

Fonctionnement de peuplements en semis direct associant du blé tendre d'hiver (Triticum aestivum L.) à différentes plantes de couverture en climat tempéré

Matthieu Carof

▶ **To cite this version:**

Matthieu Carof. Fonctionnement de peuplements en semis direct associant du blé tendre d'hiver (Triticum aestivum L.) à différentes plantes de couverture en climat tempéré. domain_other. INAPG (AgroParisTech), 2006. Français. NNT : 2006INAP0016 . tel-00338817

HAL Id: tel-00338817
https://pastel.hal.science/tel-00338817

Submitted on 14 Nov 2008

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.

Institut National Agronomique Paris–Grignon
Ecole doctorale ABIES

UMR Agronomie INRA/INA P–G

THESE

Présentée pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS–GRIGNON

par

Matthieu CAROF

Ingénieur de l'Institut National Agronomique Paris–Grignon

Fonctionnement de peuplements en semis direct associant du blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.) à différentes plantes de couverture en climat tempéré

Soutenue publiquement le 17 octobre 2006 devant le jury composé de :

Denis ANGERS	Chercheur Agriculture Agroalimentaire (Canada)	Rapporteur
Alain CAPILLON	Professeur ENSA Montpellier	Rapporteur
Harry OZIER-LAFONTAINE	Directeur de recherche INRA Antilles-Guyane	Examinateur
Guy RICHARD	Directeur de recherche INRA Orléans	Examinateur
Jean ROGER-ESTRADE	Professeur INA Paris–Grignon	Directeur de thèse
Stéphane de TOURDONNET	Maître de conférences INA Paris–Grignon	Encadrant

« Je ne sais pourquoi je trouve du charme à regarder un champ inculte. Cela représente le possible. »
Victor Hugo. *Philosophie prose.*

« …ce que vous dites là est parfaitement vrai, et parfaitement faux, comme tout au monde. »
Alfred de Musset. *Lorenzaccio.*

AVANT-PROPOS

Ce travail est signé de mon nom mais il est le fruit de diverses collaborations. En premier lieu, j'ai beaucoup de plaisir à remercier mes encadrants, Jean Roger-Estrade et Stéphane de Tourdonnet, qui m'ont accompagné pendant trois ans avec leur confiance, leur complémentarité, leur disponibilité, leur enthousiasme et leurs idées pour que cette thèse puisse être menée à bien. Exigeant mais toujours chaleureux, chacun m'a entraîné plus loin dans la réflexion et dans la rigueur ; avec humour et patience, ils ont su amoindrir certains de mes nombreux défauts et renforcer certaines de mes rares qualités. Ce travail est marqué de leur empreinte : j'en retire un profond respect et une grande fierté.

Thierry Doré a toute ma considération et mon admiration. Directeur de l'unité où cette thèse s'est déroulée, je le remercie d'abord pour son accueil ; il m'a ensuite toujours soutenu, orienté et aidé lorsque j'ai fait appel à lui. Ses pertinents conseils dans la relecture de ce document m'ont assisté pour construire une argumentation la plus rigoureuse possible.

Claire Chenu, Isabelle Cousin, Christian Feller et Vincent Hallaire ont accepté d'être les membres de mon comité de pilotage. Par leurs critiques et nos discussions, ils ont largement participé aux réflexions autour de mes travaux ; je leur en suis très reconnaissant. Deux personnes ont eu un rôle clé dans la concrétisation de ce travail. Yves Coquet m'a patiemment expliqué le principe de l'infiltrométrie, ce qui fut déterminant. Avec une grande pédagogie, Louis-Marie Bresson m'a transmis ses connaissances sur les mesures de porosité de blocs de terre imprégnée de résine. Pour ces mesures, je n'oublie pas la forte implication de Vincent Hallaire sous le costume de responsable de l'atelier de lames minces de l'UMR SAS INRA/AgroCampus Rennes ; je lui adresse encore mes plus sincères remerciements.

J'ai aussi beaucoup apprécié les échanges scientifiques avec Marie-Odile Bancal, Pablo Cruz, Jacques Gasquez, François Lecompte et Hervé Sinoquet.

Les données expérimentales acquises pour la réalisation de cette thèse sont l'aboutissement du travail de plusieurs personnes. Avant tout, je souhaite exprimer toute ma gratitude à Dominique Le Floch pour son soutien, sa motivation, ses connaissances techniques et son humeur bretonne ; il fut un maillon essentiel au déroulement de cette thèse. J'exprime toute ma sympathie aux autres membres de l'équipe technique qui sont intervenus dans ce projet, particulièrement Mathieu Bazot et Richard Gosse sans omettre Christine Souin qui m'a aidé et encouragé pendant toute la durée de la thèse. Je remercie aussi Patrick Saulas et Gilles Grandeau qui ont assuré durant trois ans la difficile conduite technique du dispositif expérimental de Grignon, support de ce travail.

Je n'oublie pas l'aide technique reçue d'unités extérieures. Cette thèse doit beaucoup à Christophe Labat qui a su m'expliquer, avec toute sa gentillesse, le fonctionnement des infiltromètres à disque ; il n'a jamais fait défaut à mes nombreuses sollicitations. De son côté,

Yannick Bénard n'a pas compté son temps pour participer à mon travail. Sans son intervention, les mesures de porosité sur les blocs de terre imprégnée de résine seraient encore un doux rêve dans mon cerveau de doctorant. Je remercie Daniel Boitez et Hervé Gaillard pour la réalisation de certaines mesures sur les échantillons de sol. J'adresse aussi mes remerciements à Florence Lafouge pour les quelques milliers de dosage d'azote total qu'elle a effectués et à Olivier Maury pour son aide dans l'utilisation du logiciel ImageJ.

Merci aux autres collègues et doctorants de l'UMR Agronomie INRA/INA P–G. Je tiens à remercier spécifiquement Marie-Hélène Jeuffroy qui est intervenue à quelques reprises pour me conseiller et guider certaines de mes décisions. Jean-François Fourbet et David Makowski m'ont éclairé de leurs connaissances en statistique ; je les en remercie. Merci à Alain Bône, fournisseur officiel de l'unité en articles scientifiques ! Merci aussi à Joëlle Brun pour toutes les démarches administratives. Stéphanie Pineau, dont l'un des rôles dans l'unité est le suivi des doctorants, a toute mon amitié : au-delà de son efficacité, sa gentillesse et sa bonne humeur ont été plus d'une fois un rempart contre le désappointement. Pour les raisons qu'elle sait, son courage aujourd'hui est pour moi une source d'admiration et une leçon de vie.

Je souhaite remercier mes collègues et amis, Cédric Naud et Céline Pelosi, pour leur soutien constant et leur sympathie. Merci à Cédric pour ses explications sur les écart-types ; merci à Céline pour ses cours sur les vers de terre qui intéressent tant de personnes à travers le monde !

Je me souviens avec plaisir des foisonnantes discussions échangées avec Lorène Prost. J'ai aussi beaucoup apprécié de partager un bureau avec Aurélie Vocanson puis Walid Sadok.

Denis Angers et Alain Capillon ont accepté d'être les rapporteurs de ce document ; Harry Ozier-Lafontaine, Guy Richard, Jean Roger-Estrade et Stéphane de Tourdonnet ont bien voulu faire partie du jury. J'en suis honoré et je les remercie de l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et du temps qu'ils y ont consacré.

Merci à ma famille de son soutien et de ses encouragements, surtout pendant les périodes les plus difficiles de cette thèse. Je tiens à remercier en particulier mon père, Sylvain Carof, pour sa relecture consciencieuse de ce document malgré son emploi du temps très chargé. Merci aussi à mon oncle, Alain Sibiril, pour ses corrections sur le résumé en anglais de ce travail.

Je profite de cette thèse pour remercier ceux qui, dans mon parcours professionnel et académique, m'ont conduit jusqu'ici : Jean-Marc Guiavarc'h, Sylvain Carof et Yannick Lautrou.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE 9

CHAPITRE I – ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET PROBLEMATIQUE.....15

1. Effets du semis direct sur les composantes du milieu cultivé 15

1.1. Effets du semis direct sur la composante biologique 16
1.2. Effets du semis direct sur la composante chimique.....17
1.3. Effets du semis direct sur la composante physique 18

2. Associer une plante de couverture à une culture de vente..... 22

2.1. Interactions entre espèces.....23
2.2. Productivité des cultures associées 24

3. Combiner le semis direct et l'association de cultures..... 25

4. Problématique de la thèse..... 30

CHAPITRE II – EFFETS DE DIFFERENTES PLANTES DE COUVERTURE SUR LE RENDEMENT DU BLE ET SUR SES COMPOSANTES.....35

1. Introduction 37

2. Materials and Methods 39

2.1. Site description.....39
2.2. Experimental design 39
2.3. Management practices.....39
2.4. Data collection and calculation 41
2.5. Statistical analysis 41

3. Results and Discussion..... 43

3.1. Wheat grain yield 43
3.2. Yield components 45

4. Conclusion..... 49

CHAPITRE III – COMPETITION OU FACILITATION POUR L'AZOTE ET LA LUMIERE ENTRE LE BLE ET LES PLANTES DE COUVERTURE.....51

1. Introduction 53

2. Materials and Methods 54

2.1. Site description.....54
2.2. Experimental design and management practices.....54
2.3. Data collection and calculation 54

3. Results and Discussion..... 59

3.1. Changes in *AWR* over time according to treatment 59
3.2. Canopy structure: height and *LAI* of intercropped species 59
3.3. PAR interception and partitioning between intercropped species.....63

3.4. Above-ground biomass and *NNI*: indicators of competition or facilitation for light and N....65

4. Conclusion.... 69

5. Résultat complémentaire : la teneur en azote total des résidus de culture 69

CHAPITRE IV – STRUCTURE ET PROPRIETES HYDRIQUES D'UN SOL EN SEMIS DIRECT AVEC DIFFERENTES PLANTES DE COUVERTURE.....73

1. Introduction 75

2. Materials and Methods 77

2.1. Site description....77
2.2. Experimental design 77
2.3. Measurements and calculation of *K* 77
2.4. Calculation of mean effective pore size radius....78
2.5. Image analysis of pore space....78
2.6. Statistical analysis 79

3. Results 81

3.1. Hydraulic conductivity....81
3.2. Functional porosity....83
3.3. Pore space description 83

4. Discussion 86

5. Résultat complémentaire : la rétention de l'eau 88

DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES 91

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 101

ANNEXES..... 115

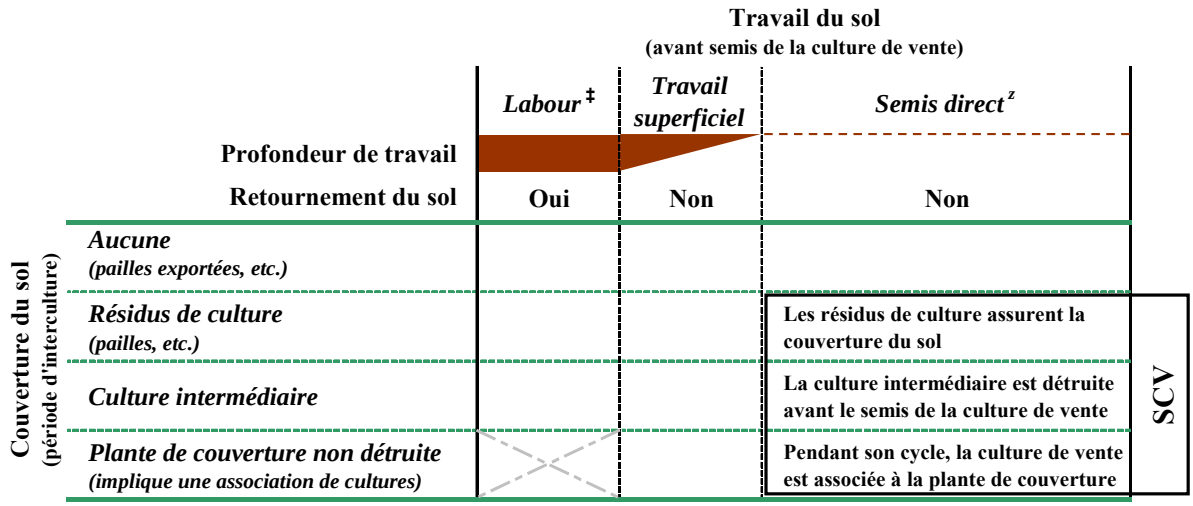
Introduction générale

Pour nourrir une population mondiale en constante augmentation, il faut accroître sans cesse la production agricole. Cet objectif peut être atteint par l'augmentation des surfaces en production et/ou par l'augmentation de la productivité des systèmes de culture. Cette dernière solution a été mise en œuvre en Europe de manière spectaculaire, tout spécialement après la seconde guerre mondiale. Cependant, cette intensification des systèmes de culture européens s'est accompagnée d'un certain nombre d'effets néfastes sur l'environnement qui ont conduit à une forte remise en cause du modèle agricole occidental (Boiffin *et al.*, 2001). Il faut donc proposer de nouveaux systèmes de culture pour répondre à ces attentes, souvent contradictoires, sur la productivité agricole, le respect de l'environnement et la rentabilité économique. Dans ce contexte, un des rôles de la recherche agronomique est de fournir des bases scientifiques pour concevoir ces systèmes de culture. **C'est dans ce cadre que se situe ce travail de thèse sur les systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV).**

Les premiers SCV sont américains. Aux Etats-Unis, les années 1930 sont marquées par une crise économique et agricole majeure. Dans les Grandes Plaines, une mauvaise gestion agricole du sol, *i.e.* un travail du sol profond et répété, concomitante à des épisodes de sécheresse entraîne des pertes de terres cultivées par érosion éolienne, le *Dust Bowl*. Dès 1935, les pouvoirs publics prennent conscience de certains effets néfastes du labour et déclarent que l'érosion est une menace nationale (Masutti, 2004). Le gouvernement établit alors le *Soil Conservation Act*, instaure le *Soil Conservation Service*[1] au sein de l'*United States Department of Agriculture* (USDA) et met en place des mesures de conservation du sol (Masutti, 2004). Parmi les solutions proposées émerge une technique culturale qui consiste à travailler le sol superficiellement pour y maintenir des résidus de récolte pendant la période d'interculture. Les fondements de l'agriculture de conservation sont établis : un travail minimal du sol et sa couverture permanente par un paillis végétal (Derpsch, 2001). Dans les années 1960, la diffusion de l'herbicide total Paraquat et la construction de semoirs adaptés accélèrent l'essor de l'agriculture de conservation (Capillon & Séguy, 2002). En 2000, plus de 35 % de la sole nationale est cultivée selon les principes de cette agriculture (Magleby, 2002).

L'expérience nord-américaine s'étend hors des frontières du pays. La technique élaborée aux Etats-Unis se répand au Canada et surtout au Brésil qui connaît à la fin des années 1960 d'importants problèmes d'érosion hydrique (Bernoux *et al.*, 2006). Comme les conditions pédoclimatiques du Brésil diffèrent fortement de celles des Etats-Unis, la recherche agronomique est sollicitée pour adapter la technique américaine au contexte brésilien et pour élaborer de nouvelles modalités de culture (Capillon & Séguy, 2002).

[1] Depuis 1994, le *Soil Conservation Service* est devenu le *Natural Resources Conservation Service*.



‡Les opérations de travail du sol qui retournent le sol empêchent leur couplage avec une couverture du sol par une plante jamais détruite.

zLe travail du sol en semis direct se réduit à celui réalisé par les éléments semeurs.

Figure Intro–1 : Description des principales pratiques culturales de gestion du sol avant le semis de la culture commerciale et pendant la période d'interculture : place des SCV parmi ces techniques (d'après Lahmar *et al.*, 2006).

En s'inspirant du *tapado* d'Amérique centrale, *i.e.* une pratique antique de semis à la volée dans une jachère herbacée préalablement fauchée, **les chercheurs basés au Brésil conçoivent des systèmes de culture dans lesquels la culture commerciale est semée directement[1] dans un couvert végétal qui occupe le champ cultivé en permanence** ; ce sont les SCV qui se divisent en deux types principaux selon l'état de la couverture végétale (Capillon & Séguy, 2002). Dans les SCV avec un couvert végétal mort, la couverture du sol est assurée par les résidus des cultures précédentes et/ou par la biomasse d'une plante de couverture implantée puis détruite avant le semis direct de la culture de vente ; ces SCV s'apparentent à la technique du semis direct. **Dans les SCV avec un couvert végétal vivant, la culture commerciale est associée à une espèce végétale pérenne (vivace ou se ressemant annuellement) pendant son cycle de croissance et de développement.** Après la récolte de la culture de vente, la plante de couverture occupe le sol de la parcelle durant toute la période d'interculture. La croissance et le développement du couvert végétal peuvent être freinés par l'utilisation d'herbicides ou de moyens mécaniques.

Des expériences nord-américaine et brésilienne émergent un constat : la réduction du travail du sol est souvent associée à une augmentation de sa couverture par de la biomasse végétale qui assure une certaine protection, en particulier contre les phénomènes érosifs. Toutefois, la mise en œuvre de ce principe est extrêmement diverse à travers le monde en fonction des modalités de travail et de couverture du sol (Figure Intro–1).

En France, les SCV existent peu même si les techniques de travail du sol alternatives au labour, regroupées sous le terme de techniques sans labour (TSL), se développent depuis les années 1970, essentiellement pour des raisons structurelles et économiques. En effet, l'abandon du labour permet de gagner du temps, de diminuer les charges de mécanisation et de réduire le coût du carburant. Ces techniques restent cependant marginales puisqu'en 2001, les TSL sont présentes sur moins de 7,5 % des surfaces cultivées françaises (Trocherie & Rabaud, 2004). Toutefois, des études récentes montrent une forte progression de ces surfaces ces dernières années : elles couvriraient, aujourd'hui, 30 % de la sole cultivée en France (Labreuche, com. pers.).

Si l'étude des SCV en climat tempéré est encore très peu développée (KASSA, 2006), les cultures associées suscitent un regain d'intérêt de la part de la recherche agronomique. Depuis plusieurs années, les agronomes s'associent aux écologues pour concevoir des systèmes de culture innovants capables d'assurer la durabilité de l'agriculture. Au travers de ce rapprochement scientifique, les agronomes cherchent à modifier les systèmes de culture pour utiliser des processus naturels peu coûteux en énergie, en s'inspirant de l'écologie (Dupraz, 2006). L'adaptation de certaines caractéristiques pertinentes des écosystèmes aux agrosystèmes peut conférer à ces derniers des propriétés émergentes telles que la résilience, l'efficience énergétique ou la régulation des populations des ennemis des cultures. La diversité biologique et la pérennité du couvert végétal sont deux caractéristiques majeures des écosystèmes naturels qui expliquent leur efficacité environnementale et leur stabilité (Dupraz, 2006 ; Tilman *et al.*, 2006). L'augmentation de la diversité biologique peut même s'accompagner d'un accroissement de la productivité des écosystèmes naturels (Tilman *et al.*, 2006). Pour toutes ces raisons, il peut être

[1] Le semis direct est l'absence totale de travail du sol, excepté celui des éléments semeurs (El Titi, 2003a). Le sol reste généralement couvert par les résidus de la culture précédente, non exportés.

intéressant (i) d'augmenter la diversité spécifique des agrosystèmes en cultivant plusieurs espèces simultanément et, (ii) de pérenniser un ou plusieurs organismes végétaux vivants sur la parcelle agricole : c'est la démarche proposée dans les SCV avec cultures associées.

Ces systèmes de culture plurispécifiques doivent permettre d'assurer des performances agronomiques (rendement, qualité) tout en limitant les atteintes à l'environnement (cette limitation peut se traduire par la réduction de l'utilisation des énergies fossiles ou le piégeage des nitrates excédentaires pendant la période d'interculture) ; ces systèmes de culture doivent aussi permettre d'améliorer certains impacts positifs de l'agriculture sur l'environnement (*e.g.* l'augmentation de la quantité de carbone séquestré).

L'hypothèse sous-jacente est que la combinaison de plusieurs espèces est importante voire nécessaire pour atteindre ces objectifs en permettant de mieux valoriser les ressources physiques et les processus biologiques naturels de l'environnement (*e.g.* les interactions positives ou le recyclage des éléments fertilisants) (Ghiloufi *et al.*, 2001). Toutefois, la cohabitation spatio-temporelle de plusieurs espèces entraîne souvent des phénomènes de compétition réduisant parfois la productivité des systèmes de culture (Ewel *et al.*, 1991 ; White & Scott, 1991 ; de Tourdonnet *et al.*, 2003 ; Samarajeewa *et al.*, 2005). Pour garantir aux agriculteurs les performances agronomiques et économiques de ces systèmes de culture, la compétition interspécifique doit d'abord être comprise puis maîtrisée.

L'enjeu de cette thèse est donc d'acquérir des connaissances scientifiques sur les SCV avec cultures associées afin de contribuer à concevoir ces systèmes de culture encore inexistants en France actuellement. Il s'agit alors d'identifier et de hiérarchiser les principaux facteurs limitants de la production. Il s'agit aussi de décrire le fonctionnement d'un agrosystème où une succession d'espèces annuelles à valeur marchande est cultivée sur un sol non travaillé avec une espèce pérenne assurant des fonctions agroécologiques. En effet, les connaissances scientifiques sont nombreuses pour rendre compte du fonctionnement d'une parcelle agricole où un mélange d'espèces herbacées est cultivé sur un sol travaillé. En revanche, ces connaissances sont beaucoup plus éparses lorsque (i) le mélange d'espèces comprend une culture de vente et une plante de couverture pérenne sans valeur marchande et que, (ii) le sol n'est plus travaillé. Ainsi, avec comme objectif la conception de nouveaux systèmes de cultures, il s'agit de comprendre les interactions que les espèces, cultivées simultanément, établissent sur un sol en semis direct et de caractériser les impacts de ces interactions sur la production de la culture commerciale. Il convient aussi de caractériser les modifications des composantes biologique, chimique et physique du milieu cultivé sous l'influence de l'association entre une culture commerciale et une plante de couverture sur un sol non travaillé.

Ce mémoire s'organise autour de quatre chapitres. Le chapitre I est une analyse bibliographique centrée sur la technique du semis direct, sur la technique de l'association culturale et sur leur couplage ; cette analyse aboutit à l'énoncé de la problématique de la thèse. Les chapitres II à IV correspondent à des articles scientifiques soumis à des revues internationales à comité de lecture ; ils présentent et discutent les résultats expérimentaux acquis au cours de ce travail. Plus particulièrement, le chapitre II se centre sur l'impact des SCV avec cultures associées sur le

rendement de la culture de vente en s'attachant à mettre en évidence les phases de sensibilité aux stress de cette culture. Le chapitre III s'intéresse aux interactions qui s'établissent entre les cultures associées d'un SCV et qui peuvent être à l'origine d'une baisse de rendement de la culture commerciale. Le chapitre IV a pour objectif de mieux comprendre le fonctionnement d'un agrosystème en SCV avec cultures associées en étudiant les effets de ces systèmes de culture sur la structure du sol et ses propriétés hydriques.

Le mémoire s'achève par une discussion générale qui expose les apports de cette thèse, ses limites, sa place dans le cadre de la recherche agronomique sur la conception et l'évaluation de nouveaux systèmes de culture et ses conséquences sur les pratiques agricoles. Des perspectives de recherche pour l'étude des SCV avec cultures associées en climat tempéré sont aussi proposées.

Chapitre I – Etude bibliographique et problématique

Un système de culture est « *l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique* » (Sebillotte, 1990). Ce concept comprend la succession culturale et les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures. L'objet d'étude de cette thèse, *i.e.* les SCV avec cultures associées, se distingue des systèmes de culture conventionnels par deux pratiques culturales : le semis direct et l'association de cultures.

L'étude bibliographique est séparée en trois parties. Les deux premières parties concernent les deux pratiques culturales fondatrices des SCV avec cultures associées, prises séparément ; la troisième partie traite de ces systèmes particuliers qui lient le semis direct et l'association de cultures en un ensemble cohérent. L'étude bibliographique débouche sur l'énonciation de la problématique de la thèse.

1. Effets du semis direct sur les composantes du milieu cultivé

En France, un certain nombre de freins agronomiques et environnementaux empêchent l'essor de la technique du semis direct, à la base des SCV. Pourtant, la réduction du travail du sol diminue la consommation d'énergie et accroît la séquestration du carbone (Holland, 2004), sans nuire nécessairement au rendement de la culture de vente (Rasmussen, 1999). Smith (2004) rapporte que la technique du semis direct en Europe peut permettre de séquestrer plus de carbone que la technique du labour (jusqu'à 0,38 t C ha^{-1} an^{-1} de plus en semis direct). En l'absence de travail du sol, la présence de résidus à la surface du sol freine le ruissellement et permet de réduire efficacement les risques d'érosion (Rasmussen, 1999 ; Basic *et al.*, 2004). Le semis direct participe aussi à l'amélioration de certaines caractéristiques de la qualité du sol, à savoir « *sa capacité à fonctionner dans un écosystème particulier pour produire de la biomasse, maintenir la qualité de l'air et de l'eau et assurer la santé des plantes et des animaux* » (SSSA, 2006). Cette définition souligne l'importance de la qualité du sol qui conditionne la production agricole (Rezaei *et al.*, 2005) mais également d'autres fonctions comme l'habitat des espèces telluriques ou le transfert de l'eau et des solutés.

La synthèse bibliographique ci-dessous, qui s'appuie lorsque c'est possible sur des synthèses antérieures (en particulier sur les thèmes déjà largement présents dans la littérature internationale), présente les impacts, favorables ou défavorables, de la technique du semis direct sur les composantes biologique, chimique et physique du milieu cultivé.

1.1. Effets du semis direct sur la composante biologique

1.1.1. Les organismes du sol

Les microorganismes du sol sont la microflore (*e.g.* les bactéries, les champignons) et la microfaune telluriques (*e.g.* les nématodes, les protozoaires). Les populations de la microflore du sol sont fortement perturbées par l'abandon du labour au profit du semis direct (Doran, 1980). Les modifications des conditions climatiques en semis direct, *i.e.* des écarts de température plus faibles et des teneurs en eau plus élevées (Kladivko, 2001), sont favorables à une augmentation de l'activité et de la biomasse microbiennes dans les premiers centimètres de sol (Roper & Gupta, 1995). Cette augmentation s'observe pour les populations bactériennes comme pour les populations fongiques (Wardle, 1995). Cependant, en semis direct, les champignons sont dominants dans les cinq premiers centimètres de sol alors qu'en situation labourée, cette zone est dominée par les bactéries (Frey *et al.*, 1999). La colonisation racinaire par les mycorhizes est plus élevée en sol non travaillé qu'en sol labouré (McGonigle *et al.*, 1999 ; Galvez *et al.*, 2001 ; Anken *et al.*, 2004).

Comme peu d'études comparent la biomasse de la microfaune en semis direct et en travail conventionnel, une généralisation des effets du semis direct sur ces populations est hasardeuse (Wardle, 1995). Dans un article de synthèse, Kladivko (2001) rapporte une grande variabilité de réponse de la microfaune au travail du sol ; par exemple, les populations de nématodes peuvent être favorisées ou inhibées après un labour (Wardle, 1995). Cette variabilité s'explique par la dépendance de la microfaune vis-à-vis de nombreuses caractéristiques du milieu cultivé dépendant du travail du sol. Par exemple, le développement de la microfaune est associé (i) aux conditions physiques du sol qui régissent sa motilité (*e.g.* la taille des pores, la présence d'un film d'eau liquide sur la paroi de ces derniers) et, (ii) aux macroorganismes qui s'en nourrissent.

Les effets du travail du sol sur les macroorganismes animaux ont été étudiés principalement sur les annélides ou vers de terre pour leurs rôles essentiels dans l'agrosystème (Kladivko, 2001). La quantité de vers de terre augmente fortement dans un sol non travaillé par rapport à un sol travaillé conventionnellement (Jordan *et al.*, 1997 ; Kladivko *et al.*, 1997 ; Tebrügge & Düring, 1999 ; Anken *et al.*, 2004). Cette augmentation s'explique par des conditions climatiques plus favorables, par l'absence de dommages occasionnés aux vers de terre par la charrue et par la présence d'une litière en surface (Shuster & Edwards, 2003). L'écart entre les situations culturales est d'autant plus grand que l'ancienneté du système sans travail du sol est importante (Edwards & Lofty, 1982). Les espèces anéciques sont les plus affectées par le travail du sol : leurs populations croissent considérablement après l'abandon du labour (Kladivko, 2001).

La réduction du travail du sol est souvent bénéfique aux autres macroorganismes tels que les microarthropodes, les insectes supérieurs, les myriapodes (El Titi, 2003b).

1.1.2. Les ennemis des cultures

Les modifications des populations des organismes du sol par la technique du semis direct concernent aussi les ennemis des cultures dont la difficile gestion constitue un frein important au développement de cette technique en climat tempéré.

En semis direct, les dégâts causés par les limaces sur diverses espèces cultivées s'accroissent (Willson & Eisley, 1992 ; Voss *et al.*, 1998 ; Andersen, 1999), même dans des régions du monde où elles étaient inconnues comme ravageurs (Glen & Symondson, 2003). Ceci amène les agriculteurs à utiliser des molluscicides.

Le semis direct favorise le développement des graminées annuelles et des adventices vivaces (El Titi, 2003c ; Murphy *et al.*, 2006), même si ce développement dépend plus des conditions pédoclimatiques et de la succession culturale que du travail du sol (El Titi, 2003c). La plus grande prolifération des adventices en semis direct peut accroître les charges opérationnelles liées aux herbicides (Debaeke & Orlando, 1994 ; El Titi, 2003c).

1.2. Effets du semis direct sur la composante chimique

1.2.1. Les matières organiques mortes

Une des raisons qui explique les changements de la composante biologique dans un système de culture sans travail du sol est la présence de ressources nutritionnelles différentes en quantité et en qualité par rapport à un système de culture avec travail du sol. Comparé à un sol labouré, les teneurs en azote et carbone organiques augmentent en semis direct, dans les cinq à dix premiers centimètres de sol (Pekrun *et al.*, 2003). Dans leur synthèse bibliographique, ces derniers auteurs rapportent que dans certaines situations, l'accumulation de matières organiques en surface s'accompagne de leur diminution en profondeur (voir par exemple, McCarty *et al.*, 1998). Cette stratification des matières organiques résulte principalement du maintien d'une quantité élevée de résidus en surface d'un sol non travaillé (Rasmussen, 1999 ; Tebrügge & Düring, 1999). La quantité d'azote labile dans les matières organiques augmente en semis direct (Doran, 1980).

Balesdent *et al.* (2000) mettent en évidence une importante réduction de la vitesse de minéralisation du carbone organique en semis direct par rapport à un sol travaillé. Pour Pekrun *et al.* (2003), c'est plus la dynamique de minéralisation des composés organiques qui est modifiée en semis direct. Par exemple, le pic de minéralisation concomitant au travail du sol n'existe plus ; la composition des microorganismes décomposeurs, dominés par les champignons, favorise l'immobilisation de l'azote au détriment de sa minéralisation (Carter & Rennie, 1987). Malgré tout, la quantité élevée de matières organiques permet de conserver une minéralisation importante en semis direct (Pekrun *et al.*, 2003).

1.2.2. Les éléments minéraux

Le non retournement du sol en semis direct conduit à un enrichissement en éléments minéraux des premiers centimètres de sol par rapport à une situation avec labour (Follett & Peterson, 1988 ; Edwards *et al.*, 1992). D'un autre côté, en semis direct, les quantités d'éléments minéraux peuvent être réduites en profondeur, notamment le phosphore et le potassium (Pekrun *et al.*, 2003). L'émission de protoxyde d'azote est favorisée dans un sol non travaillé (Six *et al.*, 2002 ; Baggs *et al.*, 2003 ; Liu *et al.*, 2006). D'autre part, si des études rapportent que le lessivage des nitrates peut être réduit lorsque le sol n'est plus travaillé (Power & Peterson, 1998 ; Halvorson *et al.*, 2001), d'autres études concluent qu'il peut être accentué (Sharpley & Smith, 1994 ; Catt *et al.*, 2000) ou non modifié (McConkey *et al.*, 2002). La même variabilité s'observe pour le transfert des herbicides en profondeur : en semis direct, les pertes d'herbicides peuvent être réduites (Tebrügge & Düring, 1999) ou augmentées (Holland, 2004) par rapport à un sol travaillé. En fait, ces contradictions sur le comportement des polluants s'expliquent par le fait que l'absence de travail du sol joue sur des phénomènes qui réduisent le risque de pollution (*e.g.* l'augmentation de la quantité de matières organiques en semis direct accroît l'adsorption de la plupart des pesticides) et sur d'autres qui l'accentuent (*e.g.* les écoulements préférentiels peuvent augmenter en semis direct). La balance entre les deux dépend étroitement des conditions expérimentales telles que le type de sol, la topographie ou le régime des précipitations (Barriuso *et al.*, 1994).

1.3. Effets du semis direct sur la composante physique

En modifiant la structure du sol, le semis direct affecte la qualité du sol (Dexter, 1997), particulièrement la circulation de l'air et de l'eau, la pénétration des racines dans le sol et l'accessibilité des nutriments aux végétaux.

1.3.1. Structure et propriétés hydriques d'un sol non travaillé

La stabilité des agrégats est corrélée à la quantité de carbone organique présent dans le sol (Stengel *et al.*, 1984). Comme cette quantité augmente sensiblement en semis direct, les agrégats sont plus stables dans cette situation culturale (Angers *et al.*, 1993 ; Suwardji & Eberbach, 1998 ; Hernánz *et al.*, 2002 ; Saber & Mrabet, 2002 ; Sasal *et al.*, 2006).

Si la stabilité des agrégats est accrue en semis direct, **l'absence de travail du sol conduit, en revanche, à une diminution de la porosité de l'horizon de surface par rapport à un sol travaillé conventionnellement** ; de nombreuses études réalisées dans des conditions pédoclimatiques variées concluent à une augmentation de la densité apparente en semis direct, dans les cinq à dix premiers centimètres de sol (Ehlers *et al.*, 1983 ; Hammel, 1989 ; Hill, 1990 ; Grant & Lafond, 1993 ; Rhoton *et al.*, 1993 ; Unger & Jones, 1998 ; Lampurlanés & Cantero-Martínez, 2003 ; Basic *et al.*, 2004). Généralement, une conséquence de la compaction du sol en semis direct est la pénétration plus difficile des racines dans le sol (Ehlers *et al.*, 1983 ; Hammel, 1989 ; Hill, 1990 ; Grant & Lafond, 1993 ; Ferreras *et al.*, 2000). Tebrügge & Düring (1999) montrent que l'écart de densité apparente entre un sol labouré et un sol non travaillé est maximal après le passage de la charrue ; l'écart décroît au cours de la saison de culture.

Dans les premiers centimètres de sol, la distribution de la taille des pores est modifiée en l'absence de travail du sol. **La mésoporosité[1] et/ou la macroporosité diminuent dans un sol en semis direct par rapport à un sol labouré** (Hill, 1990 ; Pierce *et al.*, 1994 ; Hussain *et al.*, 1998 ; Ferreras *et al.*, 2000) ; l'écart entre les deux situations culturales est particulièrement marqué après le travail du sol (Pierce *et al.*, 1994). De manière analogue, Guérif (1994) montre qu'en semis direct, les pores structuraux sont moins nombreux, situés en surface et plus continus. Une meilleure continuité des pores en semis direct est aussi observée par Heard *et al.* (1988) et Azooz & Arshad (1996). **Concernant la microporosité, des études rapportent qu'elle est plus élevée en l'absence de travail du sol** (Pierce *et al.*, 1994 ; Azooz & Arshad, 1996 ; Bhattacharyya *et al.*, 2006). Après l'arrêt du labour, la proportion de pores créés par l'activité biologique, *i.e.* les biopores longs et cylindriques, diminue fortement puis augmente au cours du temps (Shipitalo & Protz, 1987 ; VandenBygaart *et al.*, 1999). Le réseau poral qu'ils définissent présente souvent une continuité élevée (Blevins *et al.*, 1983) ; ces pores participent activement à la pénétration des racines et aux mouvements de l'eau dans le sol (Dexter, 1991).

Du volume et de la morphologie de l'espace poral dépendent les propriétés hydriques du sol *i.e.* le stockage et la circulation de l'eau (Pachepsky & Rawls, 2003). **De nombreuses études s'accordent pour montrer qu'un sol non travaillé retient plus d'eau** (Dao, 1993 ; Arshad *et al.*, 1999 ; Ferreras *et al.*, 2000 ; Baumhardt & Jones, 2002 ; Bhattacharyya *et al.*, 2006) du fait de la modification de l'espace poral mais aussi du fait de la présence des résidus en surface qui réduisent l'évaporation (Munawar *et al.*, 1990 ; Guérif, 1994). **En revanche, il n'existe pas de consensus concernant les effets du semis direct sur la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol.** Comparé à un sol travaillé, la vitesse d'infiltration de l'eau dans un sol en semis direct peut être augmentée (Miller *et al.*, 1998 ; Arshad *et al.*, 1999), similaire (Blanco-Canqui *et al.*, 2004 ; Fuentes *et al.*, 2004) ou diminuée (Ferreras *et al.*, 2000 ; Lampurlanés & Cantero-Martínez, 2006). En fait, cette variabilité s'explique par les différences d'évolution du réseau poral au cours du temps entre un sol labouré et un sol en semis direct. Des macropores[2] sont créés juste après le labour ce qui améliore temporairement la vitesse d'infiltration de l'eau (Lin *et al.*, 1999 ; Coquet *et al.*, 2005) mais l'action mécanique de la charrue peut détruire la continuité des biopores formés pendant le cycle cultural précédent (Logsdon *et al.*, 1993). A l'inverse, la réduction du nombre de méso- et macropores du sol après l'abandon du labour est contrebalancée par un accroissement de la quantité des biopores lors de la pratique à long terme de la technique du semis direct (Rasmussen, 1999). De plus, l'augmentation de la quantité de matières organiques dans les premiers centimètres d'un sol non travaillé faciliterait l'infiltration de l'eau (Findeling *et al.*, 2003).

1.3.2. Agents structurants en semis direct

La structure d'un sol évolue continuellement, alternant les phases de formation, de stabilisation et de dégradation. La formation de la structure du sol résulte principalement de perturbations physiques d'origine anthropique ou climatique (Oades, 1993 ; El Titi, 2003a). Les pores créés par

[1] La micro-, méso- et macroporosité représentent les pores dont le rayon équivalent est, respectivement, inférieur à cinq micromètres, compris entre cinq et 500 micromètres et supérieur à 500 micromètres (Luxmoore, 1981).

[2] La porosité hydrauliquement active est constituée par une fraction des méso- et macropores du sol.

ces perturbations sont généralement allongés ; ce sont les fissures. L'activité biologique des organismes du sol participe aussi à la formation de la structure mais joue surtout un rôle majeur dans sa stabilisation (Young *et al.*, 1998). La dégradation de la structure résulte quant à elle de l'action de l'homme ou du climat (Young *et al.*, 1998).

Selon les systèmes de culture, les diverses activités impliquées dans l'évolution de la structure du sol n'interviennent pas avec la même importance, la même intensité et le même pas de temps. **En semis direct, les activités biologique et climatique sont au cœur des processus d'évolution de la structure**, les interventions humaines se limitant aux passages d'engins agricoles, aux apports d'éléments fertilisants et aux amendements organiques.

Comment les activités anthropique, biologique et climatique agissent-elles sur l'évolution de la structure d'un sol non travaillé ?

Rôle de l'activité anthropique dans l'évolution de la structure du sol en semis direct

Les apports d'éléments minéraux et/ou organiques par le chaulage ou les épandages divers de fertilisants, de fumiers, de lisiers, etc. améliorent l'agrégation (Haynes & Naidu, 1998). Les apports, minéraux et organiques, peuvent aussi favoriser l'activité des organismes vivants capables d'actions chimique et/ou physique sur la structure (Oades, 1993). **Le choix de la culture commerciale, de la gestion de la période d'interculture (*e.g.* l'implantation d'une culture intermédiaire) ou de la présence d'un couvert végétal pérenne participent à l'évolution de la structure du sol par le système racinaire des plantes, ce que je décris postérieurement.** Le passage d'engins agricoles dégrade la structure : il entraîne un tassement localisé qui est fonction de la pression exercée, du temps d'application, de l'humidité du sol et de l'état de compacité initial (Richard *et al.*, 1999).

Rôle de l'activité climatique dans l'évolution de la structure du sol en semis direct

Les phénomènes climatiques tels que les alternances des cycles humectation–dessiccation ou gel–dégel fragmentent le sol (Oades, 1993) ; les caractéristiques du réseau fissural qui en résulte dépendent de l'interaction entre le microclimat du sol (température, humidité) et sa composition granulométrique et minéralogique (Hallaire, 1988). La structure à la surface de certains sols (*e.g.* les sols limoneux) peut se dégrader sous l'action des pluies. De ce phénomène résulte la formation d'une croûte superficielle ou croûte de battance (Valentin & Bresson, 1992), plus ou moins imperméable aux transferts d'eau. Le taux de couverture du sol par les plantes peut ralentir les gouttes de pluie en les interceptant et peut diminuer ainsi leur impact négatif sur le sol (Le Bissonnais, 1988). **La présence d'un couvert végétal permanent, mort ou vivant, peut réduire les effets néfastes des gouttes de pluie sur le sol.**

Rôle de l'activité biologique dans l'évolution de la structure du sol en semis direct

Les microorganismes. Les microorganismes, essentiellement la microflore, décomposent les matières organiques du sol ce qui favorise la formation d'agrégats stables par la sécrétion de polysaccharides extracellulaires (Roper & Gupta, 1995). Ces molécules lient durablement les particules primaires du sol entre elles (Dorioz *et al.*, 1993 ; Oades, 1993). Les hyphes fongiques peuvent aussi former un véritable réseau de liens capables de maintenir mécaniquement les

agrégats entre eux (Oades, 1993) ; l'agrégation tend à augmenter avec la densité des hyphes (Haynes & Beare, 1997). Certains auteurs suggèrent que l'augmentation de la formation d'agrégats stables en semis direct est directement liée à l'accroissement des populations de microorganismes du sol dans cette situation culturale (Roper & Gupta, 1995).

Les vers de terre. Les macroorganismes animaux qui participent à l'évolution de la structure du sol se classent dans le groupe fonctionnel des « *ingénieurs de l'écosystème* », essentiellement représentés par les vers de terre dans les régions tempérées (Lee & Foster, 1991 ; Lavelle, 1997). Les vers de terre épigés participent peu à la formation et à la stabilisation de la structure contrairement aux vers de terre anéciques et endogés (Lee & Foster, 1991). Les vers de terre anéciques développent un réseau de galeries subhorizontales et subverticales (Lavelle, 1997). Pour les vers de terre endogés, géophages, les galeries sont pour la plupart subhorizontales, remplies de turricules[1] (Lavelle, 1997), avec parfois des composantes verticales ouvertes vers la surface (Kay, 1990). Les vers de terre se retrouvent essentiellement dans les 20 premiers centimètres de sol mais certains descendent jusqu'à 50 centimètres de profondeur (Lavelle, 1997). Certains auteurs montrent que la création des galeries peut s'accompagner d'une légère compaction du sol dans la drilosphère[2], compaction née de la pression exercée par les animaux lorsqu'ils creusent (McKenzie & Dexter, 1988a ; McKenzie & Dexter, 1988b). Le diamètre des galeries varie avec la taille du ver de terre (Lavelle, 1997). Généralement elles mesurent de un à dix millimètres de diamètre (certaines atteignent 30 millimètres), constituant ainsi les pores les plus larges du sol (Lavelle, 1997) qui participent efficacement à l'aération du sol et au transport de l'eau et des solutés (Fragoso *et al.*, 1997). Les vers de terre sont aussi capables d'enfouir les résidus végétaux et de les fractionner en unités plus petites qui peuvent être décomposées par les microorganismes (Roper & Gupta, 1995). De plus, lors de leurs déplacements, les vers de terre géophages ingèrent des particules de sol qu'ils mélangent dans leur intestin avec des résidus organiques comme les polysaccharides ; les turricules excrétés sont des agrégats stables (Six *et al.*, 2004). Comparé à un sol travaillé, l'augmentation des populations de vers de terre constatée en semis direct peut effectivement s'accompagner d'une augmentation du nombre de biopores (Tebrügge & Düring, 1999 ; McGarry *et al.*, 2000 ; Tan *et al.*, 2002) et de la quantité de turricules dans l'horizon superficiel (VandenBygaart *et al.*, 1999).

Les racines. Les végétaux supérieurs agissent sur la structure par l'action de leurs racines et par l'apport de matières organiques au sol, sources de carbone pour les microorganismes (Angers & Caron, 1998). Au cours du développement racinaire, un biopore est produit lorsqu'une racine pénètre soit dans un milieu sans macrostructure préexistante (Dexter, 1991), soit dans un pore originel plus petit que le diamètre de la racine (Kay, 1990). Au voisinage de ce biopore la porosité diminue du fait de la pression exercée par la racine en expansion (Kay, 1990 ; Dexter, 1991). Après décomposition de la racine et comme le sol n'est pas perturbé, le biopore demeure et participe à la fois aux transferts d'eau et de solutés, à l'aération du sol et au développement des racines de la culture suivante (Jakobsen & Dexter, 1988 ; Kay, 1990 ; Dexter, 1991 ; Oades, 1993). Le prélèvement d'eau par les racines dessèche le sol à proximité ce qui crée des zones de fissuration par l'alternance des cycles humectation–dessiccation (Angers & Caron, 1998). Comme

[1] Les turricules sont des boulettes fécales.

[2] La drilosphère est la couche de sol d'épaisseur un à deux millimètres entourant une galerie.

les hyphes fongiques, les racines lient les agrégats entre eux (Young *et al.*, 1998). Les exsudats racinaires constituent un ciment qui stabilise les agrégats (Angers & Caron, 1998) : les agrégats les plus stables sont dans la rhizosphère (Bronick & Lal, 2005).

La forme du système racinaire varie en fonction du milieu et des espèces végétales. Par exemple, chez les monocotylédones il est souvent fasciculé alors que chez les dicotylédones il s'organise autour d'une racine pivot (Russell, 1977). Ces diverses architectures racinaires entraînent des variations dans la capacité des racines à pénétrer dans les pores et les agrégats pour explorer un volume de sol à la recherche d'eau et de nutriments (Whittington, 1968 ; Russell, 1977 ; Reid & Goss, 1981 ; Oades, 1993 ; Six *et al.*, 2004 ; Bronick & Lal, 2005). Ainsi, l'agrégation tend à augmenter avec la longueur spécifique *i.e.* la longueur de racine par unité de biomasse racinaire (Bronick & Lal, 2005). De plus, les plantes n'ont pas toutes la même capacité à produire des exsudats ou à interagir avec les organismes du sol ce qui modifie leurs effets sur la stabilisation des agrégats (Reid & Goss, 1981 ; Oades, 1993 ; Six *et al.*, 2004 ; Bronick & Lal, 2005). Par exemple, la quantité d'exsudats produite par les racines du maïs (*Zea mays* L.) est inférieure à celle produite par le blé (*Triticum aestivum* L.) (Hütsch *et al.*, 2002) ; les exsudats du lupin (*Lupinus augustifolius* cv. Feste) stimulent plus la croissance des champignons que ceux du blé (Haynes & Beare, 1997). **L'activité structurante des racines dépend de l'espèce présente sur la parcelle agricole.**

Dans un sol viticole, Pagliai & Denobili (1993) mettent en évidence une relation entre le développement racinaire et la présence de pores de petite taille plus nombreux en semis direct. D'un autre côté, l'augmentation de la densité apparente dans les premiers centimètres d'un sol non travaillé peut réduire le développement des racines en surface (Rasmussen, 1999).

2. Associer une plante de couverture à une culture de vente

Avec le semis direct, l'association culturale, *i.e.* la culture de deux (ou plusieurs) espèces végétales en même temps, sur une même parcelle (Vandermeer, 1989), constitue l'autre principe fondateur des SCV avec cultures associées.

Les associations culturales *stricto sensu* impliquent la culture simultanée de deux espèces à valeur marchande directe (les deux espèces récoltées peuvent être vendues) ou indirecte (l'une des deux espèces peut être utilisée, par exemple, comme fourrage pour alimenter les animaux de l'exploitation). Bien que différentes des associations entre une culture commerciale et une plante de couverture, il est important de les présenter car elles sont le principal objet des recherches dans ce domaine. Lorsque cela est nécessaire, je précise la distinction entre les associations culturales *stricto sensu* et les associations d'une culture de vente avec une plante de couverture.

Dans une association culturale, les deux espèces conduites conjointement établissent des interactions qui sont des phénomènes complexes et dynamiques faisant intervenir des mécanismes de compétition et de facilitation pour les ressources du milieu.

2.1. Interactions entre espèces

Les espèces associées interagissent par l'intermédiaire de l'environnement : une espèce affecte l'environnement (*e.g.* elle prélève une ressource) et en retour, les espèces présentes sur la parcelle réagissent à cette modification de leur milieu de vie (Figure I–1).

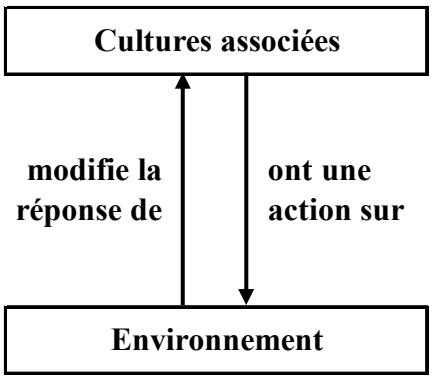


Figure I–1 : Représentation schématique des interactions entre espèces (d'après Vandermeer, 1989).

L'environnement se définit par le sol, le climat et les organismes vivants (dont les ennemis des cultures) qui le composent. Les ressources du milieu sensibles aux interactions entre espèces sont nombreuses, tant au niveau aérien qu'au niveau tellurique (Jose *et al.*, 2004). Au niveau aérien les espèces associées interagissent essentiellement pour l'interception du rayonnement solaire (Casper & Jackson, 1997) ou la modification du microclimat (humidité, température). La régulation des populations de bioagresseurs est un autre exemple d'interaction entre espèces (Letourneau, 1990 ; Sarthou *et al.*, 2005). Au niveau du sol les interactions s'établissent principalement pour les ressources en eau et en macroéléments fertilisants (Casper & Jackson, 1997). En Ecologie, de nombreux concepts décrivent les interactions entre espèces : l'amensalisme[1], le commensalisme[2], la symbiose, etc. En Agronomie, je propose de retenir que pour une ressource donnée, la nature de l'interaction établie entre les espèces cultivées sera soit neutre, soit compétitive, soit facilitée. Une interaction neutre est l'absence d'effet réciproque mesurable entre deux espèces *i.e.* le bénéfice ou le désavantage d'une espèce sur l'autre n'est pas mesurable. Une interaction compétitive – ou compétition – apparaît lorsque l'une des deux espèces a un effet sur l'environnement néfaste pour l'autre espèce (Callaway & Walker, 1997) voire les deux. A l'inverse, une interaction facilitée – ou facilitation – existe lorsque l'une des deux espèces a un effet sur l'environnement favorable pour l'autre espèce (Bruno *et al.*, 2003) voire les deux. La nature des interactions dépend de la morphologie, de la physiologie, de la densité et de l'agencement spatial des espèces qui constituent l'association culturale (Anil *et al.*, 1998). **Vandermeer (1989) souligne que les compétitions interspécifiques sont presque inévitables dans les association culturales.**

[1] L'amensalisme qualifie une relation nuisible pour une espèce, neutre pour l'autre.

[2] Le commensalisme qualifie une relation bénéfique pour une espèce, neutre pour l'autre.

Lorsque les espèces associées établissent une relation de compétition, celle-ci peut aboutir à l'apparition d'un facteur limitant *i.e.* l'une des ressources du milieu est en dessous du minimum critique pour la croissance et/ou le développement d'une espèce. Cette relation de compétition devient donc particulièrement nuisible pour l'une et/ou l'autre des espèces associées. **L'intensité d'une relation de compétition varie selon la ressource considérée, la biologie des espèces et les itinéraires techniques choisis pour l'association culturale (Fukai & Trenbath, 1993).** On aboutit à la classification suivante (Vandermeer, 1989) :

- Faible relation de compétition. Les espèces se partagent une même ressource du milieu mais à des périodes différentes de leur cycle ou dans des zones différentes du milieu ou avec des besoins très contrastés ou dans des situations où la ressource est issue d'origines différentes (*e.g.* les légumineuses peuvent utiliser l'azote de l'air contrairement aux graminées).
- Forte relation de compétition. Les espèces se partagent une même ressource du milieu, de même origine, en même temps, dans une même zone, avec des besoins similaires.

2.2. Productivité des cultures associées

Les interactions entre espèces déterminent la productivité d'une association culturale, la productivité étant un critère nécessaire pour apprécier l'intérêt agronomique d'un système de culture. Selon la nature et l'intensité des interactions, Vandermeer (1989) définit deux situations pouvant conduire à un gain de productivité dans une association culturale :

- La production facilitée. Une relation de facilitation s'établit entre les espèces associées : l'espèce A modifie positivement le milieu pour l'espèce B et du fait de cette facilitation, le rendement de l'espèce B dans l'association culturale est plus fort que dans le cas où elle est cultivée seule.
- La production compétitive. Une faible relation de compétition s'établit entre les espèces associées : l'espèce A modifie négativement l'environnement pour l'espèce B et du fait de cette compétition, le rendement de l'espèce B dans l'association culturale est plus faible que dans le cas où elle est cultivée seule. Pourtant, les espèces cultivées ensemble se complètent, utilisent plus efficacement les ressources du milieu que les espèces séparées ce qui augmente le rendement global de l'association culturale.

Toutefois, une différence majeure existe entre la productivité d'une association culturale *stricto sensu* et la productivité d'une association entre une culture de vente et une plante de couverture : dans le premier cas, la production de chacune des cultures associées est souhaitée ; dans le second cas, seule la production de la culture commerciale a une valeur marchande, la plante de couverture ou plante de service assurant uniquement des fonctions agroécologiques comme la lutte contre les ennemis des cultures, le piégeage des nitrates excédentaires ou l'augmentation de la biodiversité sur la parcelle agricole. Par exemple, grâce à l'allélopathie, le blé a un effet herbicide sur certaines adventices (Ma, 2005) ; il peut être utilisé comme plante de service si son effet désherbant ne s'exerce pas sur la culture de vente. Hooks & Johnson (2004) examinent l'effet de différentes légumineuses associées à du brocoli (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.) sur les populations de lépidoptères et d'araignées, ennemis de cette culture. Comparés à une culture pure de brocoli, les couverts végétaux réduisent la densité d'œufs et de larves des lépidoptères, quelle

que soit l'espèce de couverture ; les araignées sont retrouvées moins fréquemment dans les associations culturales mais leur quantité est plus élevée. En fait, les plantes de couverture modifient l'habitat des ravageurs ce qui explique les différences de populations entre une association culturale et une culture pure. Comparé à une situation sans plante de service, du ray-grass italien (*Lolium multiflorum* Lam.) associé à une culture commerciale de maïs permet de réduire fortement la quantité de nitrates potentiellement lessivables (Liedgens *et al.*, 2004). Cependant, cela diminue la disponibilité de l'azote pour la culture de vente ce qui pénalise son rendement.

Dans une association entre une culture de vente et une plante de couverture, toute compétition défavorable au rendement de la culture commerciale est nuisible à la performance agronomique du système même si la compétition conduit à un gain de production pour l'association culturale prise dans son ensemble.

Mesurer la productivité d'une association culturale revient à mesurer la productivité des espèces associées par rapport aux espèces cultivées seules. Pour ce faire, l'indicateur le plus couramment utilisé est le Land Equivalent Ratio (LER) qui compare la productivité des cultures associées et celle des cultures pures, à surface totale égale (Connolly *et al.*, 2001). Cependant, comme la productivité d'une association culture de vente/plante de couverture diffère de celle d'une association culturale *stricto sensu*, le LER ne peut être appliqué pour notre étude. Mesurer la productivité d'une telle association c'est en fait répondre à la question suivante : **« La productivité de la culture commerciale est-elle affectée par la plante de couverture ? »**. Il s'agit de comparer le rendement de la culture commerciale dans l'association par rapport à son rendement lorsqu'elle est cultivée seule. Si une différence existe, il s'agit de comprendre à quel moment du cycle de la culture de vente cette différence apparaît et pourquoi.

3. Combiner le semis direct et l'association de cultures

Les parties précédentes permettent de dégager deux idées principales, liées entre elles :

- Semer directement une culture commerciale présente des avantages agronomiques et économiques en modifiant le fonctionnement de l'agrosystème. D'un autre côté, ces modifications peuvent dégrader certaines caractéristiques de l'agrosystème, particulièrement la structure du sol et la pression exercée par les adventices.
- Associer deux cultures implique que des interactions s'établissent entre elles. Lorsque les cultures ont des fonctions différentes, *i.e.* une fonction marchande pour la culture de vente et une fonction agroécologique pour la plante de service, cette dernière a pour rôle d'agir sur certaines caractéristiques de l'agrosystème pour l'améliorer (*e.g.* la plante de couverture peut contribuer à maintenir une structure favorable ou à étouffer les adventices) mais peut nuire à la productivité de la culture commerciale du fait de la mise en place d'une ou plusieurs relations de compétition pour les ressources du milieu.

L'objet d'étude de cette thèse consiste à réunir les deux pratiques culturales, semis direct et association de cultures, en un ensemble dont ses concepteurs souhaitent qu'il soit cohérent : le

SCV avec cultures associées. L'intérêt principal de ce système de culture serait de conserver, voire d'améliorer, par le développement d'interactions entre les deux techniques, les avantages de chacune des pratiques culturales qui le composent tout en limitant leurs inconvénients. On parle d'interaction parce que des caractéristiques du fonctionnement de l'agrosystème sont susceptibles d'être modifiées lors du couplage des deux pratiques culturales par rapport aux techniques culturales prises isolément : par exemple, le semis direct modifierait les relations de compétition entre les espèces cultivées simultanément par rapport à la compétition s'exerçant pour la même association en sol travaillé ; ou encore, l'association d'espèces sur un sol non travaillé permettrait de diminuer la détérioration de la structure par rapport à une situation de culture pure en semis direct. Dans les paragraphes suivants, je décris ces modifications de l'agrosystème ; comme les études sur les SCV avec cultures associées sont peu nombreuses, certaines des modifications mentionnées sont hypothétiques. De plus, les informations présentées proviennent parfois d'expérimentations réalisées en climat tropical. Si les valeurs numériques qu'elles contiennent sont difficilement extrapolables aux conditions tempérées, elles peuvent donner des indications sur les grandes transformations attendues en SCV avec cultures associées par rapport à un système conventionnel.

Dans la littérature, plusieurs études montrent que dans un SCV avec cultures associées, le couvert végétal modifie la composante biologique du milieu non travaillé, particulièrement la flore adventice contre laquelle il lutte efficacement. Par contre, dans certaines situations, l'espèce de couverture nuit au rendement de la culture de vente. Dans les conditions humides et chaudes des *cerrados* (Brésil), le semis direct du coton (*Gossypium* spp.) sous un couvert de sorgho (*Sorghum bicolor* L.) permet de maîtriser l'infestation de *Cyperus rotondus* L., adventice majeure de cette culture commerciale (Capillon & Séguy, 2002). Selon ces auteurs, l'effet herbicide du sorgho résulterait de plusieurs modifications de l'agrosystème :

- La présence des résidus du couvert végétal gêne la germination et la levée de *C. rotondus*.
- L'espèce de couverture concurrence la jeune adventice pour les ressources du milieu.
- Des relations allélopathiques s'établissent entre le sorgho et *C. rotondus*.
- En améliorant les conditions climatiques du milieu, la présence d'un couvert végétal permanent et la technique du semis direct favorisent une implantation précoce du coton.

Au nord du Honduras, des chercheurs ont montré que les adventices prolifèrent moins dans des SCV qui associent le mucuna (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) au maïs par rapport à des systèmes conventionnels sans plante de couverture (Buckles & Triomphe, 1999). De plus, le mucuna est compétitif vis-à-vis des espèces végétales indésirables sans pénaliser le rendement de la culture de vente. Aux Etats-Unis, le trèfle souterrain (*Trifolium subterraneum* L.) associé avec différentes cultures commerciales comme le maïs, le soja [*Glycine max* (L.) Merr] ou le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) permet de réduire considérablement la biomasse des adventices par rapport à une culture pure, que le sol soit travaillé ou non ; de plus, ce couvert végétal n'affecte jamais négativement le rendement de la culture de vente qui lui est associé (Ilnicki & Enache, 1992). En revanche, Teasdale (1993) montre qu'en l'absence d'herbicide, l'association de la vesce velue (*Vicia villosa* Roth) au maïs sur un sol non travaillé est nuisible à la culture de vente du fait de la prolifération des adventices et/ou du couvert végétal qui devient trop compétitif. En Chine, le semis direct du blé dans l'astragale de Chine (*Astragalus sinicus* L.) permet un contrôle efficace

des adventices (Samarajeewa *et al.*, 2005). Toutefois, une relation de compétition s'établit entre le couvert végétal et la culture de vente ce qui réduit son rendement (Samarajeewa *et al.*, 2005).

La plante de couverture pourrait avoir un effet dépressif sur certains bioagresseurs grâce à l'allélopathie. Plusieurs études confirment les propriétés allélopathiques de diverses plantes ce qui permet de réduire les populations d'agents pathogènes et de mauvaises herbes (Wu *et al.*, 1999 ; Nagabhushana *et al.*, 2001 ; Ma, 2005 ; Khanh *et al.*, 2006). En revanche, le couvert végétal peut être un abri pour les parasites et les ravageurs : par exemple, dans les SCV maïs/mucuna présentés précédemment, la plante de couverture favorise la prolifération des rongeurs et des serpents qui peuvent nuire à la culture de vente (Triomphe, 1998). Finalement, l'augmentation de la diversité spécifique par l'association de cultures a des résultats très variables sur la gestion des insectes, des parasites, etc. (voir l'article de synthèse de Russell, 1989).

Le couvert végétal par sa présence toute l'année sur la parcelle agricole modifie la composante chimique du milieu cultivé en semis direct. Dans certaines situations, il peut être à l'origine de compétitions pour les ressources du milieu avec la culture de vente. Par l'intermédiaire de son système racinaire, la plante de couverture peut agir comme une « pompe biologique » en s'implantant en profondeur, le système racinaire du couvert végétal recyclant les éléments nutritifs des horizons profonds vers ceux de surface, facilement accessibles aux racines de la culture de vente (Capillon & Séguy, 2002). Dans des SCV brésiliens, cet effet a été mis en évidence pour certaines bases échangeables (*e.g.* le calcium, le manganèse) et certains oligoéléments (*e.g.* le cuivre, le zinc) (Capillon & Séguy, 2002). La plante de couverture peut aussi favoriser l'absorption de nutriments par la culture de vente. Par exemple, comparé à du maïs cultivé seul sur un sol travaillé, du trèfle blanc (*Trifolium repens* L.) associé à une culture en semis direct de maïs améliore le prélèvement de phosphore par la culture commerciale en augmentant la colonisation de ses racines par des endomycorhizes (Deguchi *et al.*, 2005). Par contre le couvert végétal, en utilisant des nutriments pour sa croissance et son développement, peut réduire leur disponibilité pour la culture de vente, pénalisant son rendement, comme je l'ai déjà indiqué ci-dessus. Cette compétition a été observée dans différents SCV avec culture associées pour l'azote (Feil *et al.*, 1997 ; Martin *et al.*, 1999). Toutefois, des études ont montré que les associations entre une céréale et une légumineuse permettent un gain de rendement par rapport aux cultures pures car les espèces associées sont complémentaires dans l'utilisation des ressources azotées du milieu : l'azote du sol est mieux utilisé par la céréale et la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par la légumineuse augmente (Jensen, 1996 ; Andersen *et al.*, 2004). Une telle association pourrait avoir les mêmes répercussions dans un SCV avec cultures associées. **Garibay *et al.* (1997) suggèrent que la compétition pour l'azote entre une plante de couverture et une culture de vente dépend de l'espèce de couverture.**

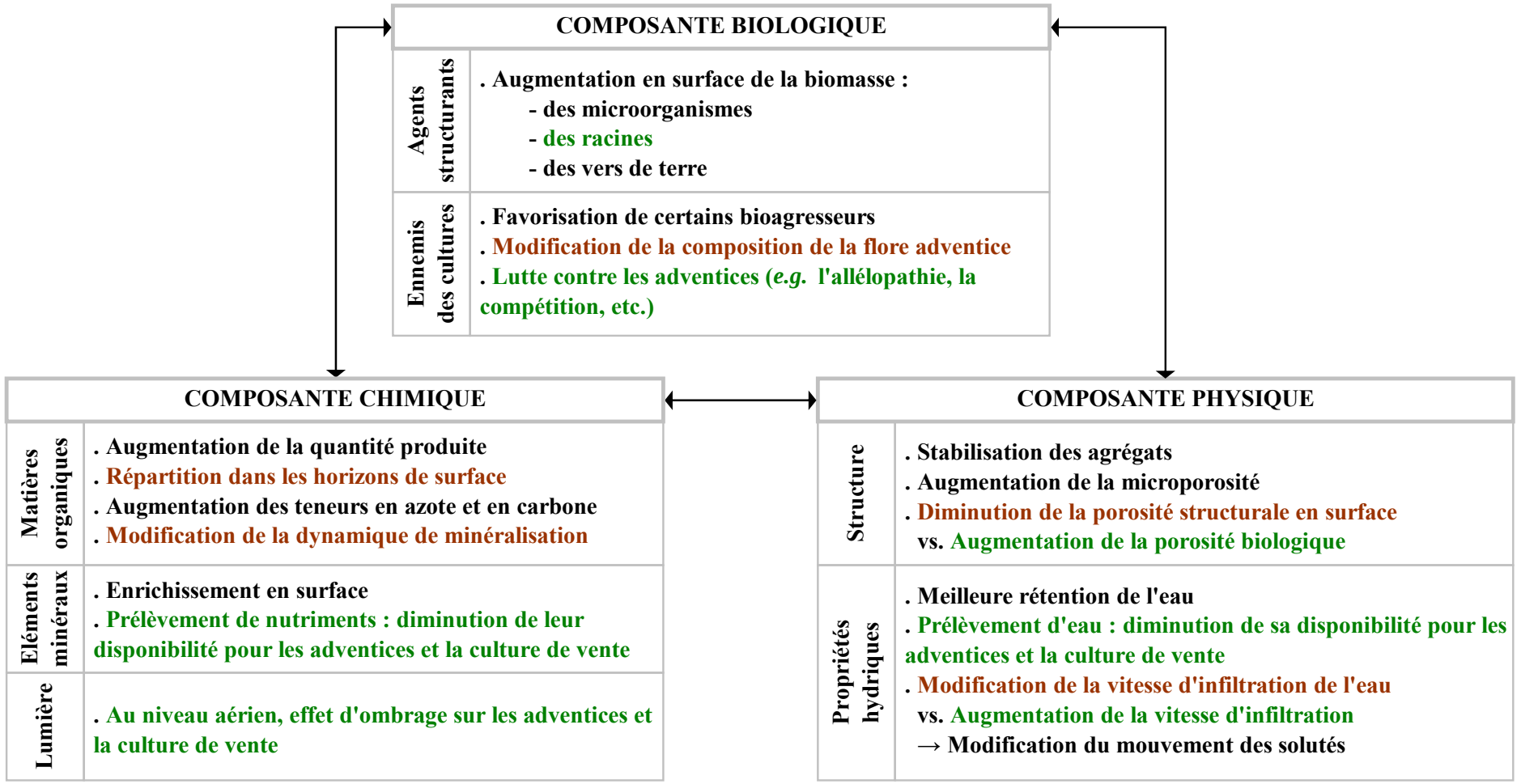


Figure I–2 : Fonctionnement hypothétique d'un agrosystème où une espèce de couverture, pérenne, est associée périodiquement à une culture commerciale sur un sol non travaillé, en climat tempéré : comparaison à un agrosystème avec travail du sol et sans association culturale. Les effets de la technique du semis direct et de l'espèce de couverture sont indiqués en noir ; ceux de la technique du semis direct seule en marron ; ceux de l'espèce de couverture seule en vert.

La présence permanente d'un couvert végétal vivant accroît la durée de fixation du carbone par la photosynthèse par rapport à un sol sans plante de couverture ; de plus, si cette dernière est une légumineuse, ses résidus peuvent être plus riches en azote que ceux d'une culture non fixatrice d'azote (Raiesi, 2006). Des études en climat tropical montrent que la quantité et la qualité des matières organiques mortes sont modifiées dans un SCV avec cultures associées par rapport à une situation sans plante de couverture : la masse des matières organiques augmente et la concentration en azote total et en carbone organique des premiers centimètres de sol s'élève (Buckles & Triomphe, 1999 ; Capillon & Séguy, 2002). **Compte tenu de la dépendance des organismes du sol vis-à-vis de la qualité et de la quantité des matières organiques, leurs populations peuvent être fortement différentes dans les SCV avec cultures associées par rapport aux systèmes de culture sans plante de couverture et/ou avec un sol travaillé.** Par exemple, dans un SCV qui associe du trèfle blanc à du blé, Schmidt *et al.* (2003) mettent en évidence une augmentation de la biomasse et du nombre de vers de terre en comparaison avec des sols sans plante de couverture, travaillés ou non. Outre l'absence d'effet destructeur de la charrue, ces auteurs attribuent aux matières organiques du SCV blé/trèfle l'augmentation des populations de vers de terre dans ce système : la quantité de matières organiques produites est élevée ; elles sont enrichies en azote par les résidus de trèfle ; leur production se déroule toute l'année. La même conclusion est avancée par Hendrix *et al.* (1992) pour différents SCV avec cultures associées. Les populations des microorganismes sont aussi affectées par les changements de matières organiques. Par exemple, Yao *et al.* (2005) montrent que les colonies de bactéries et de champignons augmentent dans le sol d'un verger de pommiers associés à de la fétuque rouge (*Festuca rubra* L.) par rapport à des sols sans couvert ou avec un couvert mort. Finalement, comme certains agents biologiques tels que les microorganismes et les vers de terre semblent favorisés dans les SCV avec cultures associées, il se peut que leurs activités structurantes le soient aussi. **De même, le système racinaire, spécifique de l'espèce de couverture et actif toute l'année, participerait continuellement à la structuration du sol ; le couvert végétal assurerait aussi une protection permanente contre l'effet néfaste des gouttes de pluie.** Une des conséquences serait donc l'amélioration de la structure du sol et de ses propriétés hydriques par rapport à un sol en semis direct ; quelques rares études sous climat tropical confirment cette hypothèse. Dans des SCV qui associent du sorgho à différentes plantes de couverture, les activités biologiques structurantes permettent, en fin de culture, une diminution de la densité apparente en surface par rapport à un sol travaillé ou non et cultivé avec du sorgho pur (Naudin *et al.*, 2005). La vitesse d'infiltration de l'eau dans ces SCV avec cultures associées reste constante du semis à la récolte alors qu'elle diminue dans un sol labouré. Les auteurs observent aussi une augmentation des capacités de rétention en eau dans les sols en SCV avec cultures associées. Dans les SCV maïs/mucuna, la vitesse d'infiltration de l'eau est supérieure à celle des systèmes conventionnels (Buckles & Triomphe, 1999).

Au vu des informations présentées, nous proposons un schéma synthétique du fonctionnement d'un agrosystème couplant la technique du semis direct d'une part et la technique de l'association de cultures d'autre part (Figure I–2).

4. Problématique de la thèse

Je viens de présenter des éléments qui montrent que le fonctionnement d'un agrosystème peut être perturbé dans toutes ses composantes biologique, chimique et physique lorsque son sol n'est plus travaillé et qu'il est couvert en permanence par une espèce végétale vivante, périodiquement associée à une culture commerciale. Le schéma de fonctionnement d'un tel agrosystème, encore très peu connu en climat tempéré (Figure I-2), est source de multiples interrogations. Par exemple, l'agronome peut s'interroger sur l'évolution à long terme du fonctionnement de cet agrosystème en tenant compte des effets des cultures précédentes et de la pérennité de la plante de couverture (Bertrand *et al.*, 2005). Il peut aussi s'interroger sur l'importance des interactions entre les composantes du milieu cultivé : comment le couplage de la technique du semis direct à celle de l'association culturale change-t-il la dépendance des composantes du milieu les unes par rapport aux autres ? Il peut encore chercher à vérifier la pertinence des éléments de l'agrosystème référencés dans le schéma : existe-t-il d'autres éléments, non rapportés ici, qui sont fortement modifiés par la réunion des deux techniques culturales fondatrices des SCV avec cultures associées ? Il peut enfin vouloir comprendre les mécanismes qui favoriseraient ou inhiberaient un bioagresseur donné dans ces systèmes de culture particuliers, etc.

Le lecteur peut juger du foisonnement des questions encore sans réponse à propos des SCV avec cultures associées, particulièrement en climat tempéré où ils sont presque inexistants. En fait, concevoir et évaluer ces nouveaux systèmes de culture nécessite de combiner (i) une approche systémique pour identifier et hiérarchiser les principaux facteurs qui perturbent la production et l'environnement et, (ii) une approche analytique de certains processus pour mieux comprendre le fonctionnement de l'agrosystème.

Nous décidons de focaliser notre étude sur les interactions entre les espèces associées d'un SCV et sur l'évolution à court terme de la structure du sol et de ses propriétés hydriques. Les raisons scientifiques de ce choix sont dictées, en partie, par l'étude bibliographique. D'abord, j'ai souligné, à plusieurs reprises, qu'une association culturale implique l'établissement de relations interspécifiques qui conditionnent la productivité de cette association. Dans la littérature internationale, cette information est le plus souvent disponible pour des espèces associées, à valeur marchande, implantées sur un sol travaillé. Par conséquent, la question suivante peut se poser : quelles interactions s'établissent entre des espèces associées qui sont cultivées sur un sol non travaillé et qui présentent des fonctions différentes au sein de l'agrosystème (*i.e.* une espèce à fonction commerciale et une espèce à fonction agroécologique) ? D'autre part, les SCV avec cultures associées ne seront acceptés que si le rendement des cultures de vente est maintenu à un niveau économiquement rentable pour le monde agricole[1] : il s'agit par conséquent de comprendre les relations de compétition entre les espèces associées de ces systèmes de culture particuliers afin de pouvoir apprécier leurs impacts sur la production et le cas échéant, les gérer. Concernant la structure du sol, les références bibliographiques sont nombreuses pour décrire ses caractéristiques et leur évolution dans un sol labouré ou en semis direct sans plante de

[1] C'est d'ailleurs une condition de l'agriculture durable.

couverture. Par contre, il existe très peu d'informations, en climat tempéré, sur la structure et son évolution dans un sol non travaillé avec un organisme végétal vivant pérenne. Or, ces informations sont essentielles pour expliquer, par exemple, le stockage et le mouvement de l'eau dans le sol qui font partie des critères majeurs de performance et de praticabilité d'un système de culture. Enfin, l'absence de dispositif expérimental ancien sur les SCV avec cultures associées en métropole et la durée de la thèse (quelques années expérimentales) ont conduit à travailler sur des systèmes récents et à focaliser la démarche expérimentale sur une courte période du système de culture (*e.g.* les rotations et les effets précédents ne sont pas étudiés dans ce travail).

A partir de notre proposition du fonctionnement d'un agrosystème où une espèce de couverture, pérenne, est cultivée périodiquement en association avec une espèce commerciale sur un sol non travaillé en climat tempéré (Figure I–2) et dans le cadre thématique que je viens de préciser, l'objectif de ce travail est de répondre aux hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : Une culture commerciale et une plante de couverture, conduites en même temps sur un sol non travaillé, établissent des relations qui ont un impact sur le rendement de la culture de vente. L'intensité de ces relations varie d'un SCV avec cultures associées à l'autre selon l'espèce cultivée en couverture.

Hypothèse 2 : Les relations de compétition et/ou de facilitation entre les espèces associées d'un SCV affectent l'élaboration du rendement de la culture de vente à des périodes différentes selon l'espèce de couverture.

Hypothèse 3 : Dans les SCV avec cultures associées, la plante de couverture pérenne modifie la structure du sol et ses propriétés hydriques par rapport à un sol en semis direct sans plante de couverture. Cette modification dépend de l'espèce cultivée en couverture.

Pour tester ces hypothèses, la première difficulté est de créer l'objet de recherche, actuellement inexistant en France. Pour cette raison, un dispositif expérimental a été mis en place à Grignon (Yvelines, France) pendant trois campagnes d'étude. Il s'appuie sur une culture de blé tendre d'hiver semé directement dans différentes espèces de plante de couverture. Ces espèces ont été choisies pour leurs différences morphologiques et physiologiques (Annexe 1) qui permettent d'explorer *a priori* (i) une large gamme de relations de compétition et de facilitation pour les ressources du milieu et, (ii) une large gamme d'effets du système racinaire sur la structure et les propriétés hydriques du sol. De plus, les SCV avec cultures associées ont été comparés à un SCV sans cultures associées pour distinguer les effets des espèces de couverture de ceux du non travail du sol sur différentes variables (*e.g.* le rendement, la structure du sol, etc.).

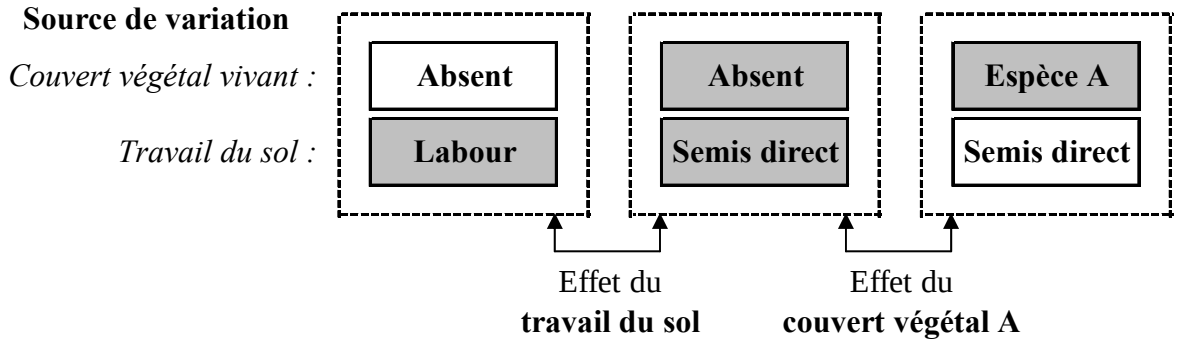


Figure I–3 : Schéma de principe du dispositif de Grignon. La comparaison des différents ensembles deux à deux permet d'étudier l'effet de la pratique culturale qui varie entre les ensembles.

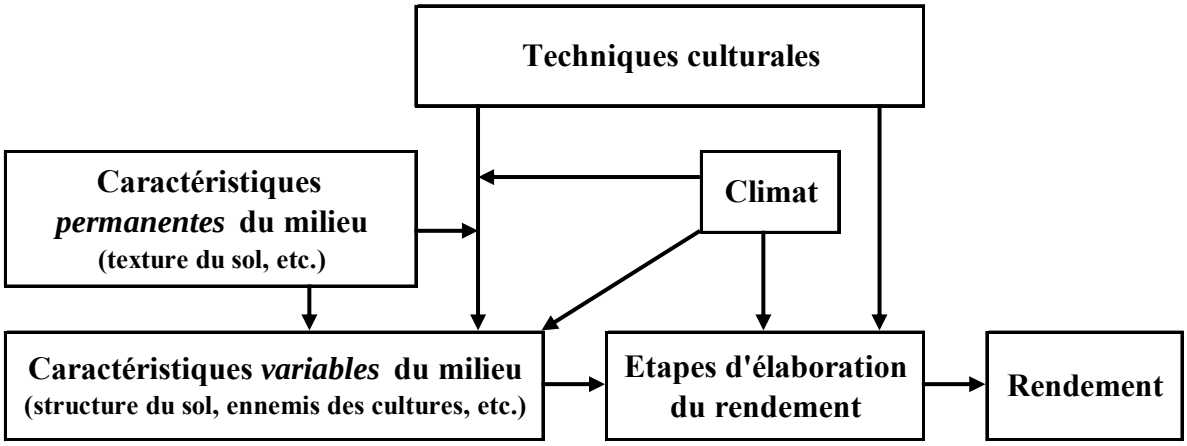


Figure I–4 : Relations entre les pratiques culturales, les caractéristiques environnementales et le rendement (d'après Doré *et al.*, 1997).

Le dispositif expérimental de Grignon est mis en œuvre sur une parcelle unique divisée en plusieurs ensembles où une seule pratique culturale varie entre deux ensembles ; en comparant les ensembles deux à deux, il est possible de mettre en évidence l'effet de cette pratique sur la culture. De plus, comme le dispositif expérimental est mis en place sur une seule parcelle, les caractéristiques du milieu non perturbées par la technique culturale peuvent être considérées identiques d'un ensemble à l'autre.

Dans ce travail, la pratique culturale qui varie est l'absence ou la présence de la plante de couverture ainsi que la nature de la plante de couverture (Figure I–3). Pour pouvoir séparer l'effet du semis direct de l'effet de l'association culturale, nous avons aussi fait varier le travail du sol : du blé cultivé seul en semis direct est comparé à du blé cultivé seul après labour.

La méthode du diagnostic agronomique est retenue pour étudier l'effet des différentes plantes de couverture sur le blé. Réalisé sur différentes parcelles d'une même zone d'étude, le diagnostic agronomique régional permet d'identifier et de hiérarchiser *a posteriori*, pour une culture donnée, les caractéristiques du milieu et les pratiques culturales responsables des variations de rendement (ou de toute autre variable caractérisant le fonctionnement de l'agrosystème) entre les parcelles de la zone étudiée (Doré *et al.*, 1997). Appliqué au rendement, le diagnostic agronomique peut s'établir avec profit à partir de l'analyse des composantes du rendement qui renseignent sur la qualité de la réalisation des différentes phases culturales ; dans la pratique, il s'agit de mesurer chaque composante et de comparer sa valeur au potentiel de production. Comme l'élaboration du rendement dépend des états du milieu et des techniques culturales, l'analyse des composantes vise à mettre en évidence les relations entre les caractéristiques du milieu, les pratiques culturales et le rendement pour identifier, à chaque phase culturale, les facteurs à l'origine de la variation du niveau des composantes et *in fine* du rendement (Figure I–4).

Un suivi de certaines caractéristiques variables du milieu a été réalisé pour affiner le diagnostic et pour nourrir l'approche analytique du travail. Ainsi, les relations de compétition et/ou de facilitation entre les espèces associées ont été étudiées pour certaines ressources du milieu dont on sait qu'elles peuvent être déterminantes pour la croissance et le développement de la culture commerciale : l'azote, l'eau et la lumière. D'autre part, la structure du sol a été observée à une échelle plus fine que celle du profil cultural, habituellement employé en Agronomie (Manichon & Roger-Estrade, 1990) ; l'observation des blocs de terre imprégnée de résine peut fournir des renseignements sur la morphologie des méso- et macropores du sol et déterminer, ainsi, les causes de leur apparition (Hallaire & Curmi, 1994). Enfin, les propriétés hydriques du sol ont été appréciées en terme de flux (*i.e.* la conductivité hydraulique) et de stock (*i.e.* les propriétés de rétention de l'eau).

Chapitre II – Effets de différentes plantes de couverture sur le rendement du blé et sur ses composantes

Ce chapitre correspond à l'article soumis à *Agronomy for Sustainable Development* et intitulé *Intercropping winter wheat (Triticum aestivum L.) with different living cover crops in a no-till management system (I): effects of living cover crops on wheat grain yield and its components*. Son objectif est de comprendre l'impact de différents SCV avec cultures associées sur le rendement de la culture de vente. Il s'agit également de mettre en évidence, grâce aux composantes du rendement, les périodes de sensibilité aux stress de la culture commerciale pour chaque association testée sur le dispositif expérimental de Grignon dont les itinéraires techniques sont rapportés dans l'annexe 2. De plus, des photographies des associations culturales sont présentées dans l'annexe 3.

INTERCROPPING WINTER WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.) WITH DIFFERENT LIVING COVER CROPS IN A NO-TILL MANAGEMENT SYSTEM (I): EFFECTS OF LIVING COVER CROPS ON WHEAT GRAIN YIELD AND ITS COMPONENTS

Matthieu Carof, Stéphane de Tourdonnet*, Patrick Saulas, Dominique Le Floch & Jean Roger-Estrade

Unité Mixte de Recherche Agronomie INRA/INA P-G, BP01, 78850 Thiverval-Grignon, France.

*Corresponding author. Tel.: +33 1 30815257; fax: +33 1 30815425. E-mail address: tourdonn@inapg.inra.fr

Abstract: Among crop management systems for sustainable agriculture, no-till winter wheat (*Triticum aestivum* L.) systems present short-term drawbacks (*e.g.* increase of herbicide use and costs as well as decrease of soil physical quality). The use of a living cover crop associated with no-tillage may overcome these drawbacks. Field experiments were carried out during three wheat growing seasons in Grignon, France, to determine the effects of eight combinations of soil tillage and living cover crop management systems on wheat grain yield and its components. Treatments involved a winter wheat crop grown (i) alone on a conventional-till soil, (ii) alone on a no-till soil, and (iii) on a no-till soil with the following living cover crops: sheep's fescue (*Festuca ovina* L.), red fescue (*Festuca rubra* L.), bird's-foot-trefoil (*Lotus corniculatus* L.), black medic (*Medicago lupulina* L.), alfalfa (*Medicago sativa* L.), and white clover (*Trifolium repens* L.). In the first experiment, no herbicide was applied during the wheat growth cycle, contrary to the two other experiments. Whatever the experiment, soil tillage had no effect on wheat yield, even if grain weight was reduced in the conventional-till treatment. Conversely, living cover crops generally reduced wheat grain yield, depending mainly on the cover crop species and on the experiment, *i.e.* climatic conditions and management practices. Furthermore, sensitivity periods to stresses differed from one experiment to another as well as from one no-till/living cover crop treatment to another. However, this study showed that, in particular situations (*i.e.* cover crop species and herbicide management), intercropping wheat with a living cover crop did not lower wheat grain yield. Future studies should investigate competition between wheat and living cover crop to design management practices able to maintain grain yield.

Keywords: no-tillage, intercropping, winter wheat (*Triticum aestivum* L.), leguminous and grass cover crops, grain yield, yield components

1. Introduction

Crop management systems based on little or no soil disturbance along with a permanent soil cover are of primary interest to help settle several economical and environmental issues of agriculture (Hatfield & Karlen, 1994). For example, no-till management systems lower energy consumption, enhance carbon sequestration, and lessen soil erosion (Basic *et al.*, 2004 ; Holland, 2004).

Although environmental conditions of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) are different in no-till systems compared to conventional-till ones (Tebrügge & Düring, 1999 ; Ferreras *et al.*, 2000 ; Wright & Hons, 2005), they generally do not reduce wheat grain yield in temperate climates (Baumhardt & Jones, 2002 ; Anken *et al.*, 2004). However, no-till production of wheat may present some short-term drawbacks. Weed control is known to be more challenging with no-tillage (Bàrberi & Lo Cascio, 2001), and it may increase herbicide use and costs (Sánchez-Gíron *et al.*, 2004). Furthermore, Lampurlanés & Cantero-Martínez (2003) have reported that no-tillage lessens soil physical quality. To overcome these drawbacks, one possibility is to associate no-tillage with the use of a living cover crop (or living mulch).

Living cover crop is a plant species (annual or perennial) that is intercropped with the cash crop (Teasdale, 2003). While the cash crop is harvested, the living cover crop remains on the field even during the off-growing season. Associated with no-tillage, a living cover crop is used to provide beneficial services to the agro-ecosystem, including taking up excess soil nutrients, improving soil physical characteristics along with weed and pest control as well as augmenting biological diversity (Sustainable Agriculture Network, 1998). Furthermore, if the cover crop is a leguminous one, it fixes nitrogen and thus, may decrease fertiliser use during the cash crop growth cycle. Finally, presence of a living cover crop which is photosynthetically active all year long may improve carbon sequestration.

The primary constraint of using living cover crop in no-till wheat management systems is the ensuing competition for nutrients, light, and/or water between the wheat and the living cover crop, perhaps lowering the cash crop yield. Compared to a conventional-till system, Samarajeewa *et al.* (2005) have shown wheat yield reduction in a no-till system with Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) used as a living cover crop. White & Scott (1991) have also reported that wheat yield decreases in no-till management systems with different cover crop species. Consequently, improving no-till management systems with a living cover crop requires alleviating detrimental effects of the living cover crop on wheat while enhancing advantages.

The purpose of this study was to determine the influence of tillage and living cover crop on wheat production over three one-year growing seasons in France. As we hypothesized that the degree of competition between the wheat and the living cover crop depended on the cover crop species, six no-till treatments with a living cover crop were compared to a conventional-till treatment and a no-till one. The present article examines resulting wheat grain yield and its components. Based on the same experiment, a companion article presents competition or facilitation relationships for light and nitrogen between intercropped species that help explain the differences in wheat yield according to treatments (Carof *et al.*, submitted-b).

Table II–1: Monthly water deficit (mm) during the 2002-2003, 2003-2004, and 2004-2005 growing seasons in Grignon, France.

	Month											
Growing season	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.
2002-2003	26	82	55	36	3	-52	-72	-56	-111	-103	-104	-65
2003-2004	29	30	37	54	-24	-17	-42	-79	-122	-54	-37	-70
2004-2005	28	22	44	38	2	-14	-14	-66	-90	-95	-84	-53

Table II–2: Dates (Days After Sowing) and rates (kg ha^{-1}) of nitrogen applications in eight treatments for three experiments.

			Treatment							
Experiment	Date	Rate	CT	NT	Fo	Fr	Lc	Ml	Ms	Tr
1	135	50	×	×	×	×	×	×	×	×
	164	150	×	×	×	×	×	×	×	×
2	78	50			×	×				
	134	50	×	×	×	×	×	×	×	×
	154	85			×	×				
	154	100	×	×			×	×	×	×
	198	70	×	×	×	×	×	×	×	×
3	133	70	×	×	×	×	×	×	×	×
	164	75	×	×			×	×	×	×
	164	110			×	×				
	182	55					×	×		×
	182	90							×	
	213	80	×	×	×	×				

Treatment labels are defined in the text.

2. Materials and Methods

2.1. Site description

A field trial was conducted from 2002 through 2005 at the experimental station of the National Institute for Agronomic Research, Grignon, France (48.9°N, 1.9°E, 130 m elevation) on an Orthic Luvisol (FAO-UNESCO, 1974) with 250 g kg^{-1} clay, 500 g kg^{-1} silt, and 250 g kg^{-1} sand in the topsoil. Prior to this trial, the site had been conventionally cultivated for several years with annual ploughing. The whole area was ploughed one last time in November 2001.

Monthly water deficit values (precipitation values minus evapotranspiration values) are presented in Table II–1.

2.2. Experimental design

The study labelled as experiments (1, 2, 3) three wheat growing seasons of the ongoing field trial. Experiment 1 was wheat crop grown from October 21, 2002 to July 17, 2003. Experiment 2 was wheat crop grown from October 29, 2003 to July 26, 2004. Experiment 3 was wheat crop grown from October 18, 2004 to July 14, 2005.

Eight combinations of soil tillage and living cover crop managements have been held to from November 2001: a conventional-till management and seven variations on a no-till one. Conventional-till management (CT) entailed an autumnal mouldboard ploughing to a 25-cm depth, followed by two rotary harrowings to a 10-cm depth for final seedbed preparation. The no-till management variations included a no-till treatment without a living cover crop (NT) and six no-till treatments with a living cover crop. The six cover crop species were broadcasted on March 28, 2002 and are as follows: sheep's fescue (*Festuca ovina* L.), red fescue (*Festuca rubra* L.), bird's-foot-trefoil (*Lotus corniculatus* L.), black medic (*Medicago lupulina* L.), alfalfa (*Medicago sativa* L.), and white clover (*Trifolium repens* L.). No-till/living cover crop treatments were labelled using initials based on the scientific name of each cover crop species: Fo, Fr, Lc, Ml, Ms, and Tr, respectively. In no-till treatments with or without a living cover crop, soil disturbance was limited to a 3-cm deep by a 4-cm wide band corresponding to the direct driller. Whatever the treatment, crop residues were left on the field and mowed. Treatments were established on 9.0- by 6.0-m plots. Each treatment was replicated four times. This experimental design allows us to study (i) effect of soil tillage comparing CT to NT, and (ii) effect of intercropping comparing the no-till/living cover crop treatments to NT.

2.3. Management practices

A no-till drill (Semeato S/A, Brazil) with a row spacing of 17-cm was used for sowing wheat seeds (cultivar Isengrain) on all plots at a rate of 220 seeds m^{-2}, 270 seeds m^{-2}, and 270 seeds m^{-2} for experiments 1, 2, and 3, respectively. Before wheat seeding, CT plots were mouldboard ploughed and rotary harrowed. Grains were harvested 269 days after sowing (DAS) for experiment 1, 271 DAS for experiment 2, and 269 DAS for experiment 3.

Table II–3: Description of herbicide applications, *i.e.* targets, active ingredients, rates, and dates (Days After Sowing), in eight treatments for three experiments.

				Treatment							
Experiment	Target	Herbicide[z]	Date	CT	NT	Fo	Fr	Lc	Ml	Ms	Tr
1	cover crops	H1a	-3					×	×	×	×
	weeds	H2a	-3		×						
2	cover crops	H1b	-1			×	×				
		H3	170						×	×	
		H4	183							×	
	dicotyledonous	H5a	154	×	×	×	×				
	ryegrass	H6a	78					×	×	×	×
		H6b	170		×				×		×
	weeds	H2b	-1		×						
3	cover crops	H1c	0			×	×	×	×	×	×
		H4	149					×	×	×	×
		H7	193							×	
	dicotyledonous	H5b	78			×	×				
		H4	149	×	×	×	×				
	ryegrass	H6a	78					×	×	×	×
		H6b	149					×	×	×	×
		H6b	184	×	×			×	×	×	×
		H6c	184			×	×				
	weeds	H8	81	×	×						
		H9	149	×	×	×	×				

[z]H1: a commercial formulation of paraquat (a: 500 g active ingredient (a.i.) ha^{-1}; b: 400 g a.i. ha^{-1}; c: 350 g a.i. ha^{-1}) + diquat (a: 250 g a.i. ha^{-1}; b: 200 g a.i. ha^{-1}; c: 175 g a.i. ha^{-1}); H2: glyphosate (a: 1080 g a.i. ha^{-1}; b: 4320 g a.i. ha^{-1}); H3: amidosulfuron (16.9 g a.i. ha^{-1}); H4: metsulfuron-methyl (2 g a.i. ha^{-1}); H5: florasulam (a: 5 g a.i. ha^{-1};b: 7 g a.i. ha^{-1}); H6: a commercial formulation of fenoxaprop-P-ethyl (a: 30 g a.i. ha^{-1}; b: 40 g a.i. ha^{-1}; c: 20 g a.i. ha^{-1}) + diclofop-methyl (a: 375 g a.i. ha^{-1}; b: 500 g a.i. ha^{-1}; c: 250 g a.i. ha^{-1}) + mefenpyr-diethyl (a: 60 g a.i. ha^{-1}; b: 80 g a.i. ha^{-1}; c: 40 g a.i. ha^{-1}), and oil (a: 846.45 g a.i. ha^{-1}; b: 0 g a.i. ha^{-1}; c: 0 g a.i. ha^{-1}); H7: a commercial formulation of 2,4 M C P A (199.5 g a.i. ha^{-1}) + 2,4 D (231 g a.i. ha^{-1}) + picloram (10.5 g a.i. ha^{-1}); H8: a commercial formulation of diflufenican (156.25 g a.i. ha^{-1}) + isoproturon (1250 g a.i. ha^{-1}); H9: a commercial formulation of mesosulfuron-methyl-sodium (9 g a.i. ha^{-1}) + iodosulfuron-methyl-sodium (1.8 g a.i. ha^{-1}), and oil (846.45 g a.i. ha^{-1})

Treatment labels are defined in the text.

Whatever the experiment, amount of NH_4NO_3 fertiliser applied was calculated thanks to the nitrogen balance-sheet method to meet wheat and cover crop nitrogen requirements (Rémy & Hébert, 1977), leading to apply various levels of fertiliser between treatments due to different cover crop nitrogen requirements (Table II–2).

In experiment 1, no herbicide was used after wheat seeding to observe cover crop influence on weed populations. In experiments 2 and 3, herbicides were used during wheat growth cycle to kill weeds and to slow down cover crop growth. For each treatment, herbicide strategy (chemical type, rate, and number of weed killer applications) was chosen according to the weed population observed in the plots as well as the biology of the cover crop species (Table II–3). Furthermore, in experiment 2, leguminous cover crops (Lc, Ml, Ms, and Tr) were mowed before wheat seeding, and in experiment 3, native vegetation in NT plots was eradicated by the use of herbicide (glyphosate, 3240 g a.i. ha^{-1}) on September 9, 2004 and mowed a month later. Wheat was fully protected against fungus diseases and pests.

2.4. Data collection and calculation

For each experiment, sampling took place at two particular wheat stages: the end of tillering and physiological maturity.

Wheat plants and their tillers were counted at the end of tillering in two subplots of three 0.5-m length rows (0.25 m^2 area) per plot. After averaging subplots, plant stand was reported as plants per square meter, and the number of tillers per plant was the ratio between the tiller counts (tiller m^{-2}) and the plant counts (plant m^{-2}).

Spikes were counted at physiological maturity in four subplots of three 0.5-m length rows (0.25 m^2 area) per plot. Then, spikes were clipped from plants, and grain yield was determined by threshing and weighing grains of each subplot (after drying for two days at 80°C). Finally, grains of each subplot were counted. After averaging subplots, the number of spikes per tiller was the ratio between the spike counts (spike m^{-2}) and the tiller counts (at the end of tillering). The number of grains per spike was the ratio between grain counts (grain m^{-2}) and spike counts. Grain yield was reported as gram per square meter on a 150 g kg^{-1} moisture basis. The grain weight, reported as g $grain^{-1}$, was calculated as the ratio between grain yield and grain counts.

Plant disease and insect population were regularly monitored during the wheat growth cycle.

2.5. Statistical analysis

Data from all the experiments were analyzed by means of the GLM procedure available from SAS/STAT (SAS Institute Inc., 1999). Experiment, treatment within an experiment, and block within an experiment were designated as fixed effects. Mean comparisons based on least-squares mean (LSMEANS) statement were made to separate treatments within an experiment where *p*-values indicated that significant differences existed ($P \leq 0.05$).

Linear regression between (i) grain yield and grain m^{-2}, (ii) grain m^{-2} and spike m^{-2}, (iii) spike m^{-2} and tiller m^{-2}, and (iv) tiller m^{-2} and plant m^{-2} was determined by REG procedure, available from SAS/STAT, over all the experiments as well as within each experiment.

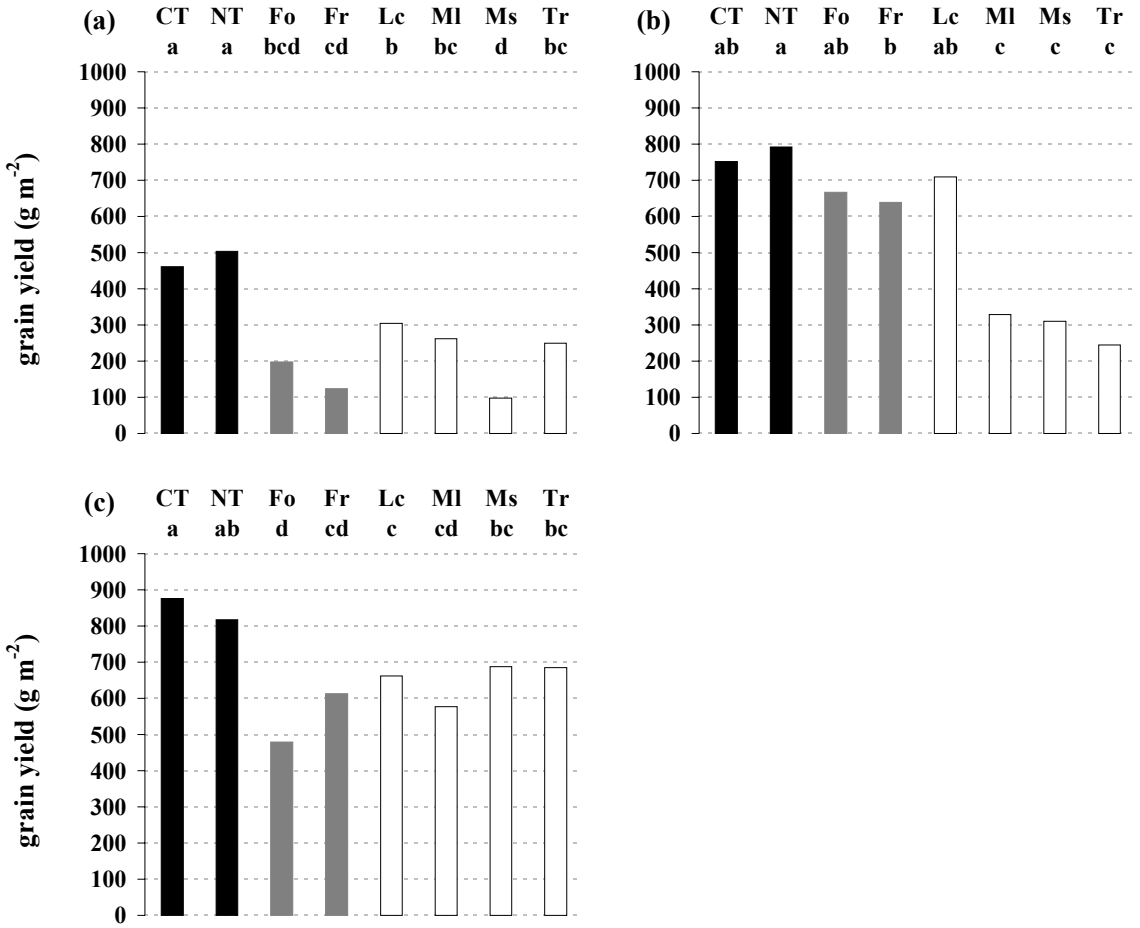


Figure II–1: Mean grain yields of the eight wheat treatments in experiment 1 (a), experiment 2 (b), and experiment 3 (c). Within an experiment, treatments followed by the same letter are not significantly different (LSMEANS, $P \leq 0.05$). Black histograms represent the treatments without a living cover crop; grey histograms represent the ones with a grass as a living cover crop; white histograms represents the ones with a leguminous as a living cover crop. Treatment labels are defined in the text.

3. Results and Discussion

3.1. Wheat grain yield

A wide range in yield was observed within the field trial since wheat grain yield varied from 97g m^{-2} to 876 g m^{-2} (Figure II–1). For any given experiment, the treatments without a living cover crop (CT and NT) resulted in very similar yield and presented the highest yield in comparison with the no-till/living cover crop treatments. Yield of CT and NT was 461 and 503 g m^{-2} (experiment 1), 752 and 792 g m^{-2} (experiment 2), and 876 and 818 g m^{-2} (experiment 3), respectively. While yield of experiment 2 was rather similar to yield of experiment 3, it differed significantly from yield of experiment 1 ($P \leq 0.05$). Changes in climatic conditions over the growing seasons may explain yield variance between experiments since cumulative water deficit observed from March to July decreased from experiment to experiment (Table II–1).

Whatever the experiment, intercropping wheat with a living cover crop generally reduced wheat grain yield compared to sole crop (NT) but ranking of the no-till/living cover crop treatments was not constant from experiment to experiment. In experiment 1, yield of the no-till/living cover crop treatments was significantly reduced compared to NT and three of the six no-till/living cover crop treatments (Fo, Fr, and Ms) exhibited particularly low yield, less than 200 g m^{-2}, the lowest level out of the three experiments. In experiment 2, three groups were evident: Fo and Lc presented yield close to that for NT; Fr presented yield significantly lower than that of NT; Ml, Ms and Tr presented yield significantly lower than that for NT. In experiment 3, yield of the no-till/living cover crop treatments was close, except for yield of Fo which was significantly lower than yield of Lc, Ms, and Tr. Whatever the no-till/living cover crop treatment, yield variance from experiment to experiment was related to a decrease of living cover crop and weed above-ground biomass, especially due to herbicidal managements (data not shown). Finally, in our experiments, intercropping wheat with a living cover crop led to grain yield reduction compared to sole crop, undoubtedly because of competition for environmental resources. This competition depended on the interaction between cover crop species and experiments, *i.e.* climatic conditions and management practices. Nevertheless, the association of intercropping with no-tillage was possible since some treatments, depending on the experiment, presented yield close to that for NT.

In this short-term study, whatever the experiment, wheat grain yield of CT was similar to that of NT. Consequently, under our environmental conditions, soil tillage had no effect on wheat yield. This observation is consistent with those of Baumhardt & Jones (2002), Hernánz *et al.* (2002), Anken *et al.* (2004), but not with that of Hemmat & Eskandari (2004). This latter study showed that under dryland conditions, wheat yield might be higher in a no-till treatment than in a conventional-till one. More particularly, they studied the effect of soil tillage on wheat yield in a dryland area of Iran and noticed that this effect was significant only when the annual rainfall was below the ten-year average (376 mm). In a six-year experiment comparing wheat yield variations according to three soil tillage practices and four previous crops, Norwood (2000) only observed a significant increase of wheat yield in the no-till treatment in four out of the 24 studied situations.

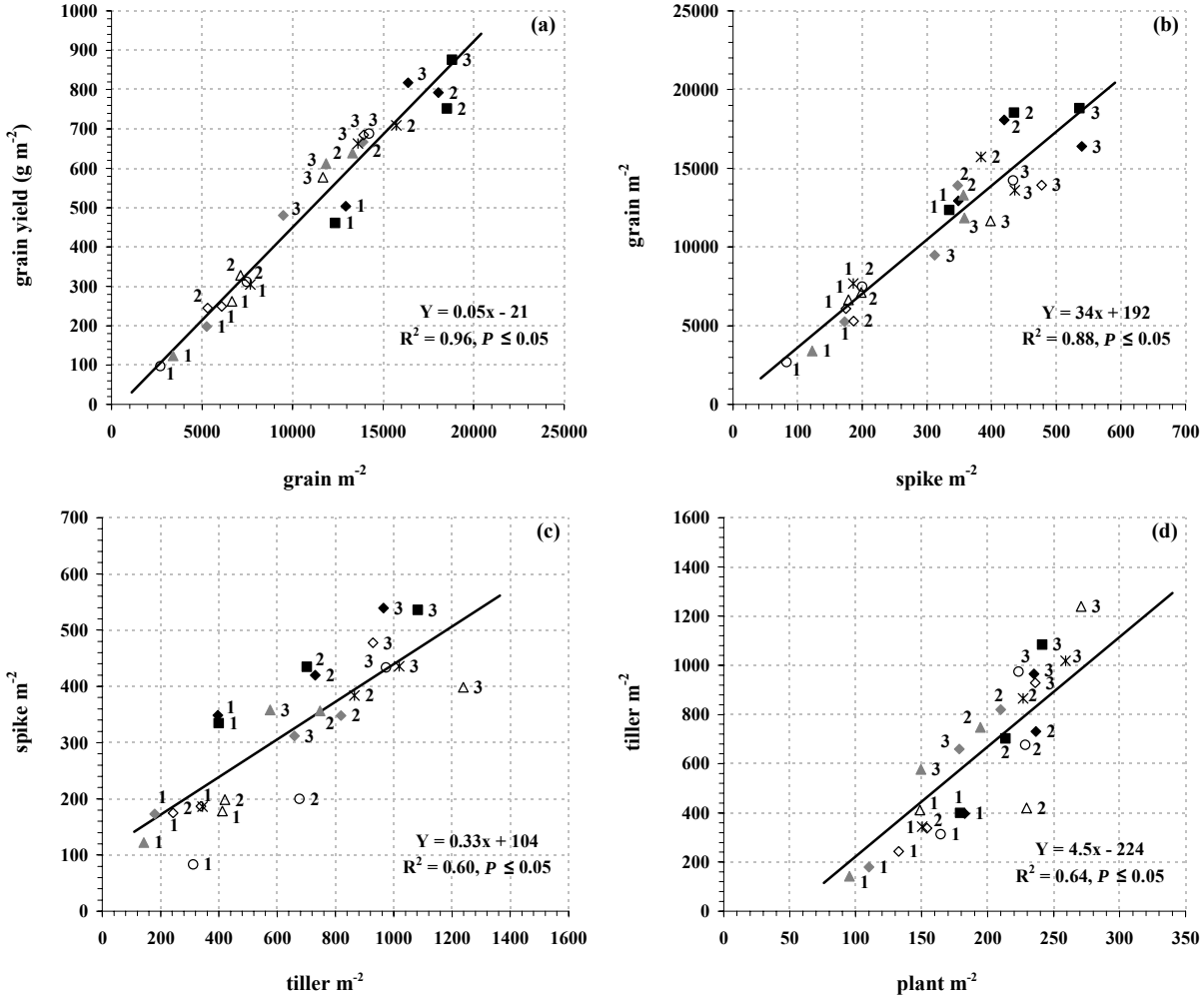


Figure II–2: Relationship between wheat grain yield and grain m^{-2} (a), grain m^{-2} and spike m^{-2} (b), spike m^{-2} and tiller m^{-2} (c), and tiller m^{-2} and plant m^{-2} (d) for CT (■), NT (◆), Fo (◆), Fr (▲), Lc (∗), Ml (△), Ms (○), and Tr (◇) for three experiments (1, 2, 3). Solid lines were fitted by linear regression over all the experiments. Linear regressions within each experiment are not represented. Treatment labels are defined in the text.

These variations were related to very low precipitation. Overall, wheat yield seems to be significantly improved in a no-till system without a living cover crop only under very low rainfall. Our yield results were seemingly consistent with theirs because we experienced no severe water deficit in our experiments.

Yield reduction for no-till/living cover crop treatments has been observed by other authors. In a two-year experiment without herbicides during the wheat growth cycle, White & Scott (1991) studied the effects of various leguminous living cover crops on no-till wheat. Among the cover crops were alfalfa, bird's-foot-trefoil, and white clover. These no-till/living cover crop treatments had little effect on wheat yield during the first wheat growing season whereas they greatly reduced wheat yield during the second growing season. Yield inter-annual variations were attributed, in part, to the greater growth of the living cover crops during the second growing season: on the one hand, it significantly reduced weed biomass but on the other hand, without herbicides, it resulted in a strong competition between the living cover crop and the wheat, reducing its yield. Humphries *et al.* (2004) found that intercropping wheat with alfalfa reduced grain yield, despite a herbicidal management. However, they showed that the productivity of intercropping might be improved if growth patterns of wheat and alfalfa were separated by using a winter-dormant variety of alfalfa. In a two-year experiment, Thorsted *et al.* (2006a) reported that a mechanical control of white clover with a weed brusher improved wheat yield compared to an unbrushed clover. However, intercrop wheat yield was still below sole crop yield. Our study confirmed that improving herbicidal strategy from experiment to experiment reduced wheat penalty, *i.e.* the gap between intercrop wheat yield and sole crop yield. This is coherent with Teasdale (1996) who have reported that even if a living cover crop is weed control effective, it also requires herbicidal and/or mechanical management to prevent excess competition with the cash crop.

3.2. Yield components

The objective here is to pursue a more in-depth yield analysis by studying yield components (Figure II–2). For each treatment within an experiment, this allows for a ranking of the periods of wheat growth cycle during which stresses (*e.g.* competition of the living cover crop on the wheat) occurred (Meynard & David, 1992 ; Leterme *et al.*, 1994).

Whatever the experiment, wheat grain yield was highly related to the number of grains per m^2 (Figure II–2a): yield variations between treatments, described in the previous section, were mainly due to grain number variations, not to grain weight variations. On the average, from experiment 1 to experiment 3, grain weight was 0.038 g $grain^{-1}$, 0.045 g $grain^{-1}$, and 0.049 g $grain^{-1}$. Grain weight highly increased from experiment 1 to experiment 2 due to a decrease of cumulative water deficit between these experiments during the grain filling period, *i.e.* from June to July (Table II–1). Whatever the experiment, grain weight of the no-till/living cover crop treatments was almost similar to grain weight of NT, with the exception of the two grass treatments (Fo and Fr) in experiment 2 (0.048 g $grain^{-1}$ for Fo and Fr vs. 0.044 g $grain^{-1}$ for NT). On the other hand, grains weighed less for CT compared to NT, whatever the experiment: 0.037 g $grain^{-1}$ vs. 0.039 g $grain^{-1}$ (exp. 1), 0.041 g $grain^{-1}$ vs. 0.044 g $grain^{-1}$ (exp. 2), 0.047 g $grain^{-1}$ vs. 0.050 g $grain^{-1}$ (exp. 3).

Table II–4: Wheat grain yield and its components affected by six no-till/living cover crop treatments for three experiments.

Experiment 1						
	Variable[z]					
Treatment	Plants per m²	Tillers per plant	Spikes per tiller	Grains per spike	Grain weight	Grain yield
Fo	– – – –			– –		– – – – – –
Fr	– – – –			– –		– – – – – – –
Lc			– – –			– – –
Ml			– – – – –			– – – –
Ms			– – – – – – –	–		– – – – – – – –
Tr				–		– – – – –
Experiment 2						
	Variable					
Treatment	Plants per m²	Tillers per plant	Spikes per tiller	Grains per spike	Grain weight	Grain yield
Fo						
Fr				–		–
Lc						
Ml		– – – –		– –		– – – – –
Ms			– – – –	–		– – – – – –
Tr	– – –			– – –		– – – – – –
Experiment 3						
	Variable					
Treatment	Plants per m²	Tillers per plant	Spikes per tiller	Grains per spike	Grain weight	Grain yield
Fo	– –					– – – –
Fr	– – –					– –
Lc						–
Ml			– – – –			– –
Ms						
Tr						

[z]Minus signs, –, indicate reduction of a variable compared to NT. One minus sign is equal to a reduction of 10 to 20 %; two minus signs are equal to a reduction of 20 to 30 % etc. Only significative variations between no-till/living cover crop treatments and NT are reported. Treatment labels are defined in the text.

Grain weight variation between CT and NT was significant in experiments 2 and 3 (LSMEANS, $P \leq 0.05$). Finally, under our environmental conditions, grain weight variations between experiments and treatments depended on climatic conditions as well as soil tillage, but not on the intercropping of wheat with a living cover crop (Table II–4). As grain weight is primarily affected by stresses during the grain filling period (Gooding *et al.*, 2000), we concluded this period was not a sensitive one in the no-till/living cover crop treatments, *i.e.* competition for environmental resources between the wheat and the living cover crop did not occur during the grain filling period, whatever the cover crop species.

Whatever the experiment, grain number per m^2 was well related to spike number per m^2 (Figure II–2b). However, the relationship between these yield components differed from one experiment to another as regression of grain number per m^2 against spike number per m^2 deviated between experiments: R-square was 0.96 ($P \leq 0.05$) for experiments 1 and 2 whereas it was 0.83 ($P \leq 0.05$) for experiment 3. Consequently, grain production per spike was significantly contrasted from one experiment to another ($P \leq 0.05$): on the average, it was 34 grains $spike^{-1}$, 38 grains $spike^{-1}$, and 32 grains $spike^{-1}$ for experiment 1, experiment 2, and experiment 3, respectively. Whatever the experiment, the number of grains per spike never differed significantly between CT and NT (LSMEANS, $P \leq 0.05$). On the other hand, in experiment 1, grain production per spike for Fo, Fr, Ms, and Tr was significantly lower than that for NT (LSMEANS, $P \leq 0.05$), with 30 grains $spike^{-1}$ on the average vs. 37 grains $spike^{-1}$. In experiment 2, Fr, Ml, Ms and Tr presented a number of grains per spike significantly lower than that for NT (LSMEANS, $P \leq 0.05$), with 34 grains $spike^{-1}$ on the average vs. 43 grains $spike^{-1}$. In experiment 3, intercropping wheat with a living cover crop did not reduce grain production per spike when compared to sole crop. Grain production per spike mainly described the flowering and fecundation periods. Consequently, the flowering and fecundation periods were sensitive ones for most of the no-till/living cover crop treatments in experiments 1 and 2, resulting in grains per spike reduction compared to sole crop (Table II–4). However, grain yield variation between treatments also depended on spike density.

The number of spikes per m^2 was related to the number of tillers per m^2 (Figure II–2c). The relationship between these yield components varied from one experiment to another: R-square was 0.26 ($P \leq 0.05$) for experiment 1, 0.43 ($P \leq 0.05$) for experiment 2, and 0.28 ($P \leq 0.05$) for experiment 3. As a result, effect of treatment on spikes per tiller was important and differed from one experiment to another. Whatever the experiment, the number of spikes per tiller did not vary significantly between CT and NT (LSMEANS, $P \leq 0.05$). However, intercropping wheat with a living cover crop led to a decrease of spikes per tiller when compared to sole crop. This was significant for (i) Lc, Ml, and Ms in experiment 1, (ii) Ms in experiment 2, and (iii) Ml in experiment 3 (LSMEANS, $P \leq 0.05$). Finally, stem elongation period, described by the number of spikes per tiller, was a sensitive one for some leguminous treatments but not for the grass treatments (Table II–4).

The tiller number per m^2 was determined by the plant stand (Figure II–2d). The relationship between these yield components was not constant from experiment to experiment: R-square was 0.68 ($P \leq 0.05$) for experiment 1, 0.36 ($P \leq 0.05$) for experiment 2, and 0.62 ($P \leq 0.05$) for experiment 3. Consequently, plant tiller production was contrasted from one experiment to another: it averaged 2.0 tillers $plant^{-1}$ in experiment 1, 3.1 tillers $plant^{-1}$ in experiment 2, and 4.2

tillers plant^{-1} in experiment 3. Whatever the experiment, effect of treatment on tillers per plant rarely differed significantly between CT and NT and between the no-till/living cover crop treatments and NT. In fact, only Ml in experiment 2 had a significant effect on the number of tillers per plant, which decreased down to 1.8 tillers plant^{-1} (LSMEANS, $P \leq 0.05$). All in all, whatever the treatment, tillering was rarely disturbed (Table II–4).

Plant stand varied from 95 plants m^{-2} to 271 plants m^{-2} (Figure II–2d). Whatever the experiment, the number of plants per m^2 never varied significantly between CT, NT, Lc, Ml, and Ms. Conversely, the number of plants per m^2 was significantly low in some treatments. Compared to NT, this was true and significant (LSMEANS, $P \leq 0.05$) for the two grass treatments in experiments 1 and 3, and Tr in experiment 2. In experiment 3, the decrease of plant stand noticed in Fo and Fr was related to an attack of wheat bulb fly (*Delia coarctata* Fallen) observed during plant establishment. Finally, plant establishment was a very sensitive period in the treatments with grass as a living cover crop (Table II–4).

Yield component analysis highlighted sensitivity periods to stresses according to treatment. What our results did show was that grain weight of CT was reduced compared to that of NT: the grain filling period seemed to be more sensitive to stresses when wheat crop was grown on a ploughed soil rather than on a no-till one. However, as wheat yield depends mainly on grains per spike and spikes per unit area (Donaldson *et al.*, 2001), grain weight variations between CT and NT did not affect wheat yield. Norwood (2000) equally noticed some grain weight variations according to soil tillage practices, without any yield reduction. However, in that study, the ranking of soil tillage practices was not constant from year to year: in the first year, grain weight tended to be higher in the no-till system whereas in the sixth year, it tended to be higher in the conventional-till one. Another study of soil tillage effect on wheat yield components did not report any grain weight variation between soil tillage practices (Hemmat & Eskandari, 2004). In our short-term study, grains per spike, spikes per tiller, plant tiller production, and plant stand did not differ between CT and NT, whatever the experiment; therefore, soil tillage had no effect on wheat growth and development from the seeding to the beginning of grain filling period. These results are not in agreement with those of Hemmat & Eskandari (2004) as well as McMaster *et al.* (2002). These authors reported an increase of spike density in the no-till management system. However, these studies took place under dryland conditions that may explain this difference in the findings.

Our results showed that sensitivity periods to stresses differed from one no-till/living cover crop treatment to another since yield components disturbed by the presence of a living cover crop were not the same from one treatment to another (Table II–4). The grain filling period was not a sensitive one in the no-till/living cover treatments. The flowering and fecundation periods were sensitive ones for most of the treatments, especially in experiments 1 and 2. The stem elongation period was a sensitive one for three treatments with a leguminous as a living cover crop (Lc, Ml, and Ms), especially in experiment 1 without herbicides. Whatever the treatment, tillering was rarely a sensitive period. Finally, erratic plant establishment occurred in the treatments with a grass as a living cover crop in two out of the three experiments. As previously said, many authors reported grains per spike and spike density are the main determinants of wheat yield (McMaster *et al.*, 1994 ; Jeuffroy & Bouchard, 1999 ; Donaldson *et al.*, 2001), *i.e.*

stresses which affect these components affect wheat yield. Under temperate climates, the number of grains per spike mainly decreases due to low radiation intercepted by the wheat around meiosis as well as N deficiency (Demotes-Mainard *et al.*, 1995 ; Jeuffroy & Bouchard, 1999). Spike density mainly decreases due to bad plant establishment and/or bad plant tiller production and/or tiller abortion, mainly caused by N deficiency (Masle, 1981a ; Masle, 1981b), without neglecting diseases and pest attacks. A companion article details competition for light and nitrogen between wheat and living cover crops during the periods of stresses, *i.e.* from sowing to the beginning of grain filling (Carof *et al.*, submitted-b).

4. Conclusion

First, results of this study indicated that soil tillage did not affect wheat grain yield, even if wheat sensitivity to stresses might have been higher during the grain filling period when wheat crop was grown on a ploughed soil, inducing lower grain weight. Secondly, results showed that intercropping wheat with a living cover crop generally reduced wheat yield. By using yield component analysis, we demonstrated that the ranking of contrasting no-till/living cover crop treatments for yield components was changed by the interaction between climatic conditions, management practices, and cover crops species: sensitivity periods to stresses differed from one experiment to another as well as from one no-till/living cover crop treatment to another. Finally, our study highlighted the fact that, in particular treatments and herbicidal managements, the association of intercropping with no-tillage did not reduce wheat grain yield. A better understanding of competitive relationships of intercropped species may lead to design management practices capable of preventing wheat losses in intercropping systems.

Acknowledgements: We would like to thank G. Grandeau for his technical assistance with the field trial. We are grateful to R. Gosse, P.-E. Rouger, and C. Souin for their help with the measurements. We thank T. Doré for his comments on the preparation of this article. We also thank S. Tanis-Plant for her editorial work in English.

Chapitre III – Compétition ou facilitation pour l'azote et la lumière entre le blé et les plantes de couverture

Ce chapitre repose sur l'article soumis à *Agronomy for Sustainable Development* et intitulé *Intercropping winter wheat (Triticum aestivum L.) with different living cover crops in a no-till management system (II): competition or facilitation for light and nitrogen*. Son objectif est d'approfondir les connaissances sur les interactions qui s'établissent entre la culture de vente et les plantes de couverture pour l'azote et la lumière. L'article est complété par un paragraphe sur la teneur en azote total des résidus de culture.

INTERCROPPING WINTER WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.) WITH DIFFERENT LIVING COVER CROPS IN A NO-TILL MANAGEMENT SYSTEM (II): COMPETITION OR FACILITATION FOR LIGHT AND NITROGEN

Matthieu Carof, Stéphane de Tourdonnet*, Patrick Saulas, Dominique Le Floch & Jean Roger-Estrade

Unité Mixte de Recherche Agronomie INRA/INA P-G, BP01, 78850 Thiverval-Grignon, France.

*Corresponding author. Tel.: +33 1 30815257; fax: +33 1 30815425. E-mail address: tourdonn@inapg.inra.fr

Abstract: No-till winter wheat (*Triticum aestivum* L.) management systems with a living cover crop is thought to be a means to participate in agricultural sustainability. If farmers are to adopt these systems, their agronomic performance has to be better understood. To help do so, we studied competition or facilitation for light and nitrogen (N) for wheat intercropped with a living cover crop. Field experiments were carried out during three wheat growing seasons in Grignon, France. Treatments were a winter wheat crop grown (i) alone on a conventional-till soil, (ii) alone on a no-till soil, and (iii) on a no-till soil with the following living cover crops: sheep's fescue (*Festuca ovina* L.), red fescue (*Festuca rubra* L.), bird's-foot-trefoil (*Lotus corniculatus* L.), black medic (*Medicago lupulina* L.), alfalfa (*Medicago sativa* L.), and white clover (*Trifolium repens* L.). For some treatments, we measured leaf area index and height of wheat and cover crop as well as radiation partitioning between intercropped species. Whatever the treatment, we measured wheat and cover crop above-ground biomass, wheat and cover crop N uptake, and wheat N status using N nutrition index (NNI). Competition for N was not important in our intercropping systems, undoubtedly due to the high amounts of fertiliser N applied. We did not observe noticeable facilitative effect of leguminous cover crops on wheat N nutrition but N-rich leguminous residues may be a potential for decreasing fertiliser N input in the long-term use of no-till/living cover crop management systems. Competition for light was important, mainly due to light partitioning between wheat and living cover crop. To improve no-till/living cover crop management systems, management of living cover crop (*i.e.* choice of cover crop species and its mechanical or herbicidal control) may help reduce competition for light between intercropped species.

Keywords: no-tillage, intercropping, winter wheat (*Triticum aestivum* L.), leguminous and grass cover crops, interspecific competition, interspecific facilitation, canopy structure, radiation partitioning, nitrogen status

1. Introduction

Use of no-till management systems for cropping winter wheat (*Triticum aestivum* L.) provides some economical and environmental advantages to agriculture (Hernánz *et al.*, 1995 ; Basic *et al.*, 2004). Nevertheless, these management systems may present some short-term drawbacks, *e.g.* no-tillage may induce an increase in herbicide use (Sánchez-Gíron *et al.*, 2004) and/or a decrease in soil physical quality (Lampurlanés & Cantero-Martínez, 2003).

Intercropping, the simultaneous cultivation of several crops in the same field, is commonly used in the tropics whereas it is mainly obsolete in temperate climates (Vandermeer, 1989). However, intercropping no-till wheat with a living cover crop (or living mulch) may overcome, at least partially, drawbacks of no-tillage.

Living cover crop is a plant species (annual or perennial) that is intercropped with the cash crop and is maintained on the field even during the off-growing season (Teasdale, 2003). A living cover crop has been shown to take up excess soil nutrients, enhance soil physical characteristics, improve weed and pest control, and increase biological diversity (Sustainable Agriculture Network, 1998).

Few studies have considered the effects on wheat of no-till management systems with a living cover crop. On the one hand, a living cover crop can compete for light, nutrients, and/or water with the cash crop and weeds (Teasdale, 1996). If this competition is expected to suppress weeds, it can also lower cash crop yield. On the other hand, intercropped species may use different ecological niches if they have different resource requirements in time or space (Vandermeer, 1989). Furthermore, one crop can provide resources for the other one. This positive interspecific interaction is called facilitation.

In a companion paper, Carof *et al.* (submitted-a) have studied the effects of eight combinations of soil tillage and living cover crop management systems on wheat grain yield and its components. Six no-till/living cover crop management systems were compared to a no-till system without a living cover crop and a conventional-till one. Results showed that intercropping wheat with a living cover crop generally reduced grain yield, depending on the cover crop species and on the herbicidal management. Furthermore, yield component analysis showed that sensitivity periods to stresses differed from one no-till/living cover crop management system to another. Based on those experiments, the present paper examines competition or facilitation for light and nitrogen (N) between wheat and living cover crop. As our management systems with a living cover crop are a particular case of intercropping (*i.e.* only wheat production is expected during the growing season), only competitive or facilitative effects of living cover crop on wheat were observed. Furthermore, as the grain filling period is not a sensitive one in the no-till/living cover crop management systems (Carof *et al.*, submitted-a), this article focuses on the competition or facilitation evidenced from seeding to the beginning of grain filling.

2. Materials and Methods

2.1. Site description

A field trial was carried out from 2002 through 2005 at the experimental station of the National Institute for Agronomic Research, Grignon, France (48.9°N, 1.9°E, 130 m elevation). The soil type is an Orthic Luvisol (FAO-UNESCO, 1974) with 250 g kg^{-1} clay, 500 g kg^{-1} silt, and 250 g kg^{-1} sand in the topsoil (total $CaCO_3$: 21 %; pHH_2O: 8.2). Due to the presence of a calcareous hardpan, maximal root depth ranged from 0.4 to 0.6 m. Prior to this trial, the site had been conventionally cultivated for several years with annual ploughing. The whole area was ploughed one last time in November 2001.

2.2. Experimental design and management practices

As thoroughly described elsewhere (Carof *et al.*, submitted-a), three wheat (cultivar Isengrain) growing seasons were labelled experiments 1, 2, and 3. They were conducted from October 21, 2002 to July 17, 2003, from October 29, 2003 to July 26, 2004, and from October 18, 2004 to July 14, 2005, respectively.

Each experiment involved eight combinations of soil tillage and cover crop managements held to from November 2001: a conventional-till management and seven variations on a no-till one. Conventional-till management (CT) consisted of an autumnal mouldboard ploughing to a 25-cm depth, followed by two rotary harrowings to a 10-cm depth for final seedbed preparation. The no-till management variations included a no-till treatment without a living cover crop (NT) and six no-till treatments with a living cover crop. The six cover crop species were broadcasted on March 28, 2002 and are as follows: sheep's fescue (*Festuca ovina* L.; treatment Fo), red fescue (*Festuca rubra* L.; Fr), bird's-foot-trefoil (*Lotus corniculatus* L.; Lc), black medic (*Medicago lupulina* L.; Ml), alfalfa (*Medicago sativa* L.; Ms), and white clover (*Trifolium repens* L.; Tr). Each treatment was replicated four times. This experimental design allows us to study (i) effect of soil tillage comparing CT to NT, and (ii) effect of intercropping comparing the no-till/living cover crop treatments to NT.

Management practices were detailed in Carof *et al.* (submitted-a). Herbicide strategy (chemical type, rate, and number of weed killer applications) and fertiliser N applications (rate and number) differed from one experiment to another as well as from one treatment to another.

2.3. Data collection and calculation

2.3.1. Soil available water reserve

Volumetric soil water content (*WC*; $m^3\ m^{-3}$) was measured using time domain reflectometry (TDR) in one plot for (i) CT, NT, Fr, Ms, and Tr in experiment 1, (ii) CT, NT, Fr, and Lc in experiment 2, and (iii) CT, NT, Fr, Lc, and Ms in experiment 3. For experiment 1, measurements began 162 days after sowing (DAS) for CT, NT, and Fr, and 207 DAS for Ms and Tr. For

experiment 2, measurements began 47 DAS. For experiment 3, measurements were made from the onset of the experiment.

In each plot, two soil pits (0.4-m deep by 1.5-m wide) were dug and TDR waveguides (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA, USA) were installed at two depths: 0.1-m deep ($WC_{0.1}$) and 0.3-m deep ($WC_{0.3}$). For experiment 1, a single waveguide was installed at each depth whereas for experiments 2 and 3, two waveguides were installed at each depth. Measurements of WC were made with a TDR Trase (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA, USA) every two or three days.

We assumed $WC_{0.1}$ represented WC in the top 0.2-m of soil whereas $WC_{0.3}$ represented WC from 0.2-m deep to 0.4-m deep. Consequently, soil available water reserve (AWR; m) was estimated in the upper part of the soil (0–0.4 m), as follows:

$$AWR_d = 0.2 \times WC_{0.1\,d} + 0.2 \times WC_{0.3\,d} - 0.4 \times WC_{pF4.2} \quad (1)$$

with:

$WC_d = WC_{pF4.2}$ if $WC_d < WC_{pF4.2}$

$WC_d = WC_{pF2.0}$ if $WC_d > WC_{pF2.0}$

where d, in DAS, is the date of a TDR measurement; $WC_{0.1}$ and $WC_{0.3}$ are WC at 0.1-m deep and 0.3-m deep, respectively, for two TDR waveguides placed one above another; $WC_{pF4.2}$ is WC at the wilting point; $WC_{pF2.0}$ is WC at pF2.0. $WC_{pF4.2}$ and $WC_{pF2.0}$ for the soil of this study were determined in the lab and we used $WC_{pF4.2}$ = 0.16 and $WC_{pF2.0}$ = 0.28 (data not shown).

2.3.2. Canopy structure descriptors

In experiment 1, canopy structure descriptors, *i.e.* height and leaf area of wheat and cover crop, were not measured. In experiment 2, measurements of canopy structure descriptors took place at 190 and 210 DAS and in experiment 3, they took place at 162, 196, and 217 DAS.

Wheat and cover crop height were measured on four plants in four plots for (i) NT, Fr, and Lc in experiment 2 and (ii) NT, Fr, Lc, and Ms in experiment 3. Wheat and cover crop leaf area were determined by sampling (i) one subplot 0.25 m^2 in three plots for NT, Fr, and Lc in experiment 2 and (ii) two subplots 0.25 m^2 in two plots for NT, Fr, Lc, and Ms in experiment 3. As intercropped species created a multispecies multilayer canopy, two layers were defined for Fr, Lc, and Ms: the top canopy layer (layer 1) only included the upper part of the wheat canopy whereas the bottom canopy layer (layer 2) included the lower part of the wheat canopy as well as the cover crop canopy. Only layer 1 was defined for NT. In each layer, a sample of the subplot plant matter was used to measure either leaf area of wheat with an optical planimeter (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, United Kingdom) or leaf area of cover crop with an image analysis software (Rasband, 2006: ImageJ) on scanned leaf material. After leaf area measurement, the subplot plant matter of each layer as well as the sample of the subplot plant matter were oven-dried for two days at 80°C and weighed. In each layer, leaf area index (LAI; $m^2\ m^{-2}$) of each intercropped species was calculated from the specific leaf area, the specific sample biomass, and the specific subplot biomass.

2.3.3. Radiative balance

In experiment 1, radiative balance was not determined. In experiment 2, it was determined in one plot for NT, Fr, and Lc, and in experiment 3, it was determined in one plot for NT, Fr, Lc, and Ms. Whatever the experiment, measurements began after the end of tillering.

Incident photosynthetically active radiation (*PARi*; μmol m^{-2} s^{-1}) was measured above the whole canopy with two replicates of amorphous silicon cells (Solems, Palaiseau, France) for the whole site. The amount of PAR transmitted to the soil (*PARt*) was measured with two amorphous silicon cells per plot, placed on the ground between two wheat rows. The amount of PAR reflected by the whole canopy (*PARr*) was measured with two amorphous silicon cells per plot, faced down the whole canopy. For the no-till/living cover crop treatments, the amount of PAR transmitted to the bottom of layer 1 (*PARt1*) was measured with two amorphous silicon cells per plot, placed at the top of layer 2 between two wheat rows. Cells were regularly moved according to cover crop height. Data of individual sensors were scanned every ten minutes, averaged every one hour, and collected on a Campbell CR10X data logger (Campbell Scientific Inc., Shepshed, UK).

Daily integration of both incident, transmitted, and reflected PAR was used to compute daily efficiency of PAR interception by the whole canopy (ε_d; unitless):

$$\varepsilon_d = \frac{\sum_{h=1}^{24}\left(PARi_h - PARt_h - PARr_h\right)}{\sum_{h=1}^{24} PARi_h} \quad (2)$$

where *d*, in DAS, is the date of a PAR measurement; *h*, in hour, is the time of a PAR measurement during day *d*.

Daily PAR interception efficiency of wheat ($\varepsilon_{wheat\ d}$; unitless) for NT was daily PAR interception efficiency of the whole canopy. Daily PAR interception efficiency of wheat for the no-till/living cover crop treatments was defined as follows:

$$\varepsilon_{wheat\ d} = \frac{\sum_{h=1}^{24}\left(PARi_h - PARt1_h - PARr_h\right)}{\sum_{h=1}^{24} PARi_h} + x_{wheat\ d}\frac{\sum_{h=1}^{24}\left(PARt1_h - PARt_h\right)}{\sum_{h=1}^{24} PARi_h} \quad (3)$$

where $x_{wheat\ d}$, unitless, is the fraction of incident PAR at the top of layer 2 intercepted by the wheat in this canopy layer during day d.

Daily PAR interception efficiency of cover crop ($\varepsilon_{cover\ crop\ d}$; unitless) was defined as follows:

$$\varepsilon_{cover\ crop\ d} = (1 - x_{wheat\ d})\frac{\sum_{h=1}^{24}\left(PARt1_h - PARt_h\right)}{\sum_{h=1}^{24} PARi_h} \quad (4)$$

To determine $x_{wheat\ d}$, we used the Kubelka-Munk equations derived by Sinoquet *et al.* (2000). In a multispecies multilayer canopy, these equations allowed for the determination of radiation partitioning between each component of each canopy layer. $x_{wheat\ d}$ was the ratio of wheat radiation interception efficiency in layer 2 to radiation interception efficiency for all components in layer 2.

Main parameters were leaf inclination of each species of the canopy (45° for wheat, 63° for grass, and 27° for leguminous), leaf scattering coefficient of each component of the canopy (0.20 whatever the component), and soil reflectance (0.15). The input variable was LAI of each component of each layer. Daily estimates of $x_{wheat\ d}$ between measuring days were interpolated by linear regression. After the last measuring day, $x_{wheat\ d}$ was considered to be constant.

2.3.4. Crop above-ground biomass and N uptake, wheat N status

Plant measurements were carried out at the end of tillering and at flowering. In experiment 1, for technical reasons, the second plant measurement took place fifteen days after flowering.

Whatever the sampling date, above-ground biomass as well as total N concentration of wheat and cover crop were determined by sampling two subplots 0.25 m^2 per plot. Samples were weighed after oven-drying for two days at 80°C. Then, samples were ground using a 0.5-mm mesh grid and total N concentration was measured using the Dumas (1831) method. After averaging subplots for biomass (g m^{-2}) and total N concentration (g g^{-1}), above-ground N uptake (g m^{-2}) for wheat and cover crop was calculated as the product of biomass time total N concentration.

Wheat N status was characterized using N nutrition index (NNI) calculated as the ratio of measured N concentration of the aerial parts to critical N concentration (N_t; g g^{-1}). N_t corresponds to the minimum N concentration of the aerial parts required to ensure maximal growth. N_t for wheat was determined using the following equations (Justes *et al.*, 1997):

if DM < 1.55 Mg ha^{-1}, $N_t = 4.4$ % (5)

if $DM \geq 1.55$ Mg ha^{-1}, $N_t = 5.35 \times (DM)^{-0.442}$ % (6)

where DM, in Mg ha^{-1}, is accumulated dry matter in wheat shoots.

If NNI is equal to or higher than 1, wheat N status is not limiting for growth. If NNI is lower than 0.90, wheat is N-deficient (Jeuffroy & Bouchard, 1999). The lower the NNI, the more severe the deficiency is.

2.3.5. Statistical analysis

Data from all the experiments were analysed by means of the GLM procedure available from SAS/STAT (SAS Institute Inc., 1999). For AWR, height, and LAI, the GLM procedure was carried out at each measurement date of each experiment. Treatment was designated as fixed effect. For above-ground biomass, N uptake, and NNI, the GLM procedure was carried out at each sampling date. Experiment, treatment within an experiment, and block within an experiment were designated as fixed effects.

Means of AWR, height, and LAI were separated by *p*-values ($P \leq 0.05$) associated with least-significant difference (LSD) test. Means of above-ground biomass, N uptake, and NNI were separated by *p*-values ($P \leq 0.05$) associated with least-squares mean (LSMEANS) statement.

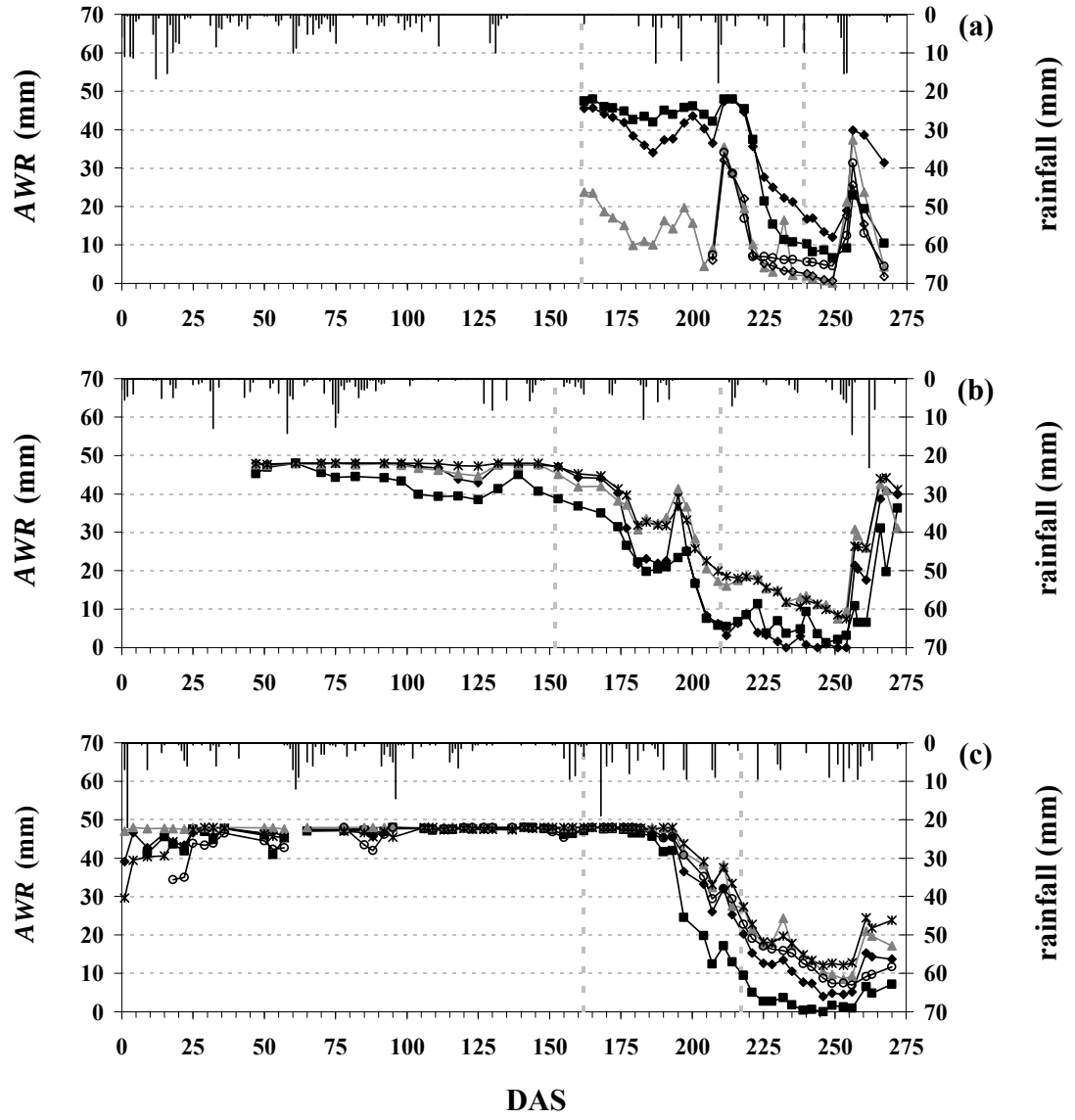


Figure III–1: Means of *AWR* in the upper soil layer (0–0.4 m) for CT (■), NT (◆), Fr (▲), Lc (∗), Ms (○), and Tr (◇) as well as daily rainfall (entire bars) for experiment 1 (a), experiment 2 (b), and experiment 3 (c). Vertical dashed lines indicate two wheat stages: the end of tillering and flowering. Treatment labels are defined in the text.

3. Results and Discussion

3.1. Changes in *AWR* over time according to treatment

Soil water can play a major role in light and N competition relationships of intercropped species. During the period from seeding to the beginning of grain filling (*i.e.* about 10 days after flowering), AWR was measured to determine whether or not soil water was a main limiting factor (Figure III–1).

Despite some periods without rainfall from seeding to the beginning of grain filling, soil water reserve was always available to crops in the treatments where these measurements were made, whatever the experiment. In experiment 1, a dry period occurred from 112 DAS to 181 DAS, with only 31 mm vs. 107 mm on the 30-year average (Figure III–1a). Fertiliser N applications were carried out during this dry period. In experiment 2, precipitations were low from 93 DAS to 126 DAS, with 4 mm vs. 51 mm on the 30-year average (Figure III–1b). After 192 DAS, another dry period (1 mm) lasted 20 days during which a last fertiliser N application was carried out. In experiment 3, a period without rainfall occurred during autumn, from 42 DAS to 56 DAS (Figure III–1c). After 119 DAS, another dry period (6 mm) lasted 35 days. First fertiliser N application was carried out during this dry period.

Time-changes in AWR rarely differed from one treatment to another, whatever the experiment (Figure III–1). Furthermore, in two out of the three experiments, AWR was generally higher in the no-till/living cover crop treatments than in the other ones. In experiment 2, it was significant from 205 DAS to 254 DAS (LSD, $P \leq 0.05$). In experiment 3, it was significant from 197 DAS to 270 DAS, when the no-till treatments were compared to CT (LSD, $P \leq 0.05$).

Under the environmental conditions of our experiments, water was not a main limiting factor, even if AWR for the no-till/living cover crop treatments was particularly low a few days before flowering in experiment 1. In agreement with this result, Thorsted *et al.* (2006c) reported, in a similar climate, that competition for water in a winter wheat/white clover intercropping system only existed during the grain filling period.

3.2. Canopy structure: height and *LAI* of intercropped species

As spatial variation in canopy structure may affect light interception and partitioning between intercropping species (Sinoquet & Caldwell, 1995), descriptors (height, *LAI*) of canopy structure were measured for some treatments in the top canopy layer as well as in the bottom canopy layer, *i.e.* the mixed one (Figure III–2).

With the exception of Fr at 196 DAS in experiment 3, LAI of the whole canopy (*i.e.* sum of wheat LAI in the two canopy layers and cover crop LAI) for Fr and Lc did not differ significantly from that for NT, whatever the experiment and the sampling date.

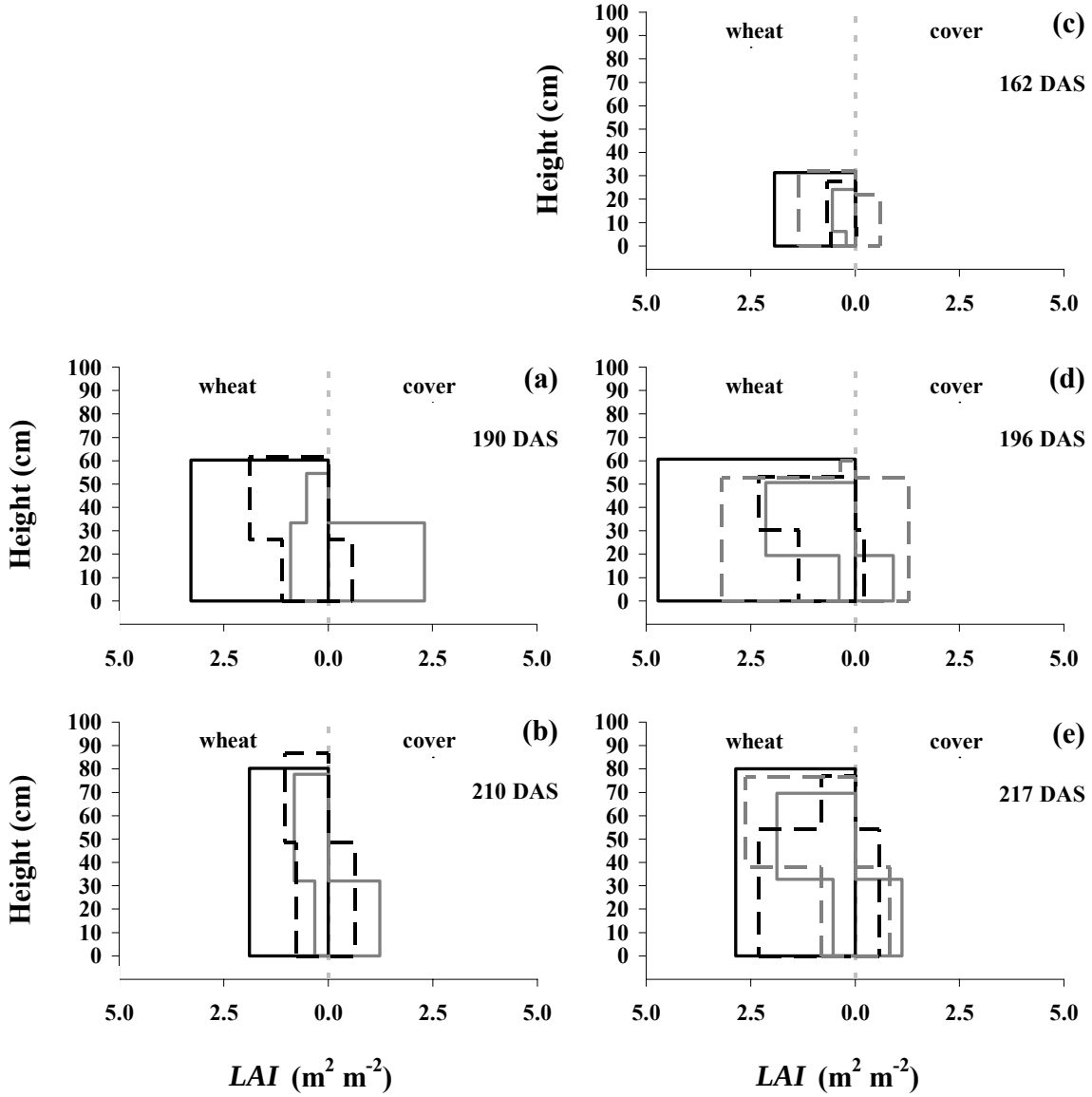


Figure III–2: Mean height and *LAI* of wheat and living cover crop in the top canopy layer and in the bottom canopy layer for NT (——), Fr (——), Lc (- - - -), and Ms (- - - -) at two sampling dates in experiment 2 (190 DAS (a); 210 DAS (b)) and three sampling dates in experiment 3 (162 DAS (c); 196 DAS (d); 217 DAS (e)). Treatment labels are defined in the text.

Conversely, *LAI* of the whole canopy for Ms was significantly higher than that for NT at 162 DAS and 196 DAS in experiment 3 (LSD, $P \leq 0.05$).

On the one hand, wheat was taller than cover crop whatever the experiment, the sampling date, and the no-till/living cover crop treatment. On the other hand, in the mixed canopy layer for Fr, wheat *LAI* was lower than cover crop *LAI* in four out of the five sampling dates, contrary to the other no-till/living cover crop treatments. Most of wheat foliage for Fr and Lc was evidenced in the top canopy layer in four out of the five sampling dates, contrary to Ms at 162 DAS and 196 DAS in experiment 3.

Wheat intercropped with red fescue (Fr) was generally shorter than wheat cropped alone (NT), even if height variations between these treatments were only significant at 190 DAS (experiment 2) and 196 DAS (experiment 3) (LSD, $P \leq 0.05$). Furthermore, regardless the experiment, total wheat *LAI* (*i.e.* sum of wheat LAI in the two canopy layers) for Fr was always lower than total wheat LAI for NT; this was significant at 190 DAS (experiment 2) and at 162 DAS and 196 DAS (experiment 3).

Living cover crops presented contrasted canopy structures, from short cover crop canopy with high *LAI* (*e.g.* red fescue at 190 DAS in experiment 2) to high cover crop canopy with low *LAI* (*e.g.* bird's-foot-trefoil (Lc) at 217 DAS in experiment 3). Whatever the experiment, red fescue formed denser canopy than the other cover crops, with the exception of alfalfa (Ms) at the first sampling date in experiment 3.

LAI is the main indicator of plant ability to capture light resources (Nassiri & Elgersma, 1998). Our study highlighted the fact that leaf area of the whole canopy for the no-till/living cover crop treatments was greater than leaf area of wheat canopy for NT only if cover crop species was alfalfa (Ms). This confirms that *LAI* of the whole canopy in intercropping systems depends on species combinations (Dong *et al.*, 2005).

As far as height was concerned, our results showed wheat always dominated cover crop, whatever the treatment. However, in the mixed canopy layer, wheat foliage may have been dominated by cover crop foliage, depending on the cover crop species: this was true for red fescue. As a consequence, intercropping wheat with red fescue changed wheat canopy structure (height and/or *LAI*) compared to that for sole crop. Variation of wheat *LAI* between mixed and sole crops may be due to fast foliage growth of sole crops as it was observed for *Arachis pintoi* in a *Digitaria decumbens*/*A. pintoi* intercropping system compared to sole crops (Sinoquet & Cruz, 1993). Moreover, changes in canopy structure between mixed and sole crops may be a consequence of species ability to occupy restricted space (Tremmel & Bazzaz, 1995). Space competitive ability is related to plant emergence kinetics: the plant that emerges first in the field acquires the competitive advantage (Wallace *et al.*, 1991 ; Bond & Grundy, 2001). In our experiments, red fescue gained this competitive advantage since its biomass was higher than wheat biomass during plant emergence, even if herbicide use slowed down growth of red fescue (data not shown). In experiment 3, wheat *LAI* for Fr may have been reduced due to low plant number per m^2 (Carof *et al.*, submitted-a).

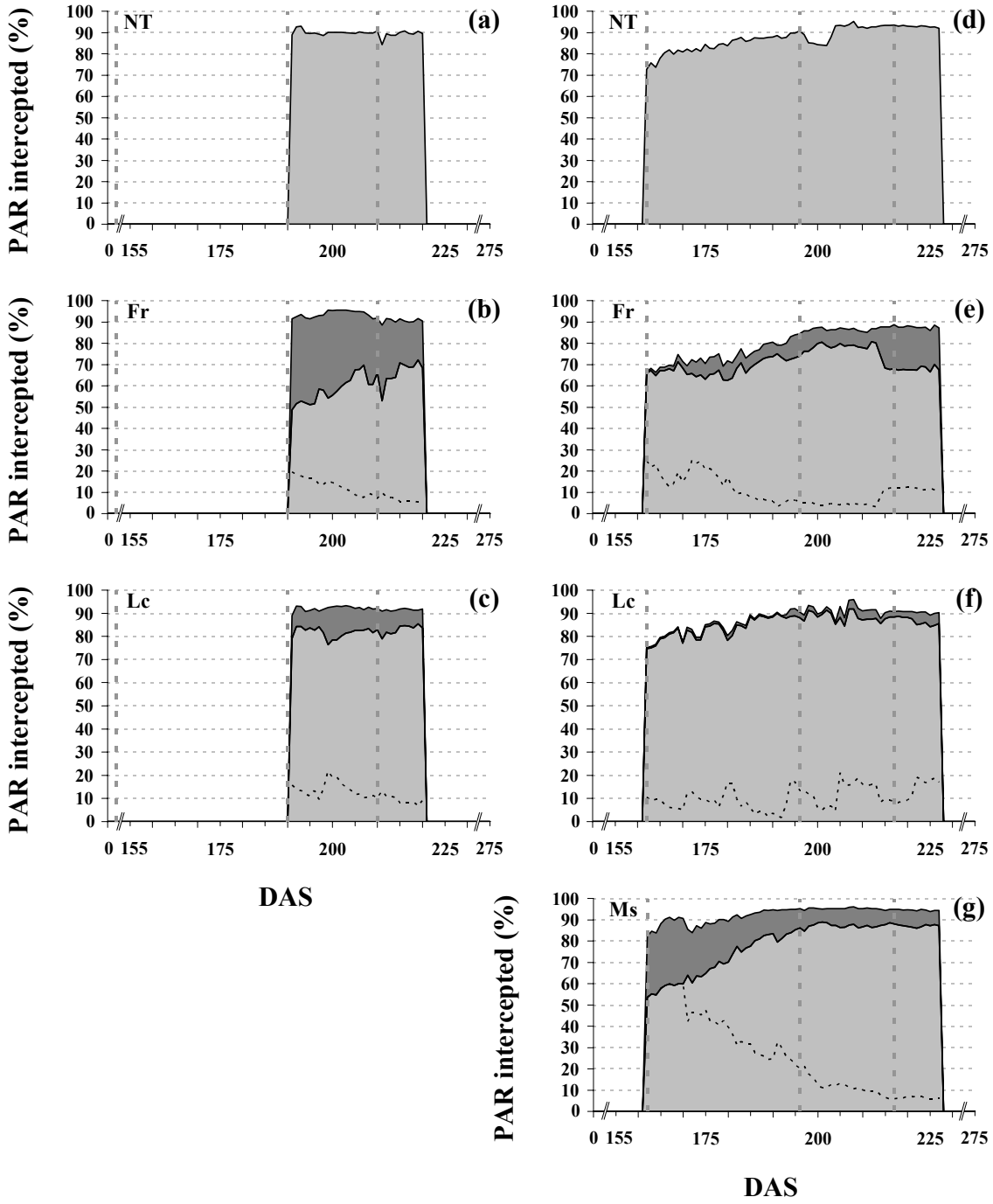


Figure III–3: Means of daily PAR intercepted by wheat in the two canopy layers (■), wheat in the bottom canopy layer (- - -) and living cover crop in the bottom canopy layer (■) for NT (a), Fr (b), and Lc (c) for experiment 2, and for NT (d), Fr (e), Lc (f), and Ms (g) for experiment 3. Vertical dashed lines indicate *LAI* sampling dates. Treatment labels are defined in the text.

3.3. PAR interception and partitioning between intercropped species

Changes in the daily amount of PAR intercepted by wheat in the two canopy layers, wheat in the mixed canopy layer, and living cover crop in the mixed canopy layer are presented in Figure III–3. Table III–I gives the cumulative amount of PAR intercepted by wheat and living cover crop during the measurement periods of experiments 2 and 3. We can thus observe PAR partitioning between intercropped species and compare PAR interception efficiency for wheat sole crop and that for wheat mixed with another plant species.

Whatever the experiment, and with the exception of Fr in experiment 3, the amount of PAR intercepted by the whole canopy (*i.e.* sum of PAR intercepted by the wheat and the living cover crop) for the no-till/living cover crop treatments was frequently higher than the amount of PAR intercepted by wheat for NT (Figure III–3). In experiment 3, the low total amount of PAR intercepted by the two components for Fr (Table III-1) was due to particularly low wheat LAI at 162 and 196 DAS (Figure III–2).

Whatever the experiment, PAR measurements showed competition for light occurred between intercropped species since the daily amount of PAR intercepted by wheat for the no-till/living cover crop treatments was regularly lower than that for NT (Figure III–3). However, major differences existed between treatments. Whatever the experiment, red fescue competed the most vigorously for light with wheat when compared to the other living cover crops since wheat PAR interception efficiency for Fr was the lowest. However, reduction of wheat PAR interception efficiency for Fr in experiment 3 was not only due to direct competition for light between wheat and red fescue but also to the reduction of wheat LAI (Figure III–2). Competition for light between wheat and the leguminous cover crop was less severe (Table III-1). Nevertheless, competitive ability of alfalfa was high at the beginning of the measurement period and decreased over the course of time (Figure III–3) due to the herbicide use. Finally, as the cumulative amount of PAR intercepted by wheat was higher than the cumulative amount of PAR intercepted by living cover crop (Table III-1), it confirmed wheat canopy dominance previously observed according to the height descriptor (Figure III–2).

Our results are in agreement with those of Keating & Carberry (1993) who have reported intercropping systems generally increase total radiation interception efficiency. Haymes & Lee (1999) also reported higher total radiation interception efficiency for spring wheat/bean (*Vicia faba* L.) intercropping than that for sole crops. Thus, in intercropping systems, radiation not intercepted by one species could benefit another one whereas in a monospecific crop, non-interception of incident radiation is a loss of energy (Cruz & Sinoquet, 1994). However, sole crop can intercept more radiation than mixed crops, especially if one species of the mixed crops highly dominates the other one (Wallace *et al.*, 1991). A defective plant development in an intercropping system may also reduce total radiation absorption efficiency when compared to sole crop: this was observed for Fr in experiment 3.

Table III–1: Means and standard deviations of cumulative PAR (mmol m^{-2} s^{-1}) intercepted by wheat in the bottom canopy layer (PAR_2), wheat in the two canopy layers (PAR_0), and living cover crop in the bottom canopy layer (PAR_2) from 191 DAS to 220 DAS for three treatments for experiment 2 and from 162 DAS to 227 DAS for four treatments for experiment 3.

		Component of the intercropping		
		Wheat		Cover crop
Experiment	Treatment	PAR_2	PAR_0	PAR_2
2	NT	–	242 ±4	–
	Fr	29 ±1	166 ±2	86 ±3
	Lc	35 ±4	221 ±3	28 ±4
3	NT	–	421 ±6	–
	Fr	49 ±16	339 ±43	49 ±12
	Lc	47 ±6	374 ±23	10 ±1
	Ms	108 ±16	380 ±39	64 ±5

Treatment labels are defined in the text.

The different patterns of cover crop canopy structure (Figure III–2) enhanced competitive ability of the different cover crop species to intercept radiation (Figure III–3). Competitive ability of a species is related to its shading ability (Wallace *et al.*, 1991). Blackshaw (1994) showed weed grass (*Bromus tectorum* L.) reduced biomass of four wheat cultivars differently according to cultivar traits. He found that those which were shaded by *B. tectorum* for much of the growing season presented the lowest biomass. Vertical distribution of leaf area and leaf area contribution of each species also affects competitive ability of a species (Sinoquet & Cruz, 1993 ; Dong *et al.*, 2005). In our intercropping systems, competitive ability of wheat was the highest, when wheat foliage was in the top canopy layer and when wheat leaf area in the mixed canopy layer was greater than cover crop leaf area.

3.4. Above-ground biomass and *NNI*: indicators of competition or facilitation for light and N

Competition or facilitation for soil N may occur for wheat intercropped with a living cover crop. In order to highlight worse or better wheat N nutrition in intercropping systems, N status of wheat in the mixed crops was compared to N status of wheat in the sole crop, using *NNI* (Table III–2). At the same time, wheat above-ground biomass in the mixed crops was compared to wheat above-ground biomass in the sole crop. According to Cruz & Soussana (1997), this approach allows us to separate competitive or facilitative relationship for N and light between intercropped species (Table III–3).

If wheat N deficiency occurred (*i.e.* *NNI* was lower than 0.90) in the treatments without a living cover crop (CT and NT), it gave rise to processes that reduced N availability to wheat, independently of competition between intercropped species. At the end of tillering, wheat N deficiency for CT occurred in experiments 1 and 2 whereas that for NT only occurred in experiment 1 (Table III–2). At flowering, wheat N deficiency occurred in CT and NT, whatever the experiment.

At the end of tillering, competition for N occurred in two out of the eighteen intercropping situations (*i.e.* in three experiments times six no-till/living cover crop treatments): in experiment 2, wheat *NNI* for Ml and Tr was significantly lower than that for NT. Furthermore, this competition for N was accompanied by competition for light since wheat above-ground biomass for Ml and Tr was significantly lower than that for NT. As far as wheat above-ground biomass was concerned, that for Fo and Fr was significantly lower than that for NT in two out of the three experiments. In experiment 1, biomass variation between the grass treatments (Fo and Fr) and NT resulted from competition for light whereas in experiment 3, it mainly resulted from high incidence of wheat bulb fly (*Delia coarctata* Fallen) which reduced plant number per m^2 for Fo and Fr (Carof *et al.*, submitted-a). At the end of tillering, competition for light also occurred for Lc and Tr in experiment 3. Facilitative effects of the leguminous cover crops on wheat N nutrition were observed in experiment 1 since wheat *NNI* for the leguminous treatments (Lc, Ml, Ms, and Tr) was higher than that for NT, even if it was only significant for Lc and Ms.

Table III–2: Means of wheat above-ground biomass (Mg ha^{-1}), wheat *NNI*, and wheat and cover crop N uptake (kg ha^{-1}) at two sampling dates for eight treatments for three experiments.

Experiment 1	End of tillering				Flowering			
	Wheat			Cover crop	Wheat			Cover crop
Treatment	Biomass	*NNI*	N uptake	N uptake	Biomass	*NNI*	N uptake	N uptake
CT	0.5073 a	0.60 c	13.3 abc	–	8.8605 a	0.71 a	128.2 a	–
NT	0.4447 a	0.64 bc	12.6 abc	–	9.1429 a	0.74 a	136.3 a	–
Fo	0.1501 b	0.56 c	3.7 cd	21.8 bc	3.3844 bc	0.43 bc	46.9 bc	65.7 c
Fr	0.1108 b	0.56 c	2.7 d	20.6 c	1.4259 c	0.31 c	19.1 c	88.2 bc
Lc	0.4788 a	0.79 a	16.4 ab	27.8 bc	5.2603 b	0.50 b	70.3 b	94.6 bc
Ml	0.5795 a	0.74 ab	18.6 a	41.0 b	5.1383 b	0.52 b	70.2 b	93.1 bc
Ms	0.3770 ab	0.77 a	12.8 abc	69.0 a	1.5782 c	0.39 bc	23.0 c	144.0 a
Tr	0.2969 ab	0.73 ab	9.1 bcd	80.9 a	3.8326 bc	0.45 bc	50.7 bc	122.9 ab
Experiment 2	End of tillering				Flowering			
	Wheat			Cover crop	Wheat			Cover crop
Treatment	Biomass	*NNI*	N uptake	N uptake	Biomass	*NNI*	N uptake	N uptake
CT	0.9174 a	0.78 c	31.5 ab	–	10.7838 a	0.64 ab	129.1 a	–
NT	0.7374 ab	0.94 a	30.4 b	–	10.3653 a	0.63 abc	125.9 a	–
Fo	0.5931 bc	1.01 a	26.3 b	37.9 b	7.2223 bc	0.56 bcd	91.2 ab	77.1 b
Fr	0.5760 bc	0.97 a	25.0 b	33.5 b	6.5686 bc	0.50 bcd	77.5 bc	79.7 ab
Lc	0.9802 a	0.92 a	39.7 a	2.9 c	8.8665 ab	0.71 a	129.3 a	25.0 c
Ml	0.3622 cd	0.80 bc	12.7 c	26.0 b	3.8769 d	0.49 cd	55.9 bc	53.9 bc
Ms	0.6148 bc	0.90 ab	24.6 b	91.3 a	4.5940 cd	0.62 abc	77.3 bc	122.3 a
Tr	0.3146 d	0.81 bc	10.8 c	24.0 b	3.5506 d	0.46 d	51.1 c	63.7 bc
Experiment 3	End of tillering				Flowering			
	Wheat			Cover crop	Wheat			Cover crop
Treatment	Biomass	*NNI*	N uptake	N uptake	Biomass	*NNI*	N uptake	N uptake
CT	1.4950 a	0.93 b	59.5 a	–	12.8246 a	0.75 abc	166.1 a	–
NT	1.1110 b	0.98 ab	47.7 b	–	11.6492 ab	0.62 c	131.4 abc	–
Fo	0.5595 e	1.07 a	24.6 d	14.2 b	6.1207 de	0.70 bc	101.9 c	24.0 ab
Fr	0.5104 e	1.02 ab	21.6 d	1.7 b	6.1051 de	0.65 c	94.1 c	36.1 ab
Lc	0.8547 cd	1.09 a	40.9 bc	6.3 b	8.8450 cd	0.82 ab	147.7 ab	15.7 ab
Ml	1.0502 bc	1.03 ab	47.1 b	7.3 b	8.7651 cd	0.84 a	152.0 a	0.0 b
Ms	0.9360 bcd	1.02 ab	41.7 bc	40.9 a	8.9941 bc	0.86 a	158.2 a	50.9 a
Tr	0.7548 de	1.05 a	34.4 c	17.0 b	5.7856 e	0.79 ab	113.0 bc	1.7 b

For each experiment, means followed by the same letter within a column are not significantly different (LSMEANS, $P \leq 0.05$). Treatment labels are defined in the text.

Table III–3: Wheat NNI and wheat above-ground biomass as plant indicators of competition or facilitation for N and light between wheat and living cover crop.

	Competition		Facilitation	
	N	Light	N	Light
I. Wheat $NNI_{\text{mixed crops}}$ < Wheat $NNI_{\text{sole crop}}$[z]				
a. Wheat $DM_{\text{mixed crops}}$ < Wheat $DM_{\text{sole crop}}$[‡]	×	×		
b. Wheat $DM_{\text{mixed crops}}$ = Wheat $DM_{\text{sole crop}}$	×			
c. Wheat $DM_{\text{mixed crops}}$ > Wheat $DM_{\text{sole crop}}$	×			×
II. Wheat $NNI_{\text{mixed crops}}$ = Wheat $NNI_{\text{sole crop}}$				
a. Wheat $DM_{\text{mixed crops}}$ < Wheat $DM_{\text{sole crop}}$		×		
b. Wheat $DM_{\text{mixed crops}}$ = Wheat $DM_{\text{sole crop}}$				
c. Wheat $DM_{\text{mixed crops}}$ > Wheat $DM_{\text{sole crop}}$				×
III. Wheat $NNI_{\text{mixed crops}}$ > Wheat $NNI_{\text{sole crop}}$				
a. Wheat $DM_{\text{mixed crops}}$ < Wheat $DM_{\text{sole crop}}$		×	×	
b. Wheat $DM_{\text{mixed crops}}$ = Wheat $DM_{\text{sole crop}}$			×	
c. Wheat $DM_{\text{mixed crops}}$ > Wheat $DM_{\text{sole crop}}$			×	×

[z]Wheat $NNI_{\text{mixed crops}}$ is wheat NNI in the mixed crops, and Wheat $NNI_{\text{sole crop}}$ is wheat NNI in the sole crop.

[‡]Wheat $DM_{\text{mixed crops}}$ is wheat above-ground biomass in the mixed crops, and Wheat $DM_{\text{sole crop}}$ is wheat above-ground biomass in the sole crop.

At flowering of experiment 1, competition for N occurred in all the no-till/living cover crop treatments, even when living cover crop was a leguminous one. In the other experiments, competition for N was only observed in Tr in experiment 2. However, as low *NNI* for Ml was close to that for Tr in this experiment, we assumed competition for N also occurred for Ml. Competition for light was observed in sixteen out of the eighteen intercropping situations. Finally, in one out of the three experiments, facilitation for N occurred for wheat intercropped with a leguminous cover crop since wheat *NNI* for the leguminous treatments was significantly higher than that for NT in experiment 3.

Whatever the experiment and the sampling date, cover crop N uptake for Ms was the highest. Furthermore, it was often significantly higher than cover crop N uptake for the grass treatments as well as higher than wheat N uptake. For the other leguminous treatments, N uptake was more variable.

In experiment 1, whatever the sampling date, wheat N deficiency may have resulted from a defective N uptake since that for CT and NT was particularly low when compared to the amount of fertiliser N applied. Two factors may explain why N was inadequately available for wheat. First, fertiliser pellets did not dissolve into the soil as the fertiliser N applications were carried out during periods with very low rainfall. Secondly, N may have been lost for wheat through ammonia volatilisation of NH_4NO_3 fertiliser since environmental conditions of our study may have promoted this phenomenon: dry weather, alkaline and calcareous soil (Recous *et al.*, 1992). At flowering in experiments 2 and 3, wheat N deficiency may have been temporary, due to the short delay between third fertiliser N application and sampling date.

In our intercropping systems, competition for light between wheat and living cover crop was much more frequent than competition for N, especially at flowering. This result is in agreement with that of Cruz & Sinoquet (1994) for a *D. decumbens*/*A. pintoi* intercropping system. Moreover, most of the time, competition for light was not accompanied by competition for N, *i.e.* competition for light did not result from competition for N, which may reduce wheat radiation-use efficiency and/or wheat *LAI* (Justes *et al.*, 1997). Thus, in our study, PAR interception and its partitioning between intercropped species was the main reason of competition for light, as previously observed.

Under the given environmental conditions of our experiments (*i.e.* high rates of fertilisation), living cover crops rarely competed for N with wheat. Either soil N resource was not limiting or intercropped species explored different volumes of air and soil or different ecological niches for N uptake (Vandermeer, 1989 ; Jumpponen *et al.*, 2002 ; Ghaley *et al.*, 2005). A better understanding of N partitioning between intercropped species by using ^{15}N enrichment techniques should be sought (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001).

When soil N was highly limiting (as it was at the end of tillering in experiment 1), wheat N nutrition was enhanced by the presence of a leguminous cover crop but this facilitative effect was no longer evidenced when soil N resource increased. However, another facilitative effect of leguminous cover crop on wheat N nutrition was observed at flowering in experiment 3 even though soil N may not have been limiting. These results are in agreement with those of Thorsted *et al.* (2006b) and Jensen & Hauggaard-Nielsen (2003). First, N transfer from a leguminous crop to a grass one is highest in N-limiting conditions. Secondly, recycling of N-rich crop residues of

leguminous cover crops may benefit intercropped wheat. The first phenomenon can occur from the onset of leguminous cover crop establishment whereas the second one can occur over several growth cycles. Finally, leguminous cover crops did not prevent wheat N deficiency. Similar to the grass cover crops, leguminous cover crops may compete for N with wheat since the use of N fertiliser reduces their capacity to fix N_2 (Jensen & Hauggaard-Nielsen, 2003).

4. Conclusion

Our results revealed that competition for N was not important when wheat was mixed with a living cover crop since fertiliser N strategy, calculated thanks to wheat and cover crop N requirements, prevents this competition. Furthermore, in the long-term use of no-till/living cover crop management systems, we assume that recycling of N-rich leguminous cover crop residues could be a potential for reducing fertiliser N input without induced N competition between intercropped species.

Our study showed that wheat and living cover crop mainly competed for light resource due to light partitioning between intercropped species. This competition may be managed through the spatial structure of the intercrop, directly through choice of living cover crop species (height, *LAI*) and cutting of the living cover crop (or herbicide use) during the growing season. One challenge is to manage canopy structure of living cover crop in order to enhance its capacity to control weeds by covering up weeds during the off-growing season while avoiding light competition with wheat during cash crop growth cycle.

Acknowledgements: We would like to thank G. Grandeau for his technical assistance with the field trial. We are grateful to F. Lafouge, R. Gosse, P.-E. Rouger, and C. Souin for their help with the measurements. We are also grateful to T. Doré for his comments on the preparation of this article. We thank S. Tanis-Plant for her editorial work in English.

5. Résultat complémentaire : la teneur en azote total des résidus de culture

Dans la conclusion qui précède, une hypothèse sur l'intérêt des SCV avec cultures associées est formulée : les résidus de culture d'une association blé/légumineuse sont riches en azote et leur recyclage permet de réduire les quantités d'azote à apporter par les engrais sans induire une compétition pour cet élément entre le blé et la plante de couverture.

Dans cette thèse, l'analyse de le teneur en azote total des résidus de culture a été réalisée sur les huit traitements expérimentaux ce qui fournit des éléments pour discuter cette hypothèse.

Pendant les expérimentations 2 et 3, les résidus de culture à la surface du sol ont été prélevés manuellement à la fin du tallage et à la maturité physiologique du blé, à raison de deux placettes de 0,25 m^2 par parcelle élémentaire. Les échantillons prélevés ont été lavés au laboratoire puis pesés après un passage à l'étuve à 80°C pendant deux jours. Les échantillons ont ensuite été broyés et leur teneur en azote total ($g\ g^{-1}$) a été déterminée suivant la méthode de Dumas (1831).

Tableau III–4 : Teneurs en azote total moyennes des résidus de culture (g N kg^{-1} de matière sèche) à deux stades du blé pour les huit traitements des expérimentations 2 et 3.

	Expérimentation 2		Expérimentation 3	
Traitement	Fin tallage	Maturité	Fin tallage	Maturité
NT	10,4 c	12,9 d	8,5 c	10,1 e
Fo	12,1 bc	14,8 cd	10,5 bc	12,1 cd
Fr	11,6 c	14,3 cd	11,3 b	12,7 bcd
Lc	15,4 ab	16,6 bc	8,8 c	11,7 d
Ml	17,2 a	18,5 ab	13,7 a	13,9 b
Ms	15,7 ab	19,0 ab	12,5 ab	18,7 a
Tr	16,5 a	21,4 a	11,7 ab	13,6 bc

Dans chaque colonne, les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (LSMEANS, $P \leq 0{,}05$). Les abréviations des traitements sont définies dans le texte.

Les valeurs des deux placettes de chaque parcelle élémentaire ont été moyennées puis analysées avec la procédure GLM du logiciel SAS/STAT (SAS Institute Inc., 1999). A chaque date de prélèvement, les valeurs moyennes de teneur en azote total des traitements expérimentaux ont été séparées par l'instruction LSMEANS de SAS/STAT.

Les résultats de la teneur en azote total des résidus de culture en fonction du traitement expérimental sont présentés dans le tableau III–4 ; comme les résidus de culture du traitement CT sont enfouis lors du labour, aucune donnée n'est rapportée pour ce traitement.

La teneur en azote total des résidus de culture diffère d'un traitement expérimental à l'autre selon l'absence ou la présence d'une plante de couverture et selon son espèce. Quelles que soient l'expérimentation et la date du prélèvement, les résidus de culture des traitements où la plante de couverture est une légumineuse (Lc, Ml, Ms et Tr) contiennent plus d'azote total que les résidus de culture du traitement NT, sans plante de couverture. Toutefois, dans l'expérimentation 3, les teneurs en azote total de Lc et NT ne sont pas significativement différentes à la fin du tallage du blé. Parmi les traitements avec une légumineuse comme plante de couverture, le traitement Lc est toujours celui dont la teneur en azote total est la plus faible ; ceci est particulièrement marqué pendant l'expérimentation 3.

En expérimentation 2, les résidus de culture des traitements avec une graminée comme plante de couverture (Fo et Fr) ne sont pas significativement plus riches en azote total que les résidus de culture du traitement NT. En revanche, ils le sont en expérimentation 3 ; ceci s'observe uniquement à la maturité physiologique du blé pour le traitement Fo.

L'association du blé avec une légumineuse permet d'augmenter la teneur en azote total des résidus de culture, avec des variations selon l'espèce de la légumineuse. Après la récolte d'une culture pure de blé et d'une culture pure de luzerne, Raiesi (2006) a mesuré la teneur en azote organique des résidus : en accord avec les résultats présentés ici, il montre que les résidus de culture de luzerne sont plus riches en azote organique que les résidus de culture de blé (17,5 g N kg^{-1} de matière sèche vs. 6,2 g N kg^{-1} de matière sèche). De même, Ranells & Wagger (1996) rapportent que l'association du riz (*Secale cereale* L.) avec une légumineuse, le trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum* L.) ou la vesce velue, augmente sensiblement la teneur en azote total des résidus de culture par rapport à la teneur en azote total des résidus de la culture pure de riz.

L'azote contenu dans les résidus de culture est une source minéralisable qui peut permettre d'accroître les fournitures du sol en cet élément. Toutefois, la teneur en azote total des résidus de culture n'est pas le seul moteur de leur minéralisation ; le rapport carbone/azote ou le contenu des résidus en polyphénol et en lignine influencent aussi la minéralisation (Aulakh *et al.*, 1991 ; Clement *et al.*, 1995). Or, ces caractéristiques sont favorables à la minéralisation de l'azote dans les résidus de légumineuses (Ranells & Wagger, 1996 ; Raiesi, 2006). D'ailleurs, la quantité de résidus de culture prélevés dans le traitement NT était toujours plus élevée que la quantité prélevée dans les autres traitements (résultats non montrés) ce qui indiquerait une décomposition plus lente des résidus de la culture pure de blé (Raiesi, 2006). A tous ces égards, les légumineuses semblent donc pouvoir approvisionner en azote les autres cultures, à un pas de temps supérieur à celui de notre étude, réduisant les apports d'engrais et participant ainsi à la durabilité des systèmes de culture (Crews & Peoples, 2004).

Chapitre IV – Structure et propriétés hydriques d'un sol en semis direct avec différentes plantes de couverture

Ce chapitre correspond à l'article soumis à *Soil Use and Management* et intitulé *Hydraulic conductivity and porosity of a loamy soil under various tillage and living cover crop management systems in northern France*. L'objectif de cet article est de mettre en évidence les effets de l'absence de travail du sol et de l'association culturale sur la morphologie de l'espace poral, la porosité fonctionnelle et la conductivité hydraulique du sol. Le dispositif expérimental présenté dans l'article est celui des chapitres précédents ; toutefois, les différentes mesures ont été effectuées uniquement pendant la campagne culturale 2004-2005, sur cinq des huit traitements (CT, NT, Fr, Lc et Ms) et sur une seule parcelle élémentaire par traitement. En fin de chapitre, l'article est complété par l'analyse des propriétés de rétention en eau du sol de ces différents traitements expérimentaux.

HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND POROSITY OF A LOAMY SOIL UNDER VARIOUS TILLAGE AND LIVING COVER CROP MANAGEMENT SYSTEMS IN NOTHERN FRANCE

Matthieu Carof[1,*], Stéphane de Tourdonnet[1], Yves Coquet[2], Vincent Hallaire[3] & Jean Roger-Estrade[1]

[1]Unité Mixte de Recherche Agronomie INRA/INA P-G, BP01, 78850 Thiverval-Grignon, France.

[2]Unité Mixte de Recherche Environnement et Grandes Cultures INRA/INA P-G, BP01, 78850 Thiverval-Grignon, France.

[3]Unité Mixte de Recherche Sol–Agronomie–Spatialisation INRA/AgroCampus Rennes, 65 rue de Saint-Brieuc, 35042 Rennes cedex, France.

[*]Corresponding author. Tel.: +33 1 30815906; fax: +33 1 30815425. E-mail address: mcarof@grignon.inra.fr

Short title: *K* and porosity under various management systems

Abstract: We studied hydraulic conductivity (*K*) and porosity for five combinations of soil tillage and living cover crop management systems. Treatments were a winter wheat (*Triticum aestivum* L.) crop grown (i) alone on a conventional-till soil (CT), (ii) alone on a no-till soil (NT), and (iii) on a no-till soil with three different living cover crops: red fescue (*Festuca rubra* L.; Fr), bird's-foot-trefoil (*Lotus corniculatus* L.; Lc), and alfalfa (*Medicago sativa* L.; Ms). Investigations were carried out on a loamy soil in Grignon, France, in November 2004, May 2005, and October 2005. *K* and mean size of hydraulically active pores were measured *in situ* at three water potentials (–0.6 kPa, –0.2 kPa, and –0.05 kPa) in the upper soil layer as well as in the underlying one (except in November 2004). In November 2004 and May 2005, pore space was described using 2D image analysis of pores on undisturbed soil samples. Major variation was due to soil tillage that (i) created two heterogeneous soil layers, and (ii) increased *K* in the upper soil layer for CT when compared to NT. Effects of living cover crop on *K* and porosity were not different from one species to another but we measured some changes in porosity compared to NT (larger functional pores, more tubules), probably due to root activity. Although these changes generally did not result in *K* improvement, they participated in the maintenance of soil structure and *K* over time. We assumed that *K* may be improved in the long-term use of living cover crops.

Keywords: no-tillage, winter wheat, leguminous and grass cover crops, hydraulic conductivity, functional porosity, pore space description

1. Introduction

As hydraulic conductivity (*K*) controls water and solute transport, its assessment at the field scale is essential to evaluate agronomical and environmental performances of no-till management systems.

One of the main functions of no-tillage is the improvement of the topsoil structure thanks to the concentration of decomposing crop residues near the soil surface (Ball *et al.*, 1996). If structural stability is often improved, several studies undertaken under various soil and climatic conditions (*e.g.* Hammel, 1989 ; Grant & Lafond, 1993 ; Ball *et al.*, 1997 ; Fabrizzi *et al.*, 2005) have reported that no-tillage leads to a decrease in structural porosity in the upper part of the soil.

At the same time, no-till management systems have a highly variable influence on *K*. Compared to conventional-tillage, no-tillage can result in greater (Arshad *et al.*, 1999), equivalent (Blanco-Canqui *et al.*, 2004 ; Fuentes *et al.*, 2004) or lower (Lampurlanés & Cantero-Martínez, 2006) infiltration rates. On the one hand, tillage increases soil macroporosity, that temporally enhances *K* (Lin *et al.*, 1999 ; Coquet *et al.*, 2005), while it destroys biological macropores created during the preceding crop cycle (Shipitalo & Protz, 1987). On the other hand, in no-tillage, compaction of the untilled layer may be counterbalanced by the increase in biological macroporosity (Rasmussen, 1999). During the transition period from conventional-tillage (with mouldboard ploughing) to no-tillage, Kay & VandenBygaart (2002) observed that volume of pores in the size range [0.03 mm; 0.1 mm] accounted for much of the loss of total porosity whereas volume of pores in the size range [0.1 mm; 0.5 mm] increased.

In a recent review of the technical solutions to prevent soil compaction, Hamza & Anderson (2005) outlined that only a combination of cultural practices could mitigate the problem of compaction. For example, they suggested (i) to increase soil organic matter which may stabilise soil aggregates, and (ii) to insert in crop rotations plants with strong tap roots which can break down compacted soils. Thus, one innovative solution is the association of no-tillage with the use of a living cover crop (or living mulch). Living cover crop is a plant species (annual or perennial) that is grown on a given field at the same time as the cash crop and that remains on the field even during the off-growing season (Teasdale, 2003). In addition to its effect on the soil physical characteristics, the living cover crop is also expected to take up excess soil nutrients, improve weed and pest control, and increase biological diversity.

The purpose of this study was to assess the effects of the association of no-tillage with the use of a living cover crop on *K* and porosity of a loamy soil in northern France. We measured the spatial and temporal variations of *K* and porosity in soil plots conducted under conventional-tillage or under no-tillage without any living cover crop or under no-tillage with a living cover crop. As we hypothesised that *K* and porosity variations between treatments depended on the cover crop species, three no-till treatments with a living cover crop were studied. *K* was measured *in situ*, at three soil water potentials, using a disc-infiltrometer. Functional porosity, *i.e.* mean size of hydraulically active pores, was determined thanks to *K* measurements. Pore morphology was characterised using image analysis of undisturbed soil cores.

Table IV–1: Morphological classification of pores according to their size and shape.

	Size class (mm^2)		
	1; small	2; medium	3; large
Shape class	[0.003; 0.196[	[0.196; 1.767[	≥ 1.767
Tubule $I_s < 5$; T	T1	T2	T3
Crack $5 \leq I_s < 20$; C	C1	C2	C3
Packing void $I_s \geq 20$; P	P1	P2	P3

2. Materials and Methods

2.1. Site description

Our measurements took place during the 2004-2005 growing season in a field trial conducted from March 2002 to October 2005 at the experimental station of the National Institute for Agronomic Research, Grignon, France (48.9°N, 1.9°E, 130 m elevation) on an Orthic Luvisol (FAO-UNESCO, 1974), containing on average 250 g kg^{-1} clay, 500 g kg^{-1} silt, and 250 g kg^{-1} sand in the topsoil. The whole area was ploughed one last time in November 2001 and prior to this date, the site had been conventionally cultivated for several years with annual ploughing.

2.2. Experimental design

The experiment compared five combinations of soil tillage and living cover crop management systems of a winter wheat (*Triticum aestivum* L., Isengrain cultivar) crop, sown with a no-till drill (Semeato S/A, Brazil) on October 18, 2004 at a rate of 270 seeds m^{-2}. Conventional-till management system (treatment CT) entailed an autumnal mouldboard ploughing (October 18, 2004) to a 25-cm depth, followed by two rotary harrowings to a 10-cm depth for final seedbed preparation (October 18, 2004). The four other management systems consisted of a no-till treatment without a living cover crop (NT), a no-till treatment with red fescue (*Festuca rubra* L.) as a living cover crop (Fr), a no-till treatment with bird's-foot-trefoil (*Lotus corniculatus* L.) as a living cover crop (Lc), and a no-till treatment with alfalfa (*Medicago sativa* L.) as a living cover crop (Ms). The three cover crop species were broadcasted on March 28, 2002.

This experiment was designed to study (i) the effect of soil tillage comparing CT to NT, and (ii) the effect of living cover crop comparing the no-till treatments with a living cover crop to NT. The choice of the living cover crop species was determined according to root system architecture since we assumed that the possible effect of the fibrous-root system of the grass cover crop (Fr) on *K* and porosity would differ from effect of the tap-root system of the leguminous cover crops (Lc and Ms).

2.3. Measurements and calculation of *K*

K (m s^{-1}) was measured in November 2004 (*i.e.* one month after the ploughing for CT), May 2005 (*i.e.* during wheat stem elongation), and October 2005 (*i.e.* four months after wheat harvest), using a disc-infiltrometer with an 8-cm diameter base.

In November 2004, steady-state infiltration rate (m s^{-1}) was not determined for Ms. At this date, measurements were carried out at the soil surface to characterise water movement in the upper soil layer (*i.e.* the seedbed for CT). In May 2005 and October 2005, measurements were carried out at the soil surface and at 10-cm depth to characterise water movement in the upper soil layer as well as in the underlying soil layer (*i.e.* the ploughed layer for CT). Whatever the depth, infiltration measurements were replicated six times per plot in a 0.45-m^2 area between the tracks left by the tractor pulling the drill, in order to avoid recently compacted zones. The infiltrometer

disc was placed on an excavated soil surface covered with a thin layer of fine well-sorted Fontainebleau sand (Coquet *et al.*, 2005) to obtain a flat surface. Infiltration rate was measured at three water potentials (–0.6 kPa, –0.2 kPa, and –0.05 kPa) in ascending order and at the same place.

The multipotential technique of Reynolds and Elrick (1991) was used to derive the relationship between *K* and the water potential from infiltration measurements assuming Wooding's solution for steady-state axisymmetrical infiltration (Wooding, 1968). Hypotheses for application of Wooding's equation as well as calculation of *K* at each potential are described in Coutadeur *et al.* (2002).

2.4. Calculation of mean effective pore size radius

According to Philip (1969), we calculated the mean effective pore size radius (λ_m in m) for each potential range *i.e.* the mean pore size characterising the soil porosity that is hydraulically active from one potential to another:

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{\rho_w g} \alpha \qquad (1)$$

where σ is the surface tension of water in g s^{-2}, ρ_w is the water density in g m^{-3}, g is the acceleration due to gravity in m s^{-2}, α is the slope of the ln*K* vs. water potential relationship in m^{-1} (Gardner, 1958).

2.5. Image analysis of pore space

Pore space description was carried out in November 2004 and May 2005 using two layered soil cores 10-cm long × 12-cm in diameter per plot. Soil cores were sampled vertically beneath two random locations of infiltration measurements. Undisturbed soil samples were dried and impregnated with a polyester resin containing fluorescent dye (Ringrose-Voase, 1996). Then, they were cut in one vertical polished section per sample. Whatever the section, six grey-level images were taken at a spatial resolution of 50 µm pixel^{-1}, with a CCD camera under UV light which renders the solid phase dark and the porosity bright. Coarse fragments which appeared bright under UV light were masked by taking another grey-level image under white light. Each grey-level UV image was then segmented into a binary image.

The following calculations were performed for each section after totalling the different images. Specific surface porosity was the ratio of pore area (*a* in mm^2) to binary image area. Individual pores were classified according to their size and shape (Hallaire & Curmi, 1994). Pore size was measured using *a*. Three size classes were determined, based on the equivalent pore radius (r_{eq} in mm) at the water potentials used for infiltration measurements. Pore shape was measured using the shape index I_s:

$$I_s = \frac{perimeter^2}{4 \pi a} \qquad (2)$$

where *perimeter* is the perimeter of a pore on a binary image in mm.

Morphological classification of pores resulted in nine size and shape classes (Table IV–1). Total porosity was the sum of specific surface porosity of each pore.

2.6. Statistical analysis

Data were analysed using the GLM procedure of the SAS/STAT software (SAS Institute Inc., 1999). The GLM procedure was carried out for K at each potential, for λ_m at each potential range, for specific surface porosity in each morphological class, and for total porosity. Measurement period, depth, treatment as well as interactions between these three factors were designated as fixed effects. As residues of K data were log-normally distributed, we used log-transformed data ($\log_{10}K$) for statistical analysis.

Means of each variable were separated by p-values ($P \leq 0.05$) using the least-squares mean (LSMEANS) statement of the SAS/STAT software.

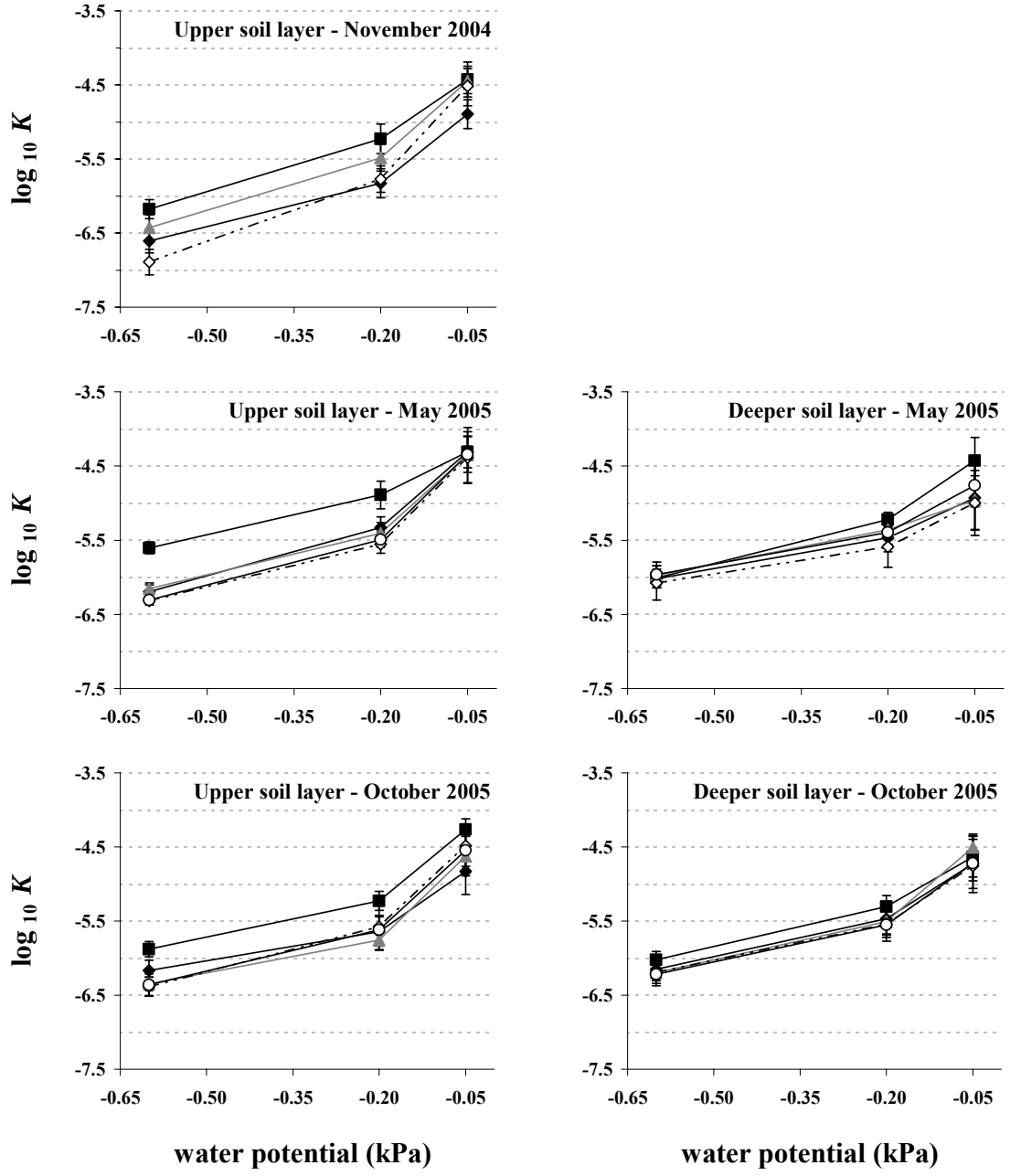


Figure IV–1: Mean values of $\log_{10}K$ for CT (■), NT (◆), Fr (▲), Lc (◇), and Ms (○) in the upper soil layer in November 2004, May 2005, and October 2005 as well as in the deeper soil layer in May 2005 and October 2005. Vertical bars are standard deviations of means. Treatment labels are defined in the text.

3. Results

3.1. Hydraulic conductivity

Changes over time in the relationship between *K* and water potential for the five treatments in the upper soil layer as well as in the deeper one are illustrated in Figure IV–1.

3.1.1. CT vs. NT

Whatever the date, the absence of tillage and living cover crop greatly modified *K* but differently according to depth and potential. In the upper soil layer, *K* was always significantly higher for CT than for NT at all potentials ($P \leq 0.05$), except for *K* at –0.05 kPa in May 2005. In the underlying soil layer, *K* was significantly higher for CT than for NT at –0.2 kPa and –0.05 kPa in May 2005 ($P \leq 0.05$).

Variation of *K* between the upper soil layer and the underlying one depended on the treatment and the date. For CT, in May 2005, *K* was higher in the seedbed at –0.6 kPa and –0.2 kPa ($P \leq 0.05$). We also noticed that *K* at –0.05 kPa in October 2005 was significantly higher in the seedbed ($P \leq 0.05$). For NT, no major differences were found across depths, except in May 2005 for *K* at –0.05 kPa which was higher in the upper soil layer ($P \leq 0.05$).

Whatever the treatment, temporal variation of *K* was important in the upper soil layer, with the exception of *K* at –0.05 kPa for CT. *K* increased from November 2004 to May 2005 whereas it decreased from this date to October 2005.

3.1.2. No-till/living cover crop treatments vs. NT

The association of no-tillage with the use of a living cover crop little affected *K* in comparison with NT, and only in the upper soil layer. In November 2004, *K* for Fr was significantly higher than *K* for NT ($P \leq 0.05$) whatever the potential. *K* for Lc was significantly the lowest at –0.6 kPa ($P \leq 0.05$), similar to NT at –0.2 kPa, and similar to Fr at –0.05 kPa. In October 2005, *K* for the no-till/living cover crop treatments was only significantly reduced at –0.6 kPa when compared to NT ($P \leq 0.05$).

In May 2005, *K* was contrasted from depth to depth whatever the no-till/living cover crop treatment: it significantly increased from the upper soil layer to the underlying one at –0.6 kPa whereas it significantly decreased at –0.05 kPa ($P \leq 0.05$). This decrease was particularly high for Fr and Lc. In October 2005, variation of *K* between depths was not important.

In the upper soil layer, change over time in *K* for the no-till/living cover crop treatments was less important than that for NT. Nevertheless, *K* for Lc was highly variable from November 2004 to May 2005 at –0.6 kPa ($P \leq 0.05$). In the deeper soil layer, temporal variation of *K* was low, with the exception of *K* for Fr at –0.05 kPa ($P \leq 0.05$).

Table IV–2: Mean values of λ_m (mm) measured at two depths and three dates for the five treatments.

Depth: soil surface				
		Date		
Potential range (kPa)	Treatment	November 2005	May 2005	October 2005
from –0.6 to –0.2	CT	0.38 a	0.27 a	0.22 ab
	NT	0.29 b	0.33 a	0.14 c
	Fr	0.37 a	0.27 a	0.18 bc
	Lc	0.45 a	0.28 a	0.30 a
	Ms	–	0.31 a	0.27 a
from –0.2 to –0.05	CT	0.86 b	0.59 b	0.99 ab
	NT	0.97 b	1.08 a	0.78 b
	Fr	1.10 ab	1.10 a	1.15 a
	Lc	1.37 a	1.23 a	1.15 a
	Ms	–	1.22 a	1.12 a
Depth: 10-cm depth				
		Date		
Potential range (kPa)	Treatment	November 2005	May 2005	October 2005
from –0.6 to –0.2	CT	–	0.30 a	0.27 a
	NT	–	0.23 ab	0.25 a
	Fr	–	0.25 ab	0.25 a
	Lc	–	0.14 c	0.23 a
	Ms	–	0.18 bc	0.24 a
from –0.2 to –0.05	CT	–	0.83 a	0.69 b
	NT	–	0.53 bc	0.77 ab
	Fr	–	0.45 c	1.03 a
	Lc	–	0.54 bc	0.79 ab
	Ms	–	0.61 ab	0.85 ab

Within a depth, a potential range, and a measurement period, treatments followed by the same letter are not significantly different ($P \leq 0.05$). Treatment labels are defined in the text.

3.2. Functional porosity

Table IV–2 presents λ_m data for two potential ranges, [–0.6 kPa; –0.2 kPa] (*i.e.* 0.25 mm ≤ r_{eq} ≤ 0.75 mm) and [–0.2 kPa; –0.05 kPa] (*i.e.* 0.75 mm ≤ r_{eq} ≤ 3 mm), for the five treatments, in the upper soil layer and the underlying one.

3.2.1. CT vs. NT

In the upper soil layer, functional porosity was affected by tillage system, especially the pores with r_{eq} lower than 0.75 mm. In the deeper soil layer, the absence of tillage and living cover crop rarely modified λ_m between CT and NT, except in May 2005 from –0.2 kPa to –0.05 kPa.

From the upper soil layer to the deeper one, whatever the date, λ_m for CT increased at all potential ranges, except in October 2005 between –0.2 kPa to –0.05 kPa. Conversely, in May 2005, λ_m for NT significantly decreased at all potential ranges ($P \leq 0.05$).

In the upper soil layer, contrary to the deeper one, changes in λ_m over time differed according to potential range and tillage system. Between –0.6 kPa and –0.2 kPa, λ_m for CT decreased from date to date: this was significant from November 2004 to May 2005 ($P \leq 0.05$). Between –0.2 kPa and –0.05 kPa, λ_m for CT decreased from the first measurement period to the second one and then, it significantly increased to reach its initial value ($P \leq 0.05$). Whatever the potential range, λ_m for NT significantly decreased from May 2005 to October 2005 ($P \leq 0.05$).

3.2.2. No-till/living cover crop treatments vs. NT

λ_m was affected by the presence of a living cover crop, differently according to depth and date. In the upper soil layer, in November 2004 as in October 2005, λ_m for the no-till/living cover crop treatments was higher than λ_m for NT, whatever the potential range. In the deeper soil layer, whatever the date, λ_m was unaffected by the presence of a living cover crop at all potential ranges (with the exception of Lc, from –0.6 kPa to –0.2 kPa, in May 2005).

Whatever the measurement period, λ_m for the no-till/living cover crop treatments decreased from the upper soil layer to the underlying one in the potential range [–0.2 kPa; –0.05 kPa]. This was significant for all the treatments in May 2005 and for Lc in October 2005 ($P \leq 0.05$).

3.3. Pore space description

Distribution of pores according to their size and shape is reported in Figure IV–2 (November 2004) and Figure IV–3 (May 2005). These figures provide information about variations of total porosity and pore morphology between treatments, depths, and dates[1].

[1] Des images binaires, prises sur les blocs de sol non remanié, illustrant les porosités caractéristiques de certains traitements expérimentaux, ont été rajoutées dans ce document, en annexe 4.

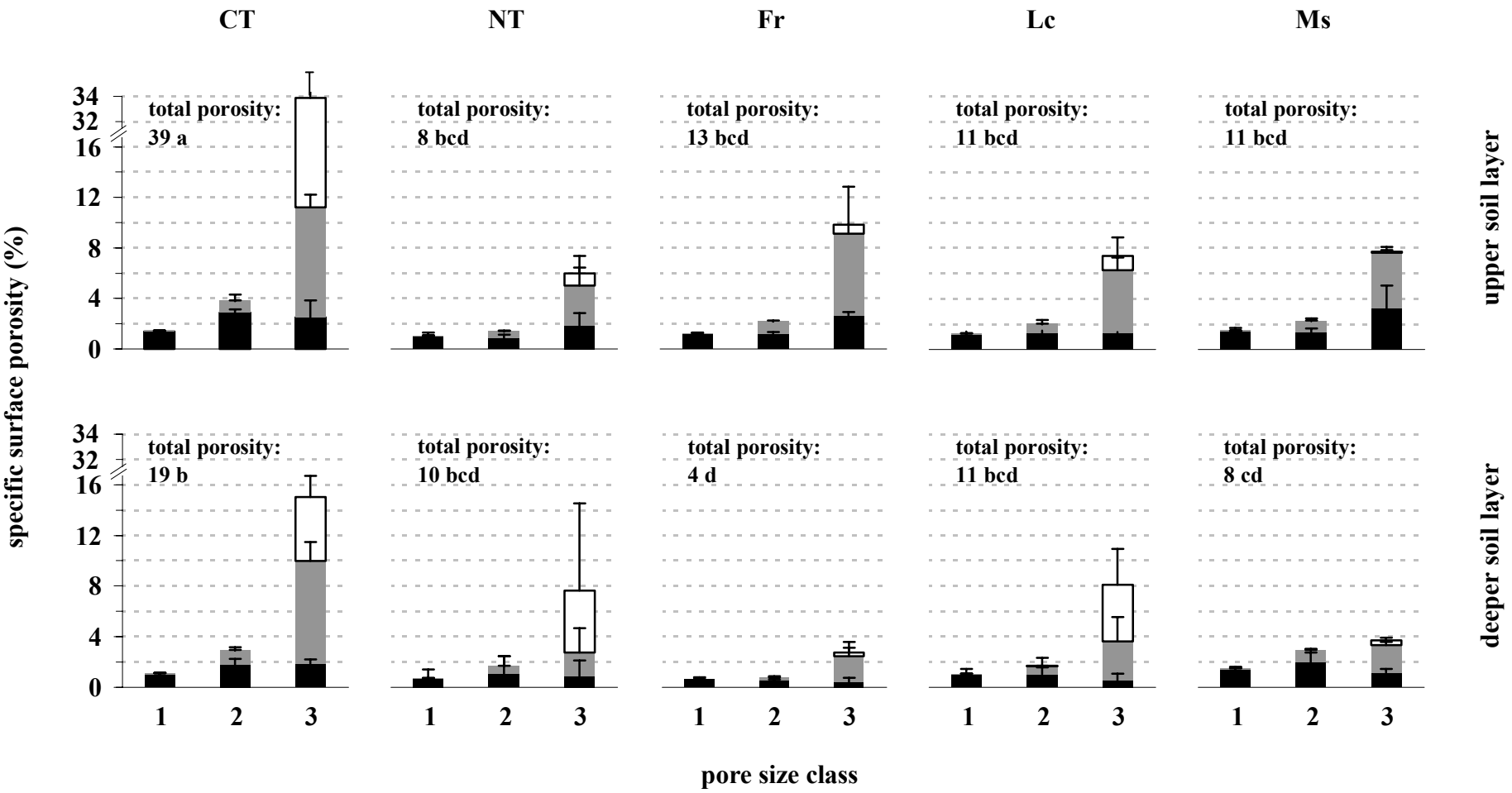


Figure IV–2: Mean values of specific surface porosity of each size (1, small; 2, medium; 3, large) and shape (■: tubule, T; ■: crack, C; □: packing void, P) class for five treatments in the upper soil layer as well as in the deeper soil layer, in November 2004. Total porosity values followed by the same letter are not significantly different ($P \leq 0.05$). Vertical bars are standard deviations of means. Treatment labels are defined in the text.

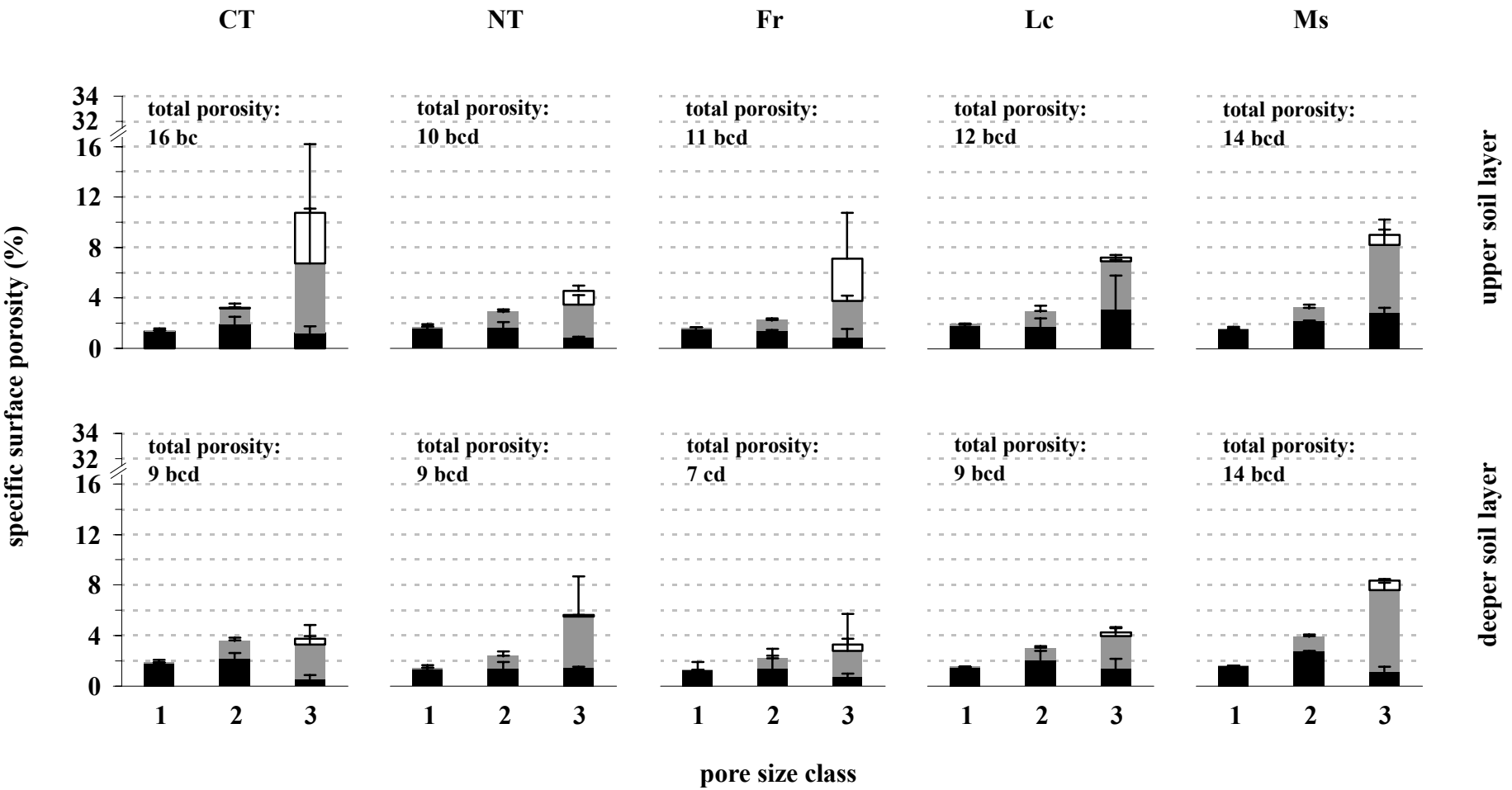


Figure IV–3: Mean values of specific surface porosity of each size (1, small; 2, medium; 3, large) and shape (■: tubule, T; ■: crack, C; □: packing void, P) class for five treatments in the upper soil layer as well as in the deeper soil layer, in May 2005. Total porosity values followed by the same letter are not significantly different ($P \leq 0.05$). Vertical bars are standard deviations of means. Treatment labels are defined in the text.

3.3.1. CT vs. NT

In the upper soil layer, total porosity was always higher for CT than for NT, although it was only significant in November 2004. At this date, pore morphological classification greatly differed between treatments: the amount of medium tubules (T2) as well as the amount of large cracks and packing voids (C3, P3) were significantly higher in CT ($P \leq 0.05$). In the deeper soil layer, in November 2004, variation of total porosity between CT and NT was low when compared to variation measured in the upper soil layer. In May 2005, no variation was measured.

Only CT presented differences in total porosity from depth to depth. In November 2004, total porosity for CT significantly decreased from one soil layer to another: this decrease was mainly due to large packing voids (P3) which were significantly less numerous in the deeper soil layer ($P \leq 0.05$). In May 2005, differences between soil layers were low.

From November 2004 to May 2005, whatever the soil layer, total porosity for CT decreased although it was only significant in the seedbed. In the upper soil layer, this decrease resulted from a significant reduction of large packing voids (P3) whereas in the underlying soil layer, it resulted from a significant reduction of large cracks (C3) ($P \leq 0.05$) as well as a reduction of large packing voids (P3). Whatever the soil layer, total porosity for NT did not vary significantly from date to date.

3.3.2. No-till/living cover crop treatments vs. NT

Compared to NT, total porosity and pore morphological classification little changed when a living cover crop was grown on a no-till soil. However, in the upper soil layer, total porosity for the no-till/living cover crop treatments was consistently higher than that for NT. These differences, not significant, were mainly due to the higher amount of cracks and tubules for the no-till/living cover crop treatments, especially for Lc and Ms in May 2005.

Variations of total porosity and pore morphological classification from depth to depth were not important for Lc and Ms. On the other hand, in November 2004, the amount of medium and large cracks (C2, C3) as well as the amount of tubules (T) for Fr decreased from the upper soil layer to the underlying one. This was significant for the large cracks ($P \leq 0.05$).

Whatever the soil layer, total porosity for the no-till/living cover crop treatments was rather persistent over time.

4. Discussion

Under environmental conditions of our experiment, K and porosity varied according to date, depth, and crop management system. These sources of variation have been reported by other authors *e.g.* Kribaa *et al.* (2001), Coutadeur *et al.* (2002), and Coquet *et al.* (2005). Changes in K and porosity over time between depths and crop management systems may be explained by changes in soil structural processes. This is the unifying theme of the present discussion.

We observed that K, functional porosity, and pore space changed from the upper soil layer to the underlying one, differently according to treatment. For CT, the two soil layers created by

tillage, *i.e.* the seedbed and the ploughed layer, exhibited contrasted K, λ_m, and amount of large packing voids. These differences decreased in the course of time. Comparing the seedbed to the ploughed layer, the harrow temporally enhanced K while it reduced the size of functional pores. As a consequence, we assumed that the decrease in K from the seedbed to the ploughed layer, despite the increase in λ_m in the ploughed layer, resulted from pore discontinuity created during the ploughing. This is in agreement with Logsdon *et al.* (1993). Comparing CT to NT, our results highlighted that the absence of tillage and living cover crop reduced differences between the upper soil layer and the underlying one. However, higher values of K and λ_m in May 2005 in the upper soil layer of NT mean to suggest that the various processes which created soil structure, *i.e.* climatic and/or biological activities, mainly occurred in the first soil layer (Roger-Estrade *et al.*, 2004). The no-till/living cover crop treatments presented two contrasted soil layers. Size of functional pores, especially the macropore ones (r_{eq} > 0.5 mm: Luxmoore, 1981), was higher in the upper soil layer than in the underlying one. As a consequence, K at –0.05 kPa was much higher in the upper soil layer than in the other one. This suggests that soil structural process associated with the living cover crop, *i.e.* root activity, mainly occurred in the upper soil layer: Gregory (2006) reported that plants had 30 % of their root mass in the upper 10 cm of soil, on the average. In addition, in November 2004, more numerous cracks in the upper soil layer for Fr indorse the idea that the wetting-drying cycles due to root activity were concentrated in this layer.

In our study, soil conditions were less favourable to water movement in NT than in CT, especially in the upper soil layer. This is in agreement with Lampurlanés & Cantero-Martínez (2006) and Sasal *et al.* (2006). Poorer soil conditions for NT compared to CT had various origins. First, our results indicated that contrary to NT, the plough and most of all, the harrow produced a well-developed structural porosity with a great amount of large cracks and packing voids and with larger functional pores in the potential range [–0.6 kPa; –0.2 kPa] resulting in higher K. This structure, observed by Hallaire & Curmi (1994) as well as Kribaa *et al.* (2001), resulted from mechanical loosening due to clod fragmentation during ploughing and especially, secondary tillage (Kooistra & Boersma, 1994). Secondly, structure became denser in the absence of tillage and living cover crop (CT vs. NT), without well-defined structural elements, as observed by Lampurlanés & Cantero-Martínez (2003). Contrary to our results, some studies showed higher K for NT compared to CT but in these situations, K was determined at least four years after the last soil tillage (Suwardji & Eberbach, 1998 ; Bhattacharyya *et al.*, 2006). In our experiment, NT was in the transition period: soil structural improvement in this treatment may require more years, particularly because the amount of organic matter would increase in the topsoil from year to year (McCarty *et al.*, 1998) that would lead to improvement of the soil structural processes in NT *i.e.* earthworm activity and soil aggregate stability (Pérès *et al.*, 1998 ; Wright *et al.*, 1999).

In opposition to the no-till/living cover crop treatments, K was strongly time-dependent in the upper soil layer of CT and NT. Two assumptions may explain increase in K from November 2004 to May 2005: an increase in the pore amount and/or an increase in their connectivity. Our results showed that neither total porosity nor size of functional pores increased from date to date. This suggests that more pores became connected and participated in the water transport. Pore connectivity may be improved during winter through the agency of swelling and shrinkage processes since soil of this study (250 g kg^{-1} clay) was sensitive to its phenomenon (Vogel *et al.*,

2005). Decrease in K from May 2005 to October 2005 was mainly due to decrease in λ_m that may result from (i) the filling of earthworm channels to protect themselves against summer drought (Sims & Gerard, 1999), and (ii) the hardsetting of the upper soil layer through the rainfall impact.

Obi (1999) reported that living cover crops enhanced saturated hydraulic conductivity compared to bare soil. He noticed that this effect depended on the living cover crop species. Compared to NT, our study did not totally corroborate Obi's results since living cover crops, no matter what species, enhanced K only at one of the three dates, in the upper soil layer. On the other hand, in this soil layer, living cover crops increased λ_m at two of the three dates, especially for the leguminous treatments. Furthermore, although total porosity did not vary between the no-till/living cover crop treatments and NT, we measured a light increase in the amount of cracks and tubules for all the no-till/living cover crop treatments when compared to NT. It is well-known that root activity may increase the amount and size of pores in the soil adjacent to the root (*i.e.* the rhizosphere). Using image analysis of soil thin sections, Whalley *et al.* (2005) observed an increase in the amount of large pores in the rhizosphere due to root growth, microbial activity, and the repeated wetting and drying of soil at the root-soil interface (Gregory, 2006). As the increase in λ_m for the no-till/living cover crop treatments was not related to an increase in K (except in November 2004), we concluded that larger functional pores created by the roots did not enhance water movement compared to NT. Nevertheless, K and λ_m for the no-till/living cover crop treatments were constant from date to date contrary to NT: living cover crops stabilised soil structure (large functional pores) over time, even during the off-growing season. Lal *et al.* (1991) as well as Hermawan & Bomke (1997) also reported that growing cover crops after cash crop harvest maintained topsoil structure thanks to improvement of aggregate stability and soil surface protection against heavy rainfall impact. Thus, although the stabilisation of soil structure did not greatly enhance K, it prevented K from decreasing in the seedbed in November 2004, contrary to NT. Furthermore, we assumed that K may improve in the long-term use of living cover crops: the amount of cracks and tubules, that increased from November 2004 to May 2005, should continue to increase in the course of time.

Acknowledgements: We would like to thank G. Grandeau for his technical assistance with the field trial. We are grateful to Y. Bénard, D. Le Floch, and R. Gosse for their help with the measurements.

5. Résultat complémentaire : la rétention de l'eau

Au cours de cette thèse, l'étude des propriétés hydriques d'un sol en semis direct avec une plante de couverture a été réalisée pour caractériser les mouvements de l'eau, ce que je viens de décrire. Les propriétés hydriques ont aussi été abordées pour le stockage de l'eau à travers des mesures de rétention à différents potentiels. Ces mesures ont été effectuées en Novembre 2005, dans l'horizon 0–2,5 cm, pour les traitements CT, NT, Fr, Lc et Ms selon le protocole ci-dessous.

Pour chaque traitement, 15 échantillons de sol non remanié ont été prélevés sur une parcelle élémentaire en utilisant des cylindres de volume 49,1 cm^3. La teneur en eau massique ($g\ g^{-1}$) à –10 kPa, –1 kPa et –0,6 kPa a été déterminée à l'aide de dispositifs pneumatiques. Les cylindres ont été disposés sur une pâte de kaolinite afin d'établir une continuité satisfaisante entre l'eau des échantillons de sol et la membrane ou la plaque poreuse du dispositif (Bruand *et al.*, 1996). Cette pâte permet l'humectation des échantillons par capillarité jusqu'à l'atteinte d'un équilibre avant d'appliquer la pression de mesure ; les échantillons sont considérés à l'équilibre lorsque leur potentiel hydrique est de –0,1 kPa. La teneur en eau massique est exprimée par rapport à la matière sèche des échantillons de sol après passage à l'étuve à 105°C pendant une journée. A chaque potentiel, cinq cylindres ont été utilisés pour mesurer la teneur en eau massique. Ces valeurs ont ensuite été moyennées, analysées avec la procédure GLM du logiciel SAS/STAT (SAS Institute Inc., 1999) et enfin, séparées par l'instruction LSMEANS de SAS/STAT.

Les résultats de la teneur en eau massique des cinq traitements en fonction du potentiel hydrique sont présentés sur la figure IV–4. Quel que soit le potentiel, le sol en semis direct sans plante de couverture (NT) retient plus d'eau que le sol travaillé (CT). Cependant, la différence entre ces traitements est significative uniquement à –1 kPa ($P \leq 0,05$). Les traitements Fr et Lc retiennent autant d'eau, voire plus, que le traitement NT. Toutefois, la valeur de teneur en eau massique mesurée à –1 kPa pour le traitement Lc paraît être erronée puisque cette valeur est particulièrement élevée et supérieure à celle mesurée à –0,6 kPa. Le traitement Ms se distingue des autres traitements avec plante de couverture ; alors que la teneur en eau massique des traitements Fr et Lc diffère significativement de celle du traitement CT à –10 kPa et –1 kPa ($P \leq 0,05$), la teneur en eau massique du traitement Ms n'est jamais différente de celle du traitement CT, quel que soit le potentiel.

A l'exception du traitement Ms, les propriétés de rétention en eau sont affectées par le travail du sol : plus de trois ans après l'abandon du labour, un sol en semis direct retient plus d'eau qu'un sol labouré (et repris par deux passages de herse rotative). Ces résultats sont en accord avec ceux d'autres auteurs (Hill *et al.*, 1985 ; Xu & Mermoud, 2001 ; Bescansa *et al.*, 2006). Les résultats de cette thèse permettent, en plus, d'identifier les effets de couverts végétaux vivants sur les propriétés de rétention en eau : la présence de la fétuque rouge ou du lotier accentue légèrement les effets du non travail du sol, particulièrement à –10 kPa et –1 kPa.

Pour les potentiels hydriques inférieurs à –31,6 kPa, la rétention de l'eau dans le sol est essentiellement influencée par la texture et la teneur en matières organiques (Stengel, 1979). En revanche, aux potentiels faiblement négatifs, les différences de teneurs en eau massique entre traitements peuvent être reliées à des différences de structure du sol. Ainsi, une rétention de l'eau élevée dans un sol en semis direct s'explique souvent par des micro- et mésoporosités plus importantes que celles d'un sol labouré (Hill *et al.*, 1985 ; Bescansa *et al.*, 2006). Nous ajoutons que les différences de propriétés de rétention en eau entre les traitements NT, Fr, Lc et Ms peuvent être liées à la présence d'un couvert végétal vivant et le cas échéant, à son système racinaire. Ainsi, nous supposons que les racines de la fétuque rouge comme celles du lotier créeraient plus de micro- et mésopores que les racines de la luzerne. Pour confirmer cela, il serait intéressant de caractériser la microstructure dans ces traitements en observant au microscope

électronique des lames minces de sol non remanié. De cette manière, Balbino *et al.* (2004) démontrent qu'un sol avec une végétation native retient plus d'eau qu'un sol avec une prairie extensive car la microstructure du sol non agricole est plus développée avec peu de microagrégats en assemblage compact.

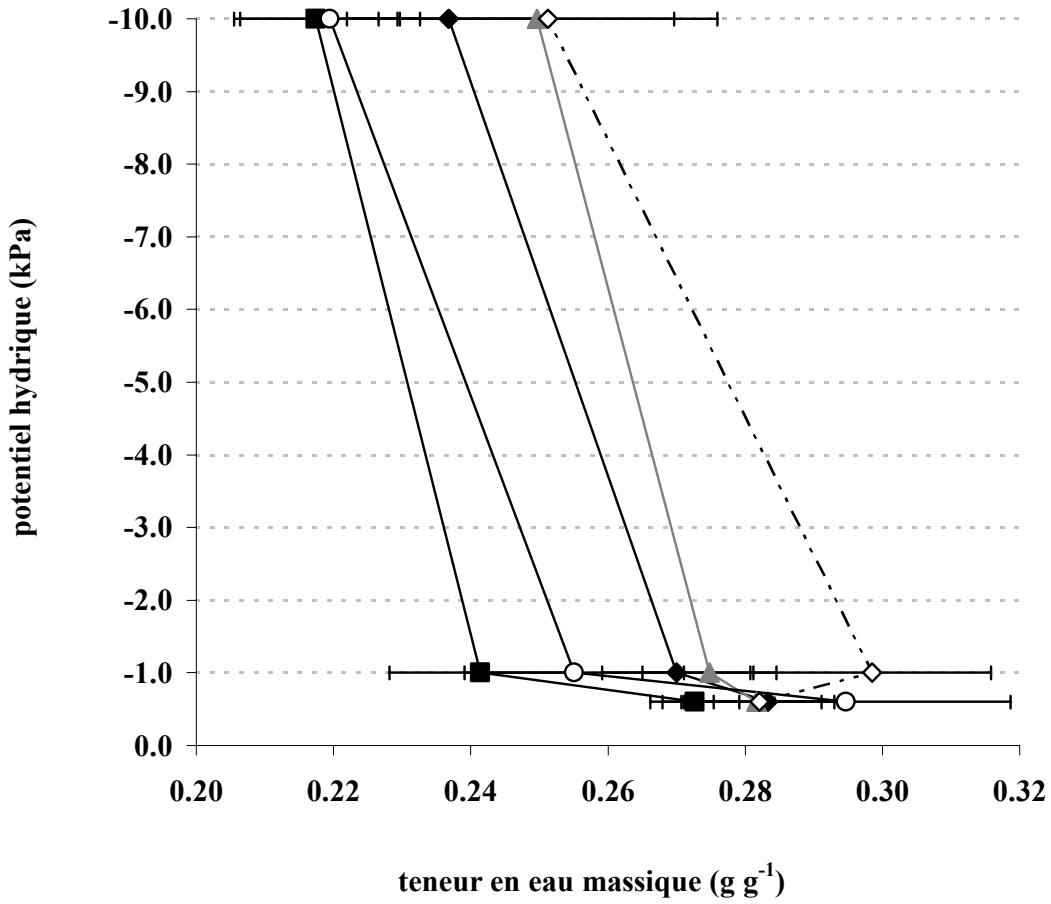


Figure IV–4 : Teneurs en eau massiques moyennes en fonction du potentiel hydrique, dans l'horizon 0–2,5 cm pour les traitements CT (■), NT (◆), Fr (▲), Lc (◇) et Ms (○). Les barres verticales sont les écart-types des moyennes. Les abréviations des traitements sont définies dans le texte.

Discussion générale et perspectives

Les travaux expérimentaux menés pour cette thèse ont enrichi les connaissances scientifiques et techniques sur le fonctionnement, en climat tempéré et sur un sol non travaillé, de peuplements associant une culture de vente à différentes plantes de couverture. Ils sont une première étape dans la conception et l'évaluation des SCV avec cultures associées en climat tempéré. Plus particulièrement, ces travaux ont permis de mieux comprendre l'intensité et la dynamique des relations qui s'établissent entre des cultures associées conduites sur un sol en semis direct ; ils ont aussi permis d'étudier sur ce sol, l'évolution de la structure et des propriétés hydriques.

Dans cette discussion générale, je synthétise d'abord les apports de la thèse sur le fonctionnement d'un agrosystème en SCV avec cultures associées, en climat tempéré, en confrontant les données expérimentales aux hypothèses énoncées dans la problématique (Chapitre I). Après avoir situé la thèse dans le cadre de la recherche agronomique sur la conception et l'évaluation des systèmes de culture, je discute des méthodes mises en œuvre dans ce travail, leurs intérêts et leurs limites, ce qui permet de détailler le domaine de validité des résultats. J'aborde enfin les conséquences possibles de ces travaux sur les pratiques agricoles. De nouveaux axes de recherche émergeront ponctuellement de cette discussion générale.

Les résultats issus du dispositif expérimental de Grignon permettent de valider les hypothèses 1 et 2. La première hypothèse reposait sur le postulat selon lequel des espèces présentes sur une même parcelle, en même temps, interagissent par l'intermédiaire de l'environnement, particulièrement en établissant des relations de compétition pour les ressources du milieu. A partir de ce postulat, nous supposions que dans un SCV avec cultures associées, l'intensité des relations de compétition dépend de l'espèce cultivée en couverture. L'hypothèse suivante stipulait que ces relations de compétition modifient l'élaboration du rendement de la culture de vente à des périodes différentes selon l'espèce de couverture. Sans ambiguïté, ce travail confirme ce postulat et valide ces hypothèses ; le tableau II–4 (p. 46) en est la parfaite illustration. En fait, l'étude met en évidence trois déterminants à l'intensité des relations de compétition entre les espèces associées dans un SCV : (i) l'espèce de couverture, (ii) sa conduite technique, notamment la gestion de sa croissance et de son développement par l'utilisation d'un moyen chimique ou mécanique et, (iii) les conditions climatiques. De même, les phases d'élaboration du rendement de la culture commerciale qui sont modifiées par la présence d'une plante de couverture dépendent de ces trois déterminants. L'étude montre aussi que ces relations de compétition entre les espèces associées s'établissent, le plus souvent, pour l'interception du rayonnement lumineux et qu'elles peuvent réduire le rendement de la culture de vente, parfois très fortement.

Une limite de ce travail peut être mise en évidence : bien que le dispositif expérimental de Grignon apporte une plus-value en distinguant l'effet du semis direct avec une plante de couverture de celui du semis direct sans plante de couverture, il lui manque, peut-être, de

comparer les effets d'associations culturales conduites sur un sol non travaillé aux effets d'associations culturales conduites sur un sol labouré. Cependant, des travaux valident pareillement nos hypothèses 1 et 2 pour différentes associations culturales menées sur un sol travaillé (Li *et al.*, 2001 ; Akanvou *et al.*, 2002 ; Knudsen *et al.*, 2004 ; Fan *et al.*, 2006). Par exemple, Fan *et al.* (2006) ont étudié, sur un sol labouré, l'interaction pour l'azote entre la fève (*Vicia faba* L.) et deux espèces différentes de céréales, le blé et le maïs ; ils montrent que selon l'espèce associée à la fève, la relation de l'association fève/céréale est soit compétitive soit facilitée et que selon la gestion de la fertilisation azotée, l'intensité de la relation de compétition ou de facilitation est plus ou moins importante. De même, la prédominance de la compétition pour le rayonnement entre les espèces associées par rapport à d'autres ressources du milieu est souvent mise en évidence dans des situations culturales où le sol est travaillé (Cruz & Sinoquet, 1994 ; Fischer *et al.*, 2001 ; Ross *et al.*, 2005 ; Thorsted *et al.*, 2006c), ce qui montrerait que le travail du sol influence peu les interactions que les espèces associées établissent entre elles, du moins pour des SCV avec cultures associées récents. Dans ces systèmes, il est d'ailleurs important de noter que la compétition pour le rayonnement s'exerce également sur les adventices. Ceci peut permettre, indirectement, de faciliter la croissance et le développement de la culture de vente : la plante de couverture, en interceptant le rayonnement, diminue la disponibilité de cette ressource pour les adventices ce qui est bénéfique à la culture commerciale. Des auteurs ont mis en évidence cette capacité d'étouffement d'une plante de couverture (Teasdale, 1996 ; Fisk *et al.*, 2001). Toutefois, ce phénomène n'est pas mis en évidence dans cette thèse car il s'exerce essentiellement pendant la période d'interculture durant laquelle aucun suivi du bilan radiatif n'a été réalisé. A l'avenir, il serait intéressant de porter une plus grande attention au comportement des plantes de couverture pendant cette période.

L'hypothèse 3 n'a été que partiellement validée. Si l'étude révèle que les propriétés hydriques d'un sol non travaillé peuvent être modifiées selon l'absence ou la présence d'une plante de couverture, elle ne permet ni de conclure à une forte dépendance de ces modifications vis-à-vis de l'espèce de couverture ni de mettre en évidence un changement important de la structure d'un sol en semis direct selon que celui-ci est cultivé avec ou sans plante de couverture.

Ces travaux apportent pourtant des éléments pour présumer que l'hypothèse 3 sera approuvée à plus long terme ou en utilisant d'autres méthodes d'investigation de la structure du sol. D'abord, on peut douter que la classification morphologique des pores par les indices de taille et de forme permette réellement de discriminer des différences structurales entre des traitements où les agents structurants sont peu différents. En effet, dans la littérature internationale, cette classification distingue des structures différentes pour des situations culturales très contrastées : un sol labouré, un sol non travaillé, un sol soumis à une forte compaction par le passage d'engins agricoles lourds, etc. (voir par exemple, VandenBygaart *et al.*, 1999 ; Kribaa *et al.*, 2001 ; Lamandé *et al.*, 2003). Il est rare, en revanche, qu'elle soit appliquée – comme c'est le cas dans la thèse – pour des situations où l'intensité d'un agent structurant varie peu d'un traitement expérimental à l'autre (*e.g.* l'espèce de couverture). D'autre part, l'échelle d'investigation, centrée sur la visualisation des méso- et macropores, était peut-être inadaptée. En effet, les différences des propriétés de rétention en eau entre les traitements expérimentaux sont caractéristiques, aux potentiels hydriques étudiés, de différences microstructurales (Balbino *et al.*, 2004) ce que l'échelle employée

pour caractériser la structure ne permettait pas d'appréhender. Il serait alors important de compléter notre étude en observant des lames minces de blocs de sol imprégné de résine pour apprécier les différenciations microstructurales entre les traitements expérimentaux. Ce travail serait d'autant plus intéressant que dans la littérature internationale, je n'ai pas recensé d'études comparant, par la méthode des lames minces, la structure d'un sol en semis direct à celle d'un sol labouré ; à titre d'exemple, pour un sol travaillé superficiellement, Pagliai *et al.* (1995) montrent une augmentation de la quantité de micro- et mésopores par rapport à un sol labouré.

Quels sont les autres éléments en faveur d'une validation de l'hypothèse 3 dans le long terme ? Bien que les mesures de porosité surfacique ne distinguent pas de types structuraux diversifiés en fonction de l'absence ou de la présence d'une plante de couverture sur un sol non travaillé, la thèse a montré que la quantité de biopores et de fissures tend à augmenter dans un sol en semis direct où un organisme végétal vivant est présent en permanence. Sans doute, cette tendance s'accentuerait dans l'utilisation à long terme de la technique du semis direct couplée à celle de l'association de cultures. En fait, dans les SCV avec cultures associées, il existerait une période de transition de quelques années, après le dernier travail du sol et l'implantation d'une espèce de couverture, pendant laquelle les composantes de l'agrosystème évolueraient, plus ou moins rapidement, pour atteindre un état d'équilibre comme c'est le cas lors de l'abandon du labour pour le semis direct (Kinsella, 1995). Dans ce dernier cas de figure, Lampurlanés & Cantero-Martínez (2003) rapportent, par exemple, une augmentation en surface de la densité apparente dans les cinq premières années de semis direct puis une diminution progressive, sous l'action d'agents structurants, jusqu'à un équilibre. En semis direct, la durée de cette période de transition est très variable selon l'environnement pédoclimatique et l'histoire de la parcelle agricole ; elle peut être de quelques jours (Karamanos *et al.*, 2004) ou de plusieurs années (Lampurlanés & Cantero-Martínez, 2003). On peut suggérer qu'il en est de même pour les SCV avec cultures associées.

Par certains aspects, cette thèse se démarque du cadre habituel de la recherche agronomique sur la conception et l'évaluation de nouveaux systèmes de culture tel qu'il est défini par Meynard *et al.* (2001). Classiquement, l'innovation des systèmes de culture s'appuie sur ceux existants pour les améliorer en utilisant des méthodes éprouvées en Agronomie comme le diagnostic agronomique, la modélisation, les expérimentations « Systèmes de culture » ou celles à vocation plus cognitive lorsqu'une lacune dans les connaissances du fonctionnement des systèmes de culture est identifiée. Cette approche itérative combinant conception et évaluation des systèmes de culture permet une amélioration progressive de ces derniers (Figure Discussion–1).

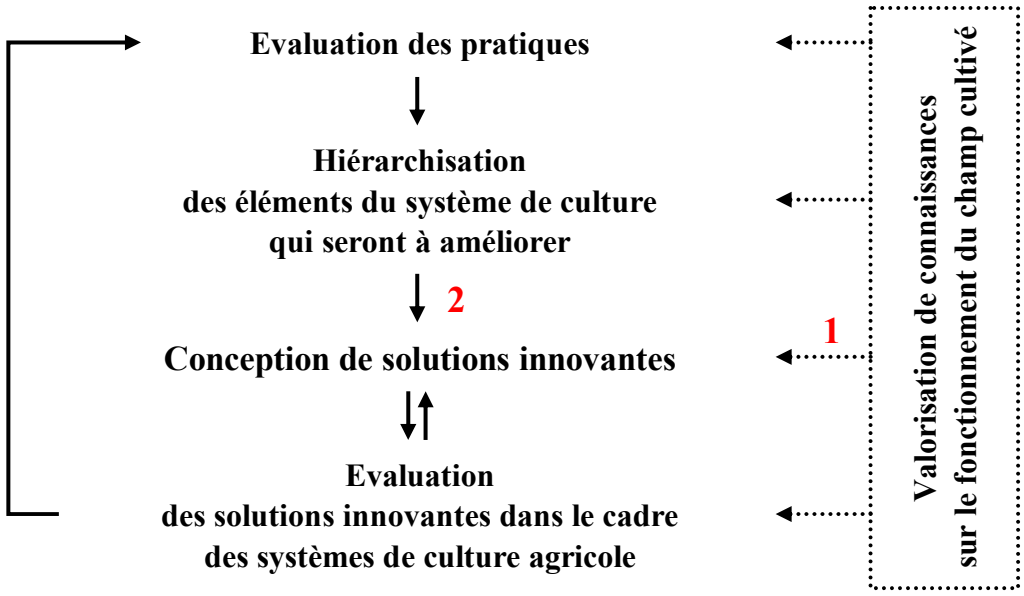


Figure Discussion–1 : Démarche itérative d'évaluation, de mise au point et d'amélioration des systèmes de culture (d'après Meynard *et al.*, 1998). Pour la conception des SCV avec cultures associées, les flèches numérotées 1 et 2 sont sources d'interrogations : ceci est expliqué dans le texte.

L'histoire de l'agriculture montre que l'innovation des systèmes de culture peut aussi se concevoir en rupture de ceux existants. L'arrêt du labour et le semis direct en sont des exemples car les modifications profondes du fonctionnement de l'agrosystème que ces changements techniques induisent rendent caduques beaucoup de connaissances et de références disponibles pour les agrosystèmes labourés. La conception de systèmes de culture peut ainsi conduire à en proposer d'autres qui n'existent pas, comme les SCV avec cultures associées, objet de cette thèse, ce qui pose une double difficulté par rapport au schéma évoqué précédemment :

(1) Un manque de connaissances disponibles sur le fonctionnement de ces nouveaux systèmes de culture (flèche 1).
(2) L'absence de parcelles agricoles sur lesquelles puisse être réalisé un diagnostic agronomique (flèche 2).

Cette double difficulté nous a conduit à effectuer un prototypage de systèmes de culture dans une expérimentation sur laquelle la démarche proposée dans le schéma précédent était mise en œuvre. Cette approche s'apparente alors aux expérimentations « Systèmes de culture » proposées par Meynard *et al.* (1996) : comme pour ces auteurs, une expérimentation est le support du diagnostic agronomique ; cependant, nous n'avons pas étudié un système de culture *stricto sensu* (*e.g.* les effets précédents ne sont pas explicitement considérés) mais plus exactement, la variation d'une technique culturale.

Finalement, le travail s'est construit sur une expérimentation dont l'objectif était d'étudier le fonctionnement d'un agrosystème où le sol, non travaillé, est couvert en permanence d'un organisme végétal vivant pérenne. Pour étudier le fonctionnement de cet agrosystème, nous avons associé à l'approche systémique (*i.e.* la mise en œuvre du diagnostic agronomique sur les prototypes de SCV avec cultures associées) une approche analytique (*i.e.* les observations et les mesures de la structure du sol et de ses propriétés hydriques). Cette double approche nous a semblé importante à adopter pour étudier une innovation telle que les SCV avec cultures associées. En effet, l'approche systémique permet d'identifier et de hiérarchiser les principaux déterminants du fonctionnement du système dans son ensemble. Cela permet de mettre en évidence les points clés à travailler pour en améliorer les externalités positives ce qui est précieux dans un contexte où peu de connaissances sont disponibles. Le couplage avec une approche analytique permet d'étudier ces points clés et permet ainsi de générer des connaissances qui peuvent être replacées dans le cadre de l'analyse globale du système. Doré *et al.* (1997) soulignent d'ailleurs que l'un des objectifs du diagnostic agronomique est la formulation de nouvelles hypothèses à tester par l'expérimentation. Toutefois, la démarche séquentielle, *i.e.* le diagnostic agronomique puis l'approfondissement des points clés, n'a pas pu être totalement déployée dans ce travail car les contraintes de temps nous ont conduit à choisir les points à approfondir avant d'avoir les résultats du diagnostic agronomique. Sur une plus longue période de recherche, nous aurions peut-être focalisé l'approche sur d'autres points : j'y reviendrai dans le paragraphe consacré aux perspectives.

Quelle crédibilité, quelle portée et quels impacts les résultats présentés dans ce document ont-ils pour la recherche agronomique et pour l'agriculture des climats tempérés ? En fait, les limites de ce travail proviennent d'une part de l'objet d'étude et d'autre part des moyens d'investigation ; de ces limites dépendent le domaine de validité des résultats.

Comme je l'ai déjà commenté, les SCV avec cultures associées n'existent quasiment pas en climat tempéré ce qui a constitué la principale difficulté de ce travail : l'acquisition de connaissances scientifiques sur le fonctionnement d'un agrosystème où le sol n'est pas travaillé et reste couvert en permanence d'un organisme végétal vivant pérenne s'est effectuée parallèlement à l'acquisition d'un savoir-faire technique, presque vierge jusqu'à présent en climat tempéré, pour la conduite de ces systèmes de culture innovants. Ceci nous a conduit à cumuler deux fonctions dans cette thèse : être ceux qui agissent sur le système de culture tout en étant ceux chargés de comprendre les conséquences de ces actions sur le fonctionnement de l'agrosystème. Dans ce contexte, la réalisation d'un diagnostic agronomique peut présenter une certaine ambiguïté ; il peut nous être reproché d'avoir diagnostiqué non pas des dysfonctionnements des SCV avec cultures associées mais plutôt des dysfonctionnements des pratiques expérimentales ! Il nous semble toutefois que la méthode du diagnostic agronomique est suffisamment puissante pour différencier, dans une certaine mesure, ces deux aspects. Par exemple, l'apprentissage de la gestion des plantes de couverture par un moyen chimique ou mécanique n'a jamais été considéré comme un dysfonctionnement des SCV avec cultures associées. Quoi qu'il en soit, au-delà des apports scientifiques dont la pertinence sera discutée par nos pairs, ce travail a le mérite d'avoir expérimenté *in situ* ces systèmes, première étape nécessaire pour des recherches futures dans ce domaine. Il a aussi permis de rassembler les premières références techniques sur ces systèmes en climat tempéré (Annexe 2).

La modélisation est couramment utilisée pour comprendre et faire évoluer les systèmes de culture (Boote *et al.*, 1996 ; Gary *et al.*, 1998) ; aurait-elle été un atout pour travailler sur les SCV avec cultures associées ? La réponse est mitigée. Dans la littérature internationale, plusieurs modèles agronomiques simulent le fonctionnement d'un agrosystème en cultures associées (voir par exemple, Baumann *et al.*, 2002 ; Brisson *et al.*, 2004 ; Tsubo *et al.*, 2005). Les avantages de ces modèles sont de tester les effets des systèmes de culture sur des variables d'intérêt, dans des scénarios pédoclimatiques variés et pour une multitude de combinaisons techniques, difficilement accessibles par l'expérimentation. Dans ce travail, cela aurait permis, par exemple, de valider les hypothèses 1 et 2 sur différents types de sol, d'augmenter le nombre d'associations culturales testées, de mieux comprendre les interactions entre la technique culturale du semis direct et celle de l'association de cultures, etc. Cependant, l'utilisation d'un modèle aurait requis un paramétrage et une validation importants du fait des profondes modifications supposées du fonctionnement de l'agrosystème dans ces conditions. De plus, dans le temps imparti pour une thèse, la sélection de la variable à paramétrer se serait raisonnée *a priori* avec le risque d'étudier *in fine* une variable peu affectée par ces nouveaux systèmes de culture. Comme le souligne Tourdonnet (1998), la modélisation profite plus à la recherche agronomique lorsqu'elle fait écho au diagnostic agronomique qui permet d'identifier et de hiérarchiser *a posteriori* les phénomènes prépondérants par rapport à un objectif d'étude. Une autre limite de la modélisation est que ces phénomènes prépondérants soient effectivement modélisables. Or, si l'on sait aujourd'hui assez bien modéliser l'impact des flux d'azote, d'eau et de lumière sur la croissance et le développement des peuplements végétaux (Boote *et al.*, 1996) y compris pour des cultures associées (Launay *et al.*, 2006), la prise en compte de l'activité et de l'impact de la composante biologique reste, pour une

large part, encore inaccessible par la modélisation : par exemple, quel modèle peut simuler la croissance et le développement des racines dans le sol et leurs impacts sur la structure ?

La thèse pourra être bénéfique pour une utilisation future de modèles dont le paramétrage se focalisera sur la compétition pour la lumière entre les espèces associées (avec quelques restrictions que j'exposerai ci-dessous) ; cela permettra de faire ressortir toute la variabilité de la conduite des SCV avec cultures associées à une échelle supérieure à celle de ce travail. La modélisation, en revanche, n'aurait pas pu soutenir l'approche analytique de la thèse puisqu'à notre connaissance, il n'existe pas de modèles simulant, sur un sol non travaillé avec une plante de couverture, l'évolution de la structure et des propriétés hydriques sous l'effet de la composante biologique. Ce manque de connaissances devait être comblé par l'expérimentation ; la thèse a apporté quelques réponses mais les questions sont encore nombreuses pour comprendre l'importance de la composante biologique dans les SCV avec cultures associées.

Quelles sont les autres limites de ce travail ? Si la réalisation des mesures sur une seule parcelle agricole a permis de s'affranchir des caractéristiques du milieu pour comprendre les effets de différentes espèces de couverture sur des variables comme le rendement, l'interception du rayonnement solaire ou la conductivité hydraulique, cela a pu restreindre, en revanche, certaines conclusions aux conditions pédoclimatiques du dispositif expérimental de Grignon. Ceci se vérifie particulièrement pour les mesures concernant la structure et les propriétés hydriques du sol : à partir des résultats acquis, il est difficile de prévoir le comportement d'un même dispositif expérimental sur des sols avec des degrés de compaction initiale différents influant sur la pénétrabilité des racines ou sur des sols à textures différentes qui les rendent plus ou moins sensibles aux phénomènes de battance, de retrait–gonflement, etc. En revanche, le domaine de validité des deux premières hypothèses peut sans doute s'étendre au-delà du dispositif expérimental de Grignon même si des restrictions existent, particulièrement pour la nature des ressources en compétition vis-à-vis des espèces associées testées. Qu'avons-nous démontré à propos de ces deux hypothèses et comment ? Quelle que soit la plante de couverture, la principale ressource en compétition est la lumière, surtout dépendante des grands ensembles climatiques et indépendante des conditions pédologiques ; la gamme d'espèces de couverture étudiées est vaste et a présenté des architectures aériennes variées ; une seule culture de vente a été testée, le blé tendre d'hiver. A la lecture de ces informations, on peut penser que la principale limite à l'extrapolation des résultats liés aux hypothèses 1 et 2 est spécifique. Plus particulièrement, ces résultats peuvent s'extrapoler dans de nombreuses régions tempérées, aux conditions pédologiques variées, pour une culture de vente dont la croissance, le développement et les besoins nutritionnels sont proches de ceux du blé d'hiver. Par contre, nous n'avons pas les moyens de prévoir le comportement d'espèces associées incluant une culture de vente très différente de celle étudiée, notamment les cultures de printemps ; comment fonctionnerait, par exemple, un agrosystème en SCV avec cultures associées dont la culture commerciale est du maïs avec des besoins hydriques beaucoup plus élevés que ceux du blé d'hiver ?

Une autre limitation des résultats est liée à l'étude à court terme de ces systèmes de culture. Je l'ai déjà évoquée pour la structure et les propriétés hydriques du sol. Pareillement, la présence d'une espèce pérenne dans les SCV avec cultures associées pourrait modifier, à long terme, la nature et l'intensité des interactions avec la culture commerciale. Ainsi, en agroforesterie, des

études ont démontré l'approfondissement du système racinaire des arbres suite à la compétition avec des cultures annuelles d'hiver : cette modification de l'architecture racinaire par la compétition permet aux arbres d'exploiter les ressources souterraines, initialement inutilisées (Dupraz *et al.*, 2005 ; Moreno *et al.*, 2005). Ainsi, nous insistons sur le fait que dans les SCV avec cultures associées, il doit exister une période de transition de quelques années avant l'apparition d'externalités positives pour l'agrosystème : par exemple, au cours du temps, le système racinaire de la plante de couverture pérenne se développera et sera capable de puiser des ressources en profondeur contrairement au système racinaire de la culture annuelle.

Les SCV avec cultures associées répondent-ils aux enjeux de l'agriculture moderne ? Si cette question trouve une réponse positive en climat tropical au travers des quelques études réalisées, aucune réponse ne peut être formulée actuellement, en climat tempéré, même après les travaux rapportés dans ce document. En fait, cette thèse a permis de transférer, en climat tempéré, les SCV avec cultures associées de la théorie à la pratique : elle a démontré qu'il était possible de gérer, sur un sol non travaillé, une plante de couverture avec une culture de vente et d'obtenir de cette dernière un rendement similaire à celui réalisé en culture pure. La thèse a aussi mis en avant la fragilité d'un tel système que l'on ne maîtrise pas encore dans sa globalité. L'exemple du traitement Fo en est une illustration : le rendement de la culture commerciale dans ce traitement est égal à celui de la culture pure uniquement pendant une année expérimentale ; les autres années, des dysfonctionnements du système ont été mis en évidence.

Cette thèse n'avait pas pour objectif de tester l'ensemble des externalités positives supposées des SCV avec cultures associées ; il n'est donc pas concevable de rejeter dès à présent les atouts potentiels de ces systèmes de culture. En effet, dans cette étude, les fonctions agroécologiques de la plante de couverture, dont on suppose qu'elles permettront d'améliorer l'agrosystème pour atteindre les critères de durabilité de l'agriculture moderne, n'ont été appréhendées que par rapport à l'évolution de la structure et des propriétés hydriques du sol. Bien que nous ayons conclu à une faible dépendance entre l'évolution de la structure et la présence d'une plante de couverture sur un sol non travaillé, nous avons aussi avancé que les effets de cette plante se manifestaient, pour certaines caractéristiques de l'agrosystème, seulement après une période de transition. De même, la thèse met en avant, sans pouvoir l'entériner, l'intérêt de la culture d'une plante de couverture de la famille des légumineuses pour réduire d'année en année les quantités d'azote apporté par l'engrais pour la fertilisation des cultures associées.

Que reste-t-il à étudier pour permettre, en climat tempéré, la conception et l'évaluation de SCV avec cultures associées ? Les réponses sont encore très nombreuses et je ne prétends pas les présenter ici de manière exhaustive ; la thèse met en avant certaines pistes de travail nécessitant un effort de recherche. Ainsi, il faut compléter nos connaissances sur les externalités positives des SCV avec cultures associées en s'intéressant particulièrement à la période d'interculture : par exemple, la recherche pourrait s'intéresser au pouvoir d'étouffement des plantes de couverture sur les adventices ou à la capacité de ces plantes à puiser les nitrates excédentaires du cycle cultural précédent. Il serait aussi particulièrement enrichissant de mettre en place une expérimentation longue durée – ou de poursuivre celle mise en place pour cette thèse – pour apprécier les effets à long terme comme les effets précédents des SCV avec cultures associées qui

sont sans doute des effets majeurs dans la compréhension de ces systèmes mais aussi dans la définition de leurs intérêts pour l'agriculture. Une telle expérimentation permettrait, par exemple, (i) de vérifier l'avantage des plantes de couverture de la famille des légumineuses dans la gestion de la fertilisation azotée des espèces associées au travers de l'enrichissement des résidus de culture en azote total et, (ii) de poursuivre l'investigation des impacts du semis direct et de la plante de couverture sur le développement du système racinaire et sur la structure. D'ailleurs, des mesures annexes à cette thèse ont révélé une très forte augmentation de la biomasse racinaire dans les associations culturales par rapport à la culture pure de blé (résultats non montrés) ce qui est en faveur d'un rôle prépondérant des racines dans l'évolution à long terme de la structure d'un sol non travaillé avec une plante de couverture (Bronick & Lal, 2005). Il serait aussi judicieux de réaliser une étude semblable à celle présentée ici, améliorée de nos critiques, pour des SCV où la culture de vente est une culture de printemps.

Le développement des SCV avec cultures associées, et plus largement l'acquisition de connaissances et la valorisation des régulations biologiques dans l'agrosystème, reste un défi à relever pour les chercheurs et les acteurs du développement travaillant à concevoir une agriculture durable. La capacité à innover restera sans doute un des moteurs essentiel de cette transformation qui ne touche pas seulement des aspects techniques mais modifie aussi le rôle des agents de la filière agricole, les relations qu'ils ont entre eux ainsi que les identités professionnelles des agriculteurs (Triomphe *et al.*, 2006).

Références bibliographiques

Akanvou, R., Kropff, M. J., Bastiaans, L. & Becker, M. 2002. Evaluating the use of two contrasting legume species as relay intercrop in upland rice cropping systems. *Field Crops Research*, **74**, 23-36.

Andersen, A. 1999. Plant protection in spring cereal production with reduced tillage. II. Pests and beneficial insects. *Crop Protection*, **18**, 651-657.

Andersen, M. K., Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P. & Jensen, E. S. 2004. Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops. *Plant and Soil*, **266**, 273-287.

Angers, D. A. & Caron, J. 1998. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, **42**, 55-72.

Angers, D. A., Samson, N. & Legere, A. 1993. Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Canadian Journal of Soil Science*, **73**, 51-59.

Anil, L., Park, J., Phipps, R. H. & Miller, F. A. 1998. Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK. *Grass and Forage Science*, **53**, 301-317.

Anken, T., Weisskopf, P., Zihlmann, U., Forrer, H., Jansa, J. & Perhacova, K. 2004. Long-term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. *Soil & Tillage Research*, **78**, 171-183.

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.

Aulakh, M. S., Doran, J. W., Walters, D. T., Mosier, A. R. & Francis, D. D. 1991. Crop residue type and placement effects on denitrification and mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, **55**, 1020-1025.

Azooz, R. H. & Arshad, M. A. 1996. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. *Canadian Journal of Soil Science*, **76**, 143-152.

Baggs, E. M., Stevenson, M., Pihlatie, M., Regar, A., Cook, H. & Cadisch, G. 2003. Nitrous oxide emissions following application of residues and fertiliser under zero and conventional tillage. *Plant and Soil*, **254**, 361-370.

Balbino, L. C., Bruand, A., Cousin, I., Brossard, M., Quétin, P. & Grimaldi, M. 2004. Change in the hydraulic properties of a Brazilian clay Ferralsol on clearing for pasture. *Geoderma*, **120**, 297-307.

Balesdent, J., Chenu, C. & Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil & Tillage Research*, **53**, 215-230.

Ball, B. C., Cheshire, M. V., Robertson, E. A. G. & Hunter, E. A. 1996. Carbohydrate composition in relation to structural stability, compactibility and plasticity of two soils in a long-term experiment. *Soil & Tillage Research*, **39**, 143-160.

Ball, B. C., Campbell, D. J., Douglas, J. T., Henshall, J. K. & O'Sullivan, M. F. 1997. Soil structural quality, compaction and land management. *European Journal of Soil Science*, **48**, 593-601.

Bàrberi, P. & Lo Cascio, B. 2001. Long-term tillage and crop rotation effects on weed seedbank size and composition. *Weed Research*, **41**, 325-340.
Barriuso, E., Calvet, R. & Cure, B. 1994. Incidence de la simplification du travail du sol sur le comportement des produits phytosanitaires : conséquences sur les risques de pollution. *In* Monnier, G., Thevenet, G., Lesaffre, B. (eds.), *Simplification du travail du sol*, Vol. 65, INRA éditions, Paris (France), pp. 105-124.
Basic, F., Kisic, I., Mesic, M., Nestroy, O. & Butorac, A. 2004. Tillage and crop management effects on soil erosion in central Croatia. *Soil & Tillage Research*, **78**, 197-206.
Baumann, D. T., Bastiaans, L., Goudriaan, J., van Laar, H. H. & Kropff, M. J. 2002. Analysing crop yield and plant quality in an intercropping system using an eco-physiological model for interplant competition. *Agricultural Systems*, **73**, 173-203.
Baumhardt, R. L. & Jones, O. R. 2002. Residue management and tillage effects on soil-water storage and grain yield of dryland wheat and sorghum for a clay loam in Texas. *Soil & Tillage Research*, **68**, 71-82.
Bernoux, M., Cerri, C. C., Cerri, C. E. P., Neto, M. S., Metay, A., Perrin, A. S., Scopel, E., Razafimbelo, T., Blavet, D., Piccolo, M. D., Pavei, M. & Milne, E. 2006. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. *Agronomy for Sustainable Development*, **26**, 1-8.
Bertrand, M., Guichard, L., de Tourdonnet, S., Saulas, P. & Picard, D. 2005. Evaluation of the agronomic, economic and environmental impacts of no-tillage cropping systems. Results of a long-term experiment in France, *In* ACT Productions (ed.), *Proceedings of the third World Congress on Conservation Agriculture*, Nairobi (Kenya), [**en ligne**] www.act.org.zw/congress/index.htm.
Bescansa, P., Imaz, M. J., Virto, I., Enrique, A. & Hoogmoed, W. B. 2006. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. *Soil & Tillage Research*, **87**, 19-27.
Bhattacharyya, R., Prakash, V., Kundu, S. & Gupta, H. S. 2006. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. *Soil & Tillage Research*, **86**, 129-140.
Blackshaw, R. E. 1994. Differential competitive ability of winter wheat cultivars against downy brome. *Agronomy Journal*, **86**, 649-654.
Blanco-Canqui, H., Gantzer, C. J., Anderson, S. H. & Alberts, E. E. 2004. Tillage and crop influences on physical properties for an Epiaqualf. *Soil Science Society of America Journal*, **68**, 567-576.
Blevins, R. L., Thomas, G. W., Smith, M. S., Frye, W. W. & Cornelius, P. L. 1983. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. *Soil & Tillage Research*, **3**, 135-146.
Boiffin, J., Malezieux, E. & Picard, D. 2001. Cropping systems for the future. *In* Nösberger, J., Geiger, H. H., Struik, P. C. (eds.), *Crop Science: progress and prospects*, CABI Publishing, Oxon (UK), pp. 261-280.
Bond, W. & Grundy, A. C. 2001. Non-chemical weed management in organic farming systems. *Weed Research*, **41**, 383-405.
Boote, K. J., Jones, J. W. & Pickering, N. B. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*, **88**, 704-716.
Brisson, N., Bussiere, F., Ozier-Lafontaine, H., Tournebize, R. & Sinoquet, H. 2004. Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parameterisation. *Agronomie*, **24**, 409-421.
Bronick, C. J. & Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, **124**, 3-22.

Bruand, A., Duval, O., Gaillard, H., Darthout, R. & Jamagne, M. 1996. Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, **3**, 27-40.

Bruno, J. F., Stachowicz, J. J. & Bertness, M. D. 2003. Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends in Ecology & Evolution*, **18**, 119-125.

Buckles, D. & Triomphe, B. 1999. Adoption of mucuna in the farming systems of northern Honduras. *Agroforestry Systems*, **47**, 67-91.

Callaway, R. M. & Walker, L. R. 1997. Competition and facilitation: a synthetic approach to interactions in plant communities. *Ecology*, **78**, 1958-1965.

Capillon, A. & Séguy, L. 2002. Ecosystèmes cultivés et stockage du carbone. Cas des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale. *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture Française*, **88**, 63-70.

Carof, M., de Tourdonnet, S., Saulas, P., Le Floch, D. & Roger-Estrade, J. submitted-a. Intercropping winter wheat (*Triticum aestivum* L.) with different living cover crops in a no-till management system (I): effects of living cover crop on wheat grain yield and its components. *Agronomy for Sustainable Development*.

Carof, M., de Tourdonnet, S., Saulas, P., Le Floch, D. & Roger-Estrade, J. submitted-b. Intercropping winter wheat (*Triticum aestivum* L.) with different living cover crops in a no-till management system (II): competition or facilitation for light and nitrogen. *Agronomy for Sustainable Development*.

Carter, M. R. & Rennie, D. A. 1987. Effects of tillage on deposition and utilization of ^{15}N residual fertilizer. *Soil & Tillage Research*, **9**, 33-43.

Casper, B. B. & Jackson, R. B. 1997. Plant competition underground. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **28**, 545-570.

Catt, J. A., Howse, K. R., Christian, D. G., Lane, P. W., Harris, G. L. & Goss, M. J. 2000. Assessment of tillage strategies to decrease nitrate leaching in the Brimstone Farm Experiment, Oxfordshire, UK. *Soil & Tillage Research*, **53**, 185-200.

Clement, A., Ladha, J. K. & Chalifour, F. P. 1995. Crop residue effects on nitrogen mineralization, microbial biomass, and rice yield in submerged soils. *Soil Science Society of America Journal*, **59**, 1595-1603.

Connolly, J., Goma, H. C. & Rahim, K. 2001. The information content of indicators in intercropping research. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **87**, 191-207.

Coquet, Y., Vachier, P. & Labat, C. 2005. Vertical variation of near-saturated hydraulic conductivity in three soil profiles. *Geoderma*, **126**, 181-191.

Coutadeur, C., Coquet, Y. & Roger-Estrade, J. 2002. Variation of hydraulic conductivity in a tilled soil. *European Journal of Soil Science*, **53**, 619-628.

Crews, T. E. & Peoples, M. B. 2004. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **102**, 279-297.

Cruz, P. & Soussana, J. F. 1997. Mixed crops. *In* Lemaire, G. (ed.), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (Germany), pp. 131-144.

Cruz, P. A. & Sinoquet, H. 1994. Competition for light and nitrogen during a regrowth cycle in a tropical forage mixture. *Field Crops Research*, **36**, 21-30.

Dao, T. H. 1993. Tillage and winter wheat residue management effects on water infiltration and storage. *Soil Science Society of America Journal*, **57**, 1586-1595.

de Tourdonnet, S., Carof, M. & Saulas, P. 2003. A contribution to the development of cropping systems with permanent cover crop in open fields in France, *In*, *Proceedings of the second World Congress on Conservation Agriculture*, Iguassu Falls (Brazil), pp. 262-265.

Debaeke, P. & Orlando, D. 1994. Simplification du travail du sol et évolution de la flore adventice : conséquences pour le désherbage à l'échelle de la rotation. *In* Monnier, G., Thevenet, G., Lesaffre, B. (eds.), *Simplification du travail du sol*, INRA éditions, Paris (France), pp. 35-62.

Deguchi, S., Uozumi, S., Tawaraya, K., Kawamoto, H. & Tanaka, O. 2005. Living mulch with white clover improves phosphorus nutrition of maize of early growth stage. *Soil Science and Plant Nutrition*, **51**, 573-576.

Demotes-Mainard, S., Doussinault, G. & Meynard, J.-M. 1995. Effects of low radiation and low temperature at meiosis on pollen viability and grain set in wheat. *Agronomie*, **15**, 357-365.

Derpsch, R. 2001. Conservation tillage, no-tillage and related technologies, *In* García-Torres, L., Benites, J., Martínez-Vilela, A. (eds.), *Proceedings of the first World Congress on Conservation Agriculture*, Madrid (Spain), pp. 161-170.

Dexter, A. R. 1991. Amelioration of soil by natural processes. *Soil & Tillage Research*, **20**, 87-100.

Dexter, A. R. 1997. Physical properties of tilled soils. *Soil & Tillage Research*, **43**, 41-63.

Donaldson, E., Schillinger, W. F. & Dofing, S. M. 2001. Straw production and grain yield relationships in winter wheat. *Crop Science*, **41**, 100-106.

Dong, S. K., Long, R. J., Hu, Z. Z. & Kang, M. Y. 2005. Productivity and persistence of perennial grass mixtures under competition from annual weeds in the alpine region of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Weed Research*, **45**, 114-120.

Doran, J. W. 1980. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Science Society of America Journal*, **44**, 765-771.

Doré, T., Sebillotte, M. & Meynard, J.-M. 1997. A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. *Agricultural Systems*, **54**, 169-188.

Dorioz, J. M., Robert, M. & Chenu, C. 1993. The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. *Geoderma*, **56**, 179-194.

Dumas, J. B. A. 1831. Procédés de l'analyse organique. *Annales de Chimie et de Physique*, **2**, 198-213.

Dupraz, C. 2006. Vers la gestion d'écosystèmes cultivés. *In* Club Déméter (ed.), *Déméter 2006*, Paris (France), pp. 73-89.

Dupraz, C., Dufour, L., Lecomte, I., Mulia, R. & Mayus, M. 2005. *Silvoarable agroforestry for Europe, INRA-SYSTEM final report*. [**en ligne**]. Disponible sur www.montpellier.inra.fr/safe/ (consulté le 21 août 2006).

Edwards, C. A. & Lofty, J. R. 1982. The effect of direct drilling and minimal cultivation on earthworm populations. *Journal of Applied Ecology*, **19**, 723-734.

Edwards, J. H., Wood, C. W., Thurlow, D. L. & Ruf, M. E. 1992. Tillage and crop rotation effects on fertility status of a Hapludult soil. *Soil Science Society of America Journal*, **56**, 1577-1582.

Ehlers, W., Kopke, U., Hesse, F. & Bohm, W. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil & Tillage Research*, **3**, 261-275.

El Titi, A. 2003a. *Soil tillage in agroecosystems*. CRC Press, New-York (USA).

El Titi, A. 2003b. Effects of tillage on invertebrates in soil ecosystems. *In* El Titi, A. (ed.), *Soil tillage in agroecosystems*, CRC Press, New-York (USA), pp. 261-296.

El Titi, A. 2003c. Implications of soil tillage for weed communities. *In* El Titi, A. (ed.), *Soil tillage in agroecosystems*, CRC Press, New-York (USA), pp. 147-185.

Ewel, J. J., Mazzarino, M. J. & Berish, C. W. 1991. Tropical soil fertility changes under monocultures and successional communities of different structure. *Ecological Applications*, **1**, 289-302.

Fabrizzi, K. P., Garcia, F. O., Costa, J. L. & Picone, L. I. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research*, **81**, 57-69.

Fan, F., Zhang, F., Song, Y., Sun, J., Bao, X., Guo, T. & Li, L. 2006. Nitrogen fixation of faba bean (*Vicia faba* L.) interacting with a non-legume in two contrasting intercropping systems. *Plant and Soil*, **283**, 275-286.

FAO-UNESCO 1974. *Soil map of the world, 1:5 000 000*. FAO, Roma (Italy).
Feil, B., Garibay, S. V., Ammon, H. U. & Stamp, P. 1997. Maize production in a grass mulch system - seasonal patterns of indicators of the nitrogen status of maize. *European Journal of Agronomy*, **7**, 171-179.
Ferreras, L. A., Costa, J. L., Garcia, F. O. & Pecorari, C. 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. *Soil & Tillage Research*, **54**, 31-39.
Findeling, A., Ruy, S. & Scopel, E. 2003. Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *Journal of Hydrology*, **275**, 49-66.
Fischer, A. J., Ramirez, H. V., Gibson, K. D. & Pinheiro, B. D. 2001. Competitiveness of semidwarf upland rice cultivars against palisadegrass (*Brachiaria brizantha*) and signalgrass (*B. decumbens*). *Agronomy Journal*, **93**, 967-973.
Fisk, J. W., Hesterman, O. B., Shrestha, A., Kells, J. J., Harwood, R. R., Squire, J. M. & Sheaffer, C. C. 2001. Weed suppression by annual legume cover crops in no-tillage corn. *Agronomy Journal*, **93**, 319-325.
Follett, R. F. & Peterson, G. A. 1988. Surface soil nutrient distribution as affected by wheat-fallow tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, **52**, 141-147.
Fragoso, C., Brown, G. G., Patron, J. C., Blanchart, E., Lavelle, P., Pashanasi, B., Senapati, B. & Kumar, T. 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of earthworms. *Applied Soil Ecology*, **6**, 17-35.
Frey, S. D., Elliott, E. T. & Paustian, K. 1999. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology & Biochemistry*, **31**, 573-585.
Fuentes, J. P., Flury, M. & Bezdicek, D. F. 2004. Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional till, and no-till. *Soil Science Society of America Journal*, **68**, 1679-1688.
Fukai, S. & Trenbath, B. R. 1993. Processes determining intercrop productivity and yields of component crops. *Field Crops Research*, **34**, 247-271.
Galvez, L., Douds, D. D., Drinkwater, L. E. & Wagoner, P. 2001. Effect of tillage and farming system upon VAM fungus populations and mycorrhizas and nutrient uptake of maize. *Plant and Soil*, **228**, 299-308.
Gardner, W. R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, **85**, 228-232.
Garibay, S. V., Stamp, P., Ammon, H. U. & Feil, B. 1997. Yield and quality components of silage maize in killed and live cover crop sods. *European Journal of Agronomy*, **6**, 179-190.
Gary, C., Jones, J. W. & Tchamitchian, M. 1998. Crop modelling in horticulture: state of the art. *Scientia Horticulturae*, **74**, 3-20.
Ghaley, B. B., Hauggaard-Nielsen, H., Hogh-Jensen, H. & Jensen, E. S. 2005. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **73**, 201-212.
Ghiloufi, M., Saulas, P. & Picard, D. 2001. Towards cropping systems with permanent ground cover and zero tillage in open field cropping systems in France, *In* García-Torres, L., Benites, J., Martínez-Vilela, A. (eds.), *Proceedings of the first World Congress on Conservation Agriculture*, Madrid (Spain).
Glen, D. M. & Symondson, O. C. 2003. Influence of soil tillage on slugs and their natural enemies. *In* El Titi, A. (ed.), *Soil tillage in agroecosystems*, CRC Press, New-York (USA), pp. 207-227.
Gooding, M. J., Dimmock, J. P. R. E., France, J. & Jones, S. A. 2000. Green leaf area decline of wheat flag leaves: the influence of fungicides and relationships with mean grain weight and grain yield. *Annals of Applied Biology*, **136**, 77-84.

Grant, C. A. & Lafond, G. P. 1993. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science,* **73**, 223-232.
Gregory, P. J. 2006. Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science? *European Journal of Soil Science,* **57**, 2-12.
Guérif, J. 1994. Influence de la simplification du travail du sol sur l'état structural des horizons de surface : conséquences sur leurs propriétés physiques et leurs comportements mécaniques. *In* Monnier, G., Thevenet, G., Lesaffre, B. (eds.), *Simplification du travail du sol*, Vol. 65, INRA éditions, Paris (France), pp. 13-33.
Hallaire, V. 1988. La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. I. Description *in situ*. *Agronomie,* **8**, 139-145.
Hallaire, V. & Curmi, P. 1994. Image analysis of pore space morphology in soil sections in relation to water movement. *In* Ringrose-Voase, A. J., Humphreys, G. S. (eds.), *Soil micromorphology: studies in management and genesis. Proceedings of the Ninth International Working Meeting on Soil Micromorphology*, Elsevier, Amsterdam (The Netherland), pp. 559-567.
Halvorson, A. D., Wienhold, B. J. & Black, A. L. 2001. Tillage and nitrogen fertilization influence grain and soil nitrogen in an annual cropping system. *Agronomy Journal*, **93**, 836-841.
Hammel, J. E. 1989. Long-term tillage and crop rotation effects on bulk density and soil impedance in Nothern Idaho. *Soil Science Society of America Journal,* **53**, 1515-1519.
Hamza, M. A. & Anderson, W. K. 2005. Soil compaction in cropping systems - A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, **82**, 121-145.
Hatfield, J. L. & Karlen, D. L. 1994. *Sustainable agricultural systems*. Lewis Publishers (CRC Press), Boca Raton (USA).
Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P. & Jensen, E. S. 2001. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crops Research*, **70**, 101-109.
Haymes, R. & Lee, H. C. 1999. Competition between autumn and spring planted grain intercrops of wheat (*Triticum aestivum*) and field bean (*Vicia faba*). *Field Crops Research*, **62**, 167-176.
Haynes, R. J. & Beare, M. H. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology & Biochemistry*, **29**, 1647-1653.
Haynes, R. J. & Naidu, R. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems,* **51**, 123-137.
Heard, J. R., Kladivko, E. J. & Mannering, J. V. 1988. Soil macroporosity, hydraulic conductivity and air permeability of silty soils under long-term conservation tillage in Indiana. *Soil & Tillage Research,* **11**, 1-18.
Hemmat, A. & Eskandari, I. 2004. Tillage system effects upon productivity of a dryland winter wheat-chickpea rotation in the northwest region of Iran. *Soil & Tillage Research*, **78**, 69-81.
Hendrix, P. F., Mueller, B. R., Bruce, R. R., Langdale, G. W. & Parmelee, R. W. 1992. Abundance and distribution of earthworms in relation to landscape factors on the Georgia Piedmont, USA. *Soil Biology & Biochemistry*, **24**, 1357-1361.
Hermawan, B. & Bomke, A. A. 1997. Effects of winter cover crops and successive spring tillage on soil aggregation. *Soil & Tillage Research*, **44**, 109-120.
Hernánz, J. L., Girón, V. S. & Cerisola, C. 1995. Long-term energy use and economic evaluation of three tillage systems for cereal and legume production in central Spain. *Soil & Tillage Research*, **35**, 183-198.

Hernánz, J. L., Lopez, R., Navarrete, L. & Sánchez-Gíron, V. 2002. Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. *Soil & Tillage Research*, **66**, 129-141.
Hill, R. L. 1990. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, **54**, 161-166.
Hill, R. L., Horton, R. & Cruse, R. M. 1985. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two mollisols. *Soil Science Society of America Journal*, **49**, 1264-1270.
Holland, J. M. 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **103**, 1-25.
Hooks, C. R. R. & Johnson, M. W. 2004. Using undersown clovers as living mulches: effects on yields, lepidopterous pest infestations, and spider densities in a Hawaiian broccoli agroecosystem. *International Journal of Pest Management*, **50**, 115-120.
Humphries, A. W., Latta, R. A., Auricht, G. C. & Bellotti, W. D. 2004. Over-cropping lucerne with wheat: effect of lucerne winter activity on total plant production and water use of the mixture, and wheat yield and quality. *Australian Journal of Agricultural Research*, **55**, 839-848.
Hussain, I., Olson, K. R. & Siemens, J. C. 1998. Long-term tillage effects on physical properties of eroded soil. *Soil Science*, **163**, 970-981.
Hütsch, B. W., Augustin, J. & Merbach, W. 2002. Plant rhizodeposition - an important source for carbon turnover in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **165**, 397-407.
Ilnicki, R. D. & Enache, A. J. 1992. Subterranean clover living mulch: an alternative method of weed control. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **40**, 249-264.
Jakobsen, B. F. & Dexter, A. R. 1988. Influence of biopores on root growth, water uptake and grain yield of wheat (*Triticum aestivum*) based on predictions from a computer model. *Biology and Fertility of Soils*, **6**, 315-321.
Jensen, E. S. 1996. Grain yield, symbiotic N_2 fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil*, **182**, 25-38.
Jensen, E. S. & Hauggaard-Nielsen, H. 2003. How can increased use of biological N_2 fixation in agriculture benefit the environment? *Plant and Soil*, **252**, 177-186.
Jeuffroy, M.-H. & Bouchard, C. 1999. Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. *Crop Science*, **39**, 1385-1393.
Jordan, D., Stecker, J. A., CacnioHubbard, V. N., Li, F., Gantzer, C. J. & Brown, J. R. 1997. Earthworm activity in no-tillage and conventional tillage systems in Missouri soils: a preliminary study. *Soil Biology & Biochemistry*, **29**, 489-491.
Jose, S., Gillespie, A. R. & Pallardy, S. G. 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, **61**, 237-255.
Jumpponen, A., Hogberg, P., Huss-Danell, K. & Mulder, C. P. H. 2002. Interspecific and spatial differences in nitrogen uptake in monocultures and two-species mixtures in north European grasslands. *Functional Ecology*, **16**, 454-461.
Justes, E., Jeuffroy, M. H. & Mary, B. 1997. Wheat, barley, and durum wheat. *In* Lemaire, G. (ed.), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (Germany), pp. 73-91.
Karamanos, A. J., Bilalis, D. & Sidiras, N. 2004. Effects of reduced tillage and fertilization practices on soil characteristics, plant water status, growth and yield of upland cotton. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **190**, 262-276.
KASSA 2006. *Knowledge Assessment and Sharing on Sustainable Agriculture*. [**en ligne**]. Disponible sur kassa.cirad.fr (consulté le 25 août 2006).
Kay, B. D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *In* Steward, B. A. (ed.), *Advances in soil science*, Vol. 12, Springer-Verlag, New-York (USA), pp. 1-52.

Kay, B. D. & VandenBygaart, A. J. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil & Tillage Research*, **66**, 107-118.
Keating, B. A. & Carberry, P. S. 1993. Resource capture and use in intercropping - Solar radiation. *Field Crops Research*, **34**, 273-301.
Khanh, T. D., Xuan, T. D., Chin, D. V., Chung, I. M., Abdelghany, E. A. & Tawata, S. 2006. Current status of biological control of paddy weeds in Vietnam. *Weed Biology and Management*, **6**, 1-9.
Kinsella, J. 1995. The effects of various tillage systems on soil compaction. *In* Soil and Water Conservation Society (ed.), *Farming for a better environment*, Ankeny (USA), pp. 15-17.
Kladivko, E. J. 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil & Tillage Research*, **61**, 61-76.
Kladivko, E. J., Akhouri, N. M. & Weesies, G. 1997. Earthworm populations and species distributions under no-till and conventional tillage in Indiana and Illinois. *Soil Biology & Biochemistry*, **29**, 613-615.
Knudsen, M. T., Hauggaard-Nielsen, H., Jornsgard, B. & Jensen, E. S. 2004. Comparison of interspecific competition and N use in pea-barley, faba bean-barley and lupin-barley intercrops grown at two temperate locations. *Journal of Agricultural Science*, **142**, 617-627.
Kooistra, M. J. & Boersma, O. H. 1994. Subsoil compaction in Dutch marine sandy loams: loosening practices and effects. *Soil & Tillage Research*, **29**, 237-247.
Kribaa, M., Hallaire, V., Curmi, P. & Lahmar, R. 2001. Effect of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate. *Soil & Tillage Research*, **60**, 43-53.
Lahmar, R., de Tourdonnet, S., Barz, P., Düring, R. A., Frielinghaus, M., Kolli, R., Kubat, J., Medvedev, V., Netland, J. & Picard, D. 2006. Prospect for conservation agriculture in northern and eastern European countries. Lessons of KASSA, *In* ESA (ed.), *Proceedings of the ninth ESA Congress*, Warsaw (Poland), in press.
Lal, R., Regnier, E., Eckert, D. J., Edwards, W. W. & Hammond, R. 1991. Expectations of cover crops for sustainable agriculture. *In* Hargrove, W. L. (ed.), *Cover crops for clean water*, Soil and Water Conservation Society, Ankeny (USA), pp. 1-11.
Lamandé, M., Hallaire, V., Curmi, P., Pérès, G. & Cluzeau, D. 2003. Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. *Catena*, **54**, 637-649.
Lampurlanés, J. & Cantero-Martínez, C. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agronomy Journal*, **95**, 526-536.
Lampurlanés, J. & Cantero-Martínez, C. 2006. Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. *Soil & Tillage Research*, **85**, 13-26.
Launay, M., Brisson, N., Corre-Hellou, G., Dibet, A., Crozat, Y., Hauggaard-Nielsen, H., Kasyanova, E., Monti, M. & Dahlmann, C. 2006. Evaluation of the STICS crop model within the INTERCROP EU project to simulate pea-barley intercropping systems, *In* INTERCROP (ed.), *Joint Organic Congress*, Odense (Denmark), [**en ligne**] www.intercrop.dk.
Lavelle, P. 1997. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. *In* Begon, M., Fitter, A. H. (eds.), *Advances in Ecological Research*, Vol. 27, Academic Press Limited, London (UK), pp. 93-132.
Le Bissonnais, Y. 1988. *Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies*, Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, Orléans (France).
Lee, K. E. & Foster, R. C. 1991. Soil fauna and soil structure. *Australian Journal of Soil Research*, **29**, 745-775.

Leterme, P., Manichon, H. & Roger-Estrade, J. 1994. Yield analysis of wheat grown in an on-farm field network in Thymerais (France). *Agronomie*, **14**, 341-361.
Letourneau, D. K. 1990. Mechanisms of predator accumulation in a mixed crop system. *Ecological Entomology*, **15**, 63-69.
Li, L., Sun, J. H., Zhang, F. S., Li, X. L., Yang, S. C. & Rengel, Z. 2001. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Research*, **71**, 123-137.
Liedgens, M., Frossard, E. & Richner, W. 2004. Interactions of maize and Italian ryegrass in a living mulch system: (2) Nitrogen and water dynamics. *Plant and Soil*, **259**, 243-258.
Lin, H. S., McInnes, K. J., Wilding, L. P. & Hallmark, C. T. 1999. Effects of soil morphology on hydraulic properties: I. Quantification of soil morphology. *Soil Science Society of America Journal*, **63**, 948-954.
Liu, X. J., Mosier, A. R., Halvorson, A. D. & Zhang, F. S. 2006. The impact of nitrogen placement and tillage on NO, N_2O, CH_4 and CO_2 fluxes from a clay loam soil. *Plant and Soil*, **280**, 177-188.
Logsdon, S. D., McCoy, E. L., Allmaras, R. R. & Linden, D. R. 1993. Macropore characterization by indirect methods. *Soil Science*, **155**, 316-324.
Luxmoore, R. J. 1981. Micro-, meso-, and macroporosity of soil. *Soil Science Society of America Journal*, **45**, 671-672.
Ma, Y. Q. 2005. Allelopathic studies of common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Weed Biology and Management*, **5**, 93-104.
Magleby, R. 2002. Soil managment and conservation. *In* Heimlich, R. (ed.), *Agricultural resources and environmental indicators*, USDA, Washington (USA), pp. 1-54.
Manichon, H. & Roger-Estrade, J. 1990. Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture. *In* Combe, L., Picard, D. (eds.), *Un point sur... Les systèmes de culture*, INRA éditions, Paris (France), pp. 27-55.
Martin, R. C., Greyson, P. R. & Gordon, R. 1999. Competition between corn and a living mulch. *Canadian Journal of Plant Science*, **79**, 579-586.
Masle, J. 1981a. Elaboration du nombre d'épis d'un peuplement de blé d'hiver en situation de compétition pour l'azote. I. Mise en évidence d'un stade critique pour la montée d'une talle. *Agronomie*, **1**, 623-632.
Masle, J. 1981b. Relations entre croissance et développement pendant la montaison d'un peuplement de blé d'hiver. Influence des conditions de nutrition. *Agronomie*, **1**, 365-374.
Masutti, C. 2004. *Le Dust Bowl, la politique de conservation des ressources et les écologues aux Etats-Unis dans les années 1930,* Thèse de Doctorat, ULP, Strasbourg (France).
McCarty, G. W., Lyssenko, N. N. & Starr, J. L. 1998. Short-term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition. *Soil Science Society of America Journal*, **62**, 1564-1571.
McConkey, B. G., Curtin, D., Campbell, C. A., Brandt, S. A. & Selles, F. 2002. Crop and soil nitrogen status of tilled and no-tillage systems in semiarid regions of Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, **82**, 489-498.
McGarry, D., Bridge, B. J. & Radford, B. J. 2000. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics. *Soil & Tillage Research*, **53**, 105-115.
McGonigle, T. P., Miller, M. H. & Young, D. 1999. Mycorrhizae, crop growth, and crop phosphorus nutrition in maize-soybean rotations given various tillage treatments. *Plant and Soil*, **210**, 33-42.
McKenzie, B. M. & Dexter, A. R. 1988a. Axial pressures generated by the earthworm *Aporrectodea rosea*. *Biology and Fertility of Soils*, **5**, 323-327.
McKenzie, B. M. & Dexter, A. R. 1988b. Radial pressures generated by the earthworm *Aporrectodea rosea*. *Biology and Fertility of Soils*, **5**, 328-332.

McMaster, G. S., Wilhelm, W. W. & Bartling, P. N. S. 1994. Irrigation and culm contribution to yield and yield components of winter wheat. *Agronomy Journal*, **86**, 1123-1127.

McMaster, G. S., Palic, D. B. & Dunn, G. H. 2002. Soil management alters seedling emergence and subsequent autumn growth and yield in dryland winter wheat-fallow systems in the Central Great Plains on a clay loam soil. *Soil & Tillage Research*, **65**, 193-206.

Meynard, J.-M. & David, G. 1992. Diagnosis of crop yield elaboration. *Cahiers Agricultures*, **1**, 9-19.

Meynard, J.-M., Habib, R. & Wallach, D. 1998. *Exposé de présentation du programme cadre "conception et évaluation des systèmes de culture et d'itinéraires techniques"*, UMR Agronomie INRA/INA P-G, Grignon (France).

Meynard, J.-M., Doré, T. & Sebillotte, M. 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *Académie d'Agriculture de France*, **87**, 223-236.

Meynard, J.-M., Réau, R., Robert, D. & Saulas, P. 1996. Evaluation expérimentale des itinéraires techniques. *In* DERF (ed.), *Expérimenter sur les conduites de culture : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation*, Paris (France), pp. 63-72.

Miller, J. J., Sweetland, N. J., Larney, F. J. & Volkmar, K. M. 1998. Unsaturated hydraulic conductivity of conventional and conservation tillage soils in southern Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, **78**, 643-648.

Moreno, G., Obrador, J. J., Cubera, E. & Dupraz, C. 2005. Fine root distribution in Dehesas of Central-Western Spain. *Plant and Soil*, **277**, 153-162.

Munawar, A., Blevins, R. L., Frye, W. W. & Saul, M. R. 1990. Tillage and cover crop management for soil water conservation. *Agronomy Journal*, **82**, 773-777.

Murphy, S. D., Clements, D. R., Belaoussoff, S., Kevan, P. G. & Swanton, C. J. 2006. Promotion of weed species diversity and reduction of weed seedbanks with conservation tillage and crop rotation. *Weed Science*, **54**, 69-77.

Nagabhushana, G. G., Worsham, A. D. & Yenish, J. P. 2001. Allelopathic cover crops to reduce herbicide use in sustainable agricultural systems. *Allelopathy Journal*, **8**, 133-146.

Nassiri, M. & Elgersma, A. 1998. Competition in perennial ryegrass white clover mixtures under cutting. 2. Leaf characteristics, light interception and dry-matter during regrowth. *Grass and Forage Science*, **53**, 367-379.

Naudin, K., Adoum, O., Soutou, G. & Scopel, E. 2005. Labour biologique contre labour mécanique : comparaison de leurs effets sur la structure du sol au Nord Cameroun, *In* ACT Productions (ed.), *Proceedings of the third World Congress on Conservation Agriculture*, Kenya (Nairobi), [**en ligne**] www.act.org.zw/congress/index.htm.

Norwood, C. A. 2000. Dryland winter wheat as affected by previous crops. *Agronomy Journal*, **92**, 121-127.

Oades, J. M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, **56**, 377-400.

Obi, M. E. 1999. The physical and chemical responses of a degraded sandy clay loam soil to cover crops in southern Nigeria. *Plant and Soil*, **211**, 165-172.

Pachepsky, Y. A. & Rawls, W. J. 2003. Soil structure and pedotransfer functions. *European Journal of Soil Science*, **54**, 443-451.

Pagliai, M. & Denobili, M. 1993. Relationships between soil porosity, root development and soil enzyme-activity in cultivated soils. *Geoderma*, **56**, 243-256.

Pagliai, M., Raglione, M., Panini, T., Maletta, M. & Lamarca, M. 1995. The structure of two alluvial soils in Italy after ten years of conventional and minimum tillage. *Soil & Tillage Research*, **34**, 209-223.

Pekrun, C., Kaul, H.-P. & Claupein, W. 2003. Soil tillage for sustainable nutrient management. *In* El Titi, A. (ed.), *Soil tillage in agroecosystems*, CRC Press, New-York (USA), pp. 83-113.

Pérès, G., Cluzeau, D., Curmi, P. & Hallaire, V. 1998. Earthworm activity and soil structure changes due to organic enrichments in vineyard systems. *Biology and Fertility of Soils*, **27**, 417-424.
Philip, J. R. 1969. Theory of infiltration. *Advances in Hydrosciences*, **5**, 215-296.
Pierce, F. J., Fortin, M. C. & Staton, M. J. 1994. Periodic plowing effects on soil properties in a no-till farming system. *Soil Science Society of America Journal*, **58**, 1782-1787.
Power, J. F. & Peterson, G. A. 1998. Nitrogen transformations, utilization, and conservation as affected by fallow tillage method. *Soil & Tillage Research*, **49**, 37-47.
Raiesi, F. 2006. Carbon and N mineralization as affected by soil cultivation and crop residue in a calcareous wetland ecosystem in Central Iran. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **112**, 13-20.
Ranells, N. N. & Wagger, M. G. 1996. Nitrogen release from grass and legume cover crop monocultures and bicultures. *Agronomy Journal*, **88**, 777-782.
Rasband, W. S. 2006. *ImageJ*, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland (USA).
Rasmussen, K. J. 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: a Scandinavian review. *Soil & Tillage Research*, **53**, 3-14.
Recous, S., Machet, J.-M. & Mary, B. 1992. The partitioning of fertilizer-N between soil and crop - Comparison of ammonium and nitrate applications. *Plant and Soil*, **144**, 101-111.
Reid, J. B. & Goss, M. J. 1981. Effect of living roots of different plant species on the aggregate stability of two arable soils. *Journal of Soil Science*, **32**, 521-541.
Rémy, J. C. & Hébert, J. 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture Française*, **63**, 700-710.
Reynolds, W. D. & Elrick, D. E. 1991. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, **55**, 633-639.
Rezaei, S. A., Gilkes, R. J., Andrews, S. S. & Arzani, H. 2005. Soil quality assessment in semiarid rangeland in Iran. *Soil Use and Management*, **21**, 402-409.
Rhoton, F. E., Bruce, R. R., Buehring, N. W., Elkins, G. B., Langdale, C. W. & Tyler, D. D. 1993. Chemical and physical characteristics of four soil types under conventional and no-tillage systems. *Soil & Tillage Research*, **28**, 51-61.
Richard, G., Boizard, H., Roger-Estrade, J., Boiffin, J. & Guerif, J. 1999. Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil & Tillage Research*, **51**, 151-160.
Ringrose-Voase, A. J. 1996. Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant and Soil*, **183**, 27-47.
Roger-Estrade, J., Richard, G., Caneill, J., Boizard, H., Coquet, Y., Defossez, P. & Manichon, H. 2004. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil & Tillage Research*, **79**, 33-49.
Roper, M. M. & Gupta, V. V. S. R. 1995. Management practices and soil biota. *Australian Journal of Soil Research*, **33**, 321-339.
Ross, S. M., King, J. R., O'Donovan, J. T. & Spaner, D. 2005. The productivity of oats and berseem clover intercrops. I. Primary growth characteristics and forage quality at four densities of oats. *Grass and Forage Science*, **60**, 74-86.
Russell, E. P. 1989. Enemies hypothesis: a review of the effect of vegetational diversity on predatory insects and parasitoids. *Environmental Entomology*, **18**, 590-599.
Russell, R. S. 1977. *Plant root systems: their function and interaction with the soil*. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, Maidenhead, Berkshire (UK).
Saber, N. & Mrabet, R. 2002. Impact of no tillage and crop sequence on selected soil quality attributes of a vertic calcixeroll soil in Morocco. *Agronomie*, **22**, 451-459.

Samarajeewa, K. B. D. P., Horiuchi, T. & Oba, S. 2005. Weed population dynamics in wheat as affected by *Astragalus sinicus* L. (Chinese milk vetch) under reduced tillage. *Crop Protection*, **24**, 864-869.

Sánchez-Gíron, V., Serrano, A., Hernánz, J. L. & Navarrete, L. 2004. Economic assessment of three long-term tillage systems for rainfed cereal and legume production in semiarid central Spain. *Soil & Tillage Research*, **78**, 35-44.

Sarthou, J. P., Ouin, A., Arrignon, F., Barreau, G. & Bouyjou, B. 2005. Landscape parameters explain the distribution and abundance of *Episyrphus balteatus* (Diptera : Syrphidae). *European Journal of Entomology*, **102**, 539-545.

SAS Institute Inc. 1999. *SAS OnlineDoc®. Version 8. SAS Institute Cary, NC*. [**en ligne**]. Disponible sur v8doc.sas.com (consulté le 14 juillet 2006).

Sasal, M. C., Andriulo, A. E. & Taboada, M. A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil & Tillage Research*, **87**, 9-18.

Schmidt, O., Clements, R. O. & Donaldson, G. 2003. Why do cereal-legume intercrops support large earthworm populations? *Applied Soil Ecology*, **22**, 181-190.

Sebillotte, M. 1990. Le système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. *In* Combe, L., Picard, D. (eds.), *Un point sur... Les systèmes de culture*, INRA éditions, Paris (France), pp. 165-196.

Sharpley, A. N. & Smith, S. J. 1994. Wheat tillage and water quality in the Southern Plains. *Soil & Tillage Research*, **30**, 33-48.

Shipitalo, M. J. & Protz, R. 1987. Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. *Canadian Journal of Soil Science*, **67**, 445-456.

Shuster, W. D. & Edwards, C. A. 2003. Interactions between tillage and earthworms in agroecosystems. *In* El Titi, A. (ed.), *Soil tillage in agroecosystems*, CRC Press, New-York (USA), pp. 229-260.

Sims, R. W. & Gerard, B. M. 1999. *Earthworms*. FSC Publications, London (UK).

Sinoquet, H. & Cruz, P. 1993. Analysis of light interception and use in pure and mixed stands of *Digitaria decumbens* and *Arachis pintoi*. *Acta Œcologica*, **14**, 327-339.

Sinoquet, H. & Caldwell, R. M. 1995. Estimation of light capture and partitionning in intercropping systems. *In* Sinoquet, H., Cruz, P. (eds.), *Ecophysiology of tropical intercropping*, INRA éditions, Paris (France), pp. 79-97.

Sinoquet, H., Rakocevic, M. & Varlet-Grancher, C. 2000. Comparison of models for daily light partitioning in multispecies canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, **101**, 251-263.

Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. & Denef, K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, **79**, 7-31.

Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S. M., de Moraes Sa, J. C. & Albrecht, A. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, **22**, 755-775.

Smith, P. 2004. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy*, **20**, 229-236.

SSSA 2006. *Soil Science Society of America*. [**en ligne**]. Disponible sur www.soils.org (consulté le 2 août 2006).

Stengel, P. 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol *in situ*. *Annales Agronomiques*, **30**, 27-51.

Stengel, P., Douglas, J. T., Guérif, J., Goss, M. J., Monnier, G. & Cannell, R. Q. 1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling. *Soil & Tillage Research*, **4**, 35-53.

Sustainable Agriculture Network 1998. *Managing cover crops profitability. Second edition*. SAN, Betlsville (USA).
Suwardji, P. & Eberbach, P. L. 1998. Seasonal changes of physical properties of an Oxic Paleustalf (Red Kandosol) after 16 years of direct drilling or conventional cultivation. *Soil & Tillage Research*, **49**, 65-77.
Tan, C. S., Drury, C. F., Reynolds, W. D., Gaynor, J. D., Zhang, T. Q. & Ng, H. Y. 2002. Effect of long-term conventional tillage and no-tillage systems on soil and water quality at the field scale. *Water Science and Technology*, **46**, 183-190.
Teasdale, J. R. 1993. Reduced herbicide weed management systems for no tillage corn (*Zea mays*) in a hairy vetch (*Vicia villosa*) cover crop. *Weed Technology*, **7**, 879-883.
Teasdale, J. R. 1996. Contribution of cover crops to weed management in sustainable agricultural systems. *Journal of Production Agriculture*, **9**, 475-479.
Teasdale, J. R. 2003. Principles and practices of using cover crops in weed management systems. *In* Labrada, R. (ed.), *Weed management for developing countries (Addendum 1)*, Vol. 1, FAO, Roma (Italy), pp. 169-178.
Tebrügge, F. & Düring, R. A. 1999. Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. *Soil & Tillage Research*, **53**, 15-28.
Thorsted, M. D., Olesen, J. & Weiner, J. 2006a. Mechanical control of clover improves nitrogen supply and growth of wheat in winter wheat/white clover intercropping. *European Journal of Agronomy*, **24**, 149-155.
Thorsted, M. D., Weiner, J. & Olesen, J. E. 2006b. Above- and below-ground competition between intercropped winter wheat *Triticum aestivum* and white clover *Trifolium repens*. *Journal of Applied Ecology*, **43**, 237-245.
Thorsted, M. D., Olesen, J. E. & Weiner, J. 2006c. Width of clover strips and wheat rows influence grain yield in winter wheat/white clover intercropping. *Field Crops Research*, **95**, 280-290.
Tilman, D., Reich, P. B. & Knops, J. M. H. 2006. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature*, **441**, 629-632.
Tourdonnet (de), S. 1998. *Maîtrise de la qualité et de la pollution nitrique en production de laitues sous abri plastique : diagnostic et modélisation des effets des systèmes de culture*, Thèse de Doctorat, INA P-G, Paris (France).
Tremmel, D. C. & Bazzaz, F. A. 1995. Plant architecture and allocation in different neighborhoods - Implications for competitive success. *Ecology*, **76**, 262-271.
Triomphe, B. 1998. Systèmes de culture avec des plantes de couverture au Mexique et en Amérique Centrale : expériences, leçons et perspectives futures, *In* ANAE-CIRAD-FAFIALA-FIFAMANORFOFIFA-TAFA (ed.), *Actes de l'atelier international "Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture"*, Antsirabe (Madagascar), pp. 75-86.
Triomphe, B., Dreyfus, F. & de Tourdonnet, S. 2006. Du labour au non-labour : pratiques, innovations et enjeux du Sud au Nord, *In* Centre International de Culture Paysanne et Rurale (ed.), *Techniques de travail de la terre, hier et aujourd'hui, ici et là-bas*, Châteaubriant (France), in press.
Trocherie, F. & Rabaud, V. 2004. Le développement des techniques culturales sans labour. Enquêtes "pratiques culturales", *In* CORPEN (ed.), *Les techniques culturales sans labour : impacts économiques et environnementaux*, Paris (France), pp. 12-16.
Tsubo, M., Walker, S. & Ogindo, H. O. 2005. A simulation model of cereal-legume intercropping systems for semi-arid regions I. Model development. *Field Crops Research*, **93**, 10-22.
Unger, P. W. & Jones, O. R. 1998. Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. *Soil & Tillage Research*, **45**, 39-57.

Valentin, C. & Bresson, L. M. 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, **55**, 225-245.
VandenBygaart, A. J., Protz, R., Tomlin, A. D. & Miller, J. J. 1999. Tillage system effects on near-surface soil morphology: observations from the landscape to micro-scale in silt loam soils of southwestern Ontario. *Soil & Tillage Research*, **51**, 139-149.
Vandermeer, J. H. 1989. *The ecology of intercropping*. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
Vogel, H. J., Hoffmann, H., Leopold, A. & Roth, K. 2005. Studies of crack dynamics in clay soil - I. Experimental methods, results, and morphological quantification. *Geoderma*, **125**, 203-211.
Voss, M. C., Ulber, B. & Hoppe, H. H. 1998. Impact of reduced and zero tillage on activity and abundance of slugs in winter oilseed rape. *Journal of Plant Diseases and Protection*, **105**, 632-640.
Wallace, J. S., Batchelor, C. H., Dabeesing, D. N., Teeluck, M. & Soopramanien, G. C. 1991. A comparison of the light interception and water-use of plant and first ratoon sugar-cane intercropped with maize. *Agricultural and Forest Meteorology*, **57**, 85-105.
Wardle, D. A. 1995. Impacts of disturbance on detritus food webs in agro-ecosystems of contrasting tillage and weed management practices. *In* Begon, M., Fitter, A. H. (eds.), *Advances in Ecological research*, Vol. 26, Academic Press, New-York (USA), pp. 105-185.
Whalley, W. R., Riseley, B., Leeds-Harrison, P. B., Bird, N. R. A., Leech, P. K. & Adderley, W. P. 2005. Structural differences between bulk and rhizosphere soil. *European Journal of Soil Science*, **56**, 353-360.
White, J. G. & Scott, T. W. 1991. Effects of perennial forage-legume living mulches on no-till winter wheat and rye. *Field Crops Research*, **28**, 135-148.
Whittington, W. J. 1968. *Root growth*. Butterworth & Co. Ltd., London (UK).
Willson, H. R. & Eisley, J. B. 1992. Effects of tillage and prior crop on the incidence of 5 key pests on Ohio corn. *Journal of Economic Entomology*, **85**, 853-859.
Wooding, R. A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research*, **4**, 1259-1273.
Wright, A. L. & Hons, F. M. 2005. Tillage impacts on soil aggregation and carbon and nitrogen sequestration under wheat cropping sequences. *Soil & Tillage Research*, **84**, 67-75.
Wright, S. F., Starr, J. L. & Paltineanu, I. C. 1999. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition. *Soil Science Society of America Journal*, **63**, 1825-1829.
Wu, H., Pratley, J., Lemerle, D. & Haig, T. 1999. Crop cultivars with allelopathic capability. *Weed Research*, **39**, 171-180.
Xu, D. & Mermoud, A. 2001. Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. *Soil & Tillage Research*, **60**, 11-19.
Yao, S., Merwin, I. A., Bird, G. W., Abawi, G. S. & Thies, J. E. 2005. Orchard floor management practices that maintain vegetative or biomass groundcover stimulate soil microbial activity and alter soil microbial community composition. *Plant and Soil*, **271**, 377-389.
Young, I. M., Blanchart, E., Chenu, C., Dangerfield, M., Fragoso, C., Grimaldi, M., Ingram, J. & Monrozier, L. J. 1998. The interaction of soil biota and soil structure under global change. *Global Change Biology*, **4**, 703-712.

Annexes

Annexe 1. Description des plantes de couverture du dispositif expérimental de Grignon i
Annexe 2. Itinéraires techniques du dispositif expérimental de Grignon.....iii
Annexe 3. Photographies des traitements expérimentaux à différentes dates xi
Annexe 4. Images binaires illustrant les porosités de certains traitements expérimentaux....xiv

Pour faciliter la lecture des annexes, la signification des abréviations des traitements est rappelée ici : CT, conventional-till management system ; NT, no-till management system ; Fo, no-till management system with *Festuca ovina* L. as a cover crop ; Fr, no-till management system with *Festuca rubra* L. as a cover crop ; Lc, no-till management system with *Lotus corniculatus* L. as a cover crop ; Ml, no-till management system with *Medicago lupulina* L. as a cover crop ; Ms, no-till management system with *Medicago sativa* L. as a cover crop ; Tr, no-till management system with *Trifolium repens* L. as a cover crop.

Annexe 1. *Description des plantes de couverture du dispositif expérimental de Grignon*

Les espèces de couverture retenues pour le dispositif expérimental de Grignon ont été choisies par Stéphane de Tourdonnet après avoir établi un cahier des charges contraignant auquel ces espèces devaient répondre : la plante de couverture, vivace ou se ressemant annuellement, doit concurrencer les adventices sans pénaliser la culture de vente ; elle doit être active pendant la période d'interculture pour pomper les nitrates et limiter les phénomènes d'érosion ; elle doit supporter l'ombre engendrée par la culture commerciale ; la croissance et le développement de ses racines doivent être importants pour participer efficacement à la structuration du sol ; elle peut, éventuellement, être capable de fixer l'azote atmosphérique ; enfin, ses semences doivent être disponibles dans le commerce. Les paragraphes ci-dessous présentent les six espèces de couverture du dispositif expérimental de Grignon, deux graminées et quatre légumineuses.

***Festuca ovina* L. (POACEAE)** ; Fétuque ovine

Hémicryptophyte, la fétuque ovine est une espèce herbacée vivace. De petite taille, entre 20 et 50 cm, elle forme des touffes denses de feuilles fines enroulées sur elles-mêmes. Son système racinaire se développe aisément jusqu'à 25 cm de profondeur. Elle s'installe lentement et peut craindre la concurrence d'adventices plus rapides. De même, sa repousse est lente après un broyage. Adaptée à de nombreux types de sol à l'exception de ceux calcaires, elle est très résistante à la sécheresse et aux basses températures ; sa tolérance à l'ombrage est plus modérée. Elle croît sur des sols dont le pH varie entre 5,5 et 7,5. En région parisienne, sa croissance est très active au printemps et elle fleurit de juin à juillet.

***Festuca rubra* L. ssp. *rubra* cv. Sunset (POACEAE)** ; Fétuque rouge

Connue aux Etats-Unis pour sa lutte efficace contre l'érosion des sols, la fétuque rouge partage avec la fétuque ovine de nombreuses caractéristiques : c'est une espèce herbacée vivace, hémicryptophyte, d'installation lente, qui fleurit de juin à juillet. De plus grande taille que la fétuque ovine, entre 20 et 70 cm, la fétuque rouge se développe en rhizomes sur des types de sol variés (dont ceux calcaires). Pour assurer une croissance et un développement corrects, le pH doit être compris entre 5,0 et 8,0. Plutôt moins résistante à la sécheresse que la fétuque ovine, elle est en revanche très tolérante à l'ombrage. La variété Sunset est traçante avec un système racinaire dense, relativement profond (au minimum 30 cm).

***Lotus corniculatus* L. (FABACEAE)** ; Lotier corniculé, Pied-de-poule

Le lotier corniculé, hémicryptophyte, est une espèce herbacée vivace connue aux Etats-Unis pour son efficacité à lutter contre les phénomènes érosifs. Plante basse, sa hauteur varie en moyenne entre 10 et 30 cm mais elle peut atteindre 70 cm. Son système racinaire pivotant, pourvu de racines latérales fines en surface, peut descendre à plus de 35 cm de profondeur. Le lotier corniculé est peu sensible à la qualité du sol : il se développe aussi bien sur des sols calcaires, caillouteux, anaérobiques ou acides. En sol superficiel et faiblement fertile, le lotier corniculé est plus productif que la luzerne luzelle (*Medicago sativa* L.) ; en sol profond, bien drainé et riche en éléments minéraux, l'inverse est observé. Le lotier corniculé s'installe plutôt lentement mais sa croissance et sa refloraison sont rapides après un broyage. Il est très tolérant aux basses

températures, moyennement tolérant à la sécheresse et intolérant à l'ombrage. En région parisienne, sa floraison est remarquée de mai à septembre.

***Medicago lupulina* L. (FABACEAE)** ; Minette, Luzerne lupuline

Plante annuelle, la minette peut être parfois pluriannuelle de courte durée grâce à des bourgeons adventifs présents sur ses racines. Thérophyte, elle se comporte en annuelle d'été lorsqu'elle germe à la sortie de l'hiver ou en annuelle d'hiver lorsqu'elle germe à l'automne. Dans ce dernier cas, elle passe l'hiver en rosette. Le port de la minette est très étalé au sol, très recouvrant et même étouffant. Ses tiges, très ramifiées, de 2 à 50 cm de long, peuvent être couchées ou érigées. Sa racine pivotante est très grêle et peu ramifiée. La minette ne tolère ni la sécheresse ni l'ombrage ; en revanche, elle résiste à des températures négatives. Peu sensible au pH, on peut la trouver sur des terrains calcaires. D'installation lente, sa repousse l'est aussi après un broyage. En Ile-de-France, sa floraison s'observe d'avril à septembre. Les gousses sont plus ou moins réniformes et mesurent 2 à 3 mm de long ; elles contiennent une seule graine.

***Medicago sativa* L. (FABACEAE)** ; Luzerne luzelle, luzerne cultivée

Herbacée, vivace par ses tiges souterraines ramifiées, la luzerne luzelle est une plante hémicryptophyte de taille moyenne ; sa hauteur varie entre 30 et 90 cm. Son système racinaire pivotant peut pénétrer profondément dans le sol (jusqu'à plus de 60 cm). S'implantant rapidement sur de nombreux types de sol, elle requiert cependant une fertilité élevée pour une production maximale ; de même, elle préfère les sols friables, profonds et bien drainés. Tolérante aux sols calcaires, elle ne se développe pas à des pH inférieurs à 6,5. Après un broyage, elle croit et refleurit rapidement. La luzerne luzelle est résistante à la sécheresse malgré des besoins en eau élevés. Par contre, elle est intolérante à l'ombrage. Sa floraison a lieu de juin à septembre. Sa capacité à fixer l'azote atmosphérique est élevée.

***Trifolium respens* L. cv. Rivendel (FABACEAE)** ; Trèfle blanc, trèfle rampant

Espèce herbacée vivace, le trèfle blanc est une plante hémicryptophyte très basse (de 7 à 25 cm de hauteur). Sa multiplication par stolons crée un tapis compact après une installation plutôt lente. Faiblement tolérante à la sécheresse et à l'ombrage, cette plante est sensible à la fertilité du sol dont les teneurs en phosphore et potassium doivent être élevées pour une croissance et un développement optimaux. Par contre, elle résiste à des températures très basses et à des pH compris entre 5,2 et 8,0. La floraison du trèfle blanc se déroule de mai à novembre. Après un broyage, il croit et refleurit rapidement. Comme la luzerne luzelle, sa capacité à fixer l'azote atmosphérique est élevée. Ses racines peuvent atteindre 30 cm de profondeur.

Les informations fournies dans cette annexe ont été recueillies à partir des documents suivants :

- **Hutt, C. 2002.** *Mise en place d'un essai pour l'étude de systèmes de culture sous couvert végétal permanent*, mémoire de DEA, Paris XII, Paris (France).
- **Orsay 2006.** *Flore virtuelle d'Orsay, Ecologie des populations et des communautés.* [**en ligne**]. Disponible sur http://www.ese.u-psud.fr/bases/flore_web (consulté le 9 août 2006).
- **USDA 2006.** *United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.* [**en ligne**]. Disponible sur http://plants.usda.gov (consulté le 9 août 2006).

Annexe 2. *Itinéraires techniques du dispositif expérimental de Grignon*

Les informations techniques recueillies au cours des trois campagnes culturales du dispositif expérimental de Grignon font partie des premières références sur la conduite des SCV avec cultures associées en climat tempéré. Pour cette raison, il me semble utile de décrire les pratiques culturales dont l'adaptation paraît être une étape indispensable à la réussite de ces systèmes de culture : il s'agit essentiellement de la gestion de la fertilisation azotée des espèces associées, de la gestion de l'espèce de couverture et de la gestion des adventices. Chacune de ces techniques culturales a été raisonnée en fonction du traitement expérimental. A l'inverse, les autres pratiques culturales n'ont pas été modifiées d'une situation à l'autre. Par exemple, nous avons opté pour une protection chimique à large spectre du blé vis-à-vis des maladies et des ravageurs sur l'ensemble de la parcelle agricole. Ainsi, le déclenchement d'une protection phytosanitaire a été décidé en fonction (i) des avertissements agricoles édités périodiquement par le Service Régional de la Protection des Végétaux d'Ile de France et, (ii) des observations bihebdomadaires de l'état sanitaire de la parcelle. Toutefois, cette protection chimique n'a pas empêché les attaques de la mouche grise dans les associations blé/graminée durant l'hiver de l'expérimentation 3 (Chapitre II–3.2., p. 48). En fait, la seule lutte efficace contre ces insectes implique un traitement insecticide des semences, non effectué sur celles utilisées dans ce travail de thèse. Bien que le blé soit l'hôte préférentiel de la mouche grise, les autres graminées le sont aussi ; les fétuques, présentes toute l'année, auraient favorisé l'infestation du blé par la mouche grise.

Après avoir défini la stratégie adoptée pour modifier chacune des techniques culturales liées au traitement expérimental, des tableaux synthétisant les itinéraires techniques réalisés sur chaque situation culturale au cours des trois campagnes du blé sont présentés.

Gestion de la fertilisation azotée dans un SCV avec cultures associées. Le raisonnement de la fertilisation azotée des espèces associées s'est appuyé sur le bilan prévisionnel, issu des travaux de Rémy & Hébert (1977)[1], qui permet d'évaluer par le calcul les doses d'engrais azoté à apporter en plus des fournitures du sol pour satisfaire les besoins d'un couvert végétal. Si la plupart des termes du bilan prévisionnel ont été estimés indépendamment du traitement expérimental, deux difficultés majeures ont été rencontrées pour appliquer cette méthode à des associations culturales conduites sur un sol non travaillé : l'estimation des fournitures du sol, en particulier celles issues de la minéralisation ; l'estimation des besoins en azote des cultures associées.

Pour estimer la minéralisation, l'étude bibliographique a montré que les quantités d'azote minéralisé étaient souvent proches entre un sol labouré et un sol non travaillé, contrairement à la dynamique de ce phénomène (Chapitre I–1.2.1., p. 17). Comme nous disposions seulement d'informations permettant de prévoir les quantités d'azote minéralisé dans un sol labouré pour la parcelle agricole de Grignon, nous avons considéré qu'à l'échelle du cycle cultural du blé, les quantités d'azote minéralisé étaient identiques d'une situation culturale à l'autre.

Les besoins du blé par unité de production sont connus ainsi que le potentiel de rendement de cette culture pour la parcelle agricole du dispositif expérimental. Par conséquent, la détermination des besoins du blé n'a posé aucune difficulté, quelle que soit la situation culturale, sous

[1] **Rémy, J. C. & Hébert, J. 1977.** Le devenir des engrais azotés dans le sol. *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture Française*, **63**, 700-710.

l'hypothèse que ces besoins sont identiques en culture pure et en cultures associées. Par contre, l'appréciation des besoins azotés des plantes de couverture est beaucoup plus compliquée parce que les besoins par unité de production des espèces sélectionnées pour le dispositif expérimental de Grignon ne sont pas toujours référencés et que leur potentiel de rendement est difficilement estimable en association, sur une parcelle n'ayant jamais porté ces cultures. Ainsi, en première année expérimentale, les besoins des plantes de couverture n'ont pas été pris en compte mais les apports correspondant aux besoins estimés du blé ont été majorés ce qui veut dire que l'objectif de rendement du blé était volontairement supérieur au potentiel de la parcelle. Pour les années suivantes, grâce aux mesures de biomasse et de teneur en azote total, nous avons calculé les quantités d'azote absorbé par les espèces de couverture l'année n que nous avons considéré comme étant leur besoin pour l'année $n + 1$, arbitrairement minoré pour les légumineuses.

Les apports ont été fractionnés en deux ou trois fois (pendant le tallage, au stade épi 1 cm, pendant la montaison) selon l'année expérimentale. Toutefois, un apport précoce a été réalisé en supplément pour les associations blé/graminée en expérimentation 2, suite aux observations visuelles de l'état des cultures indiquant une possible carence azotée du blé.

L'importance des apports n'a pas empêché l'apparition de carences azotées (Chapitre III–3.4., p. 65). Pourtant, cela ne semble pas dû à une sous-estimation des besoins puisque d'une part, les quantités absorbées par les cultures pures ou associées sont inférieures aux quantités apportées et que d'autre part, les reliquats azotés à la récolte sont toujours élevés quel que soit le traitement expérimental. Cela correspondrait donc à un problème d'absorption, décrit dans le Chapitre III–3.4., indépendant de la situation culturale.

Gestion de l'espèce de couverture et des adventices dans un SCV avec cultures associées. Au cours de la première année d'expérimentation, la croissance et le développement des espèces de couverture n'ont pas été contrôlés pendant la culture du blé afin d'apprécier leur efficacité à lutter seules contre les adventices, sans protection herbicide du blé ; toutefois, les légumineuses, qui se sont fortement développées entre mars 2002 (semis) et octobre 2002, ont été freinées en utilisant un désherbant juste avant l'implantation du blé. Si cette première expérimentation a montré l'efficacité des légumineuses à contrôler les adventices contrairement aux graminées, elle a aussi montré qu'une croissance et un développement importants des espèces de couverture étaient néfastes au rendement de la culture commerciale. Par conséquent, il a été décidé pour les années suivantes, de ralentir les plantes de couverture en utilisant un moyen chimique (herbicide) ou mécanique (broyage) ; de plus, si une plante de couverture n'arrivait pas à maîtriser les populations d'adventices, le recours aux herbicides en cours de culture était possible. Toute la difficulté était de raisonner le contrôle et la protection herbicide selon l'espèce de couverture et la flore adventice qui lui était associée. Des choix difficiles ont dû être pris tels que : comment détruire des graminées adventices dans un couvert de fétuque ? ; comment détruire des dicotylédones dans un couvert de légumineuse ? ; à quelle dose appliquer un herbicide pour ralentir un couvert sans le détruire ? Cela a conduit à utiliser une large gamme de produits phytosanitaires, répertoriés avant les tableaux des itinéraires techniques. Dans ces derniers, l'efficacité de chaque produit (ou broyage) est commenté et signalé par un code couleur selon que l'objectif assigné a été atteint ou non (couleur verte : objectif atteint ; couleur orangée : objectif partiellement atteint ; couleur rouge : objectif non atteint).

Description des produits phytosanitaires utilisés

Type	Spécialité commerciale	Matière active	Concentration[z] (g L^{-1})
Fongicide	Epopée	Prochloraze	267.1
		Tébuconazole	132.5
	Evidan	Fluquinconazole	54
		Prochloraze	174
	Opus Team	Epoxiconazole	84
		Fenpropimorphe	250
	Sphère	Cyproconazole	80
		Trifloxystrobine	187.5
	Unix	Cyprodinyl	75%
Herbicide	Allié	Metsulfuron méthyle	20%
	Atlantis WG	Mesosulfuron-méthyle	3%
		Iodosulfuron-méthyl-sodium	0.6%
	Gramoxone plus	Diquat	50
		Paraquat	100
	Gratil	Amidosulfuron	75%
	Oxalis	Glyphosate	360
	Primus	Florasulam	50
	Printazol N	2,4-D	330
		2,4-MCPA	285
		Piclorame	15
	Quartz GT	Diflufénicanil	62.5
		Isoproturon	500
	Roundup expert	Glyphosate	360
	Zeus	Méfenpyr	40
		Diclofop-méthyl	250
		Fenoxaprop-P-éthyl	20
Huile	Oléis	Huile minérale paraffinique	846.45
Insecticide	Décis	Deltaméthrine	25
Molluscicide	Skipper	Thiodicarbe	4%

[z]Sauf indication contraire, la concentration des matières actives dans les spécialités commerciales est exprimée en g L^{-1}.

EXPERIMENTATION 1	CT	NT	Fo	Fr	Lc	Ml	Ms	Tr
Fertilisation P–K								
0–25–25 (400 kg ha^{-1}) le 13/09/02	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Freinage des couverts/adventices avant semis								
Roundup expert (3 L ha^{-1}) le 18/10/02		☒						
Gramoxone plus (5 L ha^{-1}) le 18/10/02					☒	☒	☒	☒
Travail du sol								
Labour le 21/10/02	☒							
2 passages de herse rotative le 21/10/02	☒							
Semis de la culture de vente								
Blé cv. Isengrain (220 grains m^{-2}) le 21/10/02	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Fertilisation azotée								
Ammonitrate, apport 1 (kg ha^{-1}) le 5/03/03	150	150	150	150	150	150	150	150
Ammonitrate, apport 2 (kg ha^{-1}) le 3/04/03	450	450	450	450	450	450	450	450
Protection fongique								
Sphère (0,5 L ha^{-1}) le 16/05/03	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Récolte de la culture de vente								
Moisson le 17/07/03	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Broyage des pailles le 21/07/03	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒

Cet herbicide, non sélectif, a permis de freiner, avant le semis du blé, ces plantes de couverture fortement développées mais dès la mi-janvier, elles sont reparties en croissance active.

EXPERIMENTATION 2	CT	NT	Fo	Fr	Lc	Ml	Ms	Tr
Fertilisation P–K								
0–25–25 (400 kg ha^{-1}) le 2/09/03	X	X	X	X	X	X	X	X
Freinage des couverts/adventices avant semis								
Broyage au gyrobroyeur le 10/10/03					X	X	X	X
Gramoxone plus (4 L ha^{-1}) le 28/10/03			X	X				
Oxalis (12 L ha^{-1}) le 28/10/03		X						
Travail du sol								
Labour le 28/10/03	X							
2 passages de herse rotative le 28/10/03	X							
Semis de la culture de vente								
Blé cv. Isengrain (270 grains m^{-2}) le 29/10/03	X	X	X	X	X	X	X	X
Protection contre les limaces								
Skipper (3 kg ha^{-1}) le 29/10/03	X	X	X	X	X	X	X	X
Fertilisation azotée								
Ammonitrate (kg ha^{-1}), apport 0, le 15/01/04			150	150				
Ammonitrate (kg ha^{-1}), apport 1, le 11/03/04	150	150	150	150	150	150	150	150
Ammonitrate (kg ha^{-1}), apport 2, le 31/03/04	300	300	255	255	300	300	300	300
Ammonitrate (kg ha^{-1}), apport 3, le 14/05/04	210	210	210	210	210	210	210	210

Le broyage permet effectivement de réduire la biomasse de ces légumineuses au moment du semis du blé mais son intérêt est mitigé car :
- Il n'empêche pas une reprise importante de la croissance de la luzerne (Ms) dès les premiers jours de mars (1,9 t/ha au 29/03/04) ;
- La minette (Ml) et le trèfle (Tr), trop ralentis, ne sont pas efficaces pour lutter contre le géranium et le ray-grass qui se développent dès la mi-janvier.

EXPERIMENTATION 2 (suite)	CT	NT	Fo	Fr	Lc	Ml	Ms	Tr
Désherbage en cours de culture								
Zeus (1,5 L ha^{-1}) + Oléis (1 L ha^{-1}) le 15/01/04					X	X	X	X
Primus (0,1 L ha^{-1}) le 31/03/04	X	X	X	X				
Zeus (2 L ha^{-1}) le 16/04/04		X				X		X
Freinage des couverts en cours de culture								
Gratil (22,5 g ha^{-1}) le 16/04/04						X	X	
Allié (10 g ha^{-1}) le 29/04/04							X	
Protection fongique								
Evidan (1,2 L ha^{-1}) le 29/04/04	X	X	X	X	X	X	X	X
Unix (0,7 kg ha^{-1}) le 29/04/04	X	X	X	X	X	X	X	X
Epopée (1,2 L ha^{-1}) le 27/05/04	X	X	X	X	X	X	X	X
Protection insecticide								
Décis (4 L ha^{-1}) le 17/06/04	X	X	X	X	X	X	X	X
Récolte de la culture de vente								
Moisson le 26/07/04	X	X	X	X	X	X	X	X
Broyage des pailles le 27/07/04	X	X	X	X	X	X	X	X

Tous ces herbicides sont sélectifs du blé.
Primus est un herbicide antidicotylédones.
Zeus est un herbicide antigraminées.

La lutte contre les adventices a été très efficace en Fo et Fr (cible : gaillet, pissenlit) comme en Lc et Ms (cible : ray-grass).

La forte infestation par le ray-grass en Ml et Tr n'a jamais pu être totalement maîtrisée : à la maturité physiologique du blé, la biomasse des adventices est supérieure à 2,0 t/ha dans les traitements Ml et Tr.

Ces herbicides antidicotylédones, sélectifs du blé, ont été appliqués à demi-dose pour freiner les plantes de couverture sans les détruire.
Cependant, ils ont été pulvérisés trop tardivement et/ou à une dose trop faible pour ralentir efficacement la croissance et le développement de ces plantes de couverture.

EXPERIMENTATION 3	CT	NT	Fo	Fr	Lc	Ml	Ms	Tr
Freinage des couverts/adventices avant semis								
Roundup expert (9 L ha^{-1}) le 9/09/04		X						
Broyage au gyrobroyeur le 7/10/04		X						
Gramoxone plus (3,5 L ha^{-1}) le 18/10/04			X	X	X	X	X	X
Travail du sol								
Labour le 18/10/04	X							
2 passages de herse rotative le 18/10/04	X							
Semis de la culture de vente								
Blé cv. Isengrain (270 grains m^{-2}) le 18/10/04	X	X	X	X	X	X	X	X
Protection contre les limaces								
Skipper (3 kg ha^{-1}) le 18/10/04	X	X	X	X	X	X	X	X
Fertilisation azotée								
Ammonitrate (kg ha^{-1}), apport 1, le 28/02/05	210	210	210	210	210	210	210	210
Ammonitrate (kg ha^{-1}), apport 2, le 31/03/05	225	225	330	330	225	225	225	225
Ammonitrate (kg ha^{-1}), apport 3, le 18/04/05					165	165	270	165
Ammonitrate (kg ha^{-1}), apport 3, le 19/05/05	240	240	240	240				

Contrairement à la première année expérimentale, cet herbicide a permis de ralentir les plantes de couverture pendant toute la période hivernale.

EXPERIMENTATION 3 (suite)	CT	NT	Fo	Fr	Lc	Ml	Ms	Tr
Désherbage en cours de culture								
Primus (0,15 L ha^{-1}) le 4/01/05			⊠	⊠				
Zeus (1,5 L ha^{-1}) + Oléis (1 L ha^{-1}) le 4/01/05					⊠	⊠	⊠	⊠
Quartz GT (2,5 L ha^{-1}) le 7/01/05	⊠	⊠						
Allié (10 g ha^{-1}) le 16/03/05	⊠	⊠	⊠	⊠				
Atlantis WG (0,3 kg ha^{-1}) le 16/03/05	⊠	⊠	⊠	⊠				
Zeus (2 L ha^{-1}) le 16/03/05					⊠	⊠	⊠	⊠
Zeus (1 L ha^{-1}) le 20/04/05			⊠	⊠				
Zeus (2 L ha^{-1}) le 20/04/05	⊠	⊠			⊠	⊠	⊠	⊠
Freinage des couverts en cours de culture								
Allié (10 g ha^{-1}) le 16/03/05					⊠	⊠	⊠	⊠
Printazol N (0,7 L ha^{-1}) le 29/04/05							⊠	
Protection fongique								
Opus Team (0,8 L ha^{-1}) le 4/05/05	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠
Sphère (0,5 L ha^{-1}) le 31/05/05	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠
Récolte de la culture de vente								
Moisson le 14/07/05	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠

Tous ces herbicides sont sélectifs du blé.
Atlantis WG et Quartz GT sont des herbicides à large spectre.
Globalement, l'année expérimentale est marquée par une pression assez forte des adventices, nécessitant un recours important aux herbicides.

***Lc et Ms*. Le désherbage est surtout préventif.**

***Fo et Fr*. L'attaque de la mouche grise a pénalisé les fétuques dont l'efficacité dans la lutte contre les adventices a diminué : par conséquent, des herbicides ont été utilisés contre des dicotylédones mais aussi contre des graminées. Pour détruire celles-ci sans tuer les fétuques, la dose de Zeus du 20/04/05 a été réduite par rapport à celle apportée dans les autres traitements expérimentaux.**

***Ml et Tr*. Comme l'année passée, ces traitements expérimentaux sont infestés par le ray-grass mais la récurrence des passages de Zeus a permis de réduire le peuplement de cette adventice.**

Allié, pulvérisé dès la mi-mars, à demi-dose, a ralenti les plantes de couverture.

Pour Ms, une application de Printazol N, aux trois-quarts de la dose, a empêché la reprise de croissance de la luzerne jusqu'à la récolte du blé.

Annexe 3. *Photographies des traitements expérimentaux à différentes dates*

EXPERIMENTATION 1 : DU 21/10/02 AU 17/07/03

	6/12/02	4/04/03	6/06/03
CT			
NT			
Fo			
Fr			
Lc			
Ml			
Ms			
Tr			

EXPERIMENTATION 2 : DU 29/10/03 AU 26/07/04

	21/11/03	28/04/04	16/06/04
CT			
NT			
Fo			
Fr			
Lc			
Ml			
Ms			
Tr			

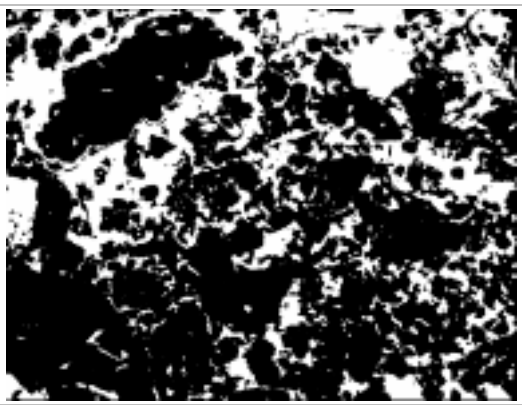
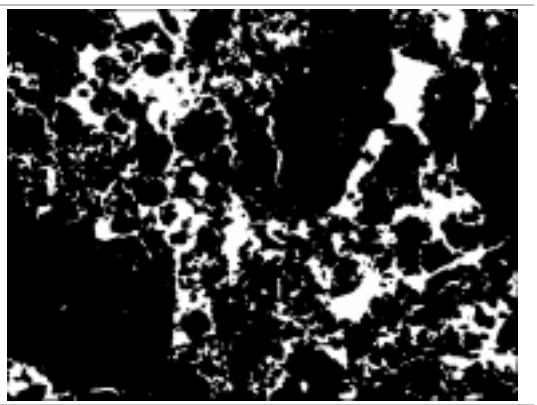
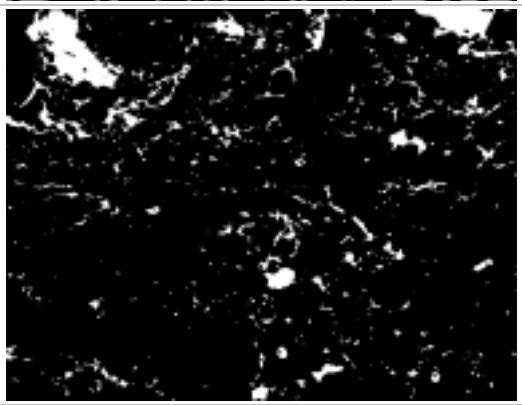
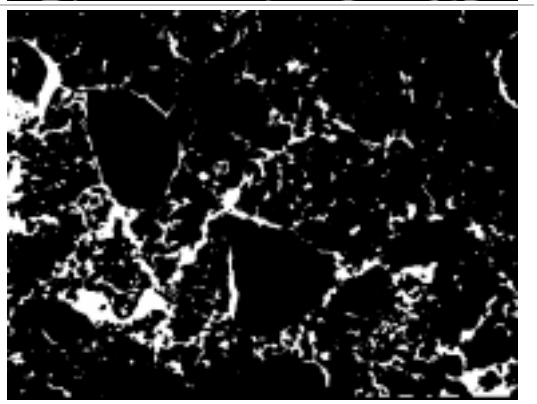
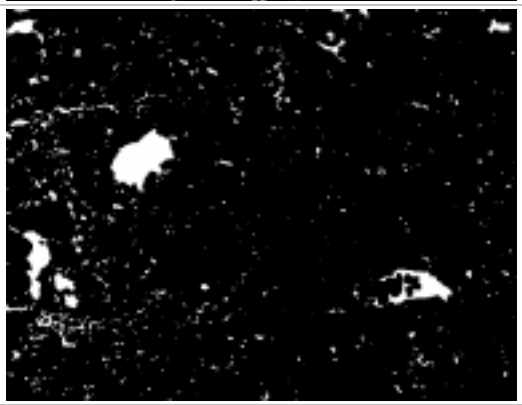
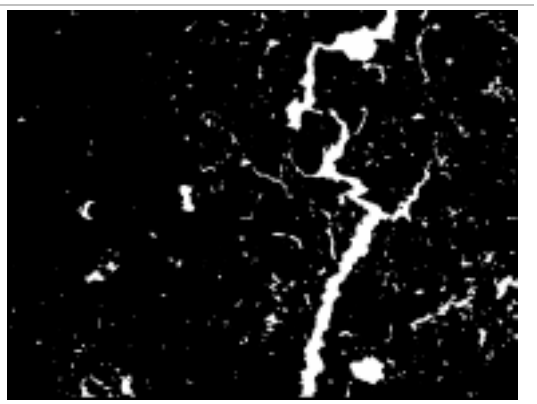
EXPERIMENTATION 3 : DU 18/10/04 AU 14/07/05

	15/11/04	13/04/05	28/06/05
CT			
NT			
Fo			
Fr			
Lc			
Ml			
Ms			
Tr			

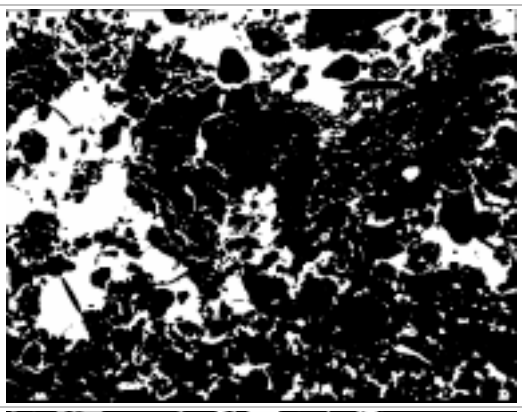
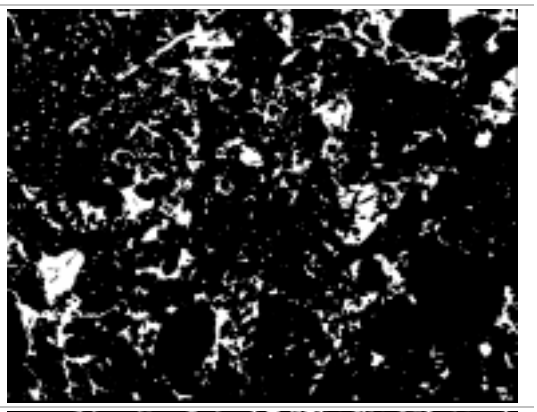
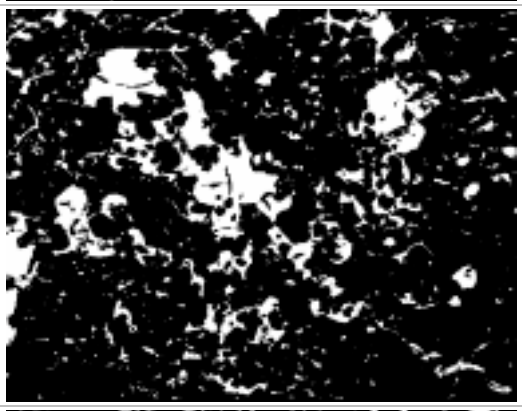
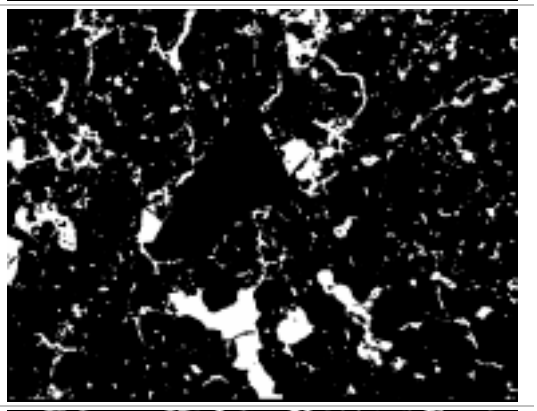
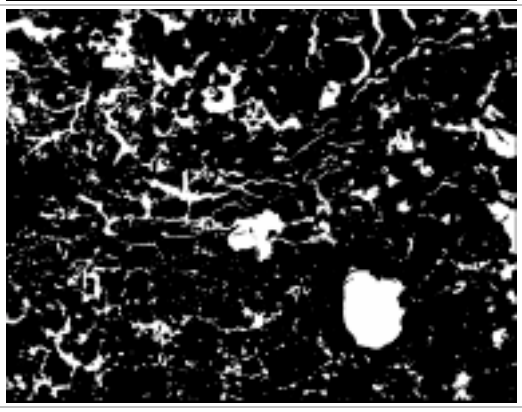
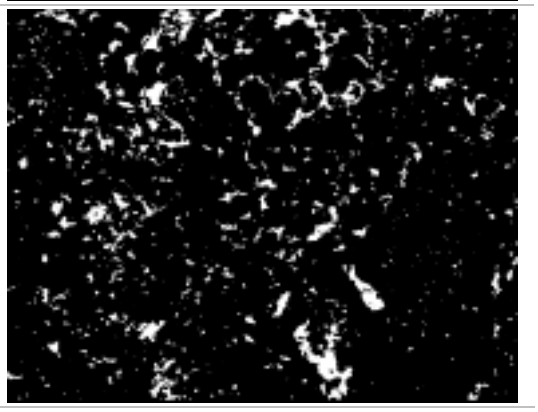
Annexe 4. *Images binaires illustrant les porosités de certains traitements expérimentaux*

Les images binaires ci-dessous sont des exemples de porosités observables par l'analyse morphologique de blocs de sol non remanié. Les pores du sol apparaissent en blanc alors que la matrice apparaît en noir. Les traitements présentés sont CT, NT et Lc.

NOVEMBRE 2004

	Horizon de surface [0–10 cm]	Horizon sous-jacent [10–20 cm]
CT		
NT		
Lc		

MAI 2005

	Horizon de surface [0–10 cm]	Horizon sous-jacent [10–20 cm]
CT		
NT		
Lc		

ABSTRACT

Functioning of no-till winter wheat (*Triticum aestivum* L.) populations intercropped with different living cover crops in temperate climate

Matthieu CAROF
Institut National Agronomique Paris–Grignon
October 2006

Innovative crop management systems have to be proposed to achieve objectives of modern agriculture such as productivity, respect of the environment, and profitability. No-till crop management systems with a living cover crop are of primary interest since they can reach these objectives. If these crop management systems really present some advantages in tropical climate, they are almost unexplored in temperate climate.

This work proposes to increase scientific knowledge about these particular crop management systems in order to facilitate their conception and evaluation in temperate climate. The study was based on field experiments carried out during three cash crop growing seasons in Grignon (Yvelines, France) since 2002. Treatments involved a winter wheat (*Triticum aestivum* L.) crop grown (i) on its own on a conventional-till soil, (ii) on its own on a no-till soil, and (iii) on a no-till soil with six different living cover crops. By associating an analytic approach to a systemic one, global aim of this work was to comprehend, according to the cover crop species, (i) the effects of the different no-till/living cover crop management systems on cash crop yield while underlying sensitivity periods to stresses for this crop, (ii) competition or facilitation for light and nitrogen between intercropped species, and (iii) short-term changes in soil structure as well as hydraulic properties.

This study showed that living cover crops may reduce, sometimes importantly, wheat grain yield, depending mainly on the cover crop species, their management practices, and the climatic conditions; wheat sensitivity periods to stresses depended also on these three factors. Furthermore, the study highlighted that competition for light between intercropped species was the most detrimental process to wheat grain yield.
On a short-term basis, soil structure little changed from a no-till soil without a living cover crop to a no-till soil with a living cover crop. Nevertheless, the study showed that hydraulic properties may change according to the absence or the presence of a living cover crop on a no-till soil without revealing important variations of these soil hydraulic properties from one living cover crop species to another.

The work increased scientific and technical knowledge on the functioning of no-till/living cover crop management systems in temperate climate. It showed feasibility as well as risks of these crop management systems; it allowed us to identify new research axis to increase knowledge and to provide some references in order to reduce these risks.

Keywords: no-tillage, living cover crop, winter wheat (*Triticum aestivum* L.), intercropping, yield component, interspecific competition, radiation interception, nitrogen status, soil structure, porosity, hydraulic property

RESUME

Fonctionnement de peuplements en semis direct associant du blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.) à différentes plantes de couverture en climat tempéré

Matthieu CAROF
Institut National Agronomique Paris–Grignon
Octobre 2006

Des systèmes de culture innovants doivent être proposés pour répondre aux nouveaux objectifs de l'agriculture qui devront allier productivité, respect de l'environnement et rentabilité économique. Les systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV) avec cultures associées permettraient d'atteindre ces objectifs. Si ces systèmes ont en effet montré des intérêts en climat tropical, ils sont presque inexistants en climat tempéré.

Cette thèse se propose d'accroître les connaissances scientifiques sur ces systèmes particuliers pour faciliter leur conception et leur évaluation en climat tempéré. Le travail repose sur un dispositif expérimental mis en place à Grignon (Yvelines, France) en 2002 pour trois campagnes culturales. Du blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.) est semé (i) dans un sol labouré, (ii) directement dans les résidus de la culture précédente et, (iii) directement dans six plantes de couverture différentes. En combinant sur ce dispositif une double approche, systémique et analytique, les objectifs de la thèse sont de comprendre, selon l'espèce de couverture, (i) l'impact des différents SCV avec cultures associées sur le rendement de la culture de vente en mettant en évidence les phases de sensibilité aux stress de cette culture, (ii) les relations de compétition et/ou de facilitation pour l'azote et la lumière entre les espèces associées et, (iii) l'évolution, à court terme, de la structure du sol et de ses propriétés hydriques.

Ce travail montre que la présence d'une plante de couverture peut réduire, parfois fortement, le rendement de la culture de vente, différemment selon l'espèce de couverture, sa conduite technique et les conditions climatiques ; les phases d'élaboration du rendement qui sont perturbées dans ces situations culturales dépendent aussi de ces trois facteurs. De plus, l'étude met en évidence que la compétition pour le rayonnement lumineux entre les espèces associées est le processus le plus défavorable au rendement du blé.
A court terme, il n'apparaît pas de différences marquées entre la structure d'un sol non travaillé sans plante de couverture et celle d'un sol non travaillé avec une plante de couverture. Toutefois, l'étude révèle que les propriétés hydriques peuvent être modifiées selon l'absence ou la présence d'une plante de couverture sur un sol non travaillé sans démontrer de variations importantes de ces propriétés selon l'espèce de couverture.

La thèse fournit des informations scientifiques et techniques sur le fonctionnement, en climat tempéré, de peuplements associant sur un sol non travaillé, une culture de vente à différentes plantes de couverture. Elle montre la faisabilité mais aussi les risques des SCV avec cultures associées ; elle permet d'identifier des axes de recherche pour compléter les connaissances et fournir des références pour réduire ces risques.

Mot-clés : semis direct, plante de couverture, blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.), association culturale, SCV, composante du rendement, compétition interspécifique, interception du rayonnement, statut azoté, structure du sol, porosité, propriété hydrique