourt, obtenues à l'aide de la consultation d'experts :

:



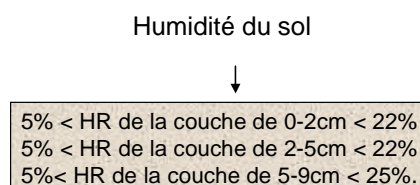
Les stratégies de travail du sol conçues et testées au cours de cette étude tiennent compte de ces recommandations ou règles de décision suivies par le groupe « système de culture »..

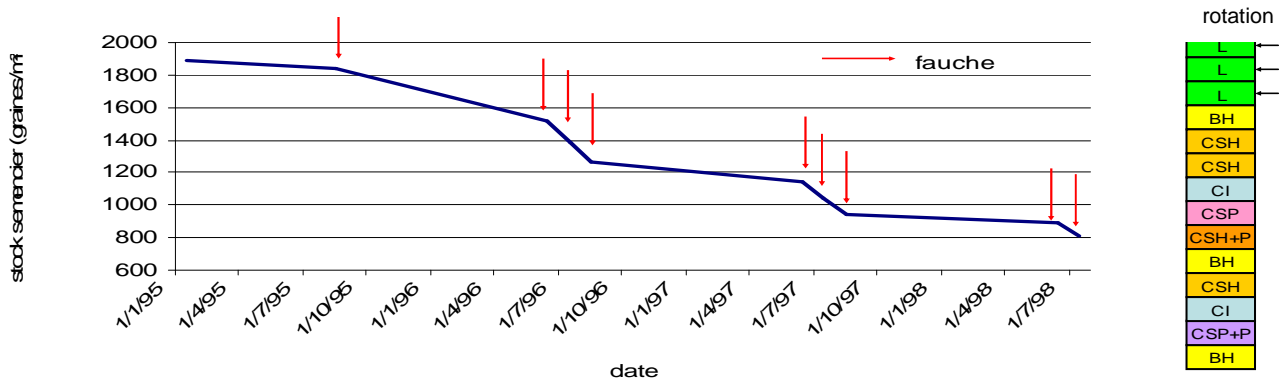
Le désherbage mécanique

Nous avons choisi de retarder au maximum les dates d'implantation des cultures à l'hiver. Ainsi, le désherbage post-semis/pré-levée a été considéré impossible en vue des conditions pédo-climatiques. Selon les membres du groupe « Système de Culture », « *au printemps, le premier désherbage peut avoir lieu lorsque le sol est ressuyé. Ensuite, le sol ne doit pas être trop sec ou trop humide. La herse étrille peut être utilisée jusqu'au 01/05 et la bineuse jusqu'au 15/05. Les mélanges céréales/protéagineux ne sont pas désherbés mécaniquement* ».

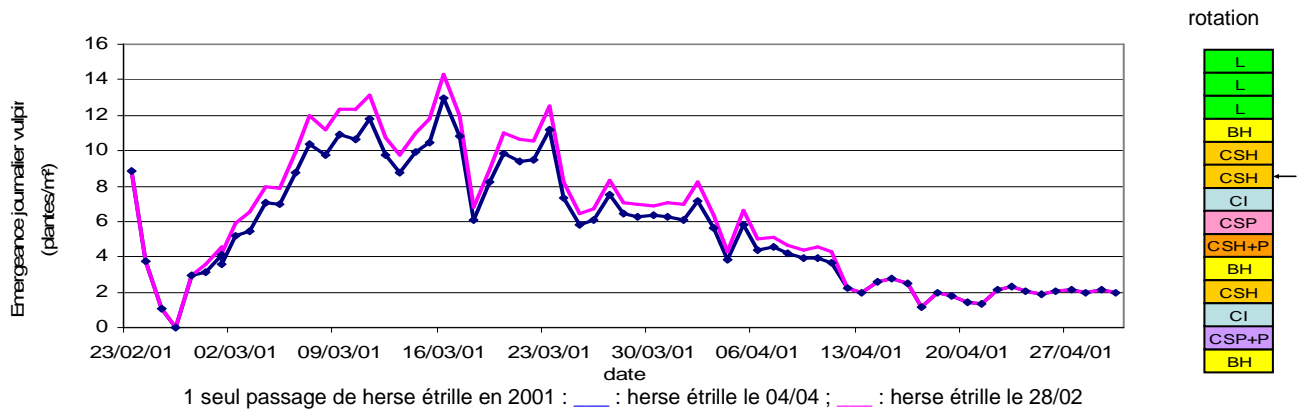
Avec l'appui des itinéraires culturaux réalisés à Mirecourt de 2004 à 2007, nous traduisons ces recommandations par (i) 5% < humidité relative du sol (HR) de la couche de 0-2 cm < 22%, (ii) 5% < HR de la couche de 2-5 cm < 22%, et (iii) 5% < HR de la couche de 5-9 cm < 25%

Conditions rencontrées pour le désherbage mécanique sur le domaine expérimental de l'INRA de Mirecourt, obtenues à l'aide de la consultation d'experts :

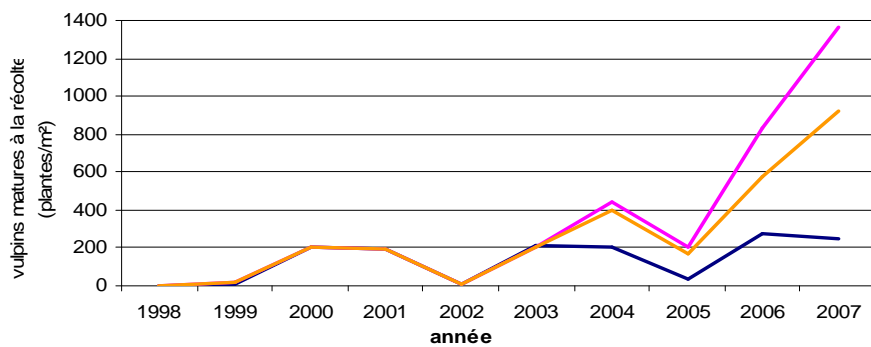




Graphique n°2 : Evolution de la banque de semences de vulpins des champs sous luzerne entre 1995 et 1998 (en nombre de graines/m²) (stratégie NL fréquence de travail du sol élevée)



Graphique n°3 : Emergence journalière du vulpin des champs du 23/02/01 au 30/05/01 selon les dates de désherbages mécaniques en plantes/m² (stratégie NI fréquence de travail du sol élevée)

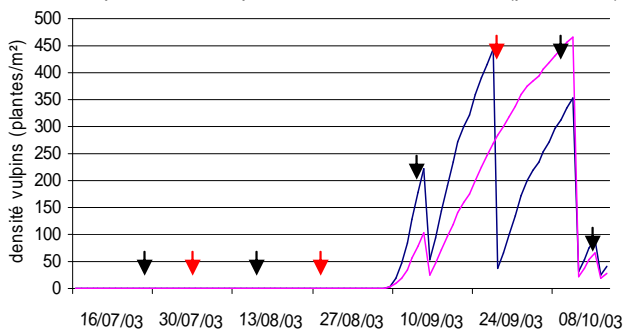


Graphique n°4 : Populations de vulpins matures à la récolte (plantes/m²) en fonction de la date d'implantation des cultures d'automne au cours de la rotation. Etude à l'échelle de la rotation stratégie NL fréquence de travail du sol élevée)

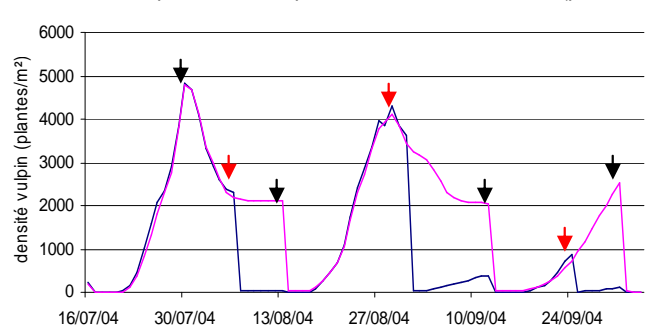
Date d'implantation d'une culture d'automne

	Tard	Avancée
1998	25/09	19/09
1999	17/10	12/10
2000	07/10	28/09
2002	14/10	09/10
2003	18/10	11/10
2004	04/10	22/09
2006	17/10	10/10

Densité de vulpins des champs du 15/07/03 au 15/10/03 (plantes/m²)



Densités de vulpins des champs du 15/07/04 au 15/10/04 (plantes/m²)



Les flèches correspondent aux opérations de travail du sol : → stratégie NL; → + → stratégie NL intensive

Graphique n°5 : Densités de vulpins des champs au cours d'une interculture de céréales d'hiver du 15/07 au 15/10 de deux années aux conditions climatiques différentes (en plantes/m²) : comparaison de l'intensité de travail du sol

5. L'évaluation *a priori* des stratégies

a. Effet des pratiques agricoles sur les populations de vulpins des champs

le rôle de la prairie

Dans la prairie, la banque de semences de vulpins des champs diminue au cours du temps (graphique n°2). En effet, le vulpin des champs produit peu ou pas de semences du fait des fauches systématiques qui empêchent le vulpin des champs d'arriver à maturité. De plus, la banque de semences est réduite par germination. Ainsi, l'introduction de prairie dans la rotation a un intérêt important pour lutter contre le vulpin.

les dates de désherbages mécaniques au printemps

Au printemps, la date de désherbage mécanique influence la germination du vulpin des champs : plus elle est avancée, plus les risques sont élevés (graphique n°3). En effet, lorsque nous comparons les densités de vulpins des champs matures à la récolte de 2 itinéraires culturaux où seules les dates de désherbages mécaniques changent, nous constatons que le désherbage mécanique du 04/04/01 est plus efficace que le désherbage mécanique « tôt » du 28/02. Lorsque l'on s'intéresse au nombre de plantes détruites par la herse étrille, on remarque que la différence n'est pas significative entre les deux pratiques. Cependant, au printemps, la herse étrille permet de mettre en germination d'autres vulpins des champs qui se développent jusqu'à la récolte. Ainsi, ils augmentent la banque de semences de vulpins des champs. A partir du mois d'avril, le potentiel hydrique du sol est plus sec et le désherbage mécanique favorise en moindre quantité les levées de dormance.

la date d'implantation d'une culture d'automne

Lorsque nous simulons un itinéraire technique en modifiant les dates de semis automnales (avancement d'environ une semaine de la date de semis), nous constatons que l'implantation tardive d'une culture d'automne est efficace contre le développement du vulpin des champs. En effet, à ITK identique et à ITK renforcé en terme de désherbage mécanique en post-semis, l'implantation précoce des céréales d'automne permet un développement plus important du vulpin des champs que l'implantation tardive, à l'échelle de la rotation (graphique n°4). Le retard de la date de semis est une règle importante à prendre en compte pour limiter le développement du vulpin des champs.

Le rôle des faux semis

Il existe deux vagues de germination potentielle chez le vulpin des champs au cours de l'interculture : au cours de l'été, puis à l'automne. Au cours de ces deux périodes les levées sont conditionnées par les conditions pédo-climatiques et peuvent être stimulées par le travail du sol.

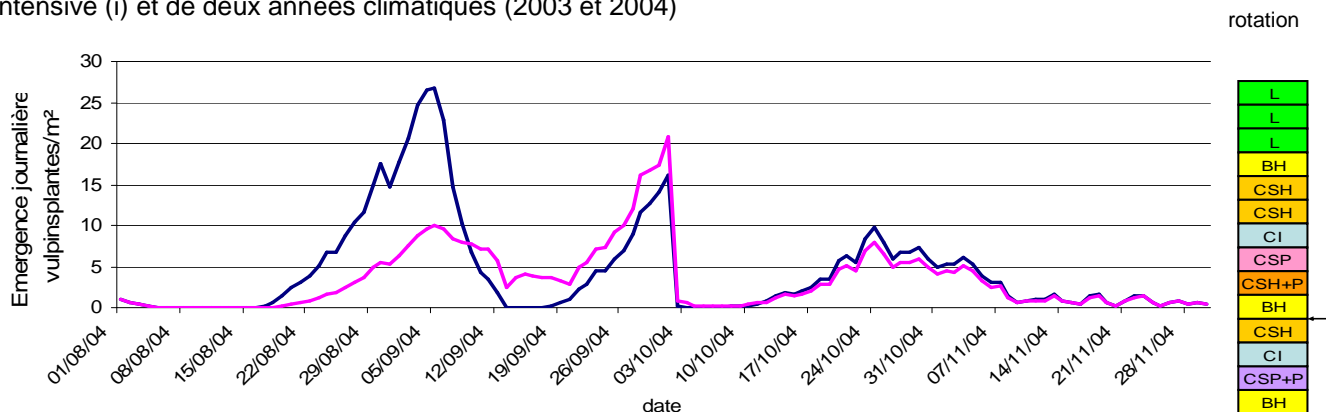
Ainsi, d'après le graphique n°5, quelque soit la fréquence de travail du sol, les levées de vulpins des champs n'ont pas lieu au cours des étés trop secs. En été 2003, année caractérisé par un été très sec, la densité de vulpins des champs étaient bien moindre par rapport à 2004 qui était caractérisé par des alternances de conditions sèches et humides. A l'automne, les levées de vulpins des champs sont favorisées par des conditions humides et plus froides du sol, conditions obtenues pour les années 2003 et 2004. D'après les graphiques présentés, les faux semis en conditions sèches (été 2003) sont inefficaces : ne stimulant aucune levée d'adventices, ils ne permettent pas d'éliminer la population ou de diminuer la banque de semences. En terme de maîtrise des populations de vulpins des champs, l'intensification de la pratique du faux semis à l'interculture n'est pas efficace (tableau n°8). En effet, le pourcentage de vulpins des champs détruits au cours de l'interculture est significativement semblable selon des stratégies étudiées (en 2003, la banque de semences de vulpins des champs a diminué de 10,84% pour une stratégie non labour (n) contre 11,90% pour une stratégie non labour plus intensive (i)). Cependant, la variation intrinsèque de l'efficacité d'une stratégie selon l'année climatique est très importante (diminution de la banque de semences de 10,84% en 2003 contre 83,25% en 2004)

Le rôle du labour :

Avec une même banque de semences initiale (1500 graines/m²), nous remarquons que le labour effectué le 15/08 diminue les levées de vulpin des champs par rapport à une stratégie « non labour » (graphique n°6) du fait de son action d'enfouissement. En effet, le 5 septembre 2004, l'émergence journalière de vulpins des champs est de 27 plantes/m² pour la stratégie « non labour » contre 10 plantes/m² pour la stratégie « labour ». Par contre, d'après les simulations, les émergences journalières de vulpins sont approximativement les mêmes à partir du 3 octobre 2004, quelle que soit la stratégie choisie. Ainsi, le labour

	stratégie non labour (n)		stratégie non labour, intensive (i)	
	2003	2004	2003	2004
Stock semencier après récolte culture	7011	4076	7644	4233
vulpins (graines/m ²) Avant semis culture d'automne	6252	683	6734	885
Evolution de la banque de semences au cours de l'interculture (%)	- 10,84%	- 83,25%	- 11,90%	- 79,10%

Tableau n°8 : Evolution de la banque de semences de vulpins des champs en pourcentage au cours d'une interculture de céréales d'hiver : comparaison de deux stratégies de travail du sol (non labour (n) et non labour intensive (i) et de deux années climatiques (2003 et 2004)

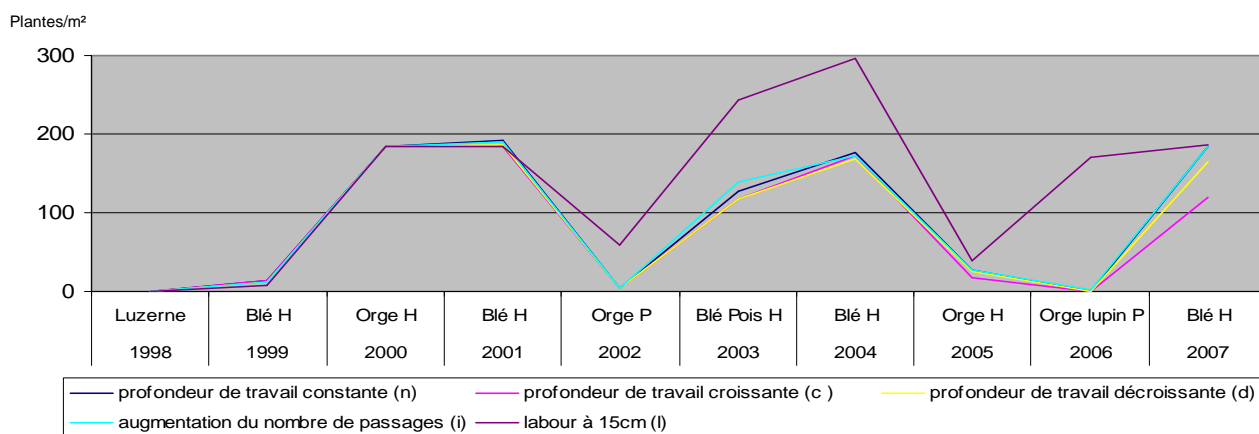


— : stratégie NL(n) ; — : stratégie labour

Graphique n°6 : Emergence journalière du vulpin des champs (même banque de semence initiale) (en plantes/m²) du 01/08/2004 au 30/11/2004 : comparaison d'une stratégie NL et d'une stratégie labour

Tableau n°9 : Description des itinéraires techniques culturaux simulés pour chaque stratégie de travail du sol :

stratégies	Labour (l)	non labour			
		profondeur de travail constante 5 cm (n)	profondeur de travail croissante (c)	profondeur de travail décroissante (d)	fréquence de travail du sol élevée, profondeur constante 5 cm (i)
Opérations en interculture longue	charrue fin décembre reprise de labour au vibroculteur avant semis	chisel + vibroculteur après la moisson semis du couvert végétal			
Opérations en interculture courte	1 labour à 15cm 4 vibroculteurs 1 semis	3 chisels 2 vibroculteurs 1 semis		3 chisels 4 vibroculteurs 1 semis	
désherbage mécanique	HE début avril 2000, 2001, 2002, 2004, 2005, 2007 HE fin avril 2004 et 2005				



Graphique n°7 : Comparaison de la densité de vulpins matures à la récolte au cours de la rotation de 12 ans pour les 4stratégies de travail du sol testées (en plantes/m²)

estival ne semble pas être un moyen efficace pour limiter les levées de vulpins des champs en post-semis : une préparation de sol, pour le semis, présente une efficacité identique.

b. Comparaison multicritères des stratégies de travail du sol

A l'issue de plusieurs itérations nous permettant de placer les désherbages mécaniques au sein des rotations (RdD : le nombre de vulpins matures à la récolte < 400 plantes/m²), nous avons obtenu 5 stratégies de travail du sol simulées, que nous comparons selon 3 critères : consommation énergétique, structure du sol et gestion des adventives (tableau n°9 et graphique n°7). Ces stratégies sont (i) labour systématique réglé à une profondeur de travail du sol constante (15 cm) (l), (ii) non labour, avec une profondeur de travail du sol constante (5 cm) (à l'interculture, 3 chisels, 2 vibroculteurs avant un semis d'automne) (n), (iii) non labour, avec une profondeur de travail du sol croissante au fur et à mesure des passages (de 5 à 15 cm) (à l'interculture, 3 chisels, 2 vibroculteurs avant un semis d'automne) (c), (iv) non labour, avec une profondeur de travail du sol décroissante au fur et à mesure des passages (de 15 à 5 cm) (à l'interculture, 3 chisels, 2 vibroculteurs avant un semis d'automne) (d), et (v) non labour, avec une profondeur de travail du sol constante (5cm) et une augmentation du nombre de passages (à l'interculture, 3 chisels, 4 vibroculteurs avant un semis d'automne) (i).

Derrière luzerne, nous remarquons que la densité de vulpins des champs matures est très faible (cas du blé en 1999), quelque soit le travail effectué sur la parcelle. Cette densité est de l'ordre de 10 plantes /m². L'implantation de culture de printemps diminue la densité de vulpins des champs (cas de l'orge de printemps implantée en 2002 et de l'association orge/lupin implantée en 2006). En 2005, nous observons une chute de la densité de vulpin des champs à la récolte, quelque soit le travail du sol effectué.

Lorsque nous comparons les stratégies, nous remarquons que les stratégies avec labour systématique sont favorables à la levée du vulpin des champs. Il y a peu de différence entre les stratégies de travail du sol en non labour étudiées : la densité de vulpin des champs à la récolte diminue, lorsque l'on augmente progressivement la profondeur de travail du sol à chaque passage au cours de l'interculture.

A la fin de la rotation, soit après 9 ans de céréales ou d'associations céréales-protéagineuses de fortes différences concernant la banque de semences de vulpins des champs apparaissent pour une même banque de semence de vulpins des champs initiale quelle que soit la stratégie (tableau n°10). En effet, lors d'une stratégie avec labour, la banque de semences de vulpins des champs est de l'ordre de 20979 graines/m², soit environ six à dix fois plus que pour une stratégie sans labour. Ces résultats sont corrélés aux résultats précédents, à savoir que la stratégie non labour en augmentant la profondeur de travail du sol à chaque passage entraîne une diminution de la banque de semence de vulpins des champs plus importante. De plus, la modification de la profondeur de travail du sol au cours de l'interculture permet de réduire la banque de semences de vulpins des champs en comparaison avec la stratégie non labour à travail de profondeur constant (2141 et 3146 graines/m² contre 3578 graines/m²). D'après ces résultats, la modification de la profondeur de travail du sol, notamment de manière croissante, est bénéfique afin de lutter contre le vulpin des champs.

Sur l'horizon de sol 0-10 cm, le pourcentage de terre fine au semis est souvent plus important lors de la stratégie avec labour (septembre 1998, octobre 2000, mars 2002, octobre 2002, octobre 2003, octobre 2004, mars 2006 et octobre 2006, soit à chaque implantation de culture) (graphique n°8). Nous n'observons pas de différence entre les différentes stratégies de travail du sol sans labour : pour ces stratégies, le pourcentage de terre dite « optimale » est plus important qu'en stratégie avec labour systématique. D'une manière générale, nous pouvons conclure que les stratégies sans labour ont un effet bénéfique sur la structure du sol de l'horizon supérieur.

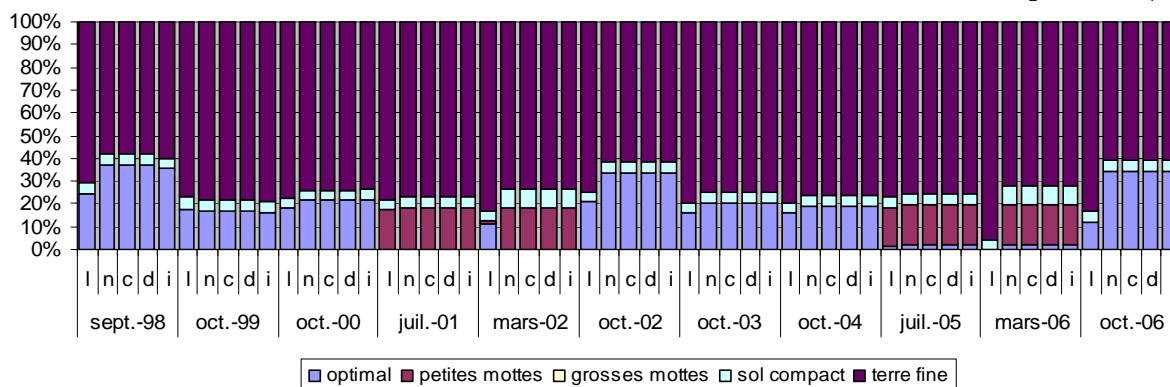
Lorsque nous comparons la consommation énergétique des différentes stratégies, nous pouvons remarquer que les stratégies avec labour et sans labour avec travail intensif au cours de l'interculture sont les stratégies les plus gourmandes en énergie (78 L/ha/an) (tableau n°11). Pour les autres stratégies étudiées, nous n'observons pas de différences significatives (de 66 à 69 L/ha/an). Ainsi, sur le plan énergétique, les stratégies labour et non labour avec travail du sol intensif à l'interculture ont une consommation supérieure aux autres stratégies non labour étudiées.

En conclusion, au cours de cette étude les stratégies non labour de travail du sol (i) ont des effets bénéfiques sur la structure du sol, et (ii) limitent la concurrence du vulpin des champs sur les cultures implantées dans la rotation. Du point de vue de la consommation énergétique, l'intérêt des stratégies en non labour dépend de la fréquence des passages d'outils, notamment durant l'interculture.

Tableau n°10 : Comparaison du stock semencier de vulpin des champs à la fin de la rotation (en juillet 2007) : stock semencier de départ en 1995 : 2018 graines/m²

	Labour systématique, profondeur constante (15 cm) (l)	profondeur de travail constante 5 cm (n)	profondeur de travail croissante (c)	profondeur de travail décroissante (d)	fréquence de travail du sol élevée, profondeur constante 5 cm (i)
Stock semencier à la fin de la rotation (graines/m ²)	20979	3578	2142	3146	5094

Structure de la couche 0-10 cm du sol au moment du semis au cours de la rotation, selon les différentes stratégies testées (%)



Graphique n°8 : Comparaison de la structure de la couche 0-10 cm du sol au moment du semis (semis du couvert et semis de la culture), au cours de la rotation, des différentes stratégies testées, en pourcentage :

Tableau n°11 : Comparaison de la consommation énergétique sur le pas de temps de la rotation, pour les différentes stratégies testées, récolte comprise (consommation énergétique de la récolte évaluée à 30L/ha/an) :

	Labour systématique, profondeur constante (15 cm) (l)	profondeur de travail constante 5 cm (n)	profondeur de travail croissante (c)	profondeur de travail décroissante (d)	fréquence de travail du sol élevée, profondeur constante 5 cm (i)
consommation énergétique de la rotation (hors récolte) en L/ha/an	78 L/ha/an	66L/ha/an	69L/ha/an	69L/ha/an	78L/ha/an

	Consommation énergétique hors récolte	Structure du sol de l'horizon 0-10cm au moment du semis	Densité de vulpins des champs matures à la récolte	Evaluation multicritère
1	faible	faible	faible	faible
2	faible	faible	moyenne	faible
3	faible	faible	forte	moyenne
4	faible	moyenne	faible	faible
5	faible	moyenne	moyenne	moyenne
6	faible	moyenne	forte	moyenne
7	faible	forte	faible	moyenne
8	faible	forte	moyenne	moyenne
9	faible	forte	forte	moyenne
10	moyenne	faible	faible	faible
11	moyenne	faible	moyenne	moyenne
12	moyenne	faible	forte	moyenne
13	moyenne	moyenne	faible	moyenne
14	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
15	moyenne	moyenne	forte	moyenne
16	moyenne	forte	faible	moyenne
17	moyenne	forte	moyenne	moyenne
18	moyenne	forte	forte	forte
19	forte	faible	faible	moyenne
20	forte	faible	moyenne	moyenne
21	forte	faible	forte	moyenne
22	forte	moyenne	faible	moyenne
23	forte	moyenne	moyenne	moyenne
24	forte	moyenne	forte	forte
25	forte	forte	faible	moyenne
26	forte	forte	moyenne	forte
27	forte	forte	forte	forte

Stratégie labour (l)

Stratégies non labour (n), (d), (i)

Stratégie non labour (c)

Figure n°3 : Evaluation de la durabilité des stratégies de travail du sol à l'aide des règles de décisions définies dans Dexi

c. Classement des stratégies de travail du sol, selon leur pertinence multicritère

L'objectif est de classer les stratégies précédemment évaluées. Tout d'abord, nous avons défini pour chacun des 3 critères (consommation énergétique, population de vulpins, structure du sol) des classes, de notation :

- Consommation énergétique/ha/an, hors récolte :
 - Consommation énergétique > 80 L/ha/an : consommation élevée
 - 60 L/ha/an \geq consommation énergétique \geq 80 L/ha/an : consommation moyenne
 - Consommation énergétique < 60 L/ha/an : consommation faible
- Structure de l'horizon 0-10 cm du sol au moment du semis (moyenne au cours de la rotation) :
 - Structure « terre optimale » > 30 % : structure bonne
 - 20 % > Structure « terre optimale » > 30 % : structure moyenne
 - Structure « terre optimale » < 20 % : structure mauvaise
- Densité de vulpins des champs matures à la récolte (moyenne au cours de la rotation) :
 - Densité de vulpins des champs matures à la récolte < 100 plantes/m² : population de vulpins faible
 - 100 plantes/m² > Densité de vulpins des champs matures à la récolte >120 plantes/m²) : population de vulpins moyenne
 - Densité de vulpins des champs matures à la récolte > 120 plantes/m² : population de vulpins forte

Nous considérons que pour juger de la pertinence des stratégies de travail du sol, les critères « consommation énergétique », « gestion des adventices » et « structure du sol » sont de même importance : nous leur attribuons à chacun un poids de 33 %. Ainsi, l'agrégation des trois, à l'aide du logiciel Dexi, nous a permis de classer les stratégies de travail du sol selon leur pertinence multicritère. Nous obtenons le classement suivant, dans l'ordre croissant de pertinence multicritère (figure n°3) : stratégie labour systématique à profondeur constante, 15 cm (l) < stratégie non labour travail du sol intensif (i) = stratégie non labour, profondeur de travail du sol constante (n) = stratégie non labour, profondeur de travail du sol décroissante (d) < stratégie non labour, profondeur de travail du sol croissante (c).

Ainsi, les stratégies les plus durables d'un point de vue multicritères, selon les objectifs de limitation (i) de la consommation énergétique, (ii) de la banque d'adventices et (iii) du tassement du sol, testés *a priori* à l'aide de modèles sont les stratégies non labour avec une augmentation de la profondeur de travail du sol au cours de l'interculture.

IV. Discussion

1. Des enquêtes brossant une diversité de stratégies de travail du sol innovantes

Nous pouvons émettre quelques critiques quand à la méthode d'échantillonnage : notre échantillon ne peut être considéré comme représentatif de la population agricole, étant donné le faible nombre d'agriculteurs interrogés. En effet, nous avons fait le choix de rencontrer un panel d'agriculteurs très différents les uns des autres, se caractérisant par des pratiques originales et innovantes. Notre méthodologie visait à utiliser les réseaux habituels mais également la méthode du « bouche à oreille » pour détecter ces innovations. Or, certains agriculteurs ne sont pas connus des réseaux et peuvent pourtant utiliser des pratiques innovantes au sein de leurs exploitations. Ainsi, l'échantillon ne représente pas toute la population agricole et il est possible que le recensement des stratégies de travail du sol innovantes en agriculture biologique soit incomplet.

Les agriculteurs rencontrés semblent isolés dans leurs techniques et disposent de peu de références concernant leurs travaux, d'où leur caractérisation d'innovants. De par leurs spécificités concernant leur travail du sol, les appuis techniques sont peu importants, ils ont donc du apprendre par l'expérience du terrain et trouvent des solutions aux problèmes auxquels ils ont été confrontés. Ces exploitants sont donc des sources d'informations non négligeables et nous pouvons donc les caractériser de précurseurs et d'agriculteurs innovants.

Au cours des enquêtes élaborées dans le cadre de cette étude, nous avons rencontré les deux paradigmes d'agriculture biologique suivants (Hill, 1985 cité par Lamine et Bellon, 2008) : (i) la reconception du système est défini par une agriculture où l'homme et la nature cohabitent : dans ce cas, la nature est reconnue comme ayant une certaine valeur et comme étant une entité à part entière, la technique et les composantes de l'agro-écosystème devant interagir de manière à renforcer la régulation naturelle des processus ; (ii) la substitution d'intrants : la productivité est la ligne directrice des actions des agriculteurs et la nature a une valeur instrumentale ; les agriculteurs contrôlent la productivité et la performance dans un même cadre technologique de référence. Ainsi, il aurait été intéressant d'approfondir et de comprendre comment ces deux paradigmes se mettent en place. Nous émettons l'hypothèse que ces deux paradigmes se traduisent par un comportement différent pour faire face aux adventices. L'approche sociologique, soit l'étude de l'histoire et du vécu des agriculteurs, peut être une piste de recherche pour expliquer les déterminants de ces orientations. Une autre piste serait à investir du côté des déterminants des systèmes techniques chez les agriculteurs : nous observons par exemple différents circuits de commercialisation des céréales (paysan-boulangier, filière courte, circuit grande consommation...), se traduisant, ou, au contraire, ne se traduisant pas, par des contraintes à l'échelle du système de culture... Ainsi, il serait judicieux d'approfondir l'analyse en utilisant des approches pluridisciplinaires car les trajectoires de ces agriculteurs englobent en même temps les trajectoires techniques, sociales, d'apprentissages et de réseaux (Lamine et Bellon, 2008).

Certaines expérimentations ont été réalisées à l'étranger concernant les stratégies biologiques de travail du sol en agriculture biologique, notamment en Suisse. Pendant plusieurs années, des essais d'implantation de blé sous couvert vivant ont été mis en place (Hiltbrunner *et al.*, 2007), avec en particulier des essais concernant les espèces de couverts permanents à utiliser (luzerne, trèfle nain...) mais aussi des techniques pour limiter le développement de ce couvert et favoriser le développement de la céréale. Les résultats n'ont pas été concluants : la concurrence entre le couvert permanent et la culture est difficile à maîtriser. L'insertion de couverts végétaux à l'interculture semble être une stratégie intéressante en terme de limitation du développement d'adventices par la formation d'un tapis végétal vivant dense au sol ; cependant la maîtrise du couvert et des adventices restent problématique selon les années (Teasdale *et al.*, 2007). Au cours de ces enquêtes, nous avons croisé des expériences plus positives de stratégie dite « biologique » de travail du sol. Une des pistes à étudier concerne la sélection des variétés cultivées, notamment les variétés de céréales, sur des aptitudes de compétition vis-à-vis de la flore spontanée car celles-ci ont suivies un schéma de sélection conventionnel au sein duquel cette propriété a été négligée. Il est nécessaire de mettre des moyens en œuvre sur cette thématique pour faire évoluer les « stratégies biologiques » de travail du sol.

2. Des stratégies et des règles de décision établies sur la base des connaissances expertes

Le groupe d'experts a été composé de personnes aux compétences complémentaires dans le but d'augmenter la richesse des échanges. Au cours des réunions de groupe, les experts devaient discuter des stratégies de travail du sol rencontrées, de leurs intérêts en Lorraine et des conditions à prendre en compte

pour les tester en région Lorraine. Ce travail aurait pu être plus riche en intégrant d'autres agriculteurs, aux points de vue variés, provenant de la région Lorraine. Mais les démarches participatives sont lourdes à mettre en œuvre et nécessitent un temps beaucoup plus long, car tous les participants doivent se familiariser avec l'étude et se mettre d'accord sur les modalités, incompatible avec les objectifs définis dans le cadre de ce travail.

Les membres du groupe « Système de Culture » du domaine expérimental de Mirecourt, converti en agriculture biologique en 2004, apprennent à conduire des systèmes de culture biologiques et en non-labour, ce qui aurait pu limiter leur expertise dans le cadre de cette étude. Cependant, travaillant depuis de nombreuses années sur le domaine et connaissant le contexte pédo-climatique, leurs expertises sur les conditions de mise en œuvre des opérations de travail du sol restent valides.

Une difficulté majeure rencontrée au cours de ce travail, réside dans la retranscription de l'expertise des agriculteurs et des membres du « groupe système », formulée par le discours, sous la forme de paramètres de modèles informatiques. L'analyse des conditions de mise en œuvre des itinéraires techniques passés sur le domaine de Mirecourt, confrontée à l'expertise des pilotes des systèmes, a permis de surmonter cette difficulté.

3. Des modèles ne permettant pas d'évaluer la variété de stratégies de travail du sol conçus

Le modèle Alomysys permet de prendre en compte de nombreux facteurs. Lors de la réalisation de nos simulations, nous avons rencontré quelques problèmes, notamment concernant la mise en place et la destruction des couverts végétaux. La détection de ces problèmes a permis à Nathalie Colbach, conceptrice du modèle, de l'améliorer et de l'adapter à des itinéraires techniques suivis en agriculture biologique. Il reste encore quelques améliorations à réaliser, notamment concernant les « stratégies biologiques ». En effet, nous n'avons pas pu les simuler suite à des problèmes de compétition non prise en compte par le modèle entre le couvert végétal et le vulpin des champs. Nous émettons l'hypothèse que ces « stratégies biologiques » sont émergentes et intéressantes pour la problématique d'économie d'énergie en agriculture. Etudier ces stratégies sur le terrain afin de produire des données pour compléter le modèle Alomysys semble être un axe de recherche pertinent.

Le modèle SISOL, modèle d'évolution de l'état structural des couches de sol cultivées (couplé avec Alomysys) repose sur des hypothèses d'évolution de la proportion de zones tassées dans les couches de sol travaillées sous l'effet combiné du retournement par la charrue, du tassement par les roues des engins et de la fragmentation par les outils de reprise de labour et le climat. Il n'apparaît pas suffisamment sensible pour effectuer des distinctions d'évolution de la structure du sol sous l'effet d'un travail à 15 cm et à 5 cm de profondeur. C'est pourquoi nous n'obtenons pas de différence significative d'évolution de la structure superficielle du sol entre les différentes stratégies de travail du sol en non labour.

4. La qualité des simulations

Nous nous sommes limités à l'étude du vulpin des champs. Il aurait été plus pertinent de s'intéresser à un spectre plus large d'adventices annuelles et pérennes, telles que le liseron, le gaillet, le rumex ou le chardon, souvent présentes dans les systèmes de grandes cultures en agriculture biologique. Le modèle Florsys (Gardarin *et al.*, 2007) est une évolution d'Alomysys et prend en compte plusieurs espèces d'adventices. Il permet alors de déterminer le risque malherbologique des parcelles. Cependant, ce modèle est en cours de développement et n'est actuellement pas disponible.

Les simulations nous ont permis d'obtenir différents résultats plus ou moins en accord avec les résultats présents dans la littérature. L'insertion de luzerne pluriannuelle dans la rotation est efficace pour limiter la banque de semences d'adventices. Ce résultat est en accord avec les règles agronomiques, qui précisent que l'insertion cultures pluriannuelles dans la rotation permet de casser les cycles des adventices ainsi que les cycles des maladies et ravageurs et de maintenir ou d'améliorer la fertilité des sols. Dans la bibliographie (ITAB, 2005), la pratique des faux-semis est présentée comme une solution pertinente qui permet de diminuer la banque de semences de vulpins des champs. Les résultats issus de ce travail permettent de nuancer cette affirmation car l'alternance de périodes sèches et périodes humides est nécessaire pour optimiser l'efficacité du faux semis lors de la période estivale. Le recul de la date d'implantation des cultures d'automne pour limiter l'émergence de vulpins des champs, souvent évoqué par les agriculteurs, a été validé par les simulations sous Alomysys. D'après Marmarot (2004), le labour, par son action d'enfouissement, est une lutte mécanique préventive intéressante contre les adventices. Les résultats obtenus au cours de cette

étude permettent de nuancer cette affirmation. En effet, l'efficacité du labour systématique à profondeur de 15 cm sur le vulpin des champs, graminée annuelle, ne s'est pas révélée supérieure par rapport aux stratégies non labour. Nous posons l'hypothèse que le labour systématique à profondeur constante remonte des anciennes graines qui lèvent à leur tour. Certes, d'après l'expertise, le labour est, en conditions humides, un moyen efficace de lutter contre les adventices : il les enfouit pour empêcher celles qui ont levées d'arriver à graines. Cependant, son action sur la banque de semences de vulpins des champs est moins efficace. Après avoir testé deux dates de désherbage mécanique au printemps pour comparer leur efficacité, nous avons observé que le désherbage mécanique retardé (avril) est plus efficace que le désherbage mécanique plus précoce (février). Cela paraît contradictoire à la réalité, car généralement, l'efficacité de la herse étrille se limite au stade dicotylédones du vulpin des champs (ITAB, 2005). Nous posons l'hypothèse qu'au mois de février, la herse étrille a un rôle de minéralisation et de réchauffement du sol. A cette époque, la herse étrille met en germination d'autres vulpins des champs. Ainsi, ce désherbage mécanique de février doit être complété d'un autre désherbage, afin d'éliminer ces vulpins des champs émergé au cours du dernier travail du sol.

Les stratégies sans labour ont un effet bénéfique sur la structure du sol car l'horizon supérieur au moment du semis est moins affiné que lors d'une stratégie avec labour. Rasmussen (1999) démontre une densité apparente en stratégie sans labour plus importante liée à un nombre de passages d'engins plus élevé. Par ce travail, nous n'obtenons pas une telle information mais nous n'avons cependant pas simulé de travail du sol en conditions humides. Travailler dans de bonnes conditions est donc une règle importante à prendre en compte pour ne pas dégrader la structure du sol.

Les consommations énergétiques évaluées *via* le recours aux bases de données au cours de ce travail sont assez faibles, comparées aux données recensées au cours des enquêtes. Deux hypothèses permettent d'expliquer ces résultats : (i) la consommation énergétique des différentes stratégies est évaluée à l'échelle de la rotation, ce qui implique des opérations de travail du sol diluées du fait de la présence de culture pluriannuelle ; (ii) nous avons réalisé des simulations *a priori* itératives avec un objectif de salissement maximal de 400 pieds de vulpins à la récolte afin d'optimiser les stratégies, donc les opérations de travail du sol ont été légèrement minimisées.

Enfin, le résultat de l'évaluation multicritères montre que le labour est le travail du sol le moins pertinent selon les objectifs de limitation (i) de la consommation énergétique, (ii) de la population de vulpins et (iii) du tassement du sol. Cependant, les simulations portaient sur un labour systématique, à profondeur de travail du sol constante (labour à 15 cm). Une des perspectives peut être de réaliser d'autres itinéraires, avec insertion du labour au bout de quelques années de rotation céréalière et avec modification de la profondeur de labour selon les années. Peut-être obtiendrions nous des résultats différents ?

V. Conclusion

Au cours de cette étude, nous avons réalisé, dans un premier temps, des enquêtes qui ont permis de détecter différentes stratégies de travail du sol innovantes. Quatre types de stratégies de travail du sol ont été établies, à savoir deux stratégies « biologiques » et deux stratégies « mécaniques », classées dans l'ordre croissant de l'intensité de travail du sol : la stratégie avec couvert végétal permanent, la stratégie avec couvert végétal au cours de l'interculture, la stratégie avec travail du sol et la stratégie avec faux semis fréquents. Dans le discours des agriculteurs, l'intensité de travail du sol a été très clairement liée à la tolérance qu'avaient les agriculteurs vis-à-vis de la présence d'adventices dans leurs parcelles de cultures, certains acceptant de « faire avec » ces adventices, d'autres souhaitant « lutter contre » afin de les éliminer.

Sur les bases de ce travail, nous avons ensuite élaboré, par la consultation d'experts, des stratégies de travail du sol à tester *a priori*, en ayant recours à des modèles, sur une rotation longue et céréalière de 12 ans. Pour des raisons essentiellement méthodologique, le travail s'est limité à l'évaluation multicritères de stratégies de travail du sol mécaniques. Nous avons par la suite comparé cinq stratégies de travail du sol : une stratégie avec labour systématique à profondeur régulière (15 cm), une stratégie non labour avec travail du sol à profondeur de travail constante pendant l'interculture (5 cm), une stratégie non labour avec travail du sol à profondeur croissante pendant l'interculture (de 5 cm à 15 cm), une stratégie non labour avec travail du sol à profondeur décroissante pendant l'interculture (de 15 cm à 5 cm), et une stratégie non labour avec fréquence de travail du sol élevée et profondeur constante pendant l'interculture (5 cm). Nous avons alors réalisé des simulations itératives afin d'évaluer ces stratégies de travail du sol sur trois critères : (i) la consommation énergétique, (ii) la population de vulpins des champs et (iii) le tassement du sol.

L'évaluation des stratégies *a priori* à l'aide de modèles nous a permis de détecter quelques règles primordiales concernant la gestion du vulpin des champs dans les systèmes en grandes cultures : l'introduction de tête de culture pluriannuelle dans la rotation, le retardement de la date de semis à l'automne, un passage tardif au printemps de herse étrille ou deux passages pour limiter les vulpins des champs. La stratégie de travail du sol non labour avec augmentation de la profondeur de travail du sol au cours des passages s'est révélée la stratégie la plus pertinente d'un point de vue multicritères, avec des objectifs de limitation (i) de la consommation énergétique, (ii) de la banque d'adventices de vulpins des champs et (iii) de tassement du sol. Il est alors nécessaire de vérifier cette affirmation *a posteriori* afin de valider cette étude.

Cette enquête a permis de soulever le manque de recherche et d'expérimentation concernant le non labour en agriculture biologique. Dans un souci de limitation de la consommation énergétique, il est désormais essentiel de pallier à cette insuffisance et de réaliser des expérimentations concernant les stratégies de travail du sol économes en énergie car les changements de pratiques vont à l'avenir être nécessaires. En région Lorraine, cette thématique initiée par ce travail a des perspectives prometteuses. Cette étude sera poursuivie et la mise en place d'un réseau d'agriculteurs aura lieu afin de (i) partager des expériences, (ii) réfléchir sur les questions communes à travailler et (iii) tester des itinéraires techniques et différentes stratégies de travail du sol dans les différents contextes pédo-climatiques de la Lorraine.

BIBLIOGRAPHIE

- Arshad, M.A., Franzluebbers, A.J., Azooz, R.H., 1999. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil & Tillage Research* 53, 41-47.
- Bochu, J.-L., Risoud, B., Mousset, J., 2008. Consommation d'énergie et émissions de GES des exploitations en agriculture biologique : synthèse des résultats PLANETE 2006. Colloque international Agriculture biologique et changement climatique, Enita Clermont, France, 8pp.
- Calderan, P., Delaunoy, A., 2006. Le travail du sol en agriculture biologique dans le Tarn : premier diagnostic. *Chambre d'agriculture du Tarn*, 36pp.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64, 1479-1486.
- Cluzeau, D., Hallaire, V., Bodet, J.M., 2001. Le rôle des lombriciens sur le fonctionnement des sols : impacts des pratiques agricoles. *Du labour au semis direct : enjeux agronomiques*, 10-13.
- Colbach, N., Busset, H., Yamada, O., Durr, C., Caneill, J., 2006. ALOMYSYS: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate - II. Evaluation. *European Journal of Agronomy* 24, 113-128.
- Colbach, N., Chauvel, B., Gauvrit, C., Munier-Jolain, N.M., 2007. Construction and evaluation of ALOMYSYS modelling the effects of cropping systems on the blackgrass life-cycle: From seedling to seed production. *Ecological Modelling* 201, 283-300.
- Colbach, N., Durr, C., Roger-Estrade, J., Chauvel, B., Caneill, J., 2006. ALOMYSYS: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate - I. Construction. *European Journal of Agronomy* 24, 95-112.
- Diosma, G., Aulicino, M., Chidichimo, H., Balatti, P.A., 2006. Effect of tillage and N fertilization on microbial physiological profile of soils cultivated with wheat. *Soil & Tillage Research* 91, 236-243.
- Emmerling, C., 2007. Reduced and conservation tillage effects on soil ecological properties in an organic farming system. *Biological Agriculture & Horticulture* 24, 363-377.
- Fort, M., Leclerc, B., Bonin, G., 2001. *Machinisme spécifique à l'agriculture biologique : état des lieux. Agro-équipement*, 44pp.
- Gardarin, A., Munier-Jolain, N., Colbach, N., 2007. Florsys : un modèle des effets des systèmes de culture sur la démographie des adventices. *AFPF : journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes*, Dijon, 11 et 12 Décembre 2007, 9pp.
- Girard, N., 2004. Construire une typologie "située" des pratiques d'agriculteurs pour reformuler en partenariat un "problème". Document INRA-SAD Toulouse, 57pp+annexes.
- Girard, N., 2006. Catégoriser les pratiques d'agriculteurs pour reformuler un problème en partenariat : une proposition méthodologique. *Cahiers Agricultures* 15, 261-272.
- Hiltbrunner, J., Liedgens M., Bloch, L., Stamp, P., Streit, B., 2007. Legume covercrops as living mulches for winter wheat : Components of biomass and the control of weeds. *European Journal of Agronomy* 26, 21-29.
- ITAB, 2005. *Maitriser les adventices en grandes cultures biologiques. Guide technique*, 120pp.
- ITAB, 2007. *Optimisation de travail du sol en agriculture biologique : compte rendu technique final. projet ADAR*, 34pp.
- Jouy, L., Munier-Jolain, N., 2001. Gestion de l'interculture, désherbage et protection des cultures. *Du labour au semis direct : enjeux agronomiques*, 18-20.
- Kouwenhoven, J.K., Perdok, U.D., Boer, J., Oomen, G.J.M., 2002. Soil management by shallow mouldboard ploughing in The Netherlands. *Soil & Tillage Research* 65, 125-139.
- Kustermann, B., Kainz, M., Hulsbergen, K.J., 2008. Modeling carbon cycles and estimation of greenhouse gas emissions from organic and conventional farming systems. *Renewable Agriculture and Food Systems* 23, 38-52.
- Labreuche, J., Cariolle, M., Quere, L., 2004. Techniques sans labour : bilan des expérimentations françaises. *Techniques culturales sans labour : impacts économiques et environnementaux*, 24-34.

- Labreuche, J., de Tourdonnet, S., Germon, J.C., Ouvry, J.F., Le Souder, C., Castillon, P., Real, B., Felix, I., Duval, R., Galiene, J., Quere, L., 2007. Synthèse des impacts environnementaux des TCSL par milieu Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France 90-137.
- Le Souder, C., Castillon, P., Genermont, S., Gillet, J.P., Laurent, F., Lebreton, J.C., Malaval, C., Nicolardot, B., Quere, L., Reau, R., 2007. Impacts des TCSL sur la dynamique de l'azote et les pertes de composés azotés Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France 138-159.
- Lotter, D.W., 2003. Organic agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* 21, 59-128.
- Marmarot, J., 2004. Gestion des adventices. *Techniques culturales sans labour : impacts économiques et environnementaux*, 59-65.
- Miles, M., Huberman, M., 2003. Analyse des données qualitatives : Méthodes en Sciences Humaines. Editions De Boeck, 2ème Ed., Bruxelles.
- Munkholm, L.J., Schjonning, P., Rasmussen, K.J., 2001. Non-inversion tillage effects on soil mechanical properties of a humid sandy loam. *Soil & Tillage Research* 62, 1-14.
- Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M.T., Landi, L., Pietramellara, G., Renella, G., 2003. Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science* 54, 655-670.
- Peigne, J., Ball, B.C., Roger-Estrade, J., David, C., 2007. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management* 23, 129-144.
- Peigne, J., Gautronneau, Y., 2007. Travail du sol en grandes cultures biologiques : pratiques et attentes. *Alter-Agri* 81, 29-31.
- Peigne, J., Védie, H., Demusy, J., Gerber, M., Vian, J.F., Cannavacciuolo, M., Aveline, A., Giteau, J.L., Berry, D., 2008. Techniques sans travail du sol en agriculture biologique et fertilité du sol. *Dinabio : développement et innovation en agriculture biologique*, 11pp.
- Peigné, P., Gautronneau, Y., Cannavacciuolo, M., Aveline, A., 2005. Les techniques culturales simplifiées en agriculture biologique. *Alter-Agri* 70, 11-14.
- Peres, G., 2003. Identification et quantification in situ des interactions entre la diversité lombricienne et la macro-bioporosité dans le contexte polyculture breton, influence sur le fonctionnement hydrique du sol. Thèse de l'université de Rennes, 253pp.
- Perrot, C., 1990. Typologie d'exploitations construite par agrégation autour de pôles définis à dire d'experts : proposition méthodologique et premiers résultats obtenus en Haute-Marne. *Productions Animales* 3, 51-66.
- Piovanelli, C., Gamba, C., Brandi, G., Simoncini, S., Batistoni, E., 2006. Tillage choices affect biochemical properties in the soil profile. *Soil & Tillage Research* 90, 84-92.
- Rasmussen, K.J., 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil & Tillage Research* 53, 3-14.
- Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., Defossez P., Manichon H., Caneill J., 2004. SISOL : Un modèle d'évolution de l'état structural des couches de sol travaillées. *Etude et Gestion des Sols* 11, 33-46.
- Sébillote, M., Soler, L.G., partie, P., al.(éd.), B.e., 1990. Les processus de décision des agriculteurs. Première partie : Acquis et questions vives. In Brossier J., Vissac B., Lemoigne J. L., (eds.). *Modélisation systémique et systèmes agraires*, Paris: INRA, 88-102.
- Sébillote, M., 1975. Comment aborder et suivre l'introduction dans un système de culture de nouveaux procédés de travail du sol ? *Bulletin technique d'information*, 555-567.
- Teasdale, J.R., 2007. Strategies for soil conservation in no-tillage and organic farming systems. *Journal of Soil and Water Conservation* 62, 144A-147A.
- Tebbrugge, F., During, R.A., 1999. Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. *Soil & Tillage Research* 53, 15-28.
- Vullioud, P., Mercier, E., 2004. Résultats de 34ans de culture sans labour à Changins. I. Evolution des rendements. *Revue Suisse d'Agriculture* 36, 201-212.
- Vullioud, P., Neyroud, J.A., Mercier, E., 2006. Résultats de 35 ans de cultures sans labour à Changins. II. Evolution des propriétés du sol. *Revue Suisse d'Agriculture* 38, 1-16.
- Wechselberger, P., Kobler, M., Heissenhuber, A., 1999. Economic and ecological evaluation of management measures and or varying management systems. *Berichte Uber Landwirtschaft* 77, 184-200.
- West, T.O., Post, W.M., 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Science Society of America Journal* 66, 1930-1946.

ANNEXES

Annexe n°1 : caractéristiques générales des agriculteurs rencontrés au cours de l'enquête sur les stratégies de travail du sol innovantes

Localisation	type de sol	conversion à l'AB	Pratique du non labour	Rotations	Couvert végétal	Particularités
Allemagne	Sols limoneux et limono-argileux	1969	Systematique depuis 25 ans	5-6 ans	Oui	Semis sous couvert vivant, couverts végétaux
Maine et Loire	Sols limoneux profonds	2000	non (arrêt de cette pratique)	6-7 ans	en interculture longue	Arrêt du non labour, binage important
Ile et Vilaine	sols hydromorphes	Installé en AB	Systematique depuis son installation	3-4 ans	couvert spontané	Permaculture, sélection de variétés
Maine et Loire	sols sableux-limoneux et limono-argileux	installé en AB	Systematique depuis son installation	5 ans	oui	Travail superficiel, outils à dents, couverts végétaux et essais sous couvert vivant
Côte d'Or	sols argilo-calcaires et argilo-limoneux	2000	Systematique, depuis quelques années avant la conversion à l'AB	6-8 ans	non	Travail superficiel, outil à dents, utilisation importante de la herse étrille
Côte d'Or	Sols argilo-calcaires superficiels	2000	quelques essais mis en place depuis son installation	7 ans	oui (essai)	Travail superficiel et labour, essai semis sous couvert vivant
Yonne	Sols limoneux et argilo-calcaires	2001	Systematique depuis 17ans	6-8 ans	non	travail superficiel intense, outils à disques indépendants
Yonne	Sols limoneux et argilo-calcaires	2001	Systematique depuis 5 ans	9 ans	non	Travail superficiel avec une charrue déchaumeuse
Yonne	Sols limono-argileux et argilo-calcaires	2001	Systematique depuis 17ans	8-12 ans	en interculture longue	Travail superficiel, alternance outils à disques-outils à dents, modifications d'outils, essai semis sous couvert vivant depuis 2ans
Seine et Marne	Sols argileux, limoneux battants, et argilo-calcaires	1999 (essai depuis + de 20ans)	non systematique depuis une vingtaine d'années	5-10 ans	en interculture longue	Travail superficiel, outils à dents, essai semis sous couvert vivant
Seine et Marne	Sols argilo-limoneux et limoneux	1999	non systematique depuis une vingtaine d'années	12 ans	non	travail superficiel intense, outils à disques indépendants, semis d'automne (90%)
Cher	Sols argileux et argilo-calcaires	2000	non systematique depuis depuis une vingtaine d'années	varie en fonction de la pression adventices	non	Travail superficiel et décompactage, actisol, modifications d'outils

Travail du sol économe en énergie

Diversité de stratégies en systèmes de grandes cultures biologiques

Par Mathilde Gerber et Xavier Coquil (Unité de Recherche INRA SAD (UR055) de Mirecourt)



La consommation énergétique des systèmes de grandes cultures en AB est, en moyenne, 1,6 fois moins élevée que celles des systèmes de culture conventionnels (Bochu *et al.*, 2008). Cette faible consommation énergétique s'explique essentiellement par des consommations d'énergie indirecte très limitées, liées à la non utilisation d'intrants de synthèse (engrais, pesticides...). Toutefois, le travail du sol reste un poste gourmand en énergie et des marges de progrès existent...

La simplification du travail du sol suscite actuellement un intérêt grandissant auprès des agriculteurs biologiques, sensibles aux techniques sans labour pour des raisons agronomiques et environnementales. L'utilisation de stratégies de travail du sol sans labour (TSL) semble bénéfique pour la fertilité des sols ainsi que

pour la qualité de l'air (séquestration du carbone). De plus, nous faisons l'hypothèse que l'utilisation de TSL en AB permettra de diminuer le coût énergétique des systèmes de culture. Cependant, la gestion des adventices reste une problématique centrale. Ainsi, cette étude a pour objectif de concevoir et d'évaluer des stratégies de travail du sol multi-objectifs, conciliant économie en énergie fossile, gestion des adventices et préservation de la stabilité structurale des sols. Ce travail, en cours de réalisation, est réalisé en trois étapes successives :

- tout d'abord, un travail d'enquêtes a été réalisé afin de détecter et de caractériser les stratégies de travail du sol innovantes et potentiellement économes en énergie mises en œuvre dans des systèmes de grandes cultures, chez des agriculteurs biologiques ;
- ensuite, ces stratégies et pratiques innovantes sont sélectionnées par un groupe d'experts lorrains puis testées virtuellement, grâce à l'utilisation de modèles mathématiques tels que Alomysys¹(Colbach

et al., 2006) dans le contexte pédoclimatique lorrain ;

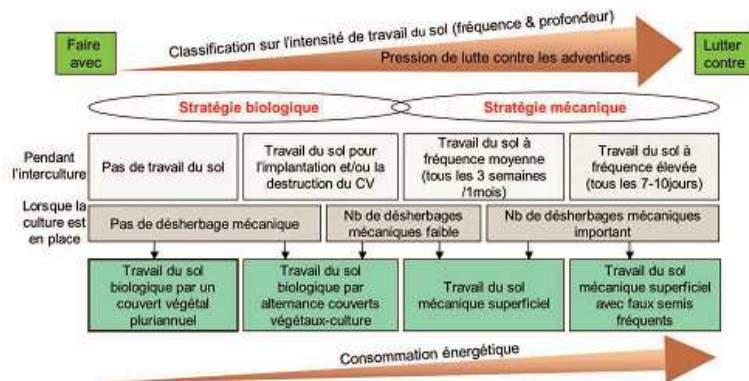
- enfin, sur la base de l'évaluation assistée par modèles, les stratégies et pratiques de travail du sol répondant le mieux aux trois objectifs fixés, seront testées sur l'installation expérimentale de l'INRA de Mirecourt, située dans la plaine des Vosges, durant plusieurs années. Cet article présente les résultats du travail d'enquêtes réalisé auprès des agriculteurs, visant à détecter la diversité des pratiques de travail du sol innovantes. La recherche des agriculteurs, limitée à la moitié Nord de la France, a été réalisée en sollicitant différents réseaux et organismes professionnels agricoles et selon la méthode « boule de neige », qui consiste à trouver un premier informateur dirigeant vers d'autres interlocuteurs.... Ainsi, les quinze agriculteurs enquêtés pratiquaient l'agriculture biologique au sein d'exploitations céréalières et recouraient à des pratiques innovantes de travail du sol à l'échelle de leur exploitation.

¹ Modèle permettant de simuler la population de vulpins présente en fonction des cultures implantées et des interventions culturales.

Couverts Intercultures multi-espèces

Au sein des rotations culturales testées sur l'installation expérimentale de Mirecourt, des couverts intercultures sont implantés afin d'éviter des sols nus durant la période hivernale. L'implantation de ces couverts répond à plusieurs objectifs : limiter la fuite des reliquats minéraux présents à la récolte (et éventuellement fixer de l'azote atmosphérique par l'introduction de légumineuses), limiter l'érosion des sols et lutter contre les adventices. De plus, afin de limiter la consommation d'énergie à l'échelle du système de culture, nous souhaitons assurer une implantation et une destruction peu coûteuse de ce couvert. Ainsi, les mélanges multi-espèces implantés sont composés uniquement de plantes gélives (- 5°C), misant sur une destruction du couvert par les températures hivernales. En 2008, afin d'assurer un couvert précoce et compétitif face à la levée des adventices, un essai de semis à la volée au sein de la culture de céréales en place a été réalisé deux semaines avant moisson.

Recherche/Expé - SoRecherche/Expé - Sol



Graphique 1 - Diversité des stratégies de travail du sol rencontrées, classées en fonction de la tolérance des agriculteurs, vis-à-vis de la présence d'adventices dans leurs champs cultivés.

Les agriculteurs biologiques recourant aux techniques sans labour systématique à l'échelle de leur exploitation sont peu nombreux. Ces agriculteurs sont avant tout préoccupés par la structure de leurs sols et la qualité environnementale de leurs pratiques. La majorité des agriculteurs rencontrés pratiquent les TSL, trois pratiquent le semis sous couvert vivant à l'échelle de leurs exploitations et trois autres réalisent des essais.

Nous pouvons classer les stratégies de travail du sol rencontrées selon l'intensité de travail du sol pendant l'interculture et pendant la culture (figure 1). L'intensité de travail du sol caractérise le couple « fréquence de passage d'outil x profondeur de travail de l'outil ». Dans le discours, l'intensité de travail du sol est très clairement liée à la perception qu'ont les agriculteurs de la présence d'adventices dans leurs parcelles de cultures,

certains acceptant de faire avec ces adventices, d'autres souhaitant lutter contre afin de les éliminer. D'un point de vue énergétique, le gradient de travail du sol ainsi dressé correspond à une variation de consommation de fioul allant croissant de 50 à 150 litres de fuel par hectare de SAU et par an. Bien sûr, l'intensité de travail du sol n'est certainement pas le seul facteur expliquant ces différences de consommation aux regards de la diversité des conditions de milieu et des systèmes de cultures en place chez les agriculteurs enquêtés. A l'issue de ces enquêtes, nous différencions les stratégies dites « biologiques », peu consommatrices en énergie, des stratégies dites « mécaniques ». Au final, nous obtenons quatre types de stratégies de travail du sol : deux « biologiques » et deux « mécaniques ». Elles sont présentées dans l'ordre croissant d'intensité du travail du sol.

Stratégie biologique : couvert végétal permanent

Elle repose sur l'activation de la vie biologique du sol (les plantes, les micro-organismes, les macro-organismes, l'humus...), en limitant les perturbations par des aérations répétées du sol lors d'opérations culturales. Ainsi, la permaculture tend à imiter la nature : le sol est toujours couvert de végétation et est ainsi protégé contre l'érosion éolienne et hydrique, contre le dessèchement par le soleil et contre l'envahissement par les adventices. Les interventions techniques se limitent au semis, à la récolte et à la fauche du couvert permanent (ex : trèfle). La compétition entre le couvert permanent et la culture en place est difficile à maîtriser. Ainsi, le contrôle du couvert est le facteur clé de réussite de cette stratégie.

Stratégie biologique : couvert végétal interculture

Pour les concepteurs de ces stratégies, l'interculture est une période privilégiée pendant laquelle la production de biomasse permet de protéger et de structurer le sol et de recycler les reliquats d'éléments minéraux post-culture. La couverture permet également la nutrition et la protection de la vie du sol et de la faune sauvage. Pour remplir un rôle optimal, le couvert végétal doit être bien implanté et homogène : l'association de plusieurs espèces est souvent utilisée pour assurer une bonne couverture du sol, quelles que soient les conditions climatiques. La gestion des couverts



Culture de blé au stade début tallage, sous couvert de trèfle (05/02/08).

Travail du sol sans labour

Groupe de travail Lorrain sur le travail du sol sans labour
A l'échelle de la Lorraine, le travail du sol sans labour au sein des systèmes de cultures faibles intrants fait l'objet d'une investigation collective INRA de Mirecourt/CCA (Centre des groupements d'Agrobiologistes Lorrains)/CRAL (Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine), soutenue par la région Lorraine. Ce groupe, a pour objectifs de poursuivre le travail d'évaluation de stratégies de travail du sol innovantes sur l'installation expérimentale de l'INRA, et de le coupler à une mise en réseau d'expériences menées par des agriculteurs à l'échelle de la région Lorraine.

végétaux est importante : l'optimum est une implantation du couvert le jour de la moisson. Plus il est semé tôt, et plus il peut faire concurrence aux adventices, surtout si les espèces semées ont un développement rapide. Il faut un certain temps entre la destruction du couvert végétal et l'implantation de la culture suivante. En effet, le couvert doit se décomposer correctement afin qu'il ne concurrence pas la culture mise en place (faim d'azote). Le couvert peut être détruit :

- naturellement (choix d'un couvert gélif dans les zones soumises à des hivers rigoureux) ;
- à l'aide d'un rouleau faca (*photo*) (écrasement des végétaux) ;
- à l'aide d'un cultivateur travaillant superficiellement (à moins de 5 cm de profondeur).

La culture suivante peut être implantée directement dans le couvert. Dans ce cas, le semis se fait obligatoirement avec un semoir adapté au semis direct afin de trancher la végétation et permettre la réalisation d'un semis favorable. Ainsi les interventions techniques se limitent au semis, à la récolte de la culture puis au semis de l'interculture et une éventuelle destruction du couvert.

Stratégie mécanique : travail du sol

Ces stratégies sont essentiellement rencontrées sur des terres argilo-calcaires et/ou sous des conditions climatiques à faibles précipitations. Plusieurs travaux superficiels du sol sont effectués : déchaumage, faux semis, préparation du lit de semences. La profondeur de ces travaux peut varier de cinq à quinze centimètres selon le type de matériel présent sur l'exploitation (néo-déchaumeur, néo-cultivateur, actisol, cultivateur, vibroculteur...) et selon les objectifs de l'agriculteur (limitation de la consommation énergétique, aération du sol...). Les outils travaillant plus en profondeur, tels que l'ameublisseur, ne sont pas indispensables. Le désherbage mécanique en post-semis est

utilisé selon l'état de salissement toléré par l'agriculteur. Dans certains cas, la charrue est utilisée en dernier recours lorsque la gestion des adventices devient difficile.

Stratégie mécanique : faux semis fréquents

Cette stratégie se base sur l'abondance de faux semis pour épuiser les adventices vivaces par extirpation et pour détruire les adventices annuelles qui se développent au stade plantule. L'outil à disques indépendants semble adapté pour cette stratégie car il permet de travailler le sol rapidement (15 km/h) et sa polyvalence permet d'avoir un parc matériel réduit. Le niveau de tolérance des agriculteurs pratiquant cette stratégie vis-à-vis des adventices est très limité. Ainsi, le recours au désherbage mécanique en post-semis est fréquent (nombre de passages élevé, différents types d'outils : bineuse, houe rotative, herse étrille).

Suite à ces enquêtes, différentes stratégies de travail du sol potentiellement intéressantes dans les conditions pédo-climatiques Lorraines ont été élaborées à l'aide d'un groupe d'experts. Elles sont actuellement évaluées à l'aide de modèles : ainsi, nous évaluons l'état de salissement des champs par le vulpin et l'état structural du sol des parcelles soumises à ces stratégies grâce au modèle Alomysys (Colbach *et al.*, 2006). Nous évaluons la consommation énergétique de ces stratégies en nous référant à la base de données en cours d'acquisition sur l'installation expérimentale de l'INRA de Mirecourt, ainsi que la base de données mise au point par Arvalis - Institut du Végétal (Simeq). Ce travail doit aboutir à la formalisation de stratégies et de règles de décision sur les modalités de travail du sol à tester en situation expérimentale, permettant de répondre à nos trois objectifs dans les conditions lorraines : limitation de la consommation énergétique, gestion des adventices et préservation de la stabilité structurale des sols.



Le rouleau faca, écraseur de végétaux, est utilisé pour la destruction économe en énergie de couverts intercultures.



Désherbage mécanique d'une parcelle de seigle au stade trois feuilles, avec une bineuse munie d'un appareil de guidage à cellules photo-électriques (09/11/07).

Remerciements

Ce travail a été réalisé en partenariat avec le CGA (Centre des Groupements des Agrobiologistes) de Lorraine dans le cadre d'un contrat financé par la région Lorraine. Nous souhaitons remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué directement ou indirectement à ce travail : animateurs, conseillers... et nous souhaitons particulièrement remercier les agriculteurs qui nous ont reçus chez eux, les membres du groupe d'experts, ainsi que l'équipe de l'INRA de Mirecourt.



POUR EN SAVOIR PLUS

- Bochu J.-L., Risoud B., Mousset J. (2008). "Consommation d'énergie et émissions de GES des exploitations en agriculture biologique : synthèse des résultats PLANETE 2006", Colloque international Agriculture biologique et changement climatique, Enita Clermont, France, 17-18 avril 2008, 8p.
- Colbach, N., Durr C., Roger-Estrade J., Chauvel B., Caneill J. (2006). "ALOMYSYS: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate - I. Construction", *European Journal of Agronomy* 24(2), pp95-112.

RESUME : Stratégies de travail du sol économes en énergie dans les systèmes de culture en agriculture biologique : détection, élaboration, évaluation multicritères *a priori*

Les agriculteurs évoquent des besoins en matière de recherches scientifiques sur la question du travail du sol sans labour en agriculture biologique pour des raisons agronomiques, environnementales (limitation de gaz à effet de serre) et économiques (limitation de la consommation énergétique). Cette étude a consisté à (i) détecter des stratégies de travail du sol innovantes économes en énergie par le biais d'enquêtes chez les agriculteurs, (ii) réaliser une typologie de ces stratégies, (iii) élaborer des stratégies à évaluer *a priori*, selon 3 critères (la consommation énergétique, l'impact sur la population de vulpins des champs et sur la structure du sol) à l'aide de modèles dans les conditions pédo-climatiques lorraines et (iv) classer ces stratégies sur la base d'une évaluation *a priori* multicritères (gestion des adventices, stabilité structurale, consommation énergétique). A partir des enquêtes, nous pouvons dire qu'il existe une diversité de pratiques de travail du sol dans les systèmes de grandes cultures biologiques. Nous avons établis 4 types de stratégies de travail du sol pour décrire cette diversité, à savoir deux stratégies « biologiques » et deux stratégies « mécaniques », correspondant à un remplacement progressif d'un travail du sol naturel, par la faune qu'il héberge, par un travail du sol mécanique d'intensité croissante.. Partant de cette typologie, 5 stratégies « mécaniques » ont ensuite été conçues à l'aide d'un groupe d'experts lorrains et évaluées *a priori* à l'aide de modèles dans les conditions pédo-climatiques lorraines (labour systématique, non labour avec travail du sol à profondeur de travail constante, non labour avec travail du sol à profondeur croissante, non labour avec travail du sol à profondeur décroissante et non labour avec fréquence de travail du sol élevée). La stratégie de travail du sol *non labour avec augmentation de la profondeur de travail du sol au cours des passages* s'est révélée être la stratégie la plus pertinente lorsque nous accordons une importance égale à l'économie d'énergie, le salissement de la parcelle par les vulpins des champs et la structure du sol. Il est maintenant nécessaire de vérifier cette affirmation par le test de cette stratégie en parcelle expérimentale.

Mots clés : agriculture biologique, travail du sol, économie d'énergie, évaluation multicritères *a priori*

ABSTRACT : Soil tillage strategies efficient in energy using in organic cropping systems : detection, design, *a priori* multicriteria assessment

Farmers evoke scientific research needs on no-till tillage for agronomic, environmental (greenhouse gases limitation) and economic (energy consumption limitation) reasons. This study consisted in (i) identifying tillage strategies innovative and efficient in energy using through surveys among farmers, (ii) make a typology of these strategies, (iii) design strategies to assess *a priori* by using models in the Lorraine soil and climate conditions and (iv) prioritize these strategies on the basis of a multicriteria assessment (weed management, structural stability, energy consumption). According to the survey, there is a diversity of soil tillage practices in organic cropping systems. We established four types of soil tillage strategies: two « biological » strategies and two « mechanical » strategies, corresponding to a progressive replacement from the soil tillage by its wildlife to the soil tillage by an increasing use of mechanical power. Inspired by this survey, five « mechanical » strategies were designed, with the help of local experts, and *a priori* evaluated with existing models : systematic labor, conservation tillage with constant tillage depth, conservation tillage with increasing tillage depth, conservation tillage with decreasing tillage depth and conservation tillage with higher tillage frequency. The strategy of conservation tillage with increasing tillage depth was assessed as the most relevante strategy from a multicriteria point of view. It is necessary to evaluate those results in an experimental trial.

Key words : oranic farming, soil tillage, efficient energy, *a priori* multicriteria assessment