



HAL
open science

Semis direct sous couverture végétale (SCV) en climat méditerranéen

M.R. Khaledian

► **To cite this version:**

M.R. Khaledian. Semis direct sous couverture végétale (SCV) en climat méditerranéen. Sciences de l'environnement. Doctorat Eaux continentales et Société, Université Montpellier II, 2009. Français. NNT: . tel-02591783

HAL Id: tel-02591783

<https://hal.inrae.fr/tel-02591783v1>

Submitted on 15 May 2020

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

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

**UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC**

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

Discipline : Eaux continentales et Société

***Ecole Doctorale : Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences,
Environnement (SIBAGHE)***

présentée et soutenue publiquement

par

MohammadReza KHALEDIAN

Le 6 février 2009

Titre :

Semis direct sous Couverture Végétale (SCV) en climat méditerranéen

JURY

M. Philippe DE REFFYE	, Président
M. Jean-Claude MAILHOL	, Directeur de Thèse
M. Pierre RUELLE	, Codirecteur de Thèse
M. Luis Santos PEREIRA	, Rapporteur
M. Rafael ANGULO-JARAMILLO	, Rapporteur
M. François AFFHOLDER	, Examineur
M. Florent MARAUX	, Examineur

At Hoda,

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	12
CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE	14
1.1 Introduction	15
1.2. Les motivations à l'origine des travaux sur SCV, le PCSI	16
1.3. Le projet systèmes de culture sous couverture végétale "SCV"	17
1.4. Les principaux chapitres de la thèse	19
CHAPITRE II : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	20
2. Synthèse bibliographique et définition des axes de recherche	21
2.1. Système de culture conventionnel (CT).....	21
2.2. Système de culture semis direct sous couverture végétale (SCV).....	22
2.3. Les techniques culturales sans labour (TCSL) dans le monde, en Europe et en France	24
- Un développement considérable aux Etats Unis et en Amérique Latine	24
- Les TCSL en Europe : un faible développement.....	25
- Les TCSL en France : un développement récent.....	25
2.4. Les avantages et les inconvénients du système SCV	26
2.5. Les aspects socio-économiques	27
- La subvention.....	29
- Le coût social.....	30
- La culture et la tradition	30
2.6. Les impacts environnementaux.....	30
-Structure du sol, érosion et ruissellement.....	30

-Impacts sur l'activité biologique du sol	32
- Qualité de l'air	34
- Baisse de l'émission de CO2 et fixation du C dans le sol.....	34
- Biodiversité.....	35
2.7. Aspects agronomiques.....	36
- Impacts sur la flore adventice.....	37
- Les principaux mécanismes de contrôle d'adventice mis en jeu en SCV.....	38
- Impacts sur les maladies et sur les parasites des cultures	40
- Avantages	41
- Inconvénients	42
2.8. Effets sur l'humidite et la température du sol.....	42
2.9. Bilan d'azote	48
2.10. Conclusion de la partie bibliographie.....	52
CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES	53
3.1. Etude expérimentale	54
3.1.1. Le contexte expérimental.....	54
3.2. Les campagnes de mesure 2000-2007	55
3.3. Blé dur	55
3.3.1. La préparation de la campagne de mesure 2004/2005.....	56
-Campagne 2004/2005 : culture de support : le blé dur <i>Triticum Durum</i> , variété "Artimond"	56
3.3.2. Les semis et les interventions pendant la campagne	57
3.3.3. Les Traitements mis en place	57
3.3.4. Campagne 2005/2006	57
-Culture de support : le blé dur, variété " Dakter "	57
3.3.5. La préparation de la campagne 2005/2006	59

3.3.6. Les semis et les interventions pendant la campagne	59
3.3.7. La récolte de blé dur (2004/2005 et 2005/2006).....	59
3.4. Le maïs	59
-Culture intermédiaire.....	61
-Culture principale.....	61
3.4.1. Besoins en eau.....	61
3.4.2. Traitements en 2007.....	61
3.4.3. Interventions culturales	62
3.4.3.1. Préparation du sol.....	62
3.4.3.2. Implantation de la culture	62
3.4.3.3. Fertilisation.....	62
3.4.3.4. Désherbage.....	63
3.4.3.5. Protection phytosanitaire	63
3.4.3.6. Irrigation et fertigation sur les traitements GàG	63
3.4.3.6.1. Irrigation.....	63
3.4.3.6.2. Fertigation.....	64
3.4.4. Récolte	64
3.5. Matériel et mesures pour les trois campagnes.....	64
3.5.1. Suivi des bilans hydriques	64
3.5.1.1. Mesure de l'humidité	64
3.5.1.2. Mesure de l'humidité par sonde à neutrons.....	64
3.5.1.3. Mesure de l'humidité par méthode gravimétrique	65
3.5.1.4. Mesure de la charge hydraulique par les tensiomètres.....	65
3.5.1.5. Suivi des apports d'eau.....	65
3.5.2. Déterminations agronomiques	65
3.5.2.1. Etude de l'indice foliaire (LAI)	65
3.5.2.1.1. Mesure par LI-COR LAI-2000	65

3.5.3. Détermination de la production de MS	66
3.5.4. La détermination du rendement	67
3.6. L'enracinement.....	67
3.7. Rappels théoriques	67
3.7.1. Bilan hydrique mesuré au champ	67
3.7.1.1. ETP, ETM et ETR : rappel de définitions utilisées en agronomie.....	67
3.7.2. Calcul du bilan hydrique	68
3.7.3. Détermination de l'ETR théorique	69
3.7.4. Les sites de mesure	70
3.7.5. Suivi hydrique par humidimétrie "TDR" et sondes	70
-Les mesures sont faites sur chaque site.....	70
3.7.6. Suivi des apports d'eau.....	70
3.8. Suivi du bilan et du devenir de l'azote sous culture.....	71
3.8.1. Rappels théoriques	71
3.8.2. Détermination du stade d'azote dans le sol.....	72
3.8.3. Détermination de la teneur en azote de la couverture et du paillis.....	72
CHAPITRE IV : RESULTATS	73
4.1. Resultats expérimentaux.....	74
4.2. Les campagnes 2004-2007.....	74
4.2.1. Synthèse des résultats 2004/2005 (blé dur).....	74
4.2.1.1. Pluie et évapotranspiration 2004/2005	74
4.2.1.2. Mise en place du blé dur 2004/2005	76
4.2.1.3. Rendement	76
4.2.1.4. Stock d'eau dans le sol en 2004/2005	78
4.2.1.5. Surface foliaire : LAI.....	80
4.2.1.6. Conclusion sur la campagne 2004/2005.....	82

4.2.2. Synthèse des résultats 2005/2006 (blé dur).....	83
4.2.2.1. Pluie et évapotranspiration 2005/2006	83
4.2.2.2. Les rendements.....	84
4.2.2.3. Stock d'eau dans le sol en 2005/2006	87
4.2.2.4. Surface foliaire : LAI.....	89
4.2.2.5. Enracinement	90
4.2.2.6. Conclusion sur la campagne 2005/2006.....	91
4.2.3. Synthèse des résultats de la campagne 2007	92
4.2.3.1. Pluie et évapotranspiration au cours de la campagne 2007	92
4.2.3.2. Irrigation 2007.....	93
4.2.3.3. Mise en place du maïs	94
4.2.3.4. Rendement maïs 2007	94
4.2.3.5. Les profils d'humidité.....	98
4.2.3.6. Analyse des LAI	100
4.2.3.7. Profil racinaire	101
4.2.3.8. Conclusion pour la campagne 2007	102
4.3. Evapotranspiration réelle calculée pour les trois campagnes	103
4.4. Le bilan d'azote sur blé dur et maïs	106
4.5. Conclusion de la partie expérimentale	110
CONCLUSION GENERALE	112
REFERENCES	115
ANNEXES.....	133
Annexe A	134
Annexe B	137

Liste des figures

Figure 1 : La surface cultivée en blé dur en France en 2005 (source : ONIC).....	56
Figure 2: Le protocole de mesure de LAI	66
Figure 3: Pluviométrie mensuelles de la campagne 2004-2005 vs la moyenne 1991-2003.....	74
Figure 4: Evapotranspiration mensuelles de la campagne 2004-2005 vs la moyenne 1991-2003	75
Figure 5: Comparaison du rendement (Rdt à 15% d'humidité) des traitements en SEC en 2004/2005.....	77
Figure 6: Comparaison du rendement de traitement 0N en 2004/2005.....	77
Figure 7: Comparaison du rendement des traitements irrigués SCV et CT en 2004/2005.....	78
Figure 8 : Comparaison des stocks d'eau de la première couche au cours de la campagne pour les deux traitements principaux, d'après les mesures sonde à neutrons.....	79
Figure 9 : Comparaison des stocks d'eau de la seconde couche au cours de la campagne pour les deux traitements principaux, d'après les mesures sonde à neutrons.....	80
Figure 10 : Comparaison des profils hydriques au cours de la campagne obtenus par mesures sonde à neutron sur CT	80
Figure 11 : LAI mesuré au cours de la campagne 2004/2005 pour blé dur.....	81
Figure 12 : Enracinement du blé dur mesuré après la récolte de la campagne 2004/2005.....	81
Figure 13 : Pluviométrie mensuelles de la campagne 2005-2006 vs la moyenne 1991-2003.....	83
Figure 14 : Evapotranspiration mensuelles de la campagne 2005-2006 vs la moyenne 1991-2003.....	84
Figure 15 : Comparaison du rendement des traitements SEC SCV et CT en 2005/2006.....	85
Figure 16 : Comparaison du rendement des traitements SCV 0Net CT 0N en 2005/2006.....	85
Figure 17 : Comparaison du rendement des traitements irrigués SCV et CT en 2005/2006.....	87
Figure 18 : Comparaison des stocks d'eau au cours de la campagne pour les deux traitements principaux, d'après les mesures sonde à neutrons sur 0-50 cm.....	88
Figure 19 : Comparaison des stocks d'eau au cours de la campagne pour les deux traitements principaux, d'après les mesures sonde à neutrons sur 50-100 cm.....	88
Figure 20 : Comparaison des profils hydriques au cours de la campagne obtenus par mesures sonde à neutron sur le CT.....	89
Figure 21 : LAI mesuré au cours de la campagne 2005/2006 pour blé dur.....	90
Figure 22 : L'enracinement de blé dur mesuré après la récolte de la campagne 2005/2006.....	90
Figure 23 : Pluviométrie mensuelles de la campagne 2007 vs la moyenne 1991-2003.....	92
Figure 24 : Evapotranspiration mensuelle de la campagne 2007 vs la moyenne 1991-2003.....	93
Figure 25 : Rendement en grain (Rdt) et en matière sèche totale (MST) sur les traitements en régime pluvial	95
Figure 26 : Le rendement en grain (Rdt) et la matière sèche totale sur les traitements sans azote après le semis (apport de 27 kgN/ha au semis)	95
Figure 27 : Le rendement en grain (Rdt) et la matière sèche totale sur les traitements irrigués en aspersion.....	96
Figure 28 : Le rendement en grain (Rdt) et la matière sèche totale sur les traitements ETM	97
Figure 29 : Le rendement en grain (Rdt) et la matière sèche totale sur les traitements en goutte à goutte avec restriction hydrique.....	97
Figure 30 : L'évolution de stock d'eau sur 0-50 cm	99
Figure 31 : L'évolution de stock d'eau sur 50-100 cm	99
Figure 32 : Comparaison des profils hydriques au cours de la campagne obtenus par mesures sonde à neutron sur CT et SCV.....	100
Figure 33 : L'évolution de surface foliaire (LAI) au cours de la campagne 2007	101
Figure 34 : Comparaison des profils d'enracinement sur les différents traitements en 2007 à la récolte du maïs.....	101
Figure 35 : Plan de flux nul à partir des mesures de tensiomètre pour CT.....	103

Liste des tableaux

Tableau 1. La rotation à Lavalette.....	55
Tableau 2 : les interventions culturales et les suivis expérimentaux en 2004/2005	58
Tableau 3 : Les interventions culturales et les suivis expérimentaux en 2005/2006	60
Tableau 4 : Phases principales du développement du maïs (d'après AGPM, 1998)	61
Tableau 5: Différence entre pluie et évapotranspiration par rapport à une moyenne de 1991-2003	75
Tableau 6: Irrigation sur différent traitements (mm).....	76
Tableau 7: La différence de pluie et l'évapotranspiration par rapport à une moyenne de 1991-2003	83
Tableau 8: Irrigation 2005/2006 sur les différents traitements.....	84
Tableau 9 : Le stock initial d'azote et l'azote apporté.....	86
Tableau 10 : Composantes du rendement	87
Tableau 11: la pluie et l'évapotranspiration totale et leurs différences par rapport à la moyenne 1991-2003.	92
Tableau 12 : Apports (en mm) pour les traitements arrosés par aspersion.....	94
Tableau 13 : Composantes du rendement	96
Tableau 14 : l'ETR calculé et l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE).....	104
Tableau 15 : Le bilan d'azote pour la campagne blé dur 2004/2005.....	108
Tableau 16 : Le bilan d'azote pour la campagne blé dur 2005/2006.....	108
Tableau 17 : Le bilan d'azote pour la campagne maïs 2007	110

Remerciements

Ce travail de thèse, réalisé au Cemagref de Montpellier, UMR G-EAU, m'a permis d'enrichir mon bagage scientifique. Je tiens d'abord à adresser mes plus sincères remerciements à Jean-Claude Mailhol, mon directeur de thèse pour son encadrement continu et sa disponibilité. Mes remerciements s'adressent également à Pierre Ruelle, codirecteur de cette thèse, et qui, de par sa connaissance du contexte et son expérience, a contribué à l'aboutissement de ce projet.

Je remercie également Patrice Garin directeur de l'UMR G-EAU et aussi Dominique Rollin son adjoint de m'avoir accueilli au sein de leur unité de recherche, ainsi que Sami Bouarfa, l'animateur de TR-ENVIRRI, pour l'intérêt porté à mon travail.

Je tiens aussi à exprimer ma vive gratitude à Laurent Delage et Patrick Rosique, les techniciens du Cemagref. Gilbert Lannes, Jean-Louis Bozza, du Cirad, Eric Delpon, du GEVES, Marionneau Anicet, du Cemagref de Clermont-Ferrand sont vivement remerciés pour leur appui à différents travaux et campagnes de mesures qui ont contribué de manière conséquente à cette thèse.

Un immense merci à Ibrahim Mubarak pour m'avoir aidé dans ce travail parfois pénible et aussi pour sa bonne humeur et ses conseils avisés. J'associe à ces remerciements également tous les stagiaires qui ont travaillé avec moi (Emerstofer, Stas, Laïd, Sabiha, Laurent et Mehdi) au cours des différentes expérimentations.

Je ne saurais oublier les chercheurs qui m'ont soutenu et conseillé : Rabah Lahmar et Sylvain Perret, du Cirad,

J'exprime mes vifs remerciements à Luis Santos Pereira, du CIGR, International Commission on Agricultural Engineering, et Prof, Instituto Superior de Agronomia Lisbon, et Rafael Angulo-Jaramillo, ENTPE (Lyon) & LTHE (Grenoble), pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Mes remerciements s'adressent aux membres de jury qui ont eu à juger ce travail : Philippe de Reffye, INRIA, François Affholder et Florent Maraux, Cirad.

Ma reconnaissance va à mon pays, l'IRAN : cette thèse a été réalisée grâce à une bourse MSRT (IRAN). Je ne saurais oublier les soutiens apportés par le Cemagref et le support fourni par SFERE et Egide.

Ce travail a été rendu possible grâce à de nombreux appuis et conseils scientifiques, administratifs et amicaux. Tous ces contacts ont également été pour moi une expérience très enrichissante sur le plan professionnel et personnel. Je tiens ici à remercier toutes les personnes qui ont pris de leur temps pour m'aider à mener ce travail à son terme.

Je remercie également Christine Moretti, Nicolas Jahier et Josiane Dartau, en charge de la gestion administrative de l'Unité, Marie-Claude Lafforgue, pour le service informatique, Martine Rombaut et les services administratifs et comptables et , David, Gérard et Augustin et tous ces agents du Cemagref qui assurent sa logistique complexe et permettent au quotidien de mener à bien les travaux de la recherche. Ces remerciements sont également l'occasion d'insister sur la très bonne ambiance dans laquelle se sont déroulées ces 4 années de thèse au Cemagref.

Je tiens à remercier tout le personnel du Cemagref, de l'Université Montpellier 2, du CIRAD, du GEVES, de l'IRD, d'Agropolis International (et en particulier Claudine Soudais), de l'IAM et d'AgroParisTech, qui ont fait de leur mieux pour m'aider durant mon séjour.

Merci enfin à ma famille, et surtout à Hoda, sans qui je n'aurais pas pu arriver jusque là. Votre soutien, qui n'a jamais failli, s'est renforcé au moment où j'en avais le plus besoin et je sais que pourrai toujours compter sur lui. Merci pour ce que vous m'avez fait devenir. Merci pour avoir toujours cru en moi, pour m'avoir encouragé et aidé tout au long de cette thèse.

Je remercie aussi ceux dont le nom m'échappe à cet instant et que je regretterai de ne pas avoir cité pour m'avoir aidé tout au long de cette thèse confirmant que la recherche est avant tout un travail d'équipe.

Chapitre I

Introduction générale

1.1 Introduction

Le présent travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche, "PCSI" (programme commun sur les systèmes irrigués). Il s'appuie sur des travaux expérimentaux menés sur le site de Lavalette au Cemagref entre 2005 et 2007.

Lors de ce programme ont été mis en évidence les comportements du système SCV (Semis Direct sous couverture Végétale) vis-à-vis du bilan hydrique, le rendement, l'efficacité d'utilisation de l'eau, et le bilan d'azote en comparaison avec le système conventionnel (CT).

L'étude des techniques culturales n'est pas un sujet nouveau. Les premières références de travaux américains datent du début du 20^{ème} siècle. En France, à l'initiative de la recherche, deux sites d'études sur longue durée existent depuis plusieurs décennies: dans le Lauragais et dans l'Essonne (à Boigneville). D'autres moins connus ont été mis en place plus récemment par les instituts et les Chambres d'Agriculture entre autres.

Des impacts environnementaux, agronomiques et socio-économiques des SCV ont été étudiés (Erenstein, 2003). Certaines thématiques de recherche sont assez souvent abordées, telles que la séquestration du carbone ou l'érosion surtout aux Etats unis et en Amérique latine. En revanche, d'autres ont été bien moins approfondies tels que le bilan hydrique et la valorisation d'eau en cultures irriguées notamment en climat méditerranéen.

Au niveau environnemental, les SCV permettent de réduire l'érosion par la présence d'un couvert végétal principalement et l'absence ou la réduction du travail du sol. Ils permettent aussi d'augmenter la biodiversité et l'activité biologique des sols. Ces systèmes pourraient contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique par la réduction de la dépense énergétique et donc des émissions de gaz à effet de serre et par la capacité de stockage du carbone via les matières organiques dans les sols.

Au niveau agronomique, l'accumulation des matières organiques (MO) en surface implique une concentration dans l'horizon de surface des éléments fertilisants, et de l'activité biologique du sol. Les SCV engendrent également une homogénéisation de la structure du sol et une augmentation de la stabilité structurale du sol après une période d'adaptation de quelques années. Les rendements seraient équivalents en CT et SCV à condition de maîtriser la pratique du SCV qui demande une gestion et une attention plus importante de la part de l'agriculteur, particulièrement au niveau de la lutte contre les adventices et les maladies (Erenstein, 2003).

Au niveau économique, le SCV permet une réduction des temps de travaux et la consommation de carburant. Une réduction des charges de mécanisation est possible si l'équipement est adapté à la surface travaillée.

Au niveau de la recherche, il convient d'étendre les évaluations de SCV à d'autres cultures et à l'ensemble des cultures d'une rotation à l'autre afin de limiter les risques d'échecs. Ceci constitue la clé du changement d'un système cultural. Cette évaluation doit être étendue à tout le territoire climatique et aux différents types de sol, avec des études à l'échelle du bassin versant

(conséquence des pratiques à cette échelle). Il est par ailleurs important de prendre en compte les problèmes environnementaux locaux avant l'adoption de ce système. L'impact de la couverture du sol, de la rotation, ce qui constitue en fait la gestion du système dans son ensemble est souvent aussi important que le non-labour en soi.

Les TCSL (techniques culturelles sans labour) y compris le SCV représentent quelques dizaines de milliers d'hectares en France (Labreuche et al., 2007). Au-delà des enjeux scientifiques, la compréhension du fonctionnement hydrique de ce système présente donc un intérêt majeur pour tout ce qui concerne le fonctionnement hydrique des cultures, autant en conditions pluviales que sous irrigation.

L'agriculture est la principale source de consommation d'eau en France, essentiellement à des fins d'irrigation. L'agriculture française prélève chaque année près de 3 500 millions de m³ d'eau, soit 11 % des prélèvements nationaux et 68 % de la consommation d'eau. Environ 60 % de ce volume prélevé est consacré à l'irrigation (Cieau, 2007). Les sécheresses en Espagne et en France de 2003 et de 2005 en particulier confirment la tendance et l'urgence de mettre en œuvre des stratégies communes pour faire face au problème de pénurie en eau. La sécheresse de 2005 en Espagne, au Portugal et dans certaines parties de la France a été causée par un faible taux de précipitation sur l'ensemble du territoire. En ce qui concerne la France, de septembre 2004 à septembre 2005, la sécheresse a affecté une grande partie du territoire national et plus particulièrement la région Poitou-Charente et les départements de Loire. Les précipitations annuelles de 2005 étaient inférieures à la moyenne des cinquante dernières années. Chaque année, depuis 1997, au moins vingt départements ont adopté des mesures de restriction d'eau. Le plan d'action de la sécheresse adopté en 2004, après la sécheresse de 2003 a été réactivé et mis à jour en 2005 pour faire face à ce nouvel événement. À la fin d'Octobre 2005, le plan d'action pour équilibrer offre-demande est encore nécessaire (Blinda et al., 2007).

Accroître l'efficacité d'utilisation d'eau en agriculture est un moyen de contribuer à la lutte contre la pénurie d'eau. Nous nous proposons de montrer dans le cadre de ce travail qu'un système SCV est capable d'augmenter l'efficacité d'utilisation d'eau en climat méditerranéen et d'apporter en conséquence une contribution à cette lutte. Dans cet objectif, nous avons mis en place un dispositif expérimental de 2004 à 2007 permettant de mettre en évidence et de quantifier les propriétés hydrodynamiques d'un système SCV, et à rechercher une approche fonctionnelle du bilan hydrique susceptible de prendre en compte ces propriétés particulières et de restituer correctement les comportements observés des cultures. Bien que cet aspect ne constitue pas le thème majeur de ce travail, la composante environnementale sera également abordée à la faveur d'un suivi expérimental du bilan d'azote.

1.2. Les motivations à l'origine des travaux sur SCV le PCSI

L'agriculture irriguée, qui reste indispensable à la sécurité alimentaire des populations, est le premier secteur consommateur en eau. Or, elle est confrontée à de nombreux défis : raréfaction de la ressource et conflits d'attribution entre usages, désengagement des États et changements institutionnels dans la gestion de l'eau, contraintes croissantes sur la qualité de l'eau et dégradation des milieux naturels (salinisation des terres et avancée de la désertification), etc.

Dans ce contexte, la recherche doit répondre efficacement à la fois aux besoins des agriculteurs et aux demandes des décideurs (États, bailleurs de fonds, gestionnaires des aménagements). C'est pourquoi, le Cemagref, le Cirad et l'Ird ont décidé de regrouper leurs compétences en matière de recherche sur l'eau agricole. Ils conclurent le 23 juin 1997 à la nécessité de construire un programme conjoint de recherche sur les systèmes irrigués durables qui prenne en compte les différentes échelles concernées, de la parcelle à la région.

A la suite de ces conclusions, le 23 février 1998, les Directeurs généraux du Cemagref, du Cirad et de l'Ird commandaient à Monsieur Besacier, chargé de mission au service des relations européennes internationales du Cemagref, un rapport sur les possibilités de mettre en œuvre un Programme Commun sur les Systèmes Irrigués "PCSI".

En 1999, quatre axes de travail prioritaires ont été dégagés afin de mieux répondre à ces nouveaux enjeux :

- 1- gestion des périmètres irrigués et systèmes d'information ;
- 2- gestion de la ressource en eau au sein des bassins versants ;
- 3- dimensions sociales et institutionnelles de la gestion de l'eau ;
- 4- maîtrise des effets environnementaux de l'irrigation.

1.3. Le projet systèmes de culture sous couverture végétale "SCV"

Inséré dans l'axe de travail "maîtrise des effet environnementaux de l'irrigation" du PCSI, un projet sur la caractérisation et l'évaluation du semis direct sous couvert végétal « SCV » en tant que système de culture innovant, démarra au cours de la campagne 2000/2001.

De tels itinéraires techniques induisent une modification importante au niveau de l'utilisation de l'eau mais aussi des transferts de solutés dans le sol du fait du maintien d'un couvert permanent à la surface du sol et de l'absence de l'homogénéisation mécanique par le labour de l'horizon de surface. Ils présentent donc un intérêt particulier qu'il convient d'étudier en milieu méditerranéen dans le cas de l'irrigation sur grandes cultures ou de l'irrigation déficitaire et en tant que technique d'économie d'eau et d'effet sur les transferts de solutés (azote et sels).

Un développement important des systèmes de culture sous couvert végétal existe aux Etats Unis, au Brésil et au Mexique. Dans ces pays sont conduits des travaux du Cirad GEC (Gestion des Ecosystèmes Cultivés) et des recherches du Cirad AIS (Appui méthodologique aux Innovations Scientifiques). Le SCV est pratiqué sur de faibles surfaces en France parallèlement aux TCS (Techniques de Culture Simplifiées) et s'étend en Espagne. Le projet a été mis en place dans ce contexte.

Il s'appuie sur la mise au point de méthodes d'études et l'amélioration des modèles existants, dans les pays du Nord, pour appuyer les dispositifs expérimentaux, les travaux de terrain et la

formation dans les pays du Sud. Un bailleur de fonds AFD¹ s'intéresse à cette technique et a choisi la Tunisie pour effectuer des démonstrations et des tests chez les agriculteurs en liaison avec le Cirad GEC essentiellement dans la zone centrale caractérisée par une faible pluviométrie et en mettant l'accent sur la lutte contre l'érosion de sols dans un premier temps.

L'intérêt porté par l'AFD sur la faisabilité du semis direct en Tunisie et la problématique scientifique qui sous-entend la mise en œuvre de cette technique et de sa diffusion ont été des critères favorables pour l'éligibilité des crédits incitatifs du PSCI. Le soutien financier du PSCI a permis le démarrage des recherches sur ce thème et le développement de partenariats avec le Maghreb.

Dans le cadre de l'UMR, Unité Mixte de Recherche, les travaux de l'axe 3, G-EAU : Eau, Acteur, Usage, s'adressent plus particulièrement aux pratiques et usages agricoles à l'échelle de l'exploitation et de la parcelle cultivée. Il porte sur la construction des innovations pour les systèmes de production agricoles. Il s'appuie sur une démarche dédiée à l'élaboration d'outils et méthodes d'accompagnement du secteur agricole dans un cadre interdisciplinaire. Cependant des investigations spécifiques restent nécessaires dans chacune des disciplines impliquées : hydraulique, agronomie, micro-économie, gestion, hydrologie, sciences du sol. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux sur le semis direct sous couvert végétal.

Au même titre que la lumière, le dioxyde de carbone ou le génome végétal, l'eau est un facteur fondamental de la production agricole. Cependant à l'inverse des précédents, l'eau reste un élément inégalement réparti entre les régions, les saisons mais également les années. De plus, on sait que la disponibilité des ressources en eau va devenir stratégique et vitale au même titre que l'énergie. Et, de la même façon que le changement climatique demande des changements majeurs dans nos modes de production et de consommation, la problématique de l'eau impose une optimisation des ressources locales disponibles, d'autant plus que dans la majorité de nos systèmes de production, l'eau est parfois devenue un intrant au même titre que la mécanisation ou les engrais. Même si le climat et le sol commandent, l'agriculteur n'est pas impuissant vis-à-vis de l'eau, et pilote le système sol plante ; il peut intervenir sur l'épaisseur du sol exploré mais également sa structure qui a un impact sur la capacité à stocker l'eau. Il convient d'agir en diminuant les charges de mécanisation et le temps de travail.

En milieu méditerranéen un intérêt particulier sera porté au cas de l'irrigation sur grandes cultures ou de l'irrigation déficitaire et en tant que technique d'économie d'eau et d'effet sur les transferts de solutés (azote et sels, dans les pays du sud).

Dans un contexte d'accroissement du prix de l'eau et du relèvement de la température accompagnés de sécheresse de plus en plus inquiétante, il est utile d'explorer les différentes possibilités d'apport en eau sur ces cultures en semis direct, en économisant l'eau en irrigation. Pour connaître les besoins et l'effet sur les rendements, des traitements témoins ETM et Sec (pluvial) ont été mis en place sur SCV et sur le système de culture conventionnel.

Une expérimentation est menée depuis fin 2000 sur la station de Lavalette du Cemagref pour une action de recherche à long terme et pluridisciplinaire sur le semis direct sous couvert végétal en

¹ AFD (Association Française pour le Développement)

culture irriguée. Elle permettra d'aller au-delà des travaux réalisés sur les techniques simplifiées (TCS) de travail du sol. Pour la campagne (2005, 2006, 2007), j'ai participé, en tant que thésard, à la mise en œuvre et au suivi de l'expérimentation.

1.4. Les principaux chapitres de cette thèse traiteront donc de :

- la comparaison du SCV et du CT au niveau des rendements
- la mise en évidence les effets du SCV sur le bilan hydrique et l'efficacité d'utilisation d'eau en cultures irrigués
- la comparaison du bilan d'azote en SCV et CT

Chapitre II

Synthèse bibliographique

2. Synthèse bibliographique et définition des axes de recherche

Dans ce document nous ne décrivons pas de manière détaillée tous les processus existant dans le système SCV. Nous limiterons notre synthèse bibliographique aux aspects suivants :

- Les paillis résiduels et leurs impacts
- Les effets du SCV associé aux couvertures sur l'évaporation du sol
- Bilan d'azote

Dans ce domaine de l'agronomie, on constate un manque certain d'informations relatives à des expériences de semis direct sur le territoire français et plus particulièrement en climat méditerranéen. L'essentiel des références agronomiques concerne les milieux tropicaux et subtropicaux (Brésil, Mexique, ...).

2.1. Système de culture conventionnel (CT)

En agriculture conventionnelle, le labour est une façon de travailler le sol, ou plus précisément la couche arable, généralement effectuée avec une charrue, qui consiste à l'ouvrir jusqu'à une certaine profondeur, et le retourner, avant le semis.

Les raisons de l'introduction de la charrue semblent liées à son intérêt pour lutter contre les mauvaises herbes et enfouir le fumier (Sébillotte et Meynard, 2004). La charrue enfouit aussi les engrais et les amendements calciques. Le labour est la première étape de la préparation du « lit de semences », il prépare l'état structural, aère, et assèche la surface du sol. Son efficacité dépend de l'humidité du sol, sa nature et la force de traction. On s'est rendu compte que le labour améliore au départ les rendements mais qu'au fur et à mesure son efficacité diminue et certains en viennent à dire qu'il devient nécessaire de labourer de plus en plus profond.

Le labour présente de graves inconvénients, comme ceux de créer une "semelle de labour", de faire disparaître la couche d'humus superficielle (les complexes argilo-humiques). Il expose le sol à l'érosion (qui peut être très importante sur les sols fragiles tels que le Löss et pentus), à la déshydratation et aux ultraviolets solaires (Lal et al., 2007). Il diminue fortement la qualité et la quantité de matière organique en surface (Rasmussen et Collins, 1991). Il permet certes d'enfouir les résidus végétaux de surface et les amendements organiques, favorisant ainsi leur décomposition anaérobie. Cette dernière est cependant nuisible aux champignons utiles du sol (tous aérobies) et, l'acidification du sol s'en trouve également favorisée. Les nématodes (qui peuvent parasiter les racines) et certaines bactéries anaérobies minéralisent trop rapidement la matière organique. Cela se traduit par une perte de nitrates (très solubles dans l'eau) et un surplus d'engrais augmentant les risques de polluer la nappe phréatique. Le labour perturbe aussi le travail des vers de terre en les exposant aux pesticides, et en ne les incitant plus à remonter chaque nuit en surface, puisqu'ils trouvent la matière organique enfouie. Leur travail d'aération du sol est donc diminué ou interrompu en surface (Balabane et al., 2005 ; Emmerling, 2001 ; Hangen et al., 2002 ; Pelosi et al., 2006). La diminution de la biomasse en vers de terre, associée à la disparition de l'humus diminue rapidement et fortement la capacité du sol à infiltrer et retenir

l'eau. Avec les méthodes de labour actuelles, les sols s'érodent d'un millimètre par an. Or, pour reconstituer cette minuscule épaisseur, il faut 10 ans.

Le labour est pour ces raisons, de plus en plus remis en cause, notamment sur les sols fragiles, secs ou exposés aux climats tropicaux, pour ses conséquences sur la dégradation ou la stérilisation des sols et pour la diminution des rendements qu'il entraîne, par rapport aux cultures sans labour. Ces dernières sont cependant techniquement plus exigeantes, délicates et complexes à gérer.

Un des objectifs principaux du travail du sol avant semis est l'amélioration de l'état structural du sol. Cependant, si les travaux du sol sont effectués dans de mauvaises conditions (trop sèches ou trop humides), les effets obtenus sont contraires à ceux attendus : apparition d'une semelle de labour, sol émiétté en surface... De plus, en agriculture motorisé, des passages répétés du tracteur favorisent le tassement du sol. Dans ces conditions, pratiquer le SCV permet de limiter les interventions qui participent à la dégradation de la structure du sol. Cela suppose aussi d'améliorer la structure du sol d'une autre manière que par le labour : c'est l'un des rôles de la couverture végétale.

2.2. Système de culture semis direct sous couverture végétale (SCV)

L'augmentation durable de la productivité agricole est nécessaire pour garantir la disponibilité de la nourriture et des moyens de survivre dans les pays en développement au cours des prochaines décennies. Cette augmentation doit provenir en grande partie d'une meilleure utilisation des terres déjà en production plutôt que du potentiel à développer de nouvelles terres cultivables, celui-ci étant limité (Shaxson et al., 1989). Pourtant, la dégradation des sols a diminué la capacité de production de certains environnements, et est en train de faire baisser la production dans d'autres. Les conséquences de la dégradation des sols sont maintenant largement reconnues (WCED, 1987; Oldeman et al., 1990; UNCED, 1992; World Bank, 1992); et la nécessité de recouvrir à des techniques de conservation des sols s'impose.

Le concept d'agriculture de conservation s'appuie sur le besoin d'aborder la conservation des sols de façon intégrée. Il est un terme générique pour les systèmes de production agricole durable c'est-à-dire que les SCV sont à la fois socio-économiquement et écologiquement viables. À ce titre, l'agriculture de conservation peut englober différents systèmes de production et de conservation en fonction du contexte local (Erenstein, 2003).

Le paillage peut être défini comme un système pour lequel au moins 30% de la surface du sol est couverte par la matière organique. Par exemple, environ 2 Mg.ha⁻¹ de résidu du maïs sont nécessaires pour obtenir 30% de couverture du sol en Méso-Amérique (Tripp et Barreto, 1993 ; Erenstein, 2003). Dans le cas du paillage des cultures annuelles, le moment critique pour satisfaire ce seuil correspond à l'émergence de la culture. Ce stade critique peut être atteint dans deux conditions contrastées. Soit, la récolte annuelle produit peu ou pas assez de résidu pour couvrir le sol jusqu'au début de la saison suivante, ce qui peut induire une érosion élevée des sols. Soit les activités de préparation du sol influent directement sur les quantités de résidu de culture restante sur la surface du sol et à l'émergence de la culture (destruction du paillis). Pour conserver

le paillis il faut donc réduire le labour ou semer directement dans les paillis de sorte que le paillage demeure associé avec le travail réduit du sol (par exemple travail de conservation du sol, sans labour, semis direct c'est-à-dire pas de travail du sol avant le semis) (Erenstein 2003).

En agriculture durable, le semis direct est un système agricole souvent associé à une culture d'intersaison qui fonctionne comme un paillis. Avant de semer la culture principale, les plantes de la culture d'intersaison sont généralement détruites avec un herbicide (Séguy et al., 1996 ; Scopel et al., 1999 ; Woomer et al., 1994; Tian, 1998; Mitchell et al., 1999; Cho et al., 2001; Reyes Gomez, 2002). Le semis direct repose sur un travail du sol localisé sur la ligne de semis, sans travail en profondeur. La semence est positionnée par les éléments semeurs dans un sol non travaillé. Le travail du sol, toujours localisé sur la ligne de semis, peut avoir une profondeur maximale allant de 2-3 à 10 cm. L'action mécanique indispensable au placement des semences est effectuée le plus souvent par des semoirs équipés de disques, plus rarement de socs ou de dents semeuses (Labreuche et al., 2007).

L'itinéraire de travail du sol a un impact sur la conduite de l'inter-culture. Tout le vocabulaire relatif à cette période mérite également d'être clairement défini. En effet, on note par exemple de fréquentes confusions entre les termes « inter-culture » et « culture intermédiaire ». L'inter-culture est la période entre deux cultures, période pendant laquelle sont implantées les cultures intermédiaires, allant de la récolte d'une culture au semis de la culture suivante. Cette période, entre les deux cultures principales, peut être conduite en sol nu (travaillé ou non) ou avec une culture intermédiaire (Labreuche et al., 2005). Les cultures intermédiaires s'opposent aux cultures commerciales. Ce sont des cultures implantées entre deux cultures principales qui ne sont, dans la majorité des cas, pas récoltées. La culture intermédiaire a des synonymes en fonction de l'objectif principal qui lui est assigné : couvert végétal, CIPAN (Culture Intermédiaire Piège A Nitrates), culture dérobée ou engrais vert (Labreuche et al., 2005 ; Larue, 2000). Le semis sous couvert est la combinaison de 2 pratiques : le semis de la culture principale sans travail du sol et la présence de cultures intermédiaires (Labreuche et al., 2007).

En pratique les définitions retenues recouvrent une très grande diversité de pratiques culturales mises en œuvre pour préparer le lit de semence et lutter contre les mauvaises herbes. Retenons parmi les définitions, celles proposées par Masse et al., 2004 et Richard et al., 2004 :

- **le semis direct** : aucun travail du sol ou travail du sol superficiel limité à la ligne de semis (5 à 10 cm).
- **le travail superficiel** : travail du sol d'une profondeur inférieure à 10 cm sur toute la surface par un outil animé, un outil à dents ou bien à disques.
- **le travail du sol profond sans retournement, communément appelé pseudo labour ou décompactage** : travail du sol réalisé sur une profondeur équivalente à celle du labour par un outil à dents (les débris végétaux et les adventices restent en surface)

Les techniques sans labour avec SCV, dont la maîtrise est encore balbutiante, sont actuellement un lieu de créativité, d'innovation et d'enthousiasme. Le SCV doit être pensé dans le cadre du système de production selon le contexte de l'exploitation, en cohérence avec les objectifs de l'agriculteur d'où la nécessité d'un diagnostic.

De nombreuses études ont été réalisées en Amérique latine et en Amérique du Nord sur les impacts positifs de l'agriculture de conservation sur l'environnement. Les limites de ces techniques sont également étudiées. Nous ne disposons que de très peu de recul par rapport à ces techniques au niveau national. Les agriculteurs français sont demandeurs de références économiques et environnementales compatibles et adaptables à leurs conditions pédoclimatiques locales.

Conjuguées à d'autres facteurs de risque (choix variétal, semis précoces, variétés sensibles, mauvais contrôle chimique, présence de matières organiques, monoculture), le SCV demande beaucoup plus de vigilance et de rigueur de la part de l'agriculteur.

Si le SCV présente de nombreux avantages qui sont reconnus aussi bien au niveau global qu'agronomique, les conditions de leur faisabilité en milieu agricole peuvent constituer un frein à leur adoption. Au niveau des producteurs Scopel (1999) montre trois freins importants à l'adaptation de SCV :

- l'accès insuffisant au matériel de semis souvent peu performant
- la difficulté de contrôler efficacement les mauvaises herbes
- la compétition entre la culture et l'élevage pour la consommation des résidus (exemple : cas du blé dur au Maghreb).

2.3. Les Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) dans le monde, en Europe et en France

Le non-labour, aujourd'hui est pratiqué sur plus de 62 millions d'hectare à travers le monde, ce qui représente à peine 4% des surfaces arables² mondiales. D'après Derpsch (2001), 84 % des surfaces cultivées en agriculture de conservation se trouvent sur le continent américain (Nord et Sud), 14 % en Australie et le reste (2%) en Europe, en Asie et en Afrique.

Robert et Capillon (2004) rapportent qu'au niveau mondial la prise de conscience de la nécessité de changer les pratiques culturales est survenue précocement suite à des catastrophes climatiques avec des conséquences sur l'érosion des sols. On estime qu'en 2003, 70 Mha sont consacrés à l'agriculture dite « de conservation », dont 70% sur l'ensemble Etats-Unis, Brésil, Australie et Argentine. Avec notamment le soutien des centres de recherche internationaux (FAO, Banque Mondiale, CIRAD) qui la considère comme « durable » les surfaces continuent de progresser.

- Un développement considérable aux Etats Unis et en Amérique Latine

Après la crise économique de 1929 et suite à des problèmes d'érosion (Dust Bowl), les recherches américaines se sont orientées sur les produits phytosanitaires et le développement des différentes techniques de travail du sol dont le non-labour (Derpsch, 2001). L'explosion de

² La surface totale mondiale, estimée par la FAO, en terre arable est de 1.4 milliards ha

l'agriculture de conservation aux Etats-Unis et en Australie correspond au développement, à l'accessibilité et à la maîtrise des équipements agricoles et des pesticides (Harrington, 2001). Depuis 1990, il a été constaté une forte augmentation dans le monde des surfaces concernées par l'agriculture de conservation. Dans les pays du MERCOSUR (Brésil, Argentine, Paraguay et Uruguay), le non-labour est adopté depuis les années 1970. Dans ces pays, l'objectif de l'agriculture de conservation est de limiter l'érosion des sols et la perte de fertilité qu'elle entraîne. De plus, ces techniques permettent aux agriculteurs sud-américains d'améliorer la rentabilité et de maintenir des systèmes agraires durables dans le temps. La révolution du "non-labour" dans ces pays a surtout eu lieu entre 1987 et 1997 (Derpsch, 2001). Au Brésil, la mise en valeur difficile des terres sèches du Cerrado (plus de 100 millions d'hectares disponibles) a connu une accélération depuis 1995. Aujourd'hui de 8 à 10 millions d'hectares sont cultivés en agriculture de conservation dans cette région du Brésil qui pourrait devenir selon Rollin (2002) une des plus grandes régions agricoles du monde. Actuellement, les Etats-Unis et l'Amérique latine sont des régions phares quant à l'acquisition de références sur l'agriculture de conservation.

- Les TCSL en Europe : un faible développement

L'agriculture occupe 50,5% du territoire de l'Europe occidentale. L'érosion des sols concernerait 157 millions d'ha soit environ 3 fois la France. Ce phénomène est très important en Europe du Sud puisqu'il peut représenter jusqu'à 70 % de la surface agricole (Chevrier et Barbier, 2002). Le développement des TCSL est inégalitaire au niveau européen. En effet, l'Espagne et le Portugal auraient entre 10% et 15% de leurs terres arables en TCSL alors que la France en aurait entre 5 et 10%. Dans le reste de l'Europe, les TCSL sont encore moins développées, même si l'Allemagne s'investit en recherche sur ce sujet.

L'Union Européenne, depuis la réforme de la PAC en 1992 et l'entrée en vigueur des mesures agro-environnementales accorde de plus en plus d'importance à la protection des sols. Les pratiques de conservation, de cultures sans labour, de couvertures hivernales, de gestion intégrée, ou de rotations équilibrées sont ainsi mises en avant.

- Les TCSL en France : un développement récent

Sur le continent américain, d'où est originaire l'agriculture de conservation, ce sont des problèmes d'érosion qui ont été à l'origine du développement de l'agriculture de conservation. En France, les motivations ont été différentes.

La réflexion de départ a été motivée par des problèmes de temps liés aux pointes de travail. En effet, dans les années 1970, lors du développement de la culture du maïs dans le bassin parisien, les agriculteurs ont cherché des moyens nouveaux pour implanter rapidement du blé derrière le maïs. Le système de semis par cultivateur rotatif à axe horizontal s'est alors développé. Mais les semis étaient de qualité médiocre et le désherbage mal maîtrisé, la technique, qui n'était pas maîtrisée, ne s'est pas répandue. C'est en fait la motivation économique qui a engendré la véritable montée en puissance du non-labour en France, avec la réforme de la PAC de 1992. Craignant une baisse des prix des céréales, les agriculteurs ont cherché à comprimer leurs charges et se sont alors tournés à nouveau vers le non-labour. Conjointement à ce mouvement, de nouveaux matériaux sont apparus afin de résoudre les problèmes des premiers jours tels que la

qualité du semis et la gestion des paillis. Aujourd'hui les agriculteurs disposent d'une large palette d'outils leur permettant d'adapter la technique au temps de travail disponible sur leur exploitation.

Il est aujourd'hui difficile de donner des chiffres sur l'étendue du non labour en France. Cela est dû au fait que le terme de non labour englobe un large panel de techniques. Il faut également distinguer les agriculteurs pratiquant le non labour de façon systématique sur leurs parcelles et les "opportunistes" qui utilisent tantôt la charrue, et tantôt s'en passent. Enfin peu d'études ont été réalisées sur ce sujet. Trocherie et Rabaud (2004) rapportent que 1,4Mha (dont 50 % en blé) font l'objet d'un " travail superficiel du sol ou d'un semis direct ", surtout dans les régions à problème d'érosion marquée (Midi-Pyrénées, Aquitaine, Ile de France).

Devant la montée en puissance de ce système, les instituts agricoles ont progressivement lancé des réflexions autour du non-labour. L'ITCF, Institut Technique des Céréales et des Fourrages, a été l'un des pionniers dans la recherche sur le non-labour en effectuant des essais longue durée depuis 1970 à Boigneville (Essonne). D'autres organismes tels que l'ITB, Institut Technique français de la Betterave industrielle, et le CETIOM, Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains, se préoccupent également des TCSL depuis une dizaine d'années. Globalement, les instituts techniques sont en état de veille active, en attendant peut être de passer à un mode plus actif d'acquisition et de diffusion de références.

2.4. Les avantages et les inconvénients du système SCV

Dans la littérature, le SCV est souvent évoqué comme un système qui possède de nombreux avantages et aussi certains inconvénients. Sebillotte et Meynard (2004), considérant que le choix des techniques culturales résulte de nombreux facteurs et entraîne de nombreuses conséquences à tous les niveaux, introduisent la nécessité de s'interroger sur les objectifs à atteindre, sur les moyens à mettre en œuvre pour y parvenir et de hiérarchiser en regard les avantages et inconvénients. Cette approche a pour objet d'aider à la réflexion et à la décision de l'agriculteur ou de son conseiller. Il faut que l'agriculteur se pose cette question : quels sont les objectifs prioritaires à atteindre compte tenu des contraintes générales externes qui s'exercent sur « mon » espace? Sachant qu'il ne sera pas possible de gagner sur tous les volets, agronomique, socio-économique et environnemental. De Tourdonnet et Saulas (2004) présentent ce système original expérimenté à l'INRA de Versailles-Grignon, qui associe la suppression complète du travail du sol au semis direct des cultures commerciales au travers d'une plante de couverture vivante (laissée en place plusieurs années). Cette technique bien que délicate à mettre en œuvre, présente potentiellement les avantages de :

- mieux contrôler des adventices et limiter l'emploi d'herbicides,
- piéger plus efficacement les nitrates, notamment en fin d'été et début d'automne,
- enrichir le sol en matière organique grâce au maintien d'une activité photosynthétique tout au long de l'année,
- fixer de l'azote atmosphérique (si la plante de couverture est une légumineuse),
- accroître la biodiversité et l'activité biologique du sol,
- réaliser l'économie de semis annuels de cultures intermédiaires.

Mais les résultats obtenus montrent que la maîtrise technique n'est pas encore satisfaisante dans la mesure où les rendements sont affectés (compétition pour l'eau, la lumière et parfois l'azote entre culture commerciale et plante de couverture). L'efficacité de l'association blé-lotier a pu cependant être observée.

La conception de SCV nécessite sans doute, en effet, de revoir complètement les itinéraires techniques et systèmes de culture. A titre d'exemple les besoins en azote du peuplement végétal en SCV ne peuvent être estimés selon la méthode du bilan largement utilisée en agriculture conventionnelle. Les essais de l'INRA montrent des carences azotées très précoces sur le blé. L'évaluation du SCV nécessite également d'approfondir les connaissances sur les phénomènes et interactions de mécanismes encore peu connus. En particulier au niveau de l'évaluation de l'état structural du sol, il semble que l'activité biologique du sol (micro, macro- organismes et racines) joue un rôle prépondérant. D'autres approches de l'agro système, à l'interface entre plusieurs disciplines (agronomie, science du sol, écologie, écophysologie...) sont encore à tester.

2.5. Les aspects socio-économiques

A ce jour là les conséquences essentiellement agronomiques du SCV ont été étudiées alors que peu d'études globales font appel à des critères socio-économiques. Cela semble être un frein au développement de cette pratique qui s'inscrit dans un contexte diversifié et complexe. Le paillage est susceptible d'être particulièrement intéressant à chaque fois qu'il allège les contraintes pour la croissance des cultures et la productivité des exploitations agricoles (par exemple, lorsqu'il diminue le stress hydrique ou en nutriments). L'acceptation de ce système est plus probable quand le SCV propose un accroissement du revenu, c'est-à-dire lorsque les avantages qu'il procure sont plus importants que les coûts requis pour sa mise en œuvre (Erenstein, 2003).

Le secteur agricole est souvent considéré comme l'un des plus gros consommateurs d'énergie (Bonny, 1993). Le SCV peut diminuer fortement la consommation de carburant et d'intrants à l'hectare, (Kosutic et al., 2005 ; Rathke et al, 2007). Le SCV nécessite moins de matériel agricole, donc moins de capitaux et donc moins d'énergie. Le prix de l'énergie s'annonçant comme durablement à la hausse, réfléchir dès aujourd'hui à des économies apparaît comme une démarche pertinente. La principale motivation affichée par les agriculteurs pour justifier l'abandon du labour est le gain de temps (Tebrügge et Büring, 1999). Selon les enquêtes, différentes causes sont liées à cette motivation : la réduction de la main d'œuvre sur les exploitations, la nécessité de dégager du temps pour cause de diversification, la volonté de passer moins de temps sur l'exploitation. Avec le SCV l'agriculteur a plus de sécurité pour réaliser son travail dans les conditions optimales.

Les motivations le plus souvent évoquées en deuxième ordre sont de nature économique ou agronomique. Concernant les coûts, on retrouve fréquemment la volonté de baisser les charges de mécanisation, de réduire la dépense en carburant ou celle relative à l'entretien du matériel. Certaines enquêtes font nettement ressortir la volonté de supprimer le labour dans des terres lourdes ou usantes pour ces raisons (Viloining, 2005). Sur un plan agronomique, de nombreuses enquêtes font état de l'aberration de labourer certaines terres pour les raisons évoquées précédemment ou pour cause de structure du sol. En effet, les sols argileux ou argilo-calcaires

sont difficiles à labourer et aboutissent, au moins pour les cultures d'automne, à des lits de semences fréquemment grossiers et à des sols creux. Ces raisons expliquent pourquoi ces sols sont cultivés en TCSL en priorité (Viloingt, 2005 ; Labreuche et al., 2007).

Selon Robert et Capillon (2004), les avantages socio- économiques semblent significatifs en termes de diminution du temps de travail, économie d'énergie mise en jeu (fioul). Selon ces auteurs, ce sont les premiers motifs d'adoption de ce nouveau système par les agriculteurs. Selon Masse et al., (2004) ce système permet une économie substantielle de main- d'œuvre salariée ou de valoriser le temps libéré et une meilleure organisation de ceux-ci.

Pour une évaluation socio-économique du SCV nous avons besoin de regrouper toutes les opérations impliquées dans la rétention du paillis en termes des pratiques nécessaires et complémentaires. Tout d'abord, procéder à une évaluation afin de comprendre comment la mise en place d'un paillis modifie les facteurs d'entrée-sortie du système culture-couverture, en termes de main-d'œuvre, de capitaux, des terres et la biomasse des paillis. Deuxièmement, l'évaluation socio-économique implique la valorisation de toutes ces modifications afin d'évaluer si les avantages du maintien de paillis l'emportent sur les coûts de mise en œuvre. Une telle évaluation est dans une large mesure déterminée au niveau de l'exploitation (et) des facteurs institutionnels. En effet, des facteurs qui compliquent l'évaluation du système avec paillis est que le maintien du paillis est contrôlé généralement par deux variables l'une interne et l'autre externe à la ferme, ce dernier n'étant pas directement sous le contrôle de l'agriculteur (Erenstein, 2003). Les résultats de rentabilité comparée, ainsi que l'importance des investissements de départ pour changer de système sont très différents d'une région à l'autre, selon les niveaux techniques des agriculteurs et le milieu physique. On serait alors en mesure de justifier dans une même région des comportements différents face à l'innovation, selon le type d'acteur. Cependant, les analyses économiques à elles seules ne suffisent pas à expliquer le pourquoi de l'adoption ou le refus des SCV par les agriculteurs. En effet, d'autres facteurs sont à prendre en considération, une analyse plus globale de nature technico-économique est donc nécessaire. Le SCV nécessite une occupation permanente du sol par les plantes de couverture. Ainsi, les parcelles ne peuvent pas être pâturées après la récolte des grains, ce qui pose un problème essentiel pour les sociétés où les systèmes d'élevage reposent sur la vaine pâture. La mise en place des SCV exige des investissements importants. Dans bien des cas un accès difficile au crédit constitue un frein à la diffusion de l'innovation, celle-ci n'étant possible que pour les chefs d'exploitation qui ont les moyens d'investir.

Sur le plan économique, on observe :

- une réduction du nombre des passages d'engins par la simplification et donc réduction du temps de travail
- une diminution des charges de mécanisation et de main d'œuvre : moindre usage du matériel, possibilité de l'amortir et de réduire le parc par le groupement. La capacité de travail en est augmentée
- la consommation de fioul est réduite et donc économie d'énergie, pour les autres intrants c'est moins net

- l'analyse économique de la simplification du travail du sol doit prendre en compte la globalité de l'exploitation et la marge nette est un bon indicateur.
- dans l'évaluation réalisée dans les petites régions d'Indre et Loire et Côtes d'Armor, les marges directes se maintiennent voire augmentent en Côte d'Armor (Le Garrec et Revel, 2004).

La suppression du travail du sol passe souvent par l'investissement dans un ou plusieurs outils spécialisés pour le non-labour. Ainsi, les charges de capital à court terme (au changement de système) augmentent, mais après plusieurs années, le capital investi par hectare diminue. Dans tous les cas, les exploitations qui ont les charges de mécanisation les plus faibles sont celles qui optimisent leur parc matériel soit en le partageant avec un ou plusieurs voisins, soit en amortissant leur investissement en augmentant la surface travaillée, réduisant la main d'œuvre ou en s'engageant dans une autre activité extra-agricole (INRA, 2001 ; Salitot, 2001).

Les charges directes de mécanisation (fioul, entretien et réparation des outils) sont réduites, mais celles concernant les intrants (semences, herbicides, fertilisants...) sont augmentées. Ainsi, Gilet (2001) estime qu'en non labour, l'investissement dans le désherbage en culture va du simple au double. Enfin, pour des sols usants ou caillouteux, la réduction des charges de mécanisation est encore plus importante.

Pour les grandes cultures, le temps de traction peut se situer entre 7 h/ha alors qu'il est d'environ 3.5 h/ha en non-labour (INRA, 2001). En théorie, l'agriculteur peut donc doubler la surface travaillée. Le gain de temps dépend, par contre, des outils utilisés et si un travail superficiel est fait. De plus, le non-labour engendre une réduction des temps de travaux mais implique cependant une grande disponibilité de la main d'œuvre. En effet, pour réaliser un lit de semence de qualité, le travail doit être effectué en conditions optimales (Husson, 1997). C'est ce qui fait dire à beaucoup d'experts que l'agriculteur en non-labour passe moins de temps au travail mais plus à regarder son champ et à se soucier des aspects pédoclimatiques.

- La subvention

Il y a des subventions agro-environnementales à travers les CTE (l'apparition du décret n°2003-675 du 22 juillet 2003). Le CTE est un contrat de cinq ans entre l'agriculteur et l'Etat. Ce contrat a deux axes principaux, le premier économique et social, le second environnemental et territorial. L'agriculteur construit son CTE en choisissant les "mesures-types" qu'il veut mettre en place sur son exploitation parmi l'éventail (contrat-type) de mesures disponibles dans chaque département. Les TCSL y compris le SCV se situent au cœur de trois mesures-type du volet environnemental et territorial des CTE (ONIC, 2001) :

- Mesure 3.1. "implantation d'une culture intermédiaire sur sol laissé nu l'hiver"
- Mesure 3.3. "Pas de travail du sol - implantation d'une culture sous couvert"
- Mesure 13.3. "Travail du sol simplifié" pour lutter contre l'érosion

Les agriculteurs français ont donc aujourd'hui la possibilité d'être aidés financièrement en se lançant ou se perfectionnant dans les TCSL. D'autres subventions de la part de l'Union Européenne devraient apparaître d'ici peu dans le but d'encourager les techniques de protection des sols de, ainsi que pour favoriser le stockage du carbone dans les sols.

- Le coût social

Le gain de temps en non-labour et l'amélioration du niveau de vie ne doit pas faire oublier les coûts associés à ces pratiques. En effet, si l'agriculteur peut doubler sa surface travaillée, cela engendrera irrémédiablement une diminution du nombre d'agriculteurs. Ainsi, des agriculteurs disparaîtront au profit de ceux qui s'élargiront afin de faire face à la concurrence grandissante.

- La culture et la tradition

Il est important de ne pas sous-estimer l'aspect culturel et traditionnel du labour par rapport au non-labour. Depuis que l'agriculture existe, le labour a existé et il est immortalisé dans les tableaux, le cinéma, les livres, en bref, dans la société. La vision du paysan labourant son champ est probablement la première qui vient à l'esprit lorsque l'on parle d'agriculture. Il y a donc un aspect culturel et traditionnel profondément ancré dans la société auquel le non-labour s'oppose (Lahmar, 2008). Le labour est pour de nombreux agriculteurs une pratique historique. Ce "frein psychologique" traduit également la peur du regard des autres : le non laboureur craint un jugement de valeur négatif de la part de ses voisins car il ne fait pas comme les autres et ses champs sont moins agréables au regard. Ils apparaissent moins soignés.

2.6. Les impacts environnementaux

-Structure du sol, érosion et ruissellement

Le paillis est stratégiquement situé à l'interface du sol-atmosphère dans le système SCV et agit d'une part comme protecteur du sol et d'autre part comme amendement des sols. Il peut arrêter efficacement le ruissèlement et aussi l'érosion des sols généralement considérée comme la forme la plus grave de la dégradation des sols (Khatibu et al., 1984 ; Aina et al., 1991 ; Lal, 1994 ; Choudhary et al., 1997 ; Findeling et al., 2003). Le paillage est extrêmement efficace pour mettre un terme à l'érosion d'origine humaine des sols dans l'agriculture. Il contribue à la conservation de la capacité de production sur place et aussi à la réduction des effets indésirables, tels que les transferts des polluants liés à l'érosion du sol. Le paillis peut aussi protéger les plantules contre l'impact de la pluie, de la grêle et du vent.

Bissonnais (2004) indique que les systèmes culturaux sans labour conduisent en général à une amélioration de la qualité physique des sols tout particulièrement au niveau de la macro porosité biologique et de la stabilité structurale, en relation avec une augmentation de la teneur en matière organique. Ceci se traduit par une réduction de la battance, une meilleure infiltration de l'eau et

en conséquence une diminution des dégâts liés au ruissellement, en particulier dans le cas des sols limoneux.

Certains auteurs signalent en revanche des problèmes de tassement du sol à long terme (Voorhees et Lindstrom, 1983) et préconisent le labour pour redonner une structure aérée au sol (Chopart, 1989) permettant d'améliorer l'infiltrabilité et la colonisation racinaire. Dos Rei Castro (1996) trouve une infiltrabilité plus forte sur les parcelles récemment labourée que sur les parcelles en semis direct, toutefois cet effet momentané disparaît au bout de 3 mois.

D'après Goldberg (2006) les systèmes sans labour sont développés dans les régions où l'érosion des sols se pose de façon aigue : Midi-Pyrénées, Aquitaine, Ile de France. Il y aurait en France, 5 millions d'ha de terre soumise à l'érosion, notamment en Midi-Pyrénées, dans le Nord, au nord et à l'est du Bassin parisien, dans la vallée du Rhône, les Alpes et plus faiblement en Bretagne, Poitou-Charentes, Alsace, sur le pourtour méditerranéen et en Corse. La loi du 30 juillet 2003 n°2003-699 relative à la prévention des risques technologiques et naturels, prévoit la délimitation des zones d'érosion et la mise en place de programmes d'action.

L'érosion est un processus physique naturel, pouvant être amplifié par l'action de l'homme, ayant pour effet l'élimination plus ou moins complète de la partie généralement superficielle des sols et des roches meubles en les entraînant sur des distances parfois importantes (CILF, 1999). Il existe plusieurs formes d'érosion : hydrique, éolienne et mécanique, les érosions hydriques et mécaniques étant les plus répandues en France. L'érosion est déclenchée par une combinaison de facteurs tels que les fortes dénivellations, le climat (par exemple, de longues périodes sèches suivies de grosses précipitations), une utilisation des terres inadéquates, les types de couverture végétale (par exemple, végétation éparse) et les catastrophes écologiques (par exemple, incendies de forêts). En outre, certaines caractéristiques intrinsèques d'un sol peuvent le rendre plus enclin à l'érosion (par exemple, finesse de la couche de terre végétale, texture limoneuse ou faible teneur en matières organiques) (CCE, 2002).

Pour l'érosion hydrique (la plus importante en France), la présence de mulch végétal vivant ou mort diminue l'effet splash et réduit donc la battance dans les sols sensibles. Les résidus de récolte protègent en effet la surface du sol des gouttes de pluies et ralentissent ou divisent le ruissellement, réduisant considérablement les pertes en terre (Meyer et Mannering, 1967). Le taux de recouvrement du sol par les résidus est le facteur primordial de l'effet protecteur du couvert végétal et donc de la limitation de l'érosion. Sans la protection des résidus de récolte, la quantité totale d'eau ruisselée est plus élevée en non-labour due à une faible rugosité de surface et donc une faible infiltration avant ruissellement.

L'érosion mécanique se caractérise par la perte directe de terre engendrée par les techniques culturales. Le fait de moins ou ne plus travailler le sol et d'implanter une couverture végétale ou d'avoir un mulch permet une meilleure stabilité du sol. La compaction ou le tassement de certains types de sols sont d'autant plus limités que la présence de couvert végétal ou de mulch est importante.

L'érosion éolienne même si elle est peu présente en France (sauf sur les terres de sables noirs dans les Landes) véhicule des particules fines de terre. La présence d'un couvert ou d'un mulch

limite le dessèchement de la couche superficielle et protège les fines particules de sols contre le vent.

L'érosion et ses conséquences souvent spectaculaire, observées dans des systèmes agricoles intensifs et fortement mécanisés, ont été des facteurs déterminants pour la mise au point du SCV (nuages de poussières aux Etats-Unis). C'est pourquoi, lutter contre les phénomènes de dégradation de l'état physique des sols d'une part, et régénérer la structure des sols dégradés d'autre part, sont deux objectifs essentiels attendus dans la mise en œuvre de ce système.

En enrichissement le sol en matière organique, la couverture végétale participe à l'amélioration de sa stabilité structurale. Les plantes de couverture permettent de fragmenter le sol grâce à l'action de leurs racines qui s'introduisent dans les fissures et les agrandissent. Nous pouvons citer le rôle particulièrement actif des graminées comme le sorgho et le mil, à enracinement profond, ainsi que des plantes à racines pivotantes comme les crotalaires.

L'énergie cinétique de la pluie est dissipée par le paillis et la quantité d'eau qui percole à travers le paillis arrive au sol avec une vitesse réduite. Elle peut alors s'infiltrer en douceur sans déformation importante de la matrice poreuse du sol. Le ruissellement est donc moins important et le pouvoir d'érosion de l'écoulement est aussi réduit, ce qui empêche la formation des croûtes par sédimentation (Findeling, 2001).

Le non labour est plus pratiqué en sols argilo-calcaires superficiels, lesquels sont les plus propices aux TCSL, notamment sur colza. Les sols argilo-calcaires lourds et les sols argileux le sont également, mais à un niveau globalement inférieur. Les autres sols, limons battants et sains, craie, limons argileux, aubues... connaissent des implantations sans labour moins fréquentes et beaucoup plus variables selon les régions (Labreuche et al., 2007).

-Impacts sur l'activité biologique du sol

La biologie du sol est caractérisée par l'activité des organismes (faune et flore hypogée) qui composent le système sol plante. On peut trouver de nombreux travaux concernant les effets positifs de la dégradation des paillis sur les processus biologiques dans le sol. Un accroissement de la disponibilité de l'azote suite à la dégradation et la minéralisation des paillis a été mis en évidence par Campbell et Zentner (1993) ; Mary et al., (1996); Schroth et al., (2001) ; Reyes-Gomez (2002). L'objectif est de limiter au maximum l'apport d'intrants afin de ne pas perturber la vie du sol. Ce qui aboutit également à limiter la pollution et la consommation énergétique.

Le paillis favorise l'activité des microorganismes du sol et en particulier celle des vers de terre en fournissant facilement une source de nourriture disponible et la création d'un abri plus favorable (Carsky et al., 1998, Govaerts et al., 2008). A son tour, l'activité des microorganismes du sol contribue à l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol. Par ailleurs, une couverture végétale modifie l'activité biologique et chimique du sol. Elle fournit la matière organique au sol lors de sa décomposition par les agents climatiques et biologiques. Cette dernière est progressivement incorporée dans l'horizon de surface et l'enrichit au cours des cycles de culture (Scopel, 1994). La couverture végétale a aussi un effet sur l'activité de la mésofaune. Cette

dernière se développe largement sous paillis, crée par son activité des galeries, augmentant notablement la capacité du sol à l'infiltration (Findeling, 2001).

Les microorganismes du sol contribuent à la formation des caractéristiques physiques du sol (creusement de galeries) et aux transformations chimiques : ils décomposent la matière organique fraîche provoquant la libération d'éléments minéraux directement assimilables par les plantes (minéralisation primaire), ou à l'inverse participent à sa réorganisation sous forme d'humus (humification). L'humus est à la fois une source d'approvisionnement en éléments minéraux pour les plantes (par minéralisation secondaire), et un élément clé du comportement du sol en jouant sur ses caractéristiques physiques (stabilité structurale) et chimiques (capacité d'échange cationique). La qualité et le degré d'humification de la matière organique du sol sont donc modifiés par l'apport de résidus (Bayer et al., 2000). Crovetto (1996) constate l'activité de champignons qui pénètrent les tissus organiques les détruisant par l'activité enzymatique, et de bactéries qui complètent ce travail en fournissant les produits ultimes de la décomposition. Il constate notamment que azotobacter qui possède une aptitude à fixer l'azote quasiment comparable à rhizobacter (légumineuses) prolifère et pourrait jouer un rôle important dans le cycle de l'azote.

Le SCV tend à développer une vie microbienne riche et notamment un équilibre par antagonisme entre les populations microbiennes, comme dans les prairies ou les forêts. Le SCV à long terme donne un rôle important aux vers de terre dans le processus d'humification. Ces derniers par leur activité rejettent à la surface des monticules riches en matière organique qui protègent le sol et créent de nombreux macropores. Les macropores guident la plante dans sa colonisation racinaire, améliorent la capacité d'infiltration du sol et permettent ainsi une meilleure distribution de la matière organique dans l'horizon parcouru par les vers. La présence de vers de terre peut augmenter de 30% la vitesse de dégradation des résidus (Zachmann et Linden, 1989). Le travail du sol détruit l'habitat des vers de terre, concentrés essentiellement dans les 10 premiers centimètres de sol, et perturbe leur activité. Les vers de terre en se multipliant et assurent un véritable labour naturel : dégradation et migration des matières organiques, drainage grâce à la multiplication des galeries de vers de terre, aération, maintien de la structure. A l'arrêt du labour, le milieu est plus ou moins recolonisé par les différentes populations de vers de terre. Leur nombre augmente de manière significative, ainsi que la biodiversité des espèces (Blondel et Heddadj, 2004). Il en résulte une augmentation de la macroporosité biologique et l'intégration de la matière organique avec entraînement en profondeur en quelques années. Enfin Mando (1997) montre que l'utilisation d'un paillis de composition chimique adapté permet, en présence de termites, d'améliorer la structure physique du sol mais aussi d'augmenter son activité microbienne et la libération de nutriments pour la culture. L'ensemble de ces phénomènes concourent à une meilleure circulation de l'eau et des minéraux dans le sol et à un meilleur développement et un rendement plus élevé de la culture en SCV.

On suppose que les plantes de couverture, en créant des conditions de température et d'humidité favorables aux micro-organismes et en fournissant plus de matière organique, favorisent leur prolifération et leur activité. La transformation de la matière organique permet également une meilleure alimentation minérale des plantes cultivées.

Au coté de ces effets positifs, quelques aspects négatifs dus à cette activation biologique ont été cependant relevés :

-comme nous l'avons vu précédemment, le couvert végétal peut favoriser la prolifération de parasites des cultures (exemple des nématodes et des symphiles qui s'attaquent aux racines de maïs, au manioc, et des vers blancs qui détruisent les tubercules de macabo)

-plusieurs cas de concurrence entre l'activité microbienne et les plantes cultivées ont été signalés par certains auteurs, surtout en ce qui concerne l'azote et l'eau

-en cas de faible disponibilité en résidus végétaux, certains termites consomment la matière organique du sol (Wielemaker, 1984).

En SCV, les micro-organismes du sol se concentrent en surface où se trouvent les résidus de récolte. Mais le contact n'est pas optimal, ce qui réduit considérablement la vitesse de décomposition de la matière organique et de minéralisation du sol.

- Qualité de l'air

Il est aujourd'hui largement admis que l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre contribue au processus de réchauffement climatique. D'après Goldberg (2006), l'agriculture est responsable de 30 % des rejets de gaz à effet de serre dans monde, 25 % du CO₂ et 70 % de N₂O. Pour ce qui est du CO₂, l'agriculture est à la fois émettrice et « puit de carbone ».

La réduction du travail mécanique et de la consommation d'énergie implique une réduction des particules émises durant le labour, ce qui résulte en une réduction de la pollution de l'air.

La réduction du travail mécanique a également pour conséquence une réduction des émissions de SO₂ par les moteurs, réduisant ainsi de façon minimale l'impact sur l'acidification de l'atmosphère, et donc les pluies acides. La prise de conscience de l'importance des émissions de gaz à effet de serre en agriculture et du potentiel de sa réduction par les pratiques agricoles est récente. De nombreuses études ont été menées en ce qui concerne le dioxyde de carbone, mais relativement peu d'études ont étudié l'ensemble des gaz à effet de serre.

- Baisse de l'émission de CO₂ et fixation du C dans le sol

Déjà, le SCV permet de réduire la dépense énergétique (fioul, mécanisation, engrais...). Le SCV favorise le stockage du carbone sur les matières organiques du sol. L'enfouissement en profondeur des matières organiques par le labour accélère la minéralisation et donc la libération de CO₂, alors que l'accumulation en surface favorise l'humification donc le stockage de C (Chevrier et Barbier, 2002). Pour celui-ci, l'agriculture de conservation est une des meilleures voies pour lutter contre l'effet de serre.

Si de nombreuses études existent sur le CO₂, peu portent sur l'ensemble des gaz à effet de serre. Pour le N₂O, les émissions sont très sensibles aux conditions physiques, structure, teneur en eau

et elles sont liées à l'occurrence de conditions anoxiques dans le sol, à la disponibilité du carbone. D'après Metay et al., (2007) le système SCV diminue les émissions de N_2O , de 31 à 35 g $N_2O-N\ ha^{-1}\ an^{-1}$ pour SCV et CT respectivement. Il faut préciser que le taux de réchauffement global de N_2O est 296 fois supérieur à celui du CO_2 .

L'agriculture participe à l'effet de serre à deux niveaux : comme émettrice de gaz à effet de serre et comme puits de carbone. En effet, de nombreuses activités agricoles agissent sur le stockage ou les émissions de gaz à effet de serre (Agu et al, 2000) : travail du sol, gestion des intrants, combustion d'énergie fossile liée aux machines, élevages et gestion des déjections animales...

La réduction de l'utilisation de machines (INRA, 2001) résulte dans une réduction importante de la consommation d'essence et d'huile, et donc dans une protection des réserves en énergies non renouvelables (hydrocarbures). Guedez, 2001 rapporte les résultats de deux essais comparant la consommation en gasoil en non labour par rapport à CT: dans le premier essai, la consommation réduit à 33 l/ha en non labour et dans le deuxième essai la consommation est réduite entre 15 % et 50 % en non labours. Grâce à la réduction du travail mécanique et de la consommation d'énergie, le non-labour sauvegarde des combustibles fossiles et réduit donc les émissions de CO_2 et CO (et donc de CH_4 , directement lié) des tracteurs (Guedez, 2001).

Le non-labour agit également comme réservoir de carbone car ses sols sont plus riches en matière organique et en carbone pris par les plantes à l'atmosphère. Cela limite donc l'effet de serre (Guedez, 2001). Cette réduction est toutefois à relativiser. En effet, selon Smith et al., 1998 une conversion à 100 % à l'agriculture de non-labour séquestrerait environ 23 Tg C an^{-1} dans l'Union Européenne ou environ 43 Tg C an^{-1} dans toute l'Europe (excepté l'ancienne Union Soviétique). De plus, jusqu'à 3.2 Tg C an^{-1} pourrait être sauvé en émission d'énergies fossiles. Comparée aux estimations du potentiel de séquestration de carbone pour d'autres options, l'agriculture en non-labour montre un potentiel presque deux fois supérieur aux scénarios où les sols ont un amendement en matière organique. Les calculs montrent qu'une reconversion de 100 % à l'agriculture en non-labour réduirait toutes les émissions de carbone d'énergies fossiles en Europe. En revanche, cela équivaut à environ 4.1 % des émissions anthropogéniques totales de CO_2-C produites annuellement en Europe (excluant l'ancienne Union Soviétique), ce qui équivaut à environ 0.8 % des émissions anthropogéniques mondiales annuelles.

Le paillage implique aussi la séquestration du C-par l'immobilisation temporaire de CO_2 ainsi potentiellement la conversion de cultures annuelles d'une source nette en un puits net de CO_2 (Kern et Johnson, 1993; Lal et Bruce, 1999 ; Follett, 2001 ; Erenstein, 2003 ; Metay, 2005).

Richard et al., (2004) indiquent que la suppression du travail du sol (et l'apport, en surface exclusivement, de résidus de cultures et des amendements organiques), fait que le taux de carbone a tendance à progresser en surface du sol et à diminuer en profondeur. Il en résulte globalement une augmentation du stock de carbone (à Boigneville : 200 $kg\cdot ha^{-1}\cdot an^{-1}$ en moyenne sur 22 ans) dans les sols.

- Biodiversité

Les bactéries, champignons, protozoaires et autres petits organismes du sol jouent un rôle essentiel dans le maintien des propriétés physiques et biochimiques nécessaires pour la fertilité des sols. De plus grands organismes, des vers, des escargots et de petits arthropodes cassent la matière organique qui est ensuite dégradée par les micro-organismes, et transportée à des couches plus profondes du sol, où elle est plus stable. En outre, les organismes du sol servent eux-mêmes de réservoirs d'éléments nutritifs. Ils suppriment les agents pathogènes externes et décomposent les polluants en éléments plus simples et souvent moins néfastes. Les réductions de la biodiversité du sol rendent les sols plus vulnérables à d'autres processus de dégradation (CCE, 2002).

En évitant la destruction de la structure du sol par le labour, et en gardant les résidus de récolte sur les champs, le non-labour donne un excellent habitat aux organismes du sol, des microorganismes aux vers de terre et insectes. La biodiversité et bio activité du sol sont améliorées. En conséquence, les bases de la chaîne alimentaire sont restaurées, ce qui profite aux prédateurs qui bénéficieront également de la protection physique des résidus de récolte. Les zones d'agriculture de conservation auront ainsi une plus grande population d'oiseaux et de petits mammifères (Guedez, 2001). Cette conséquence, toutefois, est difficilement appréciable pour un agriculteur car l'augmentation de la biodiversité peut également signifier une augmentation des pestes et nuisibles. Le SCV, en favorisant l'activité biologique et la diversité favorise également certaines populations nuisibles telles que les limaces (Taupin, 1999). La présence de couvert mort ou vivant et l'absence de travail du sol favorisent le maintien de la population de limaces. De plus, certains couverts ou cultures intermédiaires engendrent la prolifération de limaces. Si le climat est propice au maintien et à la reproduction, les limaces peuvent devenir un problème conséquent à gérer pour l'agriculteur, malgré le fait que les TCSL favorisent également les prédateurs des limaces tels que certaines espèces de carabes (ACTA, 2001). Plus d'études sont nécessaires à ce sujet. De plus, cela dépend de l'utilisation des produits phytosanitaires et de leur toxicité dans la chaîne alimentaire. Enfin, les principaux effets de la diminution ou augmentation de la biodiversité étant indirects, l'estimation des coûts ou bénéfiques n'est pas possible aujourd'hui (CCE, 2002).

Concernant la répartition de l'activité biologique au niveau du profil cultural, il est accepté en France et à l'étranger que la masse de microfaune est bien plus importante dans la couche 0-10 cm que dans la couche 10-30 cm. En revanche pour le traitement avec labour, les micro-organismes sont répartis de façon beaucoup plus homogène dans le profil étudié. La concentration de l'activité biologique est donc essentiellement en surface en non-labour, ce qui paraît normal du fait que la décomposition du couvert végétal se pratique plus en surface.

Scopel (1999) constate également une augmentation nette des teneurs en matière organique, mais seulement sur les 5 premiers centimètres de sol après 3 ans de pratique de SCV (avec paillis de maïs) sous un climat sec au Mexique. Cette augmentation des teneurs en matière organique provient vraisemblablement aussi en partie de la dégradation du système racinaire de la culture très développé en surface sous semis direct avec paillis de résidus par les micro-organismes.

2.7. Aspects agronomiques

Il y a un effet majeur sur la conservation de l'eau en réduisant le ruissellement et les pertes par évaporation en SCV. Par conséquent, davantage d'eau est conservée dans le sol, où elle reste potentiellement disponibles pour la croissance des cultures (Kalra et al., 1984 ; Gonzalez-Sosa et al., 1999 ; Bussière et Cellier, 1994 ; Govaerts et al., 2007 ; Dahiya et al., 2007).

Des limites apparaissent cependant en ce qui concerne la mise en place de la culture. En effet celle-ci doit se faire sur un sol bien ressuyé et les risques de tassement du sol doivent être minimales, ce qui n'est pas toujours le cas notamment après une culture de maïs. Le paillage implique un lit de semence couvert de résidus, ce qui complique l'opération de semis. Les paillis peuvent bloquer le semoir et exigent des adaptations à ce problème là. Il convient aussi d'assurer un bon contact entre le sol et les graines. Le paillis peut aussi rendre le semis plus délicat et nécessiter de plus de temps. Des précautions sont donc à prendre : le sol ne doit pas être trop compacté (en surface surtout) et les semences doivent être suffisamment recouvertes.

Les rendements moyens observés entre parcelles avec et sans labour sont en général très peu différents, à 1 ou 2 % près. Cela confirme l'idée généralement admise de l'absence d'effet de la suppression du labour sur les rendements (lorsque la technique est maîtrisée). Cette information montre également que les implantations sans retournement du sol ne sont pas réservées aux terres à faible potentiel ou à forte charge en cailloux (Labreuche et al., 2007).

Normalement la levée est plus lente en SCV mais les populations finales sont équivalentes dans le système SCV par rapport aux systèmes classiques. Toutefois l'enracinement profond est perturbé en SCV puisque le taux de racines fourchues progresse de 20 %. Par exemple pour le colza en TCSL la croissance automnale est faible car les paillis de la culture précédente ralentissent la levée des semis et les structures compactées contrarient l'enracinement (Labreuche et al., 2007).

Au niveau des rendements sur l'exemple de l'expérimentation morbihannaise, Blondel et Heddadj (2004) ne signalent aucun impact sur les rendements du maïs et du colza ; par contre, la culture du blé est pénalisée lorsqu'elle est conduite en semis direct.

Diverses études montrent des rendements équivalents voire supérieures pour les cultures en SCV. Des essais de culture sans labour pendant 34 ans sur des sols limoneux et argileux à Changins (Suisse) permettent de distinguer trois périodes dans l'évolution des rendements. De 1970 à 1978, les différences des rendements moyens entre travail sans labour et travail avec labour sont minimales ; de 1979 à 1991, le non labour est supérieur au labour de 9 % en moyenne ; et de 1992 à 2003 les différences sont de nouveau minimales avec des résultats de même type qu'en première période (Vulliaud et Mercier, 2004).

- Impacts sur la flore adventice

Le labour, en climat continental a comme intérêt l'aération du sol, la destruction efficace des adventices et des limaces et aussi de quelques déprédateurs par enfouissement. Il s'est substitué à l'agriculture sur brûlis, laquelle n'est efficace contre les « mauvaises herbes » que quelque années. Quand on supprime le labour le taux de mauvaises herbes augmente si la lutte chimique n'est pas

efficace. Néanmoins certains auteurs disent que le SCV affecte le taux des mauvaises herbes, les ravageurs et les maladies. Il est connu pour contrôler la croissance des mauvaises herbes, en général par étouffement ou par les effets allélopathiques (Akobundu, 1987).

- Les principaux mécanismes de contrôle d'adventice mis en jeu en SCV

- Compétition pour la lumière : la plante de couverture morte ou vivante, plus le mulch est épais, plus le contrôle des adventices est efficace. Dans le cas d'une couverture vivante, un bon contrôle des mauvaises herbes nécessite une plante à développement rapide et à fort pouvoir couvrant.

- Allélopathie : l'allélopathie est l'ensemble des phénomènes dus à l'émission ou la libération de substances organiques par divers organismes végétaux vivants ou morts et qui s'expriment par l'inhibition ou la stimulation de la croissance des plantes se développant au voisinage de ces espèces ou leur succédant sur le même terrain.

Dans les cas de contrôle par l'allélopathie, les plantes de couverture émettent des substances qui gênent la germination, la croissance ou le développement des adventices. Ces substances peuvent être des exsudats provenant des racines, des produits résultant du lessivage des tiges et des feuilles, ou encore des toxines issues de la décomposition de parties de la plante (De Raissac et al., 1998).

En SCV les labours motorisés sont remplacés par des labours chimiques. Par la suite, les herbicides sont épandus de façon ciblée (sur la ligne), ce qui limite les quantités apportées. Cependant, on constate que ces systèmes nécessitent en définitive un nombre de traitements herbicides ou une quantité par hectare de produits épandus plus élevés qu'avec les itinéraires herbicides réalisés en systèmes conventionnels (Séguy et al., 1999).

De même, il a été montré que les quantités d'herbicides épandues, lorsque le travail du sol est simplifié, sont supérieures à celles apportées en labour conventionnel de 15 à 60 %, ce qui dépend du degré de simplification, du type de culture et de la nature des adventices (Barriuso et al., 1994). Dans la bibliographie en général, les avis sont partagés en ce qui concerne l'efficacité du contrôle des adventices par une couverture végétale permanente. Si certains auteurs sont convaincus des avantages présentés par les SCV pour lutter contre l'enherbement des parcelles, il existe certaines limites à l'origine de polémiques. Clavier (1998) a analysé les implications majeures des SCV sur les peuplements de mauvaises herbes dans des parcelles au Mexique :

-le non travail du sol comparativement à un travail conventionnel avec labour, favorise le développement de certains adventices vivaces, car leur système n'est pas détruit et peut donc former des bourgeons végétatifs. Ainsi, en France, des infestations importantes de graminées vivaces (chiendent rampant, avoine à chapemets) ont été observées en monoculture de céréales implantées en SCV (Debaeke et Orlando, 1994).

-la présence d'une couverture végétale provoquerait une augmentation du stock de semence d'adventices en les retenant, alors qu'elles ont tendance à être emportées par les

pluies quand le sol est nu. En France, Debaeke et Orlando (1994) précisent que la concentration des graines semble se faire dans les cinq premiers centimètres du sol. La couverture végétale aurait également l'inconvénient de faire écran lors des traitements herbicide, et donc d'empêcher leur action : un mulch peut intercepter jusqu'à 60 % du pesticide appliqué (Barriuso et al., 1994).

Une polémique beaucoup plus générale semble exister à propos des SCV : ils sont certes présentés comme offrant une solution naturelle et écologique aux problèmes de protection de l'environnement (érosion, baisse de fertilité des sols), mais les traitements herbicides qu'ils impliquent ne seraient-ils pas justement en contradiction avec une solution naturelle et écologique ? (Diallo, 2002). Mamarot (2004), au sujet de la problématique du non labour vis-à-vis des adventices, rapporte que le stock semencier concentré en surface, conduit à exprimer pleinement son potentiel de salissement (95 % des levées d'adventices ont lieu dans les 5 premiers cm du sol) alors que par ailleurs le développement des espèces nitrophiles indésirables, bisannuelles et vivaces se trouve favorisé et que l'augmentation des matières organiques libres (mulch) ou liées (complexe argilo-humique) dans l'horizon de surface contribuent à faire diminuer l'efficacité des herbicides et en augmenter la persistance. Mais à l'inverse, l'absence de lumière et un mauvais contact des graines de mauvaises herbes avec le sol devraient en réduire les levées. De même, la localisation en surface des graines ne peut qu'aggraver le taux annuel de décroissance de leur viabilité. S'appuyant sur un réseau d'exploitations en Midi-Pyrénées, l'auteur observe que les écarts de salissement semblent être plus le reflet de la qualité du désherbage (dans la culture et dans l'interculture) que les techniques culturales employées. Et les échecs de désherbage pour des raisons humaines ou climatiques se révèlent, selon lui, plus rapidement et plus intensément en non labour qu'en labour.

Trois leviers sont déterminants selon Maramot (2004) pour compenser l'effet désherbant du labour :

- une meilleure gestion de l'interculture : déchaumage, destruction (mécanique ou chimique) des nouvelles levées et les vivaces dans l'interculture et couverts végétaux bien installés.
- un désherbage parfait en alternant impérativement les molécules, pour éviter toute explosion du salissement : il entraînera un surcoût très variable selon la rotation et les espèces posant problèmes.
- une rotation allongée, si possible avec alternance des cultures d'hiver et de printemps.

Il conclut clairement que le non labour rend indéniablement plus délicate l'opération de désherbage qui, de fait, nécessite de plus grandes compétence, vigilance et réactivité de la part de l'agriculteur.

Masse et al., (2004), selon des résultats culturaux sur longue durée obtenus en France, confirment les effets favorables des rotations sur la maîtrise du désherbage, notamment la succession des cultures d'automne et de printemps, de même que l'alternance de cultures de graminées et de dicotylédones.

La lutte contre les adventices constitue un des principaux problèmes auxquels sont confrontées les agricultures des régions chaudes, mais le problème existe aussi dans les régions tempérées. Dans les SCV, c'est la plante de couverture qui doit permettre le contrôle des mauvaises herbes. Hormis la gestion des résidus de récolte en paillis, certains de ces systèmes consistent en fait à implanter ou à sélectionner un adventice principal, la plante de couverture, qui exerce entre autre, des effets régulateurs sur le développement des autres mauvaises herbes. En retour, il faut parvenir à contrôler la plante de couverture, soit par des moyens mécaniques soit par des produits chimiques, afin qu'elle ne concurrence pas elle-même la culture principale.

D'après Chabanne (2003) les plantes de couverture comme les résidus de récolte limitent l'installation des mauvaises herbes et leur développement par compétition pour la lumière. Par ailleurs, leurs racines diffusent des substances qui retardent la croissance ou inhibent la germination d'autres plantes. Cet effet, bien maîtrisé, permet de réduire l'utilisation des désherbants. Les plantes de couverture doivent être cependant compatibles avec la culture principale. Une couverture végétale vive peut ainsi remplir les principaux rôles du travail du sol : aération, ameublissement, contrôle des adventices des cultures.

Le contrôle des mauvaises herbes est crucial pour le SCV car le non labour du sol favorise la levée des adventices dès les premières pluies. Le manque de moyens techniques et de connaissances rend les petits producteurs impuissants face à ce problème. Ils manquent de références techniques pour lutter efficacement contre les adventices (variété, date de semis, répartition spatiale, gestion de la couverture, méthodes mécaniques chimiques).

Pour épandre l'herbicide "total" nécessaire à la destruction des plantes de couverture avant l'implantation de la culture, le pulvérisateur requis est semblable à celui utilisé en système conventionnel. En revanche, au cours du cycle de la plante cultivée, on utilise parfois deux types d'herbicides : un pour la ligne de semis (herbicide sélectif de la culture), et un pour l'interligne (herbicide total). Cette pratique permet de réduire les coûts des herbicides, les herbicides sélectifs étant plus chers que les herbicides "totaux".

- Impacts sur les maladies et sur les parasites des cultures

Le SCV présente différents avantages et inconvénients par rapport aux ravageurs et maladies des cultures. L'effet du paillis sur les ravageurs et les maladies est varié. Un paillis en fait peut reporter l'inoculum et des parasites de la récolte précédente. Par ailleurs, la présence du paillis peut réduire la transmission des maladies des plantes par la pluie-éclaboussures (Thurston, 1992 ; Erenstein, 2003).

Le SCV maintient un environnement favorable aux champignons pathogènes ou de certains prédateurs, comme limaces qui peuvent causer de sérieuses pertes aux cultures ou leur destruction. La lutte contre les limaces dont les œufs ne sont plus enfouis par le labour, et dont les prédateurs (oiseaux, carabes...) ont presque disparu semble nécessaire dans ce système. Le développement des populations des limaces serait favorisé par les lits de semence motteux, l'absence de déchaumage, la destruction tardive du couvert, le degré d'appétence de ces

couverts...Comme moyens de lutte, ARVALIS retient le déchaumage pour une terre fine et le roulage des sols motteux après semis. Les couverts végétaux peuvent être efficaces selon leur appétence (Diallo, 2002). On peut aussi utiliser des semences traitées.

Le paillis de résidus peut être un foyer de développement de micro-organismes nuisibles ou une source de produits de dégradation phytotoxiques pour la culture en place (Bussière, 1991 ; Findeling, 2001). L'effet d'un paillis de résidus dépend donc fortement du contexte agro-pédo-climatique dans lequel il est utilisé.

Masse et al., (2004) soulignent que les attaques de tipules ne sont pas influencées par le mode de travail du sol mais leur population augmenterait derrière les cultures intermédiaires dès qu'elles seraient insuffisamment développées.

Le développement des fusarioses est lié au climat, au précédent cultural ainsi qu'aux modes de travail du sol. Ce dernier a un impact sur les précédents culturaux favorables aux fusarioses comme le maïs et le sorgho, en modifiant la quantité de résidus de culture en surface. Par contre, le travail du sol n'a pas d'impact sur d'autres précédents, comme le blé, le pois ou le colza.

D'après une enquête réalisée auprès d'agriculteurs dans les Côtes d'Armor et en Indre et Loire rapportée par Lebreuche et al., 2007, l'impact de l'abandon du labour sur la conduite des cultures de blé, maïs et colza a été mesuré. Certaines pratiques comme la fertilisation azotée ou la date de semis sont peu affectées par le changement de travail du sol. Les anti-limaces ont tendance à être utilisés plus fréquemment dans le département de l'Indre et Loire alors qu'aucun écart n'a été noté dans les Côtes d'Armor où la pression du mollusque est plus faible. Cependant le coût d'anti-limaces n'augmente pas. Le même paradoxe a été noté sur le coût de désherbage (culture et inter-culture). Le nombre d'herbicides non sélectifs augmente dans différentes situations (colza, blé de colza, maïs). L'usage de ces produits est par contre quasi nul dans certaines situations comme les blés après le maïs. Le coût des herbicides non sélectifs est cependant le plus fort avec labour, signe de doses plus fortes ou des conséquences du choix de produits plus « haut de gamme ». Ces comparaisons montrent que l'usage d'anti-limaces ou d'herbicides non sélectifs tendraient à augmenter mais que d'autres facteurs comme la technicité ou des stratégies d'achats interfèrent. Il faut donc être très prudent dans les conclusions émises lors d'enquêtes.

- Avantages

Avec certaines plantes de couverture ou lors de la dégradation des résidus de récolte, il peut se produire une stimulation de la germination, puis une lyse des tubes germinatifs de certains champignons pathogènes du sol par des phénomènes d'allélopathie. On peut citer les exemples suivants :

-la pourriture des racines de cotonnier due à *Phymatotrichum omnivorum* peut être contrôlée par la présence de résidus de culture.

-la pourriture noire des racines de haricots due à *thielaviopsis basicola* est contrôlée à 90% en mettant sur le sol de la paille d'avoine, des résidus de maïs ou de la paille de luzerne (Abawi et Thurston, 1994).

Les plantes de couverture peuvent constituer une barrière physique à la dissémination d'un inoculum primaire du pathogène. Par exemple, à la réunion, une couverture de kikuyu sur la culture de géranium empêche les éclaboussures de terre et donc l'infestation du géranium par l'anthracnose (*Glomerella vanillae* zim.) (Michellon, 1996).

La couverture végétale peut servir de réservoir de parasitoïdes et donc constituer une forme de contrôle biologique contre les ravageurs et les pathogènes des cultures (Diallo, 2002).

- Inconvénients

Une couverture végétale permanente (par exemple un paillis de tige de blé) peut maintenir une humidité idéale dans les dix ou quinze premiers centimètres du sol pour le développement de *rhizoctonia solani* et *pythium* sp en culture de blé (Abawi et Thurston, 1994). De même, l'humidité est propice à la prolifération des limaces et escargots qui attaquent la culture et la plante de couverture. Dans l'association maïs-mucuna au Honduras, les agriculteurs notent une concentration de rongeurs et serpents sous la couverture végétale qui constitue un abri très favorable à leur prolifération (Buckles et Triomphe, 1999).

Dans le cas d'application des herbicides, le couvert végétal permanent forme un écran lors des traitements insecticides et fongicides. Avec l'augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol, et par conséquent l'entraînement en profondeur des pesticides interceptés par le mulch, les risques de pollution sont augmentés.

La suppression du labour provoque une augmentation de la matière organique et de la biomasse microbienne à la surface du sol, ce qui augmente l'absorption et la dégradation de la plupart des pesticides arrivant au sol, donc les herbicides racinaires ont moins d'efficacité et les pertes par lixiviation diminuent. Les résidus de récolte interceptent les pesticides en solution ou en poudres mouillables (jusqu'à 60 %, Ghadiri et al., 1984), ce qui induit une perte d'efficacité de ces pesticides de traitements des sols. Les formulations les mieux adaptées sont les granulés et les micros encapsulés.

2.8. Effets sur l'humidité et la température du sol

En SCV, la gestion de l'eau est meilleure. En effet, dans un climat sec, le sol est plus humide grâce à : une limitation de l'évaporation par les résidus de récolte, une plus grande porosité et une matière organique plus importante. Dans un climat humide, une meilleure facilité d'infiltration permet un retour de l'humidité du sol à la capacité au champ plus rapide. Le SCV influe sur la quantité d'eau utile stocké dans le sol, ce qui est dû essentiellement à l'action des plantes de couverture. Celles-ci agissent d'une part sur les mécanismes de constitution des réserves en eau dans le sol et d'autre part sur les facteurs de pertes en eau (Scopel, 1994 ; Scopel et al., 1999).

Les résultats de la littérature montrent qu'un paillis permet un stockage d'un volume d'eau non négligeable dans les micro-bassins formés à l'amont des résidus. Cette eau piégée par les micro reliefs ne peut pas s'écouler, elle ne peut que s'infiltrer dans le sol ou s'évaporer, ce qui peut générer un microclimat plus humide et initier une baisse du pouvoir évaporant de l'atmosphère ambiante. En conséquence, le paillis contribue à limiter la quantité d'eau potentiellement mobilisable pour le ruissellement. En outre le paillis, même sous forme de couverture partielle, offre un obstacle à l'écoulement de l'eau sur le sol par effet barrage et augmentation de la rugosité, ce qui conduit l'eau à se frayer un chemin tortueux, et à s'écouler lentement dans le dédale du paillis (Diallo, 2002). De plus, une couverture végétale, qu'elle soit morte ou vivante, crée un environnement dans lequel les variations climatiques sont amorties, en termes de température et d'humidité. En saison sèche, la couverture fait barrage à l'évaporation donc l'humidité résiduelle de la saison des pluies est maintenue. Lorsqu'il pleut en abondance, elle évite le ruissellement, favorisant l'infiltration de l'eau. Le principal avantage du paillage, en particulier en Afrique dans les régions arides et semi-arides, est l'amélioration des sols et les conditions de la surface du sol qui permettent une meilleure infiltration de l'eau (Unger, 1994). Logsdon et al., 1993; Shukla et al., 2003 ont observé que le SCV entraîne une augmentation du taux d'infiltration et par conséquent davantage d'eau peut être stockée dans le sol.

En régime d'évaporation, l'enrichissement en matière organique permet d'augmenter la capacité de rétention en eau du sol au voisinage de la surface, ce qui est particulièrement intéressant pour les sols sableux. Le sol reste ainsi plus humide en période de dessèchement. Cela favorise les semis en conditions sèches mais peut aussi les retarder et affecter la décomposition de la matière organique.

La nature poreuse du paillis en fait un réservoir susceptible d'intercepter une partie de l'eau de pluie et de l'évaporer par la suite. Arreola Tostado (1996) trouve qu'un paillis de résidus de maïs de $4,5 \text{ t.ha}^{-1}$ peut stocker jusqu'à $1,5 \text{ kg.m}^{-2}$ à chaque pluie. Il montre par ailleurs que le paillis évapore environ 75 % de son stock maximal d'eau au rythme de la demande potentielle, au delà des résistances au transfert d'eau qui entrent en jeu et réduisent le flux évaporatif. En climat semi-aride tropical le paillis se dessèche presque intégralement en une journée. Le paillis peut alors contribuer de façon significative aux pertes par évaporation du système sol-paillis (Findeling, 2001).

De nombreuses études ont été réalisées pour comprendre l'effet d'un paillis sur l'humidité du sol (Lal 1978 ; Brun et al., 1986 ; Midmore et al. 1986; Enz et al. 1988 ; Gonzales-sosa 1999) ou sur la température du sol (Adeoya, 1984 ; Midmore et al., 1986 ; Mannque, 1988). La plupart du temps le paillis a été étudié pour ses effets sur le bilan de l'eau et différents modèles ont été proposés (Bond et Willis, 1969 ; Unger et Parker, 1976 ; Steiner, 1989). Cependant ces modèles ne peuvent être généralisés en raison du grand nombre potentiel de combinaisons entre les propriétés du sol, le climat et le paillis (Bussière et Celler, 1994).

MacGarry et al., (2000) montrent que 28 % d'eau supplémentaire est accessible à la plante pour les sols non labourés. Norwood (1994) montre qu'à 90 cm de profondeur, la teneur en eau est augmentée de 62 % grâce au maintien en surface des résidus de culture qui limitent à la fois l'évaporation et le ruissellement. En mettant en place une couverture morte comme Lantana camara immédiatement après la récolte de riz, on peut conserver suffisamment d'humidité dans le

sol pour une culture de blé (Chaudhaary et Acharya, 1993). Les effets de couvrir la surface du sol avec le paillis du blé ont été examinés par Steiner, 1989 ; Li et Xiao, 1992 et Baumhardt et Jones, 2002. Ils considèrent que le paillage est l'un des meilleurs moyens de conserver plus d'eau dans le sol en contribuant à la diminution de l'évaporation.

Une couverture morte permet de limiter l'évaporation du sol. En fait, la présence d'un mulch limite la remontée par capillarité de l'eau contenue en profondeur du sol. Les résultats des travaux au Kentucky de Phillips et al., (1980) montrent effectivement que l'évaporation du sol en semis direct avec mulch est bien inférieure comparativement à un labour sans couverture. (+2°C dans un exemple, mais cela varie selon les auteurs et sites expérimentaux de 1 à presque 10°C). En plus, l'amplitude thermique est moins élevée. Les profils de température journalière de l'air et ceux du sol sont modifiés considérablement par la couche de paillis, une inversion se produisant au sein du paillis, ce qui conduit à baisser les moyennes de la température du sol et son amplitude (Gonzales Sosa et al., 1999).

On peut dire qu'en général, une couche de paillis a tendance de réduire l'évaporation du sol, sa température et l'amplitude de celle-ci (Bristow et al., 1986; Chung et Horton, 1987; Bristow, 1988; Sui et al., 1992; Bussièrre et Cellier, 1994; Azooz et al., 1997 ; Dahiya et al., 2003 ; Dahiya et al., 2007). La technique présente donc une utilité certaine dans les régions arides soumises à de fortes pluies pour limiter l'érosion des sols et la perte d'eau par l'évaporation.

Les effets de paillis sur l'évaporation et la température du sol sont étudiés de manière détaillée par différents auteurs. D'après Findeling (2001), Bond et Willis (1969, 1970) ont conduit des expériences en laboratoire pour étudier l'effet d'un paillis de résidus de riz sur la régulation de l'évaporation d'une colonne de sol. Ils mettent en évidence des phases distinctes d'assèchement d'un sol paillé, qui s'apparentent à celles trouvées par Idso et al (1974) pour un sol nu. Le paillage réduit l'évaporation du sol principalement par l'effet d'ombrage. L'ombrage est plus efficace pendant la première phase de dessèchement d'un sol humide (Bond et Willis, 1970; Adams et al., 1976). La réduction d'évaporation due à des résidus diminue également avec le temps, en particulier dans les périodes de sécheresse ou avec les pluies légères et peu fréquentes (Greb, 1966; Lal, 1974). Dans une étude en laboratoire en utilisant des colonnes de sol, Unger et Parker (1976) a constaté que les taux d'évaporation étaient plus élevés pour le sol nu que pour les sols avec des résidus lors des premiers 15 jours, après, la tendance s'inverserait.

L'effet de la densité d'un paillis sur son efficacité à limiter l'évaporation du sol a été démontrée par Unger et Parker (1976). Ils ont étudié différents types de paillis. Ils concluent que plus le paillis est formé d'un matériau dense plus son efficacité à réduire l'évaporation est grande. Ainsi l'efficacité d'un paillis de 8 t.ha⁻¹ de blé est équivalente à celle d'un paillis de 16 t.ha⁻¹ de sorgho ou de 32 t.ha⁻¹ de coton. Au niveau de la masse, environ deux fois plus de résidus de sorgho et quatre fois plus de résidus de coton (*Gossypium hirsutum* L.) sont nécessaires pour atteindre la même réduction de l'évaporation qu'avec une paille de blé. Steiner (1989) propose une relation empirique unique pour des paillis de différentes natures, reliant la quantité de paillis à la réduction d'évaporation.

L'effet d'épaisseur d'un paillis sur son efficacité à limiter l'évaporation du sol est également étudiée. Gusev *et al.* (1993) et Gusev et Busarova (1996) comparent un paillis de matière organique à une litière forestière et constatent un effet important de réduction de l'évaporation

par le paillis. Ils précisent que l'épaisseur du paillis et la diffusivité de la vapeur d'eau dans le paillis sont des paramètres déterminants pour prédire les flux de masse et de chaleur dans le paillis et le sol. Unger and Parker (1976) et Steiner (1989) ont trouvé que l'épaisseur d'un paillis est plus importante que sa densité pour contrôler l'évaporation du sol.

Le taux de couverture du paillis est aussi un paramètre important. Arreola Tostado (1996) et Scopel et al. (1998) étudient l'effet des couvertures faibles de résidus de maïs (de 30 % à 70 %) sur la dynamique de l'eau pluviale d'une culture de maïs. Ils observent une interception du rayonnement voisine du taux de couverture du paillis. La réduction de l'énergie résiduelle arrivant au sol, et donc de l'évaporation potentielle, est fortement dépendante du taux de couverture du paillis.

L'effet d'un paillis dépend également des conditions externes (humidité du sol sous-jacent et vitesse du vent). Ainsi Sauer et al. (1998) mettent en évidence une résistance du paillis au transfert de la vapeur d'eau qui est d'autant plus forte que le sol sous-jacent se dessèche. Kimball et Lemon (1971) ont montré que la pénétration du vent dans les résidus réduit son efficacité comme un obstacle à l'échange. Des résultats similaires ont été obtenus à partir d'études réalisées par Campbell et al., 1980.

Novak et al. (2000c), Braud (1998a); Bussière et Cellier (1994); Chung et Horton (1987), montrent que le paillis constitue un obstacle physique au rayonnement important et qu'il peut modifier considérablement le bilan énergétique à la surface du sol. La plus grande partie de l'énergie calorifique que le sol reçoit provient de l'énergie solaire : la part de cette dernière, qui arrive au sol, est estimée, en moyenne, en climat tempéré, à 144 calories par jour et par cm² (surface horizontale). En fait, elle varie considérablement en fonction de la latitude, de la saison, de l'exposition et du couvert végétal ; l'énergie calorifique reçue le jour élève la température du sol et évapore l'eau retenue ; la nuit, au contraire, le sol se refroidit par rayonnement : il s'ensuit une oscillation diurne de la température du sol, qui est caractéristique du type de sol et de sa végétation.

Lorsqu'on mesure la température des sols différents, dans une même région et à un même moment, on constate qu'elle peut varier dans de larges limites ; trois facteurs interviennent à ce niveau:

1. la couleur du sol : les sols foncés s'échauffant plus vite que les sols clairs
2. la teneur en eau qui joue un rôle considérable : la capacité calorifique de l'eau est, en effet, quatre à cinq fois plus élevée que celle de l'air ou des matières solides ; il faut donc beaucoup plus de calories pour élever du même nombre de degrés la température d'un sol saturé d'eau, que celle d'un sol sec. Comme on a vu normalement l'humidité du sol en SCV est plus élevée.
3. la couverture végétale, qui se comporte en écran, intervient de façon importante. Par les chaudes journées ensoleillées, la température d'un sol nu peut dépasser 50° C en climat tempéré, et 60 à 70° C en climat tropical.

La conductivité thermique des sols varie considérablement suivant leur aération et leur humidité : celle de l'air est, en effet, très faible par rapport à celle de l'eau et des matières solides ; en conséquence, les horizons humifères de surface, lorsqu'ils sont très aérés, diffusent mal les calories vers la profondeur. Ils s'échauffent (ou se refroidissent) très rapidement à l'inverse des horizons minéraux, moins bien aérés : ces horizons, riches en matière organique et très aérés, constituent un écran protecteur (appelé souvent mulch), qui s'oppose aussi bien à la diffusion des calories, qu'à celle de la vapeur d'eau (limitation de l'évaporation). Il existe donc une véritable discontinuité thermique (et hydrique) pour ces sols très aérés en surface : en agriculture, on installe souvent, à la surface du sol, des mulch artificiels ou résidus de culture qui jouent un rôle comparable (Duchaufour, 1988).

La présence de paillis induit une augmentation de l'humidité du sol et du même coup une augmentation de la capacité calorifique et un réchauffement plus lent du sol qui peut entraîner un retard à la germination de la culture. Varadan et Rao (1983) mettent en évidence l'effet d'un paillis de 5 t.ha⁻¹ d'une espèce herbacée (*Eupatarium odorata*) sur la température du sol pour le bananier et le cocotier une réduction de la température du sol de 1 à 7 °C dans l'horizon 0-10 cm, et la limitation des amplitudes thermiques à 3 °C sur tout le profil (environ 10 °C sans paillis), pendant le pic de chaleur estival. Ils expliquent ce résultat par une réduction de l'énergie incidente à la surface du sol et la limitation du flux de chaleur libérée par le sol durant la nuit.

Les changements des flux de chaleur dans le sol sont dus à la perturbation du sol en CT par rapport à SCV. Le flux de chaleur dans le sol dépend de la capacité thermique et la conductivité thermique des sols modifié par le travail du sol, ce qui affecte la structure du sol, la masse volumique, et la teneur en eau (Hillel, 1998 ; Jury et al., 1991). Parce que les particules du sol ont une faible capacité thermique et une meilleure conductivité thermique que l'eau, les sols secs se réchauffent et se refroidissent potentiellement plus rapidement que les sols humides. En général, la température du sol en CT a tendance de répondre plus rapidement à la température de l'air qu'en SCV où le sol est normalement plus humide (Licht et Al-Kaisi, 2005).

L'effet du paillis sur la limitation de l'évaporation du sol peut avoir des répercussions favorables sur la transpiration de la culture. Gonzalez Sosa et al., (1999) et Gonzalez Sosa (1999) participent à une campagne de terrain de 3 ans à Murex au cours de laquelle ils recueillent une base de données importantes concernant les transferts d'eau et de chaleur dans un système sol-paillis- plante-atmosphère. Le paillis suivi est constitué de végétaux morts pour une partie déposés horizontalement sur le sol et pour l'autre partie laissés sur pied. La couche de paillis maintient une humidité élevée à la surface du sol et conduit à des profils de températures d'amplitude atténuée dans le sol. Licht et Al-Kaisi (2005) ont étudié l'effet de labour sur la température du sol et observé une température supérieure du sol (1.2-1.4 °C) à 5 cm de profondeur par rapport à celle du non labour.

En climat tropical, la présence d'un paillis entraîne généralement une baisse des températures extrêmes du sol, souvent accompagnée d'une diminution des températures moyennes (Bussière, 1991), ces effets étant spécialement marqués près de la surface. L'albédo du paillis, son épaisseur et sa structure (tassée ou aérée) semblent être des paramètres déterminants de l'efficacité d'un paillis à amortir la température du sol (Bussière, 1991). Sauer et al. (1998) montrent qu'un paillis de maïs (8 t.ha⁻¹ et 95 % de couverture), inhibe les transferts thermiques entre le sol et l'atmosphère. La présence de paillis induit une augmentation de l'humidité du sol et du même

coup une augmentation de la capacité calorifique et un retard au réchauffement du sol qui peut entraîner un retard à la germination de la culture. Dans certaines conditions le SCV peut engendrer un maintien prolongé indésirable du sol à basse température (Tamlin et al., 1975 ; Aston et Fischer, 1986) et éventuellement un retard à la germination et à l'émergence des cultures (Sauer et al., 1998; Findeling, 2001).

Certains auteurs utilisent différents modèles pour mieux comprendre l'effet d'un paillis sur l'humidité et la température du sol. Les résultats de simulation réalisée par Bristow et al., 1986 montrent que, pour les conditions de Pullman à l'université de Washington, les résidus de culture en surface du sol ont diminué l'évaporation d'environ 36 % en comparaison avec des simulations de l'évaporation du sol nu. Les tendances au niveau mensuel indiquent cependant que l'efficacité des résidus dans la conservation de l'humidité du sol diminue à mesure que l'intervalle de temps sans pluie augmente.

Au moyen d'un modèle numérique des transferts d'eau et de chaleur, SiSPAT6 : Simple Soil Plant Atmosphere Transfer model, (Braud, et al., 1998), les auteurs estiment une réduction de 5 à 10 % de l'évaporation annuelle avec paillis. Cette réduction résulte d'une forte diminution de l'évaporation du sol, accompagnée d'un rapport d'une partie de cette dernière sur la transpiration de la plante. Hillel et la., (1975) ont présenté une adaptation d'un modèle de simulation de chaleur et les transferts de masse avec un paillis végétal à la surface. Les simulations montrent également que le paillis réduit l'évaporation.

Les résultats de simulation réalisée par Gonzalez-sosa et al., (1999) montrent que l'évaporation d'un sol paillé diminue de 4 à 10 % par rapport à un sol nu selon les caractéristiques du paillis dans le sud-ouest de la France. Les simulations de Gregory et al. (2000) indiquent l'évaporation du sol avec paillis est plus élevée pour les régions ayant des sols argileux avec des précipitations fréquentes et une faible demande d'évaporation que dans les régions avec des sols sableux ayant des précipitations sporadiques et une évaporation élevée. Celles réalisées par Zhang et al., 2007 montrent que, lors d'une période d'essai sur blé, le paillage a augmenté le stockage de l'eau du sol de 5 à 8 %, diminue l'évaporation du sol de 11-13 %, augmente la transpiration de 2-5 % par rapport au système conventionnel. Il en résulterait augmentation du rendement en blé et de fait un accroissement de l'efficacité d'utilisation de l'eau.

D'après Findeling (2001) et Reyes Gomez (2002) le paillis modifie le bilan radiatif au niveau du sol et les échanges turbulents entre le sol et l'atmosphère. Le paillis joue le rôle d'un écran et il atténue le rayonnement arrivant à la surface du sol tout comme celui émanant de ce dernier (Bussière, 1991 ; Gonzalez Sosa et al., 1999 ; Novak et al., 2000c). En plus le paillis est un obstacle physique poreux qui peut limiter fortement les flux diffusifs et convectifs de chaleur et de vapeur entre le sol et l'atmosphère (Bristow et al., 1986 ; Bussière et Cellier, 1994 ; Braud, 1998 ; Findeling et al., 2003 ; Gusev et Busarova, 1996 ; Sauer et al., 1998), les échanges turbulents apportant une contribution importante (Novak et al., 2000a ; Novak, 2000b). Ayant une faible conductivité thermique, il joue le rôle d'isolant thermique entre le sol et l'atmosphère (Bussière, 1991 ; Gusev et al., 1993 ; Novak et al., 2000a ; Sauer et al., 1998). Toutes ces actions se traduisent par la réduction de l'évaporation du sol et des amplitudes thermiques en son sein en présence d'un paillis (Arreola-Tostado, 1996 ; Cheng-hua et Cheng-lin, 1997 ; Kalra et al., 1984 ; Steiner et al., 1989 ; Scopel et al., 1998 ; Unger et Parcker, 1976 ; Varadan et Rao 1983).

2.9. Bilan d'azote

L'azote (N) est un élément nutritif limitant la production agricole dans toutes les régions du monde. Relativement à CT peu d'informations ont été publiées concernant la gestion des fertilisants azotés pour atteindre une production optimale en SCV. L'utilisation efficace des engrais minéraux a été responsable de l'augmentation de la production alimentaire plus que n'importe quelle autre entrée, (+40 % d'augmentation aux USA (Malhi et al., 2001)). Toutefois, l'impact négatif sur l'environnement lié au lessivage des nitrates (NO_3), aux émissions des gaz à effet de serre, entraîne une réduction de l'utilisation d'engrais en Amérique du Nord (Bumb, 1995). Une amélioration de l'efficacité d'utilisation des engrais est donc essentielle pour maintenir les niveaux de rendement.

Le SCV modifie à la fois la demande en azote des cultures en raison de changements dans le potentiel de rendement, et la disponibilité de N en raison des changements dans le cycle de l'azote et les pertes potentielles de N. L'efficacité d'utilisation de l'azote peut également changer avec des changements dans la gestion du travail du sol, le microclimat, l'activité microbienne et la distribution d'engrais par rapport à des résidus de récolte. L'efficacité d'utilisation de l'azote est régie :

- par les caractéristiques du sol (pH, CEC, sa teneur en matière organique, sa texture : le type d'argile, l'aération et le compactage),
- les facteurs climatiques (température, précipitations : la quantité et le timing, l'évaporation et le stade de développement cultural)
- les pratiques culturales (travail du sol, semis, la rotation des cultures et la gestion des ravageurs), le type de culture
- la gestion des applications d'engrais

En gros, l'efficacité d'utilisation de l'azote appliqué est généralement inférieure à 50 % dans les régions tropicales (Baligar et Bennett, 1986) et inférieure à 70 % dans les zones tempérées (Malhi et Nyborg, 1991, 1992). Il apparaît que notre compréhension de la gestion optimale des fertilisants dans divers écosystèmes est encore incomplète.

Un programme de gestion efficace de N doit répondre aux quatre questions principales, à savoir, le taux d'application de N, le type d'engrais (urée,...), le calendrier d'apports et le placement de l'engrais en relation notamment avec la technique d'irrigation (Mailhol et al., 2006). La quantité d'engrais azoté nécessaire en SCV est souvent calculée en faisant référence à la quantité nécessaire pour le CT en ajoutant quelques pourcentages plus ou moins arbitraires. Le pourcentage varie selon les régions, 10 à 20 % (Phillips et al., 1980; Buchholz et Hanson, 1982). Le placement d'engrais sous la surface peut réduire la volatilisation de NH_3 et l'immobilisation des éléments nutritifs (Mengel et al., 1982; Reinertsen et al., 1984; Fox et al., 1986). Le placement à proximité des racines limite l'effet du transport par la pluie ou l'irrigation prépondérant lorsque l'engrais est épandu à la surface. L'épandage d'engrais azoté sur la surface en SCV réduit la disponibilité de N pour la culture par rapport à l'épandage et l'incorporation en CT (Malhi et Nyborg, 1986). On peut résoudre en partie ce problème en enterrant l'engrais au moment de semis.

La dose appliquée tient généralement compte de la perte par volatilisation, immobilisation, dénitrification et par lessivage. Au cours du temps, l'amélioration structurale du sol en SCV et la formation des macropores peuvent augmenter l'infiltration (Ehlers, 1975; Edwards, 1982). Il en résulte une augmentation du risque de lessivage des ions mobiles tels que NO_3^- dans des eaux drainées (Thomas et al., 1973). D'après Dick (1983) une délibération lente d'éléments nutritifs, un lessivage possible, une accumulation des résidus organiques et le non travail du sol, contribuent à la diminution de la disponibilité en N sur non labour.

La plus part du temps, en SCV, les engrais sont appliqués à la surface du sol plutôt qu'incorporés au sol. De ce fait, la plupart des engrais appliqués sont directement exposés à l'air et la lumière. Cela peut contribuer à accroître les pertes d'azote. L'action de l'azote est plus efficace en non labour lorsque le paillis est plutôt retenu qu'enlevé (Malhi et Nyborg, 1990). Selon certains auteurs (Bhagat et Verma, 1991) le paillage peut réduire la perte d'engrais, en particulier par la volatilisation et augmenter ainsi l'efficacité de l'utilisation d'azote, laquelle généralement diminue avec la quantité appliquée (Sieling et al., 1998; Bellido et Bellido, 2001).

L'application d'engrais à base de NH_4 permettrait de réduire les pertes par la volatilisation lorsque les températures sont faibles, le vent léger, et lorsqu'il y a de bonnes chances qu'il pleuve après l'application d'engrais. NH_4 et NO_3 font l'objet d'immobilisation par des micro-organismes au cours de leur croissance et leur reproduction. L'immobilisation augmente avec la présence d'un résidu ayant un haut rapport C/N. La dénitrification se produit lorsque la disponibilité en oxygène dans le sol est limitée. Cela se produit surtout lorsque le sol est inondé ou fortement compacté. Toutefois, même lorsque le sol n'est pas complètement inondé, il y a des microsites (endroits) où la disponibilité en oxygène est limitée et la dénitrification peut se produire. Le NO_3 est plus soumis au lessivage que l'ammonium (NH_4), NH_4 est normalement fixé aux particules du sol et ainsi soustrait au lessivage, contrairement à NO_3 qui lui est mobile dans la solution du sol. Le potentiel de pertes d'azote par l'intermédiaire de ces différentes voies possibles dépend du type de sol et des conditions environnementales (Malhi et al., 2001).

Les émissions de N_2O au cours de l'été sont légèrement plus élevées, similaires ou inférieures sous non labour, mais toujours plus basses sous non labour pendant le dégel de printemps. L'émission totale du printemps et de l'été est égale ou plus basse en SCV qu'en CT. Cela montre que le non labour a un potentiel de réduction d'émissions de gaz à effet de serre dans la région d'Alberta de Parkland (Canada) selon Lemke et al., (1999). L'épandage de NO_3 à la surface du sol peut être relativement plus efficace que l'urée ou le NH_4 en SCV par rapport à CT (Lemke et al., (1999)).

L'utilisation de l'azote soluble du sol par les microorganismes qui décomposent la litière peut être responsable d'une carence de la plante en azote, ce qui la rend plus sensible aux maladies et réduit sa production. Il en va ainsi de la perte d'azote par volatilisation suite à la décomposition de la matière organique.

Les modifications des propriétés physiques du sol en non-labour modifient le fonctionnement microbien. Ainsi, les microorganismes responsables de la nitrification sont particulièrement sensibles au pH du sol. Avec la diminution de la température et la moins bonne aération du sol, la nitrification est donc ralentie (surtout en fin d'hiver), même si cela dépend de l'humidité du sol. La dénitrification augmente dans les premiers centimètres et diminue dans le reste du profil

anciennement labouré (site de Toulouse, Groffman 1985), mais le résultat général reste nuancé et la plupart des auteurs y voient un nécessaire complément d'azote. Il est important de constater que l'azote est réparti différemment en SCV. Ce système réduit nettement les transferts d'azote organique liés au déplacement des sédiments dû à la réduction des phénomènes d'érosion par ruissellements. D'après Nyborg et Malhi (1989) le taux de minéralisation nette a été plus élevé en CT qu'en SCV. En SCV, l'accumulation de résidus organiques à la surface du sol fait écran à l'évaporation. Cet environnement plus humide est propice à l'augmentation de l'activité microbiologique (Doran, 1980). Le SCV dessèche plus lentement les sols et maintient la température du sol plus faible, ce qui retarde et ralentit la minéralisation et la nitrification. Dans ce contexte, parmi les micro organismes du sol, il y a une population importante de micro organismes qui est capable de favoriser la dénitrification et d'activer un métabolisme anaérobie (Doran, 1980; Rice and Smith, 1982; Linn and Doran, 1984; Aulakh et al., 1984).

Les plantes de couverture produisent une biomasse importante en quantité, sur et dans le sol, qui n'est pas exportée. Le labour permet d'incorporer la matière organique dans le sol, ce qui en accélère la minéralisation. Ainsi, le SCV limite la vitesse de décomposition de la matière organique, ce qui est d'autant plus important sous les climats chauds et humides où cette décomposition est très rapide. Cependant, par rapport aux processus de minéralisation de la matière organique, il convient d'analyser le fonctionnement du système SCV. Si l'absence de labour diminue la vitesse de minéralisation, la présence de la plante de couverture peut avoir un effet inverse. En effet, l'accumulation de résidus organiques en surface augmente l'activité biologique du sol, ce qui intensifie le processus de minéralisation. Il ne faut d'ailleurs pas oublier que la décomposition de la matière organique dépend pour beaucoup des conditions climatiques : elle est active en période humide et chaude, et quasiment inexistante en période sèche ou froide. De plus, rappelons-le, la minéralisation dépend du rapport C/N des éléments végétaux concernés. En effet, la vitesse de décomposition de la matière organique est inversement proportionnelle à la teneur en lignine et au rapport C/N des résidus.

Les plantes de couverture joueraient le rôle de pompes biologiques en favorisant la remontée d'éléments minéraux situés à une trop grande profondeur du sol pour être accessibles aux plantes cultivées, mécanisme sur lequel on ne dispose pas encore d'éléments chiffrés. Ce rôle n'est possible que pour les plantes de couverture qui disposent d'un enracinement suffisamment développé pour aller absorber ces éléments en profondeur. Par la suite, la minéralisation de la biomasse végétale produite par la plante de couverture libère en surface les éléments minéraux ainsi captés et recyclés (Séguy et al., 1996).

Le paillis d'une légumineuse se caractérise par un faible rapport C/N qui peut fixer des quantités importantes de N. Dans ce cas, il a tendance à améliorer de manière significative la disponibilité de N qui peut potentiellement augmenter le rendement dans des situations où le manque d'azote est un problème. Par contre, un paillis de céréale se caractérise par un fort rapport C/N qui peut effectivement provoquer un stress azoté due à une immobilisation temporaire de N par rapport à des situations où les résidus sont brûlés ou extraits (Quansah et al., 1997 ; Erenstein, 2003).

L'activation de la vie biologique des sols par la couverture végétale augmente la consommation en azote des microorganismes, ce qui peut provoquer dans certains cas (rapport C/N élevé) des carences temporaires en azote. Dans certains cas, le bilan azoté est meilleur pour la plante cultivée en système conventionnel qu'en SCV, dans d'autres cas c'est le contraire. Une inter-

culture légumineuse comme *Mucuna* donne lieu à une fixation importante de N (par exemple 80-150 kg N. ha⁻¹ par an) (Buckles et al., 1998 ; Erenstein, 2003). Kushwaha et al., (2000) montrent que pour une culture de riz en SCV, la libération d'azote minéral à la phase de formation des grains est considérablement plus importante que pour cette même culture sans paillis.

En terme de flux d'azote, l'activité de la biomasse microbienne du sol génère un flux brut d'immobilisation pour pouvoir dégrader la matière organique et simultanément ou un peu plus tard un flux brut de minéralisation résultant de l'activité de dégradation de la matière organique. Cela se traduit alors par une libération très forte d'azote minéral dans le temps, on parle de pic de minéralisation (Birch, 1958 ; Blondel, 1971).

Dans les zones où l'humidité du sol est limitée au cours de la saison, de meilleurs rendements ont été obtenus en SCV par rapport à CT (Wicks et Smika, 1973; Unger et Wiese, 1979; Lindwall et Anderson, 1981). Toutefois, dans d'autres climats le SCV produit moins que le CT pour des traitements ayant reçus la même quantité de N (Harder, 1979; Parsons et Koehler, 1984; Rasmussen et al., 1983; Malhi et al., 1988).

Plusieurs facteurs peuvent être responsables des rendements inférieurs en SCV par rapport à CT: un ralentissement de la minéralisation (Malhi et Nyborg, 1987; Malhi et Nyborg, 1989), plus de dénitrification (Aulakh et al., 1984), plus de lessivage (Thomas et al., 1973; Ehlers, 1975; Edwards, 1982) et l'augmentation de la volatilisation de l'ammoniac (Fenn, 1975).

Malhi et Nyborg (1990) ont fait des essais pour comprendre si les rendements pourraient être similaires pour les deux méthodes de travail du sol (CT et SCV) par l'augmentation des taux d'engrais d'azote. Expériences sur le terrain avec l'orge (*Hordeum Vulgare* L. cultivar Gait) ont été menées de 1984 à 1987 à deux endroits (Innisfail dans le centre d'Alberta et aussi dans le centre de Rimbey dans le nord de l'Alberta). Il y avait deux traitements de travail du sol (CT et SCV), deux niveaux de paillis (sans paillis et avec de paillis) et quatre niveaux d'apport d'engrais de N (0, 33, 67 et 100 kg N ha⁻¹). L'engrais azoté était enterré (4 cm de côté et 4 cm au-dessous de la ligne de semis) au moment du semis. Le rendement en grain et en matière sèche totale ont été moins élevés en SCV qu'en CT sur traitement à taux faible de N (0 ou 33 kg N ha⁻¹), mais à un taux élevé de N (67 ou 100 kg N ha⁻¹) le SCV donne lieu à un rendement égal ou supérieur sur les deux sites. Les traitements avec paillis ont tendance à réduire le rendement face aux traitements sans paillis selon cette expérience pour des faibles taux d'apports d'azote. Mais la tendance s'est inversée lorsque les taux de N étaient élevés. Le rendement augmente avec l'azote ce qui veut dire que l'efficacité d'utilisation de l'azote apportée était plus efficace dans le cas du SCV que du CT, et cette efficacité s'accroît lorsque le paillis est retenu au lieu d'être enlevé. Les auteurs concluent qu'en enterrant l'engrais en SCV, le rendement d'orge pourrait être égale à celui du CT, à condition que le taux d'azote apporté ne deviennent pas un facteur trop limitant.

Locke et Hons (1988) ont aussi étudié les effets de différents traitements de N (0, 50, 100 et 150 kg N. ha⁻¹) sur le rendement de sorgho et l'accumulation de N dans les grains et les résidus sur SCV et CT à la station College (Texas) sur un sol Weswood (Fluventic Ustochrept). La réponse du rendement en grain à différents niveaux de N était non linéaire (par rapport à l'augmentation d'azote) contrairement à celle des résidus. Toutefois, l'interaction de labour (SCV ou CT) et N a influencé le rendement en grain ainsi que celui de résidus. À faibles niveaux de N, le CT a un meilleur rendement, mais à des niveaux plus élevés la différence n'est pas significative.

comme dans l'expérience précédente. Les deux systèmes (SCV et CT) atteignent un maximum de rendement en grains avec $122 \text{ kg N. ha}^{-1}$, alors que la concentration de N dans les feuilles lors du remplissage des grains était plus élevée en CT. L'indice de surface foliaire mesurée lors du remplissage des grains a augmenté de manière significative avec le niveau de N appliqué et était plus élevé en CT.

2.10. Conclusion de la partie bibliographie

Dans les pays du MERCOSUR (Brésil, Argentine, Paraguay et Uruguay), le SCV est adopté depuis les années 1970. Dans ces pays, l'objectif de l'agriculture de conservation est de limiter l'érosion des sols et la perte de fertilité qu'elle entraîne. De plus, ces techniques permettent aux agriculteurs sud-américains d'améliorer la rentabilité et de maintenir des systèmes agraires durables dans le temps. Par contre en France, la réflexion de départ a été motivée par des problèmes de temps liés aux pointes de travail. C'est en fait la motivation économique qui a engendré la véritable montée en puissance du SCV en France, avec la réforme de la PAC de 1992. L'Union Européenne, depuis la réforme de la PAC en 1992 et l'entrée en vigueur des mesures agro-environnementales accorde de plus en plus d'importance à la protection des sols. Les agriculteurs français sont demandeurs de références économiques et environnementales compatibles et adaptables à leurs conditions pédoclimatiques locales.

Le SCV peut être particulièrement intéressant lorsqu'il qu'il atténue les contraintes de croissance des cultures améliorant ainsi la productivité des exploitations agricoles (par exemple, lorsqu'il diminue le stress hydrique ou en nutriments). Si des éléments attestant de leur rentabilité pour les agriculteurs ne sont pas apportés, les SCV ne peuvent faire l'objet de programmes de diffusion à large échelle. A l'inverse, la démonstration de l'intérêt des SCV pour l'économie de l'exploitation agricole et du pays améliorera leur prise en compte au niveau politique et facilitera la mise en œuvre de stratégie de formation et de diffusion à grande échelle (Projet PAMPA, 2008).

Sebillotte et Meynard (2004), considérant que le choix des techniques culturales résulte de nombreux facteurs et entraîne de nombreuses conséquences à tous les niveaux, introduisent la nécessité de s'interroger sur les objectifs à atteindre, sur les moyens à mettre en œuvre pour y parvenir et de hiérarchiser en regard les avantages et inconvénients.

Il y a un effet majeur sur la conservation de l'eau en réduisant le ruissellement et les pertes par évaporation en SCV. Par conséquent, davantage d'eau est conservée dans le sol, où elle reste potentiellement disponibles pour la croissance des cultures (Kalra et al., 1984 ; Gonzalez-Sosa et al., 1999 ; Bussière et Cellier, 1994 ; Govaerts et al., 2007 ; Dahiya et al., 2007). Les phénomènes d'évaporation sont atténués du fait que le réchauffement du sol est moindre. Accroître l'efficacité d'utilisation d'eau en agriculture est un moyen de contribuer à la lutte contre la pénurie d'eau. Selon ce qui précède, le système SCV est donc capable d'augmenter l'efficacité d'utilisation d'eau.

Chapitre III

Matériels et méthodes

3.1. Etude expérimentale

3.1.1. Le contexte expérimental

Les expérimentations ont été conduites à la station expérimentale du Cemagref, située sur le domaine de Lavalette au nord de Montpellier (43° 40'N, 3° 50'E, altitude 30 m), à 15 km environ de la mer. Les parcelles d'essais s'étendent dans le lit majeur du fleuve Lez, à son confluent avec la Lironde, affluent dont le débit est nul en dehors des épisodes pluvieux.

Mise en place en 1989, la station est située au cœur du pôle Agropolis. Elle constitue un lieu privilégié d'accueil et d'échanges pour les équipes travaillant dans le domaine des relations eau-sol-plante-atmosphère, apte à assurer l'interface entre les chercheurs, les industriels, les instituts techniques et la profession agricole. Elle a bénéficié à ce titre d'appuis financiers régionaux.

Les sols d'origine colluvio-alluviale sont très profonds. En accord avec les régimes pluviométrique et hydrologique locaux, aucune remontée de nappe n'a été mise en évidence. La nappe ne contribue donc pas directement à l'alimentation hydrique des cultures d'été. Le sol appartient à une seule unité pédologique, celle des sols bruns peu évolués.

Le climat est de type méditerranéen. D'après Ruelle (1995) les précipitations moyennes annuelles pour une période de 30 ans (1951-1980) sont de 750 mm à la station météorologique de Montpellier-Fréjorgues située au bord de la mer. Cependant un important déficit climatique (P-ETp) estival existe puisque la pluviométrie moyenne P n'est que de 110 mm, pour les mois de mai à septembre pour des ETp Penman cumulées de 490 mm.

La station dispose de 5 ha équipés pour l'expérimentation en irrigation. Elle peut accueillir une gamme étendue de matériels d'irrigation localisée, d'irrigation par aspersion ou d'irrigation gravitaire. Les infrastructures sont complétées par des moyens de mesure concernant la distribution de l'eau, l'hydrodynamique du sol, l'état hydrique et physiologique des cultures, le climat. La station est équipée depuis 1990 d'une station agro météorologique complète intégrée au réseau INRA³.

Les recherches conduites à la station concernent d'une part, la maîtrise des différentes techniques d'irrigation afin de réaliser les apports d'eau de la manière la plus adéquate possible en gravitaire, goutte à goutte et aspersion et d'autre part, la maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation. Elles permettent la rigueur dans l'élaboration des protocoles, la mise en place et le suivi des essais. L'analyse des résultats d'expérimentations en station rend possible un travail approfondi sur la compréhension des phénomènes physiques, la mise au point des méthodes et des modèles. Enfin, la complémentarité entre la mise en œuvre des techniques, un travail fondamental de compréhension des phénomènes physiques et une démarche de modélisation constitue un atout pour cette station qui lui permet en effet, de développer des collaborations avec l'INRA, le CNRS⁴, et selon les thèmes abordés, Montpellier Sup'Agro ex-ENSAM⁵, le GEVES et le CIRAD.

³ INRA (Institut National de Recherche Agronomique)

⁴ CNRS (Centre national de recherche scientifique)

3.2. Les campagnes de mesure 2000-2007

Chaque saison, la couverture végétale sur SCV est détruite au glyphosate environ 2 semaines avant le semis de la culture principale (ou culture de support). La rotation des cultures sous forme de couverture végétale en SCV et la culture de support en CT et SCV est présentée dans le tableau 1. Après 4 ans d'étude sur les cultures d'été ; maïs (*Zea mays* L.) et sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench), un blé dur (*Triticum turgidum* L. var bé dur) a été semé sur deux campagnes en 2004/2005 et 2005/2006. Pour ces deux campagnes, il n'y avait pas une couverture végétale en SCV, mais il y avait suffisamment de résidus à la surface du sol pour former du paillis.

Tableau 1. La rotation à Lavalette

Campagne	Couverture végétale en SCV	Culture de support
2000/2001	Avoine ¹	Maïs
2001/2002	Avoine	Maïs
2002/2003	Blé dur	Sorgho
2003/2004	Mélange de la vesce ² et l'avoine	Sorgho
2004/2005	-	Blé dur
2005/2006	-	Blé dur
2006/2007	Mélange de la vesce, l'avoine et le colza ³	Maïs

¹ *Avena sativa* L., ² *Vicia sativa* L., ³ *Brassica napus* L.

Deux séries de traitements ont été mis en place pour une culture de blé dur : des traitements en semis direct sous couvert végétal et des traitements avec labour avec itinéraire technique traditionnel qui doivent être utilisés à titre d'éléments de comparaison.

3.3. Blé dur

Le blé dur appartient au groupe des céréales à pailles. Les céréales sont des plantes cultivées pour leurs graines riches en amidon donc en énergie. Le blé fait partie des monocotylédones (embryon à un seul cotylédon), famille des Poacées ou graminées (inflorescence de base en épillets. Il appartient au genre *triticum durum*, il fait partie du groupe des tétraploïdes (2n=28). Le blé dur recouvre 417 000 hectares (soit un peu moins de 5% des surfaces céréalières françaises) et se place donc en quatrième position, avec une production de 10,3 millions de tonnes en 2005. La moitié de la production est exportée sous forme de grains. Le blé dur est la matière première de la semoulerie (pâtes alimentaires et couscous).

Sa culture était traditionnellement confinée dans le sud de la France, elle s'est étendue vers le centre et bassin Parisien aux cours des années 1980.

La réforme de la PAC en 1992 a modifié le contexte de la production à la suite de la mise en place d'un système de primes limitées aux zones méridionales assorti d'un système de quotas

⁵ ENSAM (Ecole nationale supérieure d'agronomie de Montpellier)

d'abord par agriculteur, ensuite par région, ce qui a entraîné une diminution des superficies dans les zones ne bénéficiant pas des primes.

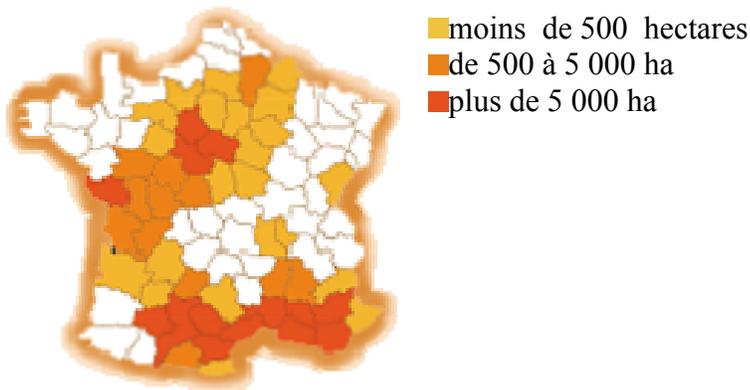


Figure 1 : La surface cultivée en blé dur en France en 2005 (source : ONIC)

3.3.1. La préparation de la campagne de mesure 2004/2005

-Campagne 2004/2005 : culture de support : le blé dur *Triticum Durum*, variété "Artimond"

Suite à la culture de sorgho récoltée le 20 septembre 2004 et pour la préparation de la nouvelle culture de blé dur (var. Artimond), un broyage des chaumes du sorgho a été effectué le 27 septembre 2004 sur le CT et le 1 octobre 2004 sur le SCV. Le labour de la parcelle conventionnelle (2 ha) a été effectué le 30 septembre 2004, suivi d'une reprise à la herse Z et rouleau.

Une intervention pour un traitement au Round Up (3.5 l/ha) sur les SCV a été effectuée le 18 novembre 2004. Pendant le cycle de culture, est effectué un suivi de l'état hydrique des sols (météo-pluie-irrigation), de la biomasse végétale (prélèvement et LAI), des apports d'engrais et des reliquats d'azote.

3.3.2. Les semis et les interventions pendant la campagne

Ils ont été effectués :

- **Sur CT** à la date du 17 novembre 2004, au semoir combiné Kuhn à 132 Kg /ha sur une surface de 1.7 ha
- **Sur le SCV** à la date du 30 novembre 2004, au semoir pour semis direct SEMEATO à 160 kg/ha sur une surface de 0.560 ha (SCV NORD)

Pendant la campagne, les interventions culturales et les suivis expérimentaux sont répertoriées sur le tableau 2. Les irrigations ont été réalisées par aspersion.

3.3.3. Les Traitements mis en place

Le traitement principal lors des différentes campagnes est conduit sous irrigation pour atteindre un rendement objectif de l'ordre de grandeur de celui d'un agriculteur, 60q/ha par exemple pour le blé dur. Cet objectif est révisé en fonction des potentialités de la culture qui dépendent des conditions climatiques et des problèmes éventuellement rencontrés dans le déroulement des interventions culturales. Cetraitement est dénommé CT et SCV, pour chacune des modalités.

Pour l'ensemble des trois campagnes qui servent de support à ce travail, deux traitements de référence sont mis en place pour ce qui concerne l'alimentation en eau : un traitement bien alimenté en eau, sans restriction hydrique dit « ETM » et un traitement sans irrigation dit traitement pluvail « SEC ». Une référence complète le dispositif pour évaluer la minéralisation : un traitement sans azote dit « 0N ».

3.3.4. Campagne 2005/2006

-Culture de support : le blé dur, variété " Dakter "

. Pour cette campagne nous avons choisi la variété Dakter inscrite au catalogue en 2004 par la société Eurodur. Cette variété est tout particulièrement adaptée aux régions traditionnelles de production de blé dur. Elle a une bonne tolérance aux maladies: (fusariose, oïdium, et bien sûr la rouille brune, maladie la plus importante en terme de dégâts à la culture). Elle offre des capacités de compensation intéressante, de par son fort coefficient de tallage, et son poids de 1000 grains. La variété Dakter est intéressante pour un blé succédant à une culture de blé sur la même parcelle du fait de sa résistance aux maladies. Cette deuxième campagne avec la même culture, en contradiction avec les recommandations du SCV qui recommande de réaliser des rotations, a en effet été décidée suite aux difficultés rencontrées en semis direct l'année précédente, comme nous le verrons plus loin .

Tableau 2 : les interventions culturales et les suivis expérimentaux en 2004/2005

Dates	INTERVENTION	REMARQUES
27/09/04	déchaumage du CT	
30/09/04	Labour du CT	
15/11/04	Passage de la herse sur CT	
17/11/04	Semis de blé dur sur CT	132 kg/ha (350 gr/m ²)
18/11/04	Traitement au Roundup	3.5 l/ha
30/11/04	Semis de blé dur sur SCV	160 kg/ha (450 gr/m ²)
06/12/04	Installation tube Neutron+mesure sur CT	
06/12/04	Levée du semis sur CT	20 jours après le semis
20/12/04	Levée du semis sur SCV	20 jours après le semis
20/12/04	Mesure Gamma+Gravimètre	Stade 2 F
05/01/05	Installation Tensiomètre sur CT	De 10 à 60 cm
07/01/05	Installation tube Neutron+mesure sur SCV	
07/01/05	Comptage plantes sur CT	
19/01/05	Installation Tensiomètre sur SCV	
03/02/05	Prélèvement de sol (reliquat d'azote)	
15/02/05	1 ^{er} apport d'azote d'ammonitrate	54 kg N/ha
21/02/05	Mise en place Tube Neutron sur 0N	CT et SCV
11/03/05	Fosse pour mesure racinaire sur CT	
18/03/05	2 ^{ième} apport d'azote	CT: 67 U; SCV: 61 U
18/03/05	Mise en place Tube Neutron	CT SEC ; SCV Nord SEC
31/03/05	Installation Tensiomètre sur CT	De 60 à 150 cm
01/04/05	Irrigation SCV Sud	21.2 mm
04/04/05	Irrigation sur CT et SCV Nord	CT: 27mm; SCV Nord: 36 mm
05/04/05	Irrigation sur CT 0N	32.6 mm
05/04/05	Installation Tensiomètre sur SCV	De 60 à 150 cm
08/04/05	Irrigation SCV Nord 0N	33 mm
14/04/05	Prélèvement de sol et végétaux sur CT	
18/04/05	Profil racinaire sur CT	Profondeur : 45 cm
19/04/05	Prélèvement de sol et végétaux sur SCV	SCV NORD
03/05/05	Irrigation sur CT	17 mm
03/05/05	Mesure Gamma+gravimétrie sur CT	
04/05/05	Irrigation sur CT 0N	16 mm
04/05/05	Mesure Gamma+gravimétrie sur CT SEC	
09/05/05	3 ^{ième} apport d'azote sur CT et SCV Nord	30 U
09/05/05	3 ^{ième} irrigation sur CT	44 mm
10/05/05	3 ^{ième} irrigation sur CT 0N	48 mm
11/05/05	1 ^{er} irrigation sur 3 ^{ième} secteur de CT	48 mm
12/05/05	Prélèvement biomasse	CT et SCV
28/06/05	Prélèvement végétaux pour biomasse	CT
05/07/05	Prélèvement végétaux pour biomasse	SCV
07/07/05	Profil racinaire	CT
08/07/05	Profil racinaire	SCV Nord

Cette variété est bien adaptée au milieu Montpelliérain, son élaboration du rendement originale (fertilité de l'épi élevé) lui donne théoriquement de la souplesse pour le type d'étude que nous avons réalisé, avec des atouts en cas de levée difficile et en cas de sécheresse excessivement précoce.

3.3.5. La préparation de la campagne 2005/2006

Suite à la culture de blé récolté le 20 juillet 2005 et pour la préparation de la nouvelle culture de blé dur, un broyage des chaumes a été effectué le 29 juillet 2005 sur le traitement CT.

Le labour de la parcelle en traitement CT (2 ha) a été effectué le 7 octobre 2005, suivi d'une reprise à la herse Z et au rouleau de 4 m. Les chaumes ont été laissés en place sur le traitement SCV. Il faut cependant noter qu'une intervention pour un traitement au Round Up (4.2l/ha) sur le SCV a été effectuée le 13 octobre 2005 pour détruire les mauvaises herbes et les repousses. Les autres interventions (fertilisantes, fongicides et herbicides) sont identiques sur les différents traitements. Un engrais de fond, 135 unités de Super phosphate 45 a été appliqué avant semis.

3.3.6. Les semis et les interventions pendant la campagne

Ils ont été effectués :

- **Sur le CT** à la date du 23 novembre 2005, au semoir combiné Kuhn à 167Kg /ha PMG=55 sur une surface de 1.7 ha (mesuré au semoir)
- **Sur le SCV** à la date du 29 novembre 2005, avec le semoir pour semis direct SEMEATO à 127 kg/ha PMG=55 sur une surface de 0.560 ha (SCV NORD)

Pendant la campagne, les interventions culturales et les suivis expérimentaux sont répertoriées sur le tableau 3. Les mêmes techniques d'irrigation par aspersion que précédemment ont été utilisées.

3.3.7. La récolte de blé dur (2004/2005 et 2005/2006)

Avant la récolte mécanique tous les sites ont été échantillonnées, les tiges et les épis sont comptés par rangée et par placette et ensuite récoltés. Les épis ont été égrainés, et un sous-échantillon a été choisi pour la détermination du poids de 1000 grains (PMG). Après séchage en étuve et pesée, les tiges et les épis ont été broyés séparément pour analyser la teneur en azote de la culture.

3.4. Le maïs

Le maïs, *Zea mays*, est une céréale annuelle de grande taille (1à 4m), originaire d'Amérique centrale. Etant originaire de régions chaudes et humides, les deux facteurs limitant pour le développement du maïs sont donc la température et l'humidité (FAO, 1979). Le cycle de développement du maïs comporte trois phases principales (tableau 4).

Tableau 3 : Les interventions culturales et les suivis expérimentaux en 2005/2006

Dates	INTERVENTION	REMARQUES
29/07/05	déchaumage du CT	
07/10/05	Labour du CT	
13/10/05	Traitement enherbement SCV	Round-Up 4,2 l/ha
26/10/05	Reprise à la herse CT	
22/11/05	Apport super -phosphate45	135 U
23/11/05	Semis blé dur sur CT	167kg/ha PMG=55
24/11/05	Roulage à la croskilette du semis	CT
24/11/05	Prélèvement de sol (reliquat d'azote)	CT -SCV N - Scv N 0N -Scv S
29/11/05	Semis SCV	127 Kg/ha PMG=55
29/11/05	Prélèvement sol pour Gravimétrie	0à15 cm CT et SCV
30/11/05	Traitement enherbement SCV	Round-Up 1,2 L/ha
10/01/06	Levée sur CT	
20/01/06	Levée sur SCV	
26/01/06	Mesure de densité	CT
27/01/06	Mesure de densité	SCV S- CT 0N ScvN SCVN0N
13/02/06	Mise en place Tube Neutron +gravimétrie	CT
14/02/06	Mise en place Tube Neutron +gravimétrie	SCV NORD
28/02/06	Prélèvement de sol (reliquat d'azote)	CT/SCV/CT0N
01/03/06	Prélèvement de sol (reliquat d'azote)	SCV0N
03/03/06	prélèvement de mulch	SCV
10/03/06	Apport d'ammonitrate	60 U
29/03/06	Traitement enherbement SCV	Bazagran 1,9 Kg/ha 400l/ha
07/04/06	Biomasse	
13/04/06	apport d'ammonitrate	CT 100 U SCV 80 U
13/04/06	apport de magnésie	380 kg/ha
21/04/06	Irrigation	SCV SUD
24/04/06	Irrigation	SCV NORD
25/04/06	Irrigation	CT
03/05/06	Irrigation	SCV NORD
04/05/06	Irrigation	SCV SUD
05/05/06	Irrigation	CT
30/05/06	Irrigation	CT
06/06/06	Irrigation	SCV NORD
08/06/06	Irrigation	SCV SUD
28/06/06	Récolte manuelle	
10/07/06	fosses racinaires	CT
11/07/06	fosses racinaires	SCV
19/07/06	Prélèvement de sol (reliquat d'azote)	CT SCV

Tableau 4 : Phases principales du développement du maïs (d'après AGPM, 1998)

Phase de préfloraison	Phase de floraison et de latence	Phase de remplissage de grain
du stade 7-8 feuilles jusqu'à la sortie des panicules males croissance importante mise en place des pièces florales	émission de pollen fécondation puis formation de grain pendant 10-15 jours après la fécondation le nombre de grain est quasiment définitif	du stade laiteux à la maturité physiologique

Le maïs préfère les sols riches en éléments fins et en matière organique, à pH compris entre 5.5 et 6.5. Le maïs est modérément sensible à la salinité. Il est très sensible à la gelée, mais il tolère les conditions atmosphériques chaudes et sèches, si l'eau est disponible en quantité suffisante pour son développement (FAO, 1996). Pour les maïs utilisés en Europe, on considère que le zéro de germination est voisin de 6 °C, et entre 6 et 10 °C, la germination est lente. La somme de température semis-levée considérée est de 150 à 180 °C, soit 6 à 20 jours. Les maïs précoces (les moins exigeants en chaleur) requièrent pour accomplir leur cycle une somme des températures de 1500 °C en base 6 °C, tandis que les maïs tardifs ont besoin de 2000 °C, d'après les références européennes.

-Culture intermédiaire

Sur les parcelles conduites en SCV un couvert à base d'avoine, vesce et colza a été implanté à la fin novembre 2006.

-Culture principale

Un cultivar de maïs bien adapté aux conditions pédoclimatiques de la région a été choisi pour cet essai : PR35TY65 de Pioneer Hi-Bred. C'est un hybride de type corné-denté, disposant d'un potentiel de rendement élevé. D'après les essais Arvalis 2004-2005-2006, son rendement moyen est de 130 q/ha à 15% d'humidité. Cette variété est classée tardive et nécessite, pour une base de 6°C, des sommes de températures de 1020 °C du semis à la floraison femelle, et de 1975 °C du semis à la récolte. Le PR35Y65 est assez sensible à l'helminthosporiose et au charbon des inflorescences. En revanche, il se montre résistant à la fusariose des tiges ainsi qu'à la verse à la récolte (MOLINES, 2006).

3.4.1. Besoins en eau

Le maïs compte parmi les cultures ayant une forte réponse à l'irrigation. Les périodes critiques de déficit hydrique pour le maïs sont la floraison et la formation des grains. D'une manière globale, la période de sensibilité du maïs à la sécheresse va du stade 8-10 feuilles visibles, jusqu'au stade grain pâteux avec une sensibilité maximale de 15 à 20 jours avant la floraison mâle à 15 jours après (stade laiteux). Un manque d'eau durant cette période peut entraîner une réduction très importante du rendement (jusqu'à 50 %).

3.4.2. Traitements en 2007

Comme lors des campagnes précédentes les deux modalités de gestion avec l'itinéraire classique avec labour (CT) et le système en semis direct sous couvert végétal (SCV) ont été conservées, avec une irrigation par aspersion mais le démarrage d'un essai d'irrigation en goutte à goutte a conduit à mettre en place un traitement supplémentaire aussi bien sur CT que sur SCV dont les résultats seront aussi pris en compte dans ce travail. Il faut ajouter que l'irrigation goutte à goutte a aussi été utilisée pour le traitement de référence sans restriction hydrique.

3.4.3. Interventions culturales

3.4.3.1. Préparation du sol

Pour les parcelles conduites en CT, on réalisa un déchaumage, suivi d'un labour à la charrue à soc fin décembre. La reprise pour la préparation du lit de semence a été réalisée mi-avril, par un passage croisé de pulvérisateur à disques puis de herse.

Bien évidemment, les parcelles conduites en SCV n'ont subi aucun travail du sol. Seule une destruction du couvert par l'application d'un herbicide systémique (Round Up Bio-Force à 340 mg/l de glyphosate) a été effectuée la veille du semis (24/4/2007). La culture de couverture, largement dominée par le colza présentait un indice foliaire de 4. Par conséquent, la dose de pulvérisation fut majorée à 7 l/ha (valeur qui pourrait se discuter).

3.4.3.2. Implantation de la culture

Le maïs a été semé le 24 avril 2007, à une densité de 80 000 grains/ha et à une profondeur de 3-4 cm. Les rangs, orientés est-ouest, étaient espacés de 75 cm.

Le semis fut réalisé par un semoir pneumatique de précision à cannelures de marque SEMEATO. Ce type d'outil, spécialement conçu à l'origine pour les systèmes en semis direct, a servi à la mise en place de la culture sur tous les traitements de l'essai. Ainsi, la régularité de distribution des graines a été excellente sur le SCV. Le positionnement était un peu moins bon dans le cas du sol labouré.

3.4.3.3. Fertilisation

Sur l'ensemble du dispositif, une fumure de fond de 100 kg/ha de potasse et 100 kg/ha d'acide phosphorique a été appliquée dix jours avant le semis (400 kg/ha de 0-25-25).

La fertilisation azotée, composée d'ammonitrate 33, a été globalement ajustée en fonction :

- des reliquats d'azote sur l'horizon 0-1.2 m mesurés lors des prélèvements effectués une semaine avant le semis ;
- de la minéralisation prévue de l'azote organique au cours du cycle de culture, basée sur un minorant de 80 kg/ha ;
- des objectifs de rendements, différents selon les traitements, en s'appuyant sur le coefficient b du maïs (besoin en azote par quintal de grain produit) d'une valeur de 2.83.

Pour les traitements SCV, la quantité moyenne d'azote contenue dans les résidus végétaux de la culture de couverture s'élevait à 174 kg/ha. Communément, on estime à 30% le taux de restitution en azote assimilable pour la culture suivante par rapport à la quantité absorbée par une culture intermédiaire piège à nitrates, soit dans notre cas, 52 kg/ha (THIEBAUT P., *et al*, 2001).

Une semaine avant le semis, la totalité du CT, excepté le 0N, a reçu 67 kg/ha. Sur tous les traitements, y compris sur le 0N, une dose de 27 kg/ha a été positionnée au semis sous le lit de semence. Puis un troisième apport manuel sur les sites de mesures irrigué en aspersion au mois de juin après l'analyse des reliquats azotés. Enfin, l'ensemble des parcelles en goutte-à-goutte a alors reçu des apports par fertigation.

3.4.3.4. Désherbage

Deux traitements herbicides ont été réalisés durant la campagne : le premier au Mercantor Gold (960 g/l de S-metolachlore) appliqué 2 jours après le semis à la dose de 1,6 l/ha ; le second au Basagran SG (87 % de bentazone) appliqué 17 jours après le semis à la dose de 1,6 l/ha. L'efficacité incomplète du désherbage chimique sur les parcelles SCV ETM et SCV Restreint a nécessité un sarclage manuel échelonné sur tout le début de la campagne. Néanmoins, l'envahissement par des adventices atteignant 0,5 à 1 m de hauteur n'a pu être évité sur ces parcelles.

3.4.3.5. Protection phytosanitaire

La culture de maïs n'a reçu que deux traitements : d'une part un insecticide (Curater à 5 % de carbofuran) appliqué au semis à la dose réduite de 1 kg/ha (pour des raisons de dysfonctionnement du distributeur combiné au semoir) au lieu de 12 kg/ha, et d'autre part, un molluscide (Métarex à 5 % de métaldéhyde) épandu seulement sur le SCV à la levée, à la dose de 5 kg/ha. Quelques jours après la levée, le peuplement était relativement homogène.

3.4.3.6. Irrigation et fertigation sur les traitements GàG

Le domaine expérimental de Lavalette est doté d'une station de pompage qui effectue des prélèvements dans le Lez, sa réhabilitation était en cours avec transfert des prélèvements sur le réseau Bas-Rhône-Languedoc. Cet équipement a permis de mettre en œuvre l'irrigation et la fertigation sur notre dispositif d'essai. Par contre, du fait des travaux, il y a eu certaines perturbations.

3.4.3.6.1. Irrigation

L'expérimentation comprenait 5 modalités d'irrigation communes aux 2 systèmes de gestion du sol : ETM et Restreint en GàG, traitement en aspersion, traitement 0N en aspersion et Sec.

Les 2 premiers traitements étaient irrigués en goutte-à-goutte par des gaines à cheminement long de marque T-Tape (longueur : 30 m, diamètre : 16 mm, débit/ mètre : 3.4 l/h à 0.56 bars,

écartement des goutteurs : 30 cm). Celles-ci étaient placées à la surface du sol, tous les deux inter-rangs, donc avec un écartement de 1,5 m.

La station en tête était composée d'un réducteur de pression, d'un filtre à sable, d'un filtre à tamis, d'un compteur volumétrique et d'un manomètre. Les vannes hydrauliques étaient commandées soit manuellement, soit de manière automatique par électrovannes à impulsion pilotées par un programmateur électronique.

3.4.3.6.2. Fertigation

Seuls les traitements ETM et Restreint ont été fertilisés de manière localisée par une solution nutritive grâce à l'installation de micro-irrigation dont ils disposaient. Une pompe doseuse hydraulique, montée en dérivation sur la conduite principale d'irrigation, asservie au débit de cette dernière et reliée à une cuve en PVC de 550 l assurait l'injection de la solution fertilisante. La fertigation a concerné uniquement la nutrition azotée, à base d'ammonitrate 33, titrant 16,5% d'azote nitrique et 16,5% d'azote ammoniacal.

3.4.4. Récolte

Le stade de maturation ayant été atteint, la récolte manuelle des placettes a eu lieu à partir du 7 septembre et la récolte mécanique le 20 septembre 2007.

3.5. Matériel et mesures pour les trois campagnes

Pour répondre aux objectifs de l'expérimentation, il est important de maîtriser l'adéquation qui existe entre ce que l'on souhaite connaître : *état en eau et en azote du sol* et leur effet biophysique. Il faut donc collecter des données précises qui nous permettent, d'une part, de comparer les différents processus hydro-pédologiques qui s'établissent dans la parcelle, entre le milieu édaphique et la croissance de la plante et, d'autre part, déterminer les bilans hydriques et azotés nécessaires à la compréhension de ces processus selon que le sol est en conduite conventionnelle (avec labour) ou en conduite SCV. Le protocole d'échantillonnage et de mesure, ainsi que les matériels utilisés obéissent donc à ces objectifs.

3.5.1. Suivi des bilans hydriques

L'étude de l'évolution au cours du temps des flux d'eau nécessite la mesure à la fois des apports, des humidités et des charges hydrauliques.

3.5.1.1. Mesure de l'humidité

La mesure de l'humidité a été réalisée à l'aide d'un humidimètre neutronique et des mesures gravimétriques.

3.5.1.2. Mesure de l'humidité par sonde à neutrons

Un site de mesure par parcelle (traitement) est équipé d'un tube d'accès neutronique. L'humidimètre utilisé est une sonde à neutrons Campbell 503 DR.

3.5.1.3. Mesure de l'humidité par méthode gravimétrique

Des mesures gravimétriques ont été réalisées lors de l'installation des tubes d'accès des sondes à neutron (avant le semis), ces valeurs étant utilisées comme l'humidité initiale pour les simulations et la validation des mesures neutroniques.

3.5.1.4. Mesure de la charge hydraulique par les tensiomètres

Le suivi des charges hydriques à l'aide de tensiomètres avait pour objectif de déterminer la position du plan de flux nul et le sens de l'écoulement. Afin de disposer d'une meilleure précision, les charges sont lues sur des multimanomètres à mercure (DT5000).

3.5.1.5. Suivi des apports d'eau

La campagne d'irrigation a débuté durant le mois d'avril pour blé dur et le mois de juin pour le maïs. Puis, les irrigations ont été menées en fonction de la disponibilité du matériel et des travaux sur la station de pompage. En effet, l'enrouleur est rattaché à la station GEVES, qui a sa propre expérimentation à mener, et le matériel se partageait donc. Ces contraintes n'ont pas permis le choix de toutes les dates d'irrigation.

Ces remarques montrent les difficultés de conduite d'une campagne d'expérimentations et la nécessaire adaptation « en temps réel » du protocole pour sauvegarder les points essentiels de l'expérimentation.

3.5.2. Déterminations agronomiques

3.5.2.1. Etude de l'indice foliaire (LAI)

L'indice foliaire caractérise la surface photosynthétiquement active de la culture, constituée principalement par l'ensemble des feuilles vertes. Le développement foliaire, caractéristique de l'espèce et qui peut varier avec la variété, est suivi par des mesures manuelles à enregistrement automatique au LAImètre (LI-COR LAI-2000). Le suivi du LAI présente un intérêt dans la mesure où la surface foliaire conditionne directement les prélèvements hydriques de la plante et la production de matière sèche.

3.5.2.1.1. Mesure par LI-COR LAI-2000

Il s'agit d'un appareil qui permet de caractériser un couvert végétal par la valeur de l'efficacité d'interception (ε_i) de l'énergie reçue par la culture dans le domaine des longueurs d'ondes photosynthétiquement actives. Il est donc étroitement corrélé à l'indice foliaire, ainsi qu'aux propriétés des feuilles (dont le port et la forme géométrique).

L'analyseur du couvert végétal LI-COR LAI-2000 (LAI indirect) permet d'évaluer de façon rapide l'indice foliaire d'une culture, à travers la relation suivante, dérivée de la loi de Beer-Lambert :

$$LAI = \frac{1}{K} * Ln\left(1 - \frac{\varepsilon_i}{0.95}\right) \quad \text{Équation 1}$$

ε_i : Efficacité de l'interception (compris entre 0 et 0.95)

K : coefficient d'extinction moyen du couvert considéré (k= 0.7 pour le maïs)

Les mesures effectuées en cinq points au niveau des pieds de plante (↓) et en deux points au dessus du couvert végétal (↑) (schéma ci-dessous) permettent de mieux tenir compte de la variabilité spatiale. La précision de la mesure dépend du coefficient d'extinction k du couvert foliaire de l'espèce considérée. Lorsque l'efficacité atteint des valeurs supérieures à 90%, la précision devient insuffisante pour discriminer des indices foliaires élevés. De plus, l'appareil comptabilise les feuilles en cours de dessèchement et n'est pas utilisable pendant la sénescence (Kradia, 2007).

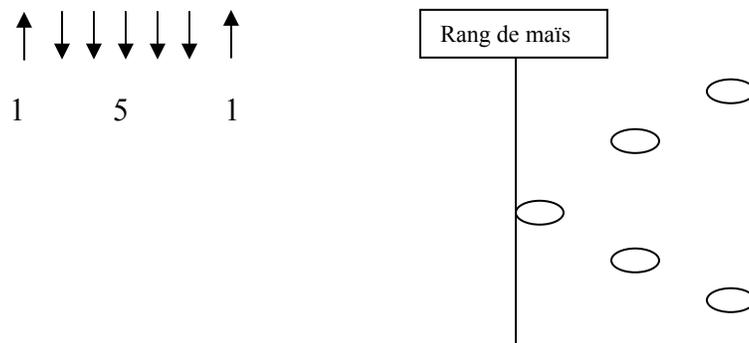


Figure 2: Le protocole de mesure de LAI

Le LAI a été mesuré environ une fois par semaine avec 5 à 10 répétitions par traitement, sachant que le LAI peut diminuer fortement l'après midi par suite de la modification du port des feuilles en cas de stress (Olufayo, 1994). On notera que dans le cas de l'appareil utilisé, les mesures sont faites en lumière diffuse au coucher du soleil, donc sauf lors de périodes très chaudes et sèches, la valeur mesurée ne prend pas en compte ce phénomène.

3.5.3. Détermination de la production de MS

Les prélèvements de culture ont été effectués deux fois pendant la saison pour chaque traitement. En général 4 placettes d'une surface de 3 m² environ (dont la dimension est mesurée avec précision) incluent 4 rangées pour tenir compte des effets de compétition. Les pieds ont été comptés par rangée et par placette, puis récoltés, pesés (poids humide) et séchés en étuve pendant 48 à 72 heures à 80°C et pesés de nouveau (poids sec). Des pesées successives permettent de contrôler le dessèchement.

Il nous semble important d'indiquer que la détermination de la quantité de matière sèche (MS) produite est délicate. En effet la mesure de la matière verte des tiges (et feuilles) est aisée mais la détermination du taux de MS est laborieuse du fait que toutes les plantes ne présentent pas le même état de dessèchement (proportion variable de feuilles vertes) et que la grande masse végétale par placette impose un sous-échantillonnage pour connaître le taux de MS, surtout pour le maïs.

3.5.4. La détermination du rendement

Elle est effectuée à partir d'une série de placettes (5 à 7) par traitements qui sont récoltées manuellement; Les tiges et les épis sont comptés par rangée et par placette. Les épis du blé dur sont battus par une batteuse à poste fixe de marque Wintersteiger, par contre pour le maïs l'égrenage est fait à la main, un échantillon est prélevé pour réaliser le poids de 1000 grains. Des bottillons ont été séchés et pesés, pour être broyés séparément pour analyser la teneur en azote des traitements principaux.

3.6. L'enracinement

Il est observé sur fosse pendant la campagne (début de cycle à la traversée de la couche 0-30 cm correspondant au labour...) et dans tous les cas à la récolte. Il est confronté au suivi du plan de flux nul déterminé par tensiométrie.

3.7. Rappels théoriques

Afin de faire le lien entre les informations recherchées et ce que l'on souhaite observer, il paraît pertinent de faire quelques brefs rappels théoriques sur les paramètres étudiés et nécessaires à la compréhension des phénomènes mis en jeu.

3.7.1. Bilan hydrique mesuré au champ

3.7.1.1. ETP, ETM et ETR : rappel de définitions utilisées en agronomie

Les besoins de la plante sont fixés par la demande évaporative de l'air : l'évapotranspiration potentielle ETP. L'ETP définie comme la quantité d'eau transpirée par unité de temps par un gazon bien alimenté en eau, recouvrant complètement le sol et de hauteur uniforme (Penman, 1948).

La consommation en eau d'une plante au cours de son cycle végétatif est irrégulière. Le maximum survient au moment de la floraison, le minimum en fin de maturation. Les facteurs qui déterminent la transpiration sont d'une part des facteurs climatiques (lumière, rayonnement, température et humidité atmosphérique) ; et d'autre part, les facteurs physiologiques, comme la nature du couvert végétal, le développement foliaire (caractérisé par le LAI, transpiration, photosynthèse) et l'activité biophysique de la plante (liées à son état hydrique et minéral).

L'ETM (évapotranspiration maximale) est définie comme la consommation maximale en eau d'un couvert végétal bien alimenté en eau. Elle peut être soit mesurée, soit calculée à partir de l'ETP par la relation $ETM = Kc \times ETP$, où Kc représente le coefficient cultural, qui dépend du stade de développement de la culture.

L'ETR (évapotranspiration réelle) est la consommation en eau réelle de la culture. Elle dépend des conditions climatiques, du type de culture, du stade phénologique de la plante et des conditions d'humidité du sol. Ainsi, suivant que le sol peut fournir toute l'eau demandée par la plante ou non, l'ETR sera égale ou inférieure à l'ETM. La mesure directe de l'ETR reste du domaine de station expérimentale ; son estimation se fait à partir de l'ETM en tenant compte de l'eau disponible dans le sol, et à l'aide du bilan hydrique. Il faut donc aborder la question des réserves en eau du sol.

Remarque : L'ETM et l'ETR prennent en compte à la fois l'eau transpirée par les plantes et évaporée par le sol.

3.7.2. Calcul du bilan hydrique

Les études du sol démontrent l'extrême hétérogénéité et complexité du sol et les variations rapides des structures qui peuvent exister à quelques mètres de distance. De ce fait la dynamique de l'eau est souvent complexe et peut expliquer l'irrégularité du développement du couvert végétal (Caillot et al., 1983, Ruelle, 1995). Les hétérogénéités sont considérablement atténuées dans les horizons de culture et dans les couches organiques où l'activité biologique est très intense. Au contraire, dans les horizons sous-cultureux et les couches profondes, ces hétérogénéités sont très fréquentes. Le bilan hydrique est fondé sur le principe de conservation de la masse, appliquée en dehors de la zone racinaire, ou intégrée sur un profil de sol incluant totalement l'enracinement :

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = - \frac{\delta q}{\delta z} \quad \text{Équation 2}$$

θ	teneur en eau volumique densité volumique [mm ³ .mm ⁻³]
t	temps [s]
z	profondeur [cm]
q	densité volumique de flux d'eau [mm.s ⁻¹]

Cette équation est souvent utilisée par les agronomes (Maraux et Lafolie, 1998) pour un intervalle de temps Δt entre deux mesures. Il correspond à la variation du stock d'eau dans une tranche de sol limitée par la surface du sol et une cote z , en fonction de données liées au continuum sol - plante - atmosphère. En prenant en compte les apports et les pertes d'eau du système pour un intervalle de temps donné (Musy et Soutter, 1991), nous avons la relation suivante :

$$\Delta S = P + I - ETR - D \pm R + RC \quad \text{Équation 3}$$

ΔS	variation du stock d'eau dans le sol [mm]
P	pluie [mm]

I	irrigation [mm]
ETR	évapotranspiration réelle [mm]
D	drainage [mm]
R	ruissellement [mm]
RC	remontées capillaires [mm]

Les données sur les précipitations (**P**) sont obtenues par relevé automatique ou manuel des pluviomètres ; l'irrigation (**I**) qui est le moyen de remédier à la sécheresse. Elle est aussi mesurée directement par pluviomètres pour l'irrigation par aspersion.

Les apports d'eau par remontées capillaires (**RC**) sont difficiles à estimer avec précision (Mauraux et al., 1998 ; Chopart et Vauclin, 1990). Dans notre cas, l'absence de nappe à proximité du front racinaire et le suivi des flux par mesures tensiométriques nous permettent de retenir une couche de sol d'une épaisseur suffisante pour que le flux soit nul à la face inférieure de cette couche (plan de flux nul). Quant au ruissellement (**R**), il peut s'agir d'un flux entrant ou d'un flux sortant selon que l'eau provient d'une parcelle en amont ou est évacuée vers une parcelle elle même. Avec une pente quasi nulle et des pluviométries horaires adaptées lors des irrigations, le ruissellement est négligeable dans les conditions d'étude.

Le drainage (**D**) correspond à une partie des précipitations et/ou d'irrigation non stockable dans la tranche de sol correspondante. Dans certains sols, l'eau apportée peut s'infiltrer dans les macro-fissures du sol et atteindre rapidement les couches profondes du sol ou le réseau de drainage. Ce phénomène se rencontre peu en cultures avec irrigations fréquentes. Le flux de drainage peut être calculé à partir de la loi de Darcy (effet macro - pores négligeable) :

$$q = -K(\theta) \frac{\delta H}{\delta z} \quad \text{Équation 4}$$

$$\frac{\delta H}{\delta z} \quad \text{gradient de charge}$$

$$K(\theta) \quad \text{conductivité électrique}$$

L'évapotranspiration (**ETR**), comporte deux phénomènes. L'évaporation (**ES**) concerne la restitution de l'eau par le sol. Elle est surtout manifestée après apport d'eau lorsque la culture est encore peu développée. La transpiration (**TR**) est la restitution de l'eau à l'atmosphère par la plante, phénomène lié aux facteurs climatiques et physiologiques. Il s'agit d'un flux sortant que l'on peut estimer dans certains cas à l'aide de la méthode du flux de sève.

3.7.3. Détermination de l'ETR théorique

L'équation (5) peut être établie en considérant les lois des écoulements dans les milieux poreux. Le sens des écoulements dépend du signe de gradient de charge d'après la loi de Darcy. Pour un gradient de charge négatif, le flux est positif et dirigé vers le bas ; il sera donc désigné sous le terme de percolation. Pour un gradient de charge positif, le flux est négatif et dirigé vers le haut ; il est appelé habituellement remontée capillaire, ou à la surface du sol, évaporation.

A tout point de charge hydraulique maximum ($dH/dz = 0$) correspond un plan de flux nul qui sépare une zone de sol soumise à l'évaporation, d'une zone soumise à la percolation.

Au cours d'une période donnée, l'ETR est donc égale à la variation de stock pendant celle-ci entre la surface du sol et la côte du plan de flux nul à condition que le plan de flux nul soit situé en dessous de la zone racinaire :

$$[\text{ETR}] = \Delta S_{z0} - P - I \quad \text{Équation 5}$$

où ΔS_{z0} est la variation de stock entre la surface du sol et la côte du plan de flux nul.

Afin d'étudier l'évolution au cours du temps des flux d'eau dans le système, via le bilan hydrique, il est nécessaire de connaître à la fois, les mesures d'humidité volumiques (obtenues par la sonde à neutrons) et la position du plan de flux nul obtenue par lecture des charges hydrauliques sur les tensiomètres.

3.7.4. Les sites de mesure

Une batterie de tensiomètres est installée aux cotes 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 110, 130, 150 cm. Les lectures et contrôle des tensiomètres ont lieu au moins 5 jours sur 7 avant 9h. Il convient de disposer des mesures avant que les effets de prélèvement par la culture soient sensibles à cette coté.

3.7.5. Suivi hydrique par humidimétrie "TDR" et sondes

Afin de caractériser l'effet du mulch des sites TDR en mesure automatique sont mises en place. Il s'agit de caractériser l'évolution dans les premières couches du sol avec un pas de temps fin (horaire) pour pouvoir ensuite caler des modèles fonctionnant au pas journalier. Des dispositifs Campbell et TRASE seront utilisés à cet effet.

-Les mesures sont faites sur chaque site

- à 8 cm, 12 cm, 15 cm par deux séries de sondes placées à l'horizontale ;
- sur 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm par des sondes CS 615 et CS 616 placées verticalement

Afin de prendre en compte l'effet de la température, une série de sondes de température sont mises en place.

3.7.6. Suivi des apports d'eau

Les apports d'eau sont suivis dans 5 pluviomètres autour des sites de mesure installés à 10 cm au dessus de la culture. Ils sont pour cela placés sur des pieds télescopiques. Ils sont mesurés en utilisant des allonges graduées 6 à 12 heures après l'apport, dès que le sol est suffisamment ressuyé pour éviter de tasser le sol autour des sites de mesures.

3.8. Suivi du bilan et du devenir de l'azote sous culture

3.8.1. Rappels théoriques

L'azote se trouve dans le sol 95 % sous forme organique non assimilable directement par la plante. La plante absorbe l'azote sous forme minérale : azote ammoniacal (NH^{+4}), l'azote nitreux (NO^{-2}) et surtout l'azote nitrique (NO^{-3}). La forte proportion d'azote organique est une des causes des difficultés rencontrées pour établir les bilans d'azote.

Le compartiment organique peut à la fois libérer de l'azote minéral (minéralisation) et absorber de l'azote minéral (immobilisation), le bilan constitue la minéralisation nette.

Différents mécanismes permettent le déplacement de l'azote dans la solution du sol (Hillel, 1980 ; Jury, 1992) :

- La convection : entraînement direct de l'azote nitrique à l'état dissous dans l'eau ;
- La diffusion : mobilité de l'azote nitrique selon son gradient de concentration dans le sol ;
- La dispersion mécanique : la vitesse de migration de l'eau contenant des nitrates, varie à l'intérieur de chaque pore et entre les pores en raison de l'architecture interne du sol.

La forme nitrique est la plus mobile, donc souvent la seule concernée par ces mécanismes de transport. Établir un bilan d'azote revient à appliquer le même raisonnement que pour le bilan hydrique. La conservation de la masse pour l'azote minéral est décrite par l'équation suivante :

$$\Delta S_N = \text{Apports} + \text{Minéralisation} - \text{Pertes} - \text{Prélèvement} \quad \text{Équation 6}$$

ΔS_N variation du stock [kg/ha]

A par la pluie, l'irrigation, les engrais et la fixation symbiotique ou non symbiotique

M minéralisation nette de l'humus

P lessivage, organisation (inverse de la minéralisation), dénitrification et volatilisation.

Prélèvement : absorption par la plante.

Les apports d'azote sont estimés à partir de la dose d'engrais importée sur les sites. Les épandages d'engrais sont ici sous la forme d'ammonitrate (33.3 % d'azote). Les apports provenant de la pluie ou des irrigations restent négligeables d'après les dosages effectués sur l'eau de pluie et d'irrigation.

La minéralisation sera évaluée sur le site **0N**, qui permettra de valider les estimations antérieures. Les pertes par drainage et celles par voie gazeuse sont considérées comme nulles (sauf si fortes pluies et dans ce cas un nouveau prélèvement de sol sera effectué pour réinitialiser le bilan). Les pertes sont les composantes du bilan azoté qui sont plus difficiles à estimer. Souvent elles sont déduites du bilan, une fois les autres composantes déterminées.

La variation de stock est estimée par les prélèvements sur le terrain sur différentes couches de sol pour chaque traitement. Ces prélèvements sont ensuite envoyés au laboratoire d'analyse de sols

du Cirad, qui communique les résultats sous forme de teneur massique (mg/kg) du sol sec. La quantité par unité de surface (kg de N/ha) est alors calculée par la formule :

$$Q_N = \omega_N d_a \cdot e \cdot 10 \quad \text{Équation 7}$$

- QN teneur en azote du sol [kg/ha]
- ω_N concentration en azote dans la couche du sol [ppm]
- d_a densité apparente ou masse volumique sèche [kg/m³]
- e épaisseur de la tranche du sol prélevée [m]
- 10 facteur d'échelle, permettant d'exprimer Q_N en kg de N/ha

3.8.2. Détermination du stade d'azote dans le sol

Pendant la campagne de culture les prélèvements à la tarière sont faits sur 1,5 m par couches de 30 cm, sauf pour l'horizon de surface, où on a divisé la couche de prélèvement en 0-10 et 10-30 cm. Cette séparation devrait permettre d'appréhender l'effet du semis direct. Un échantillon composite a été réalisé à partir de 7 carottages sur les 60 premiers centimètres et 5 ensuite. L'échantillonnage est un point capital afin de disposer par la suite de résultats exploitables.

Les prélèvements sont effectués à proximité des sites de suivi tensio-neutronique. Ils sont complétés par une collecte de plantes éventuellement de mauvaises herbes et de paillis sur une placette de 2 m de long sur 1 m de large pour déterminer la MS et la teneur en azote. Les dates des déterminations prévues sont les semis et la récolte.

3.8.3. Détermination de la teneur en azote de la couverture et du paillis

La détermination de MS a eu lieu quelques jours avant l'application du Round-up sur l'ensemble de SCV. Une fois la récolte réalisée, les échantillons sont séchés à l'étuve pendant 48 heures à 70 °C et pesé (poids sec) pour calculer le rendement en MS.

Chapitre IV

Résultats

4.1. Résultats expérimentaux

Dans cette partie nous présentons une analyse succincte des observations liées au développement de la culture qui fournira les éléments nécessaires pour une comparaison agronomique entre système de culture conventionnel avec labour, CT et semis direct sur couvert végétal, SCV.

4.2. Les campagnes 2004-2007

Les résultats de l'analyse du rendement sont présentés année par année, par souci de clarifier la présentation.

4.2.1. Synthèse des résultats 2004/2005 (blé dur)

4.2.1.1. Pluie et évapotranspiration 2004/2005

Plusieurs facteurs climatiques dont la variation interannuelle est forte, influent sur le développement des céréales d'hiver en milieu méditerranéen (Baldy, 1993 ; Ruelle, 1995). Nous aborderons successivement la pluviométrie, les températures et l'évapotranspiration de référence. Ces facteurs, ainsi que leurs interactions avec les conditions d'alimentation hydrique, doivent obligatoirement être pris en compte pour interpréter les rendements obtenus.

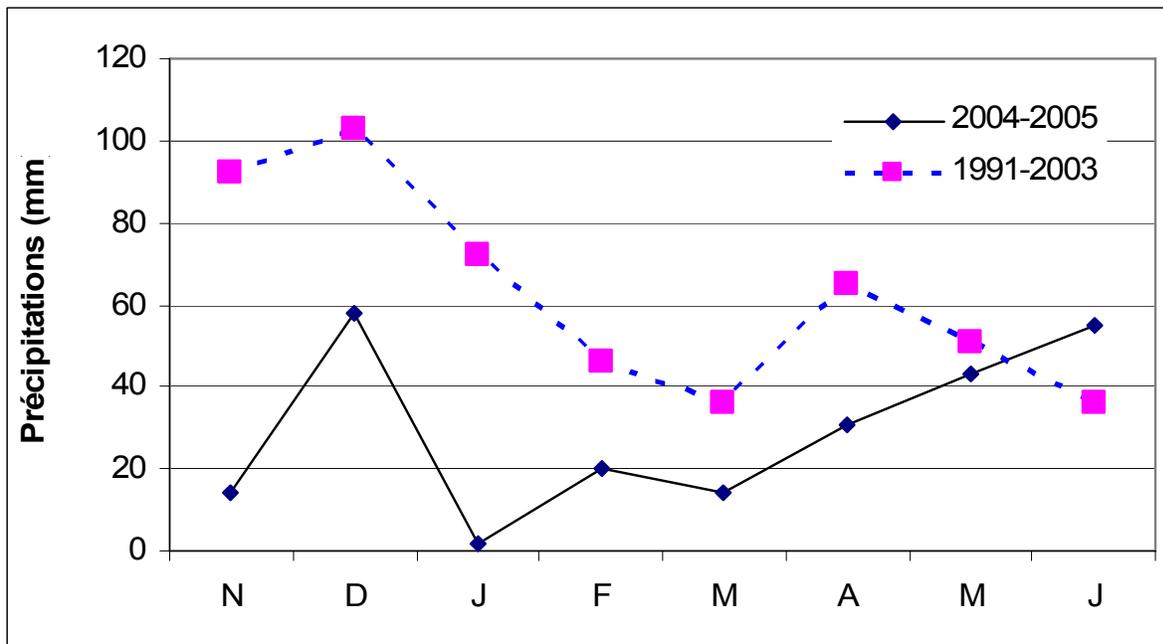


Figure 3: Pluviométrie mensuelles de la campagne 2004-2005 vs la moyenne 1991-2003.

La pluviométrie de la campagne agricole 2004/2005 a été particulièrement faible puisque la somme des précipitations atteint seulement 236 mm du semis à la récolte. Ce total correspond à une pluviométrie fortement déficitaire (figure 3). Le Tableau 5 présente la pluie et l'évapotranspiration au cours de cette campagne. On constate un déficit pluviométrique de 265 mm par rapport à la moyenne de 1991-2004.

Classiquement, la consommation en eau des cultures est comparée à une évapotranspiration de référence permettant d'appréhender la demande climatique locale. Sur le site nous disposons des observations nécessaires pour calculer l'évapotranspiration potentielle Penman (1948, 1956). On constate un excédent de 54 mm d'évapotranspiration par rapport à la moyenne 1991-2003, comme on peut le voir sur le diagramme de la figure 4 et aussi dans le tableau 5.

Il faut cependant remarquer que le nombre d'années est restreint pour une comparaison en conditions méditerranéenne.

Tableau 5: Différence entre pluie et évapotranspiration par rapport à une moyenne de 1991-2003

En mm	2004-2005	1991-2003	Différence
Pluie	236	501	-265
ETp (Penman)	530	476	+54

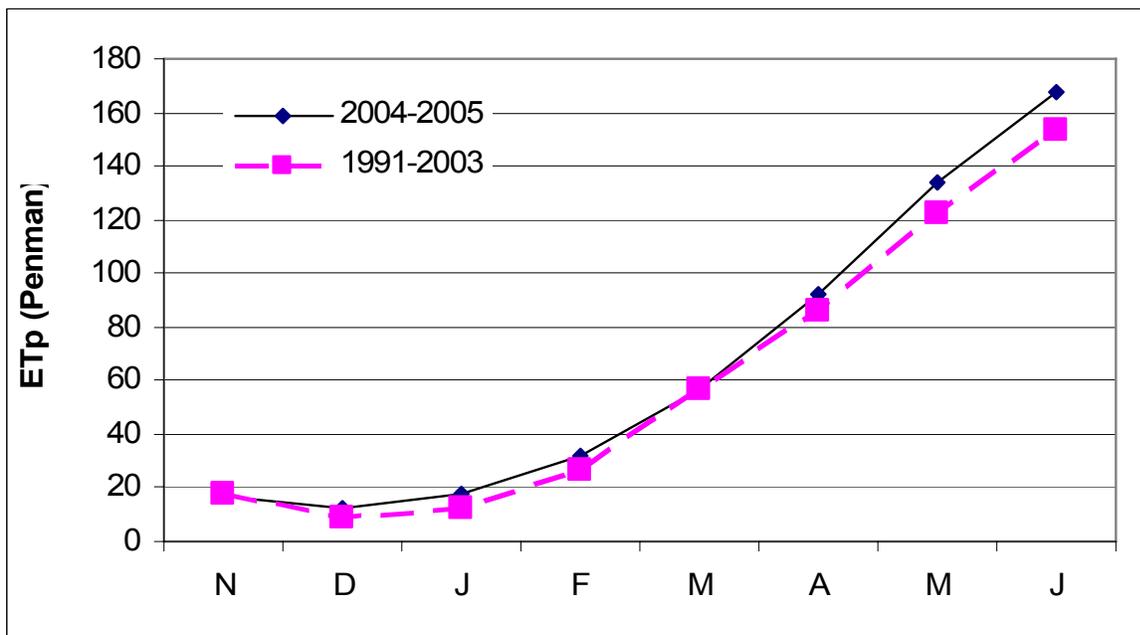


Figure 4: Evapotranspiration mensuelles de la campagne 2004-2005 vs la moyenne 1991-2003

Au cours de cette campagne, le déficit climatique élevé a engendré un besoin en irrigation important ; malheureusement à cause de dysfonctionnement de matériel d'irrigation, le plan initial d'irrigation n'a pas pu être respecté sur SCV, qui a reçu des apports inférieurs aux autres traitements (Tableau 6).

4.2.1.2. Mise en place du blé dur 2004/2005

Les opérations de mise en place de la culture du blé se sont bien déroulées. Les semis ont été retardés par les pluies de fin octobre. Ce n'est que le 17 novembre que les sols étaient suffisamment ressuyés pour envisager les semis dans de bonnes conditions notamment au niveau de la conduite conventionnelle. Pour la conduite en SCV, ils ont eu lieu le 30 novembre pour des raisons de disponibilité du semoir adapté au semis direct. Mais les précipitations reçues peu au paravent n'ont pas permis de disposer d'un sol suffisamment ressuyé.

Tableau 6: Irrigation sur différent traitements (mm)

Date	CT	CT 0N	SCV	SCV 0N
04/04/2005			36	
05/04/2005	27	33		
08/04/2005				33
03/05/2005	17			
04/05/2005		16		
09/05/2005	44			
10/05/2005		48		
Total	88	97	36	33

Pour les traitements CT, les semis ont été réalisés à une densité de 300 grains /m², densité tout à fait satisfaisante pour la variété et la date de semis. Les pertes à la levée sont de l'ordre de 59 % et 18 % sur SCV et CT respectivement. Cette perte est très importante sur SCV en raison d'un sol mal rappuyé sur la ligne de semis, et de la période très froide qui a suivi le semis. Sur ce traitement SCV, le contact sol-graine dans le sillon n'était pas satisfaisant. La technique de semis direct nécessite de réaliser les travaux lorsque le sol est sec. La levée a demandé un temps plus long sur SCV, en partie pour ces raisons.

4.2.1.3. Rendement

Les résultats pour la récolte en 2005, obtenus sur 5 placettes de taille de 0.48 et 0.68 m² en CT et SCV respectivement. On rappelle que l'écartement entre lignes était différent sur les deux traitements ce qui a contraint à utiliser des placettes de dimension différentes. Les rendements des différents traitements ont été comparés à partir d'une analyse de deux moyennes en utilisant un test de T-Student au seuil 0,05 pour identifier les moyennes significativement différentes, il y avait au moins 5 répétitions dans chaque traitement. Selon la présentation classique, on a reporté dans tous les graphiques les barres d'incertitude correspondant à l'écart-type et les différentes dans les bâtonnets des histogrammes indiquent des valeurs moyennes significativement différentes.

Nous examinerons à la fois les traitements en pluvial et sans apport d'azote à titre de référence avant de comparer les traitements avec un itinéraire classique fertilisé et irrigué.

Pour les deux traitements en pluvial (SEC) comme le montre le graphe de la figure 5, les rendements en grain, RDT et en matière sèche totale, MST, du SCV sont significativement différents de CT. Ceci s'explique principalement par le fait que le peuplement du SCV était significativement inférieur à celui du CT ; le stock d'eau en sortie d'hiver était en effet proche sur les deux parcelles, comme nous le verrons plus loin.

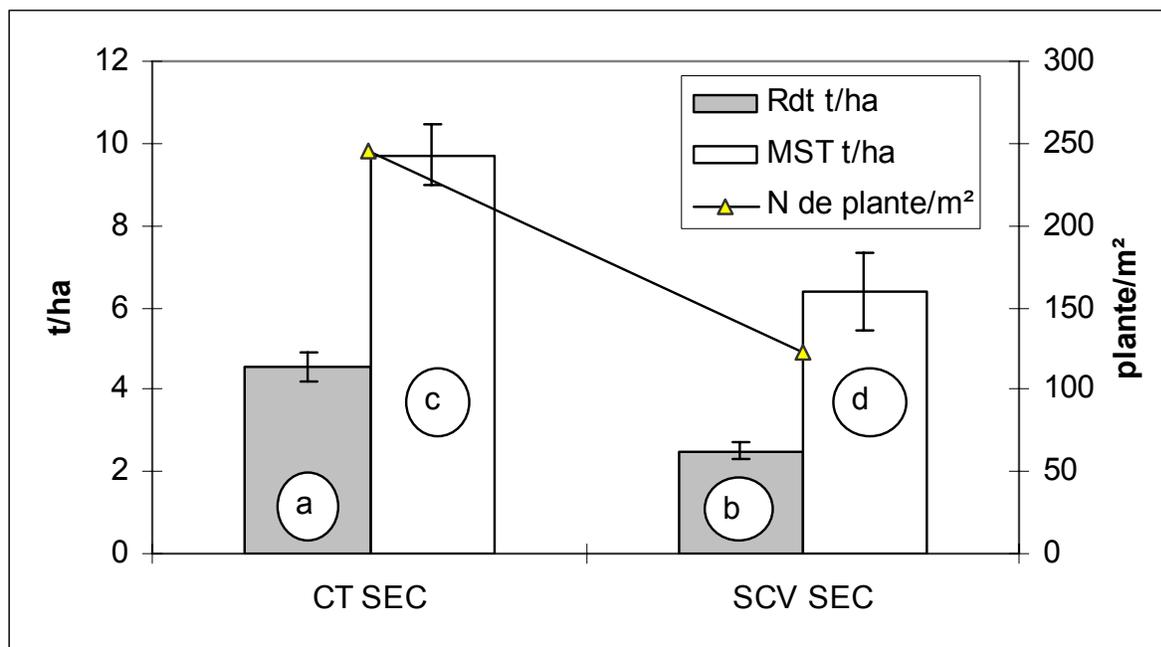


Figure 5: Comparaison du rendement (Rdt à 15% d'humidité) des traitements en SEC en 2004/2005

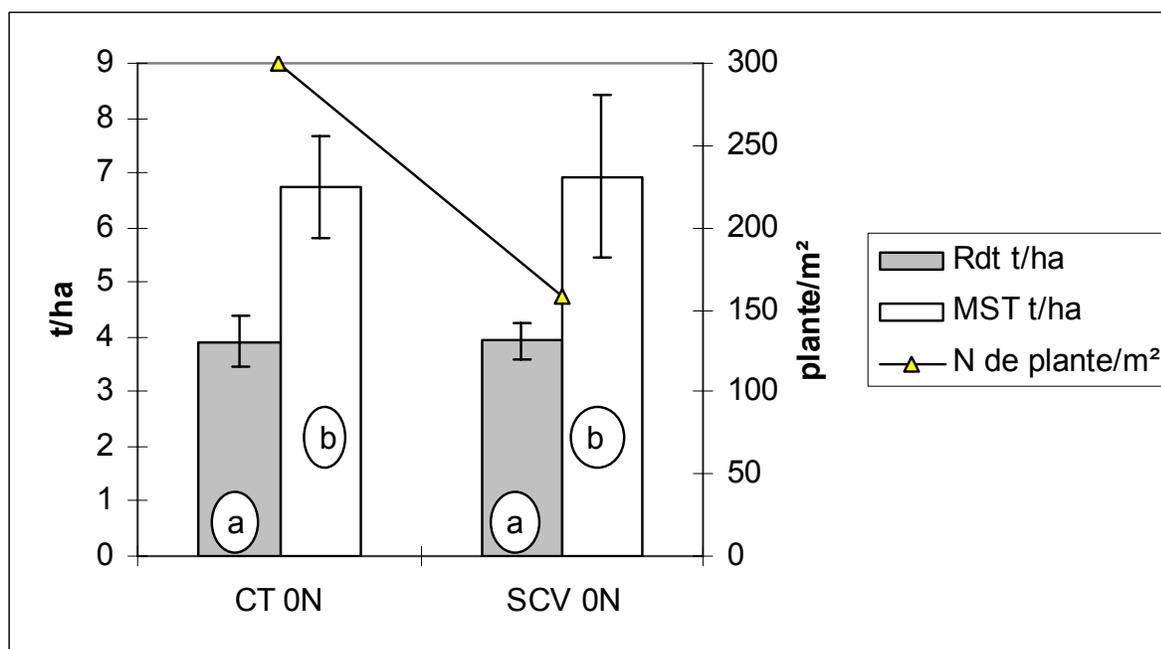


Figure 6: Comparaison du rendement de traitement 0N en 2004/2005

Les rendements en grain, RDT et matière sèche totale, MST sur les deux traitements sans azote (figure 6) ne sont pas significativement différents malgré un peuplement beaucoup plus faible sur SCV par rapport à CT. Ceci s'explique par une bonne valorisation du stock initial d'azote sur SCV qui était très élevé (233 kg N/ha pour 47 kg N/ha sur CT, cf. Tableau 15).

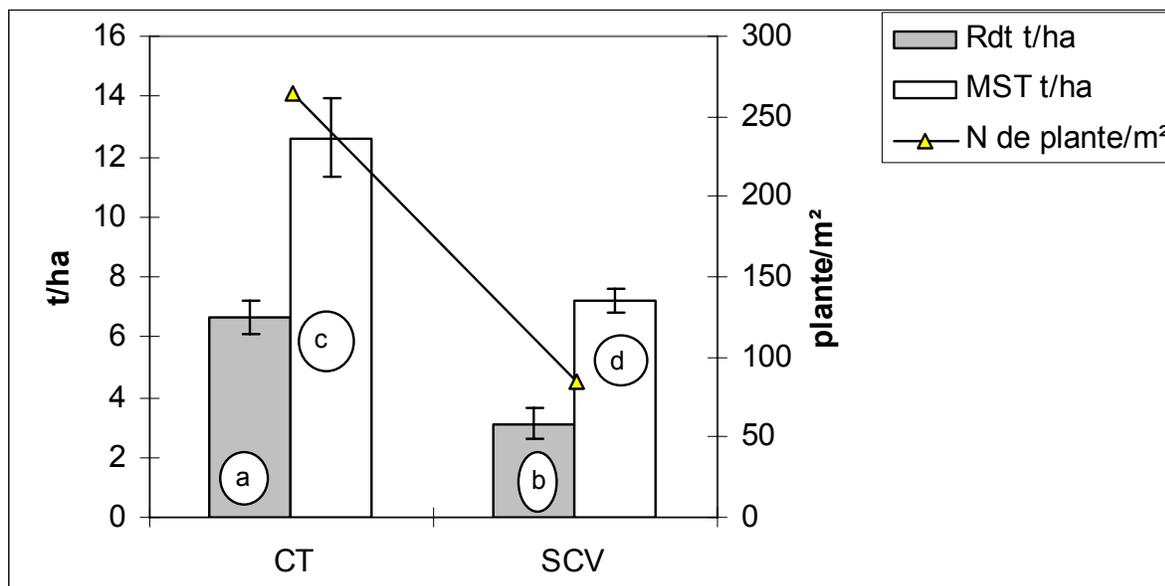


Figure 7: Comparaison du rendement des traitements irrigués SCV et CT en 2004/2005

Le graphe de la figure 7, compare RDT et MST pour les deux traitements avec apport d'azote et irrigation. Ces deux variables en SCV sont significativement différents de CT. Sur le traitement SCV la baisse de rendement atteint près de 3 t/ha, soit 53 %. Cette baisse a été occasionnée par le problème de semis à l'origine d'une mauvaise levée. Un peuplement 3 fois moins important que celui de CT induit une forte chute des potentialités de rendement qui ne rend pas possible la comparaison directe des résultats. Les problèmes rencontrés lors de l'irrigation sur SCV (36 mm sur SCV contre 88 mm sur CT) contribuent aussi à cette baisse de rendement. De fait le rendement en grain apparaît pénalisé aussi par un faible indice de récolte qui est de 37%, sur SCV pour 45% sur CT et la différence de rendement s'explique en partie par le poids de 1000 grains. L'analyse des réserves en eau du sol et de leur utilisation devrait permettre des préciser les conditions dans lesquelles s'est trouvé le traitement SCV par rapport à CT.

4.2.1.4. Stock d'eau dans le sol en 2004/2005

Le suivi hydrique du cycle de culture au niveau des sites de mesures permet d'analyser la cohérence entre la production et la mobilisation des réserves. L'évolution du stock d'eau a été analysée depuis janvier, à partir d'une série de mesures à la sonde à neutron réalisées chaque semaine environ. Le cas de deux traitements principaux avec des sols identiques est analysé ci-après (figure 8 et 9). Deux couches pour lesquelles une variation de stock apparaît de façon très

nette sont repérées. Il s'agit des couches 0-50 et 50-100 cm. Par contre d'après la figure 10, la variation de stock pour les couches suivantes reste très limitée surtout en SCV.

Il apparaît tout d'abord que les stocks sont très voisins au début des mesures. On constate ensuite que seuls les horizons de surface sont affectés par les apports d'eau (irrigations et précipitations) et la consommation par la plante.

Le graphique de la figure 8 montre que les deux traitements CT et SCV ont utilisé pratiquement toute la réserve disponible en eau dans l'horizon 0-50 cm. Ce résultat est obtenu avec un peuplement moins important mais une seule irrigation sur SCV. En avril et mai, la réserve hydrique de cette couche de sol est basse et le traitement CT sollicite très fortement la couche suivante 50-100 cm (Figure 9). C'est moins le cas pour le traitement SCV très certainement en raison d'un enracinement plus faible sur SCV, comme en témoigne le profil racinaire à la récolte (figure 12). La remontée des stocks de surface en mai correspond à des mesures faites après les irrigations.

Il est intéressant d'examiner plus précisément toutes les couches du sol. Pour cela, on peut faire appel aux mesures sonde à neutron qui sont faites tous les 10 cm (figure 10).

Il apparaît alors que CT a même sollicité la couche 100-150 cm à partir de fin avril, période où la diminution de stock ne peut être imputée à du drainage. Par contre, la couche 100-150 cm n'a pas contribué significativement à l'alimentation hydrique de la culture pour le SCV ; ce dernier n'est donc pas parvenu à valoriser l'eau disponible ainsi que les éléments minéraux en profondeur.

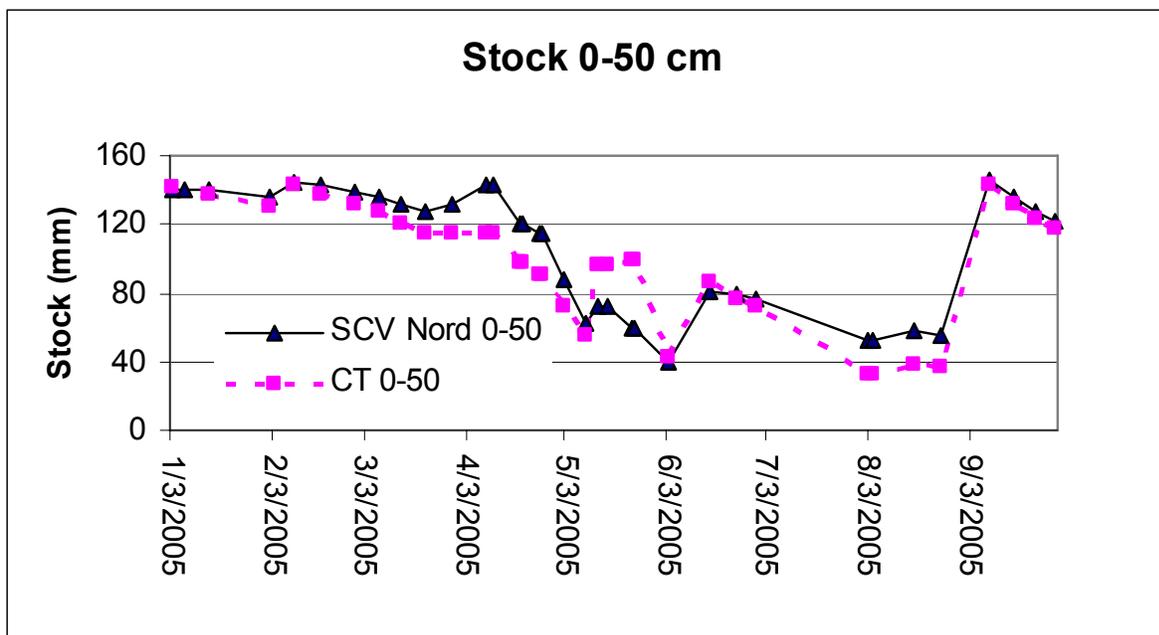


Figure 8 : Comparaison des stocks d'eau de la première couche au cours de la campagne pour les deux traitements principaux, d'après les mesures sonde à neutrons.

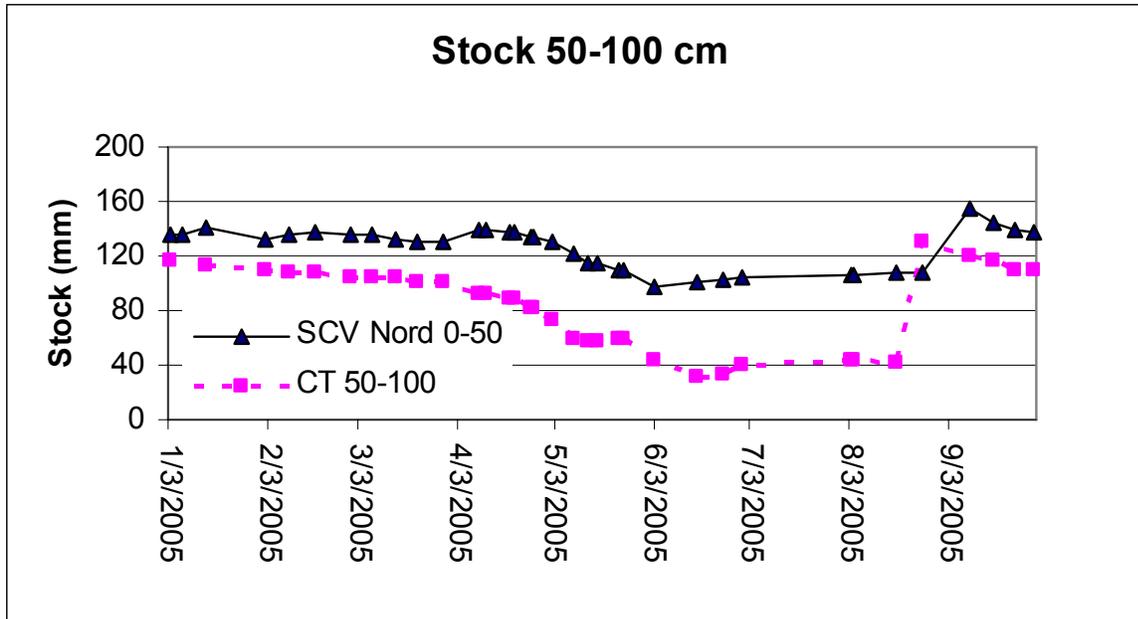


Figure 9 : Comparaison des stocks d'eau de la seconde couche au cours de la campagne pour les deux traitements principaux, d'après les mesures sonde à neutrons.

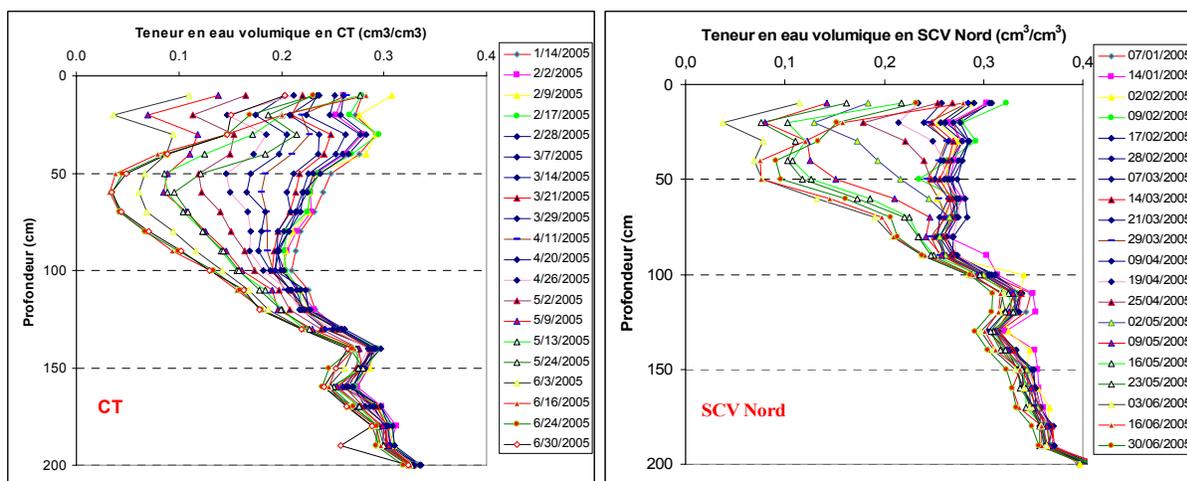


Figure 10 : Comparaison des profils hydriques au cours de la campagne obtenus par mesures sonde à neutron sur CT

4.2.1.5. Surface foliaire : LAI

En 2004/2005, au début du cycle, la surface foliaire (LAI) a été inférieure sur CT (figure 11). Ceci s'explique toujours par le fait qu'en SCV le peuplement était plus faible ainsi qu'en raison d'un retard de levée par rapport à CT. Ainsi l'évolution du LAI a été également retardée sur SCV et LAI_{max} est atteinte plus tardivement. Ceci s'explique par le fait que le sol est plus froid sur SCV en raison de la présence du résidu à la surface du sol qui fait écran au rayonnement. En fin de cycle, les LAI sont supérieurs à 3 et les consommations potentielles sont assez voisines, les analyses faites précédemment sur l'utilisation des réserves du sol sont validées, les différences ne peuvent être attribuées aux seules différences des LAI.

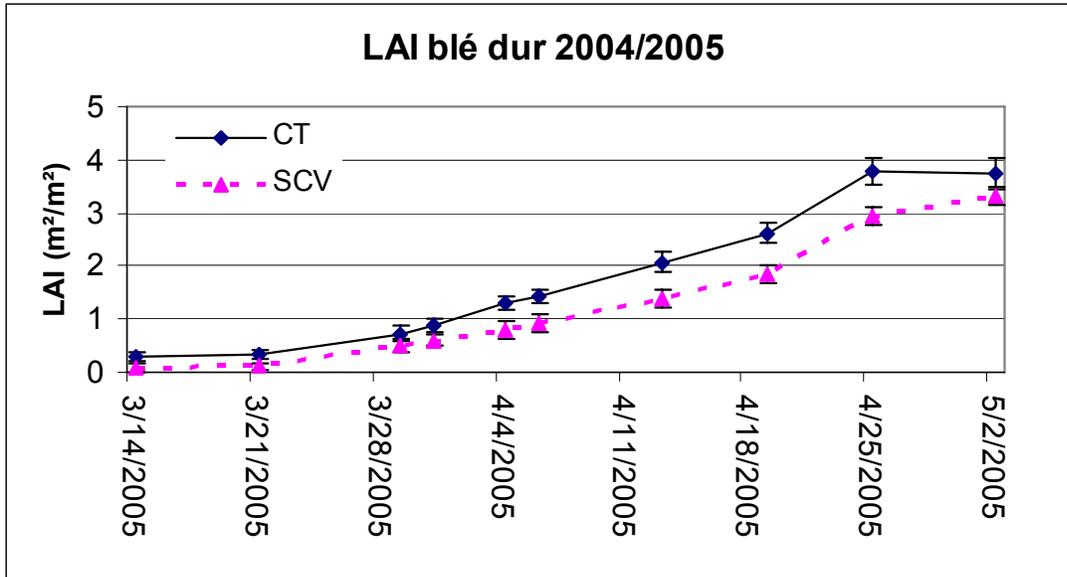


Figure 11 : LAI mesuré au cours de la campagne 2004/2005 pour blé dur

La figure 12, qui présente l'enracinement de blé dur 2004/2005, fait apparaître que la profondeur maximale atteinte est proche de 1,4 m sur le traitement CT, par contre les racines n'arrivent qu'à 1,15 m sur SCV. Sur ce traitement, avec un sol plus froid et un peuplement plus faible, l'enracinement est du même ordre que sur le traitement CT jusqu'à 0,3 m mais moins important pour le reste de profil. La présence d'eau et d'azote à une profondeur au-delà de 1.15m (voir à des profondeurs nettement plus faibles, voisines de 1m) n'a pas été profitable à la plante.

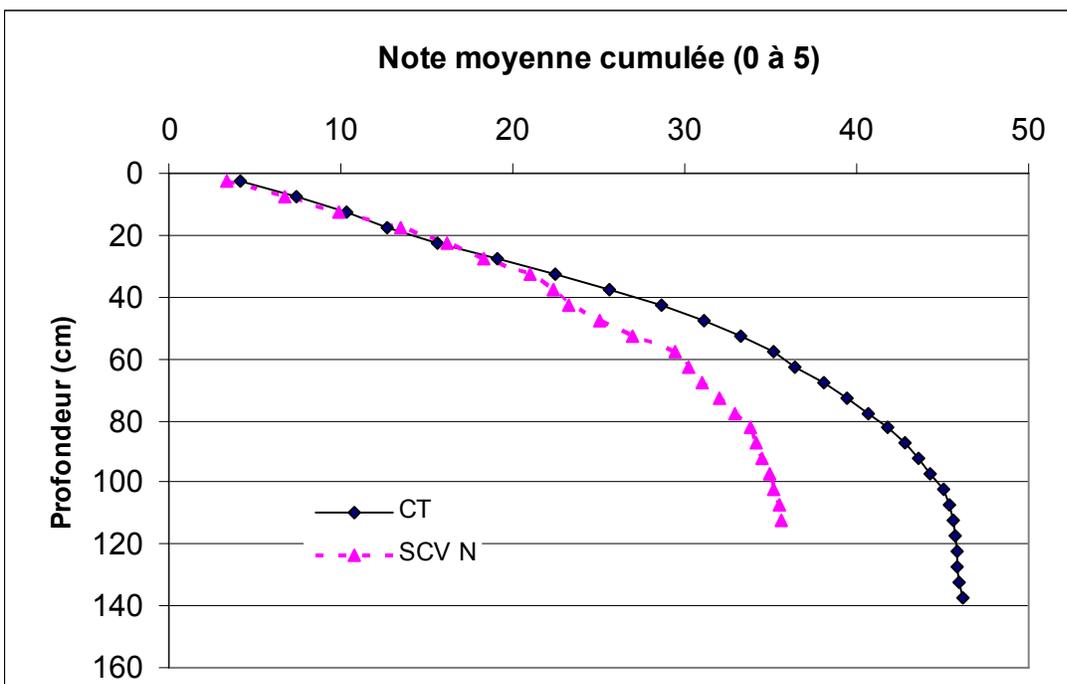


Figure 12 : Enracinement du blé dur mesuré après la récolte de la campagne 2004/2005

4.2.1.6. Conclusion sur la campagne 2004/2005

Bien que les conditions défavorables du fait d'une pluie n'aient pas permis la réalisation d'un semis satisfaisant pour SCV (ce qui est un handicap pour cette technique) et ait entraîné un peuplement inférieur à celui du traitement CT, puis des problèmes de matériel aient perturbé l'irrigation, un certain nombre de résultats ont été dégagés sur les différences entre CT et SCV.

La confrontation des informations sur le développement foliaire a confirmé un retard de la culture sur SCV ; il est à imputer à la température du sol sous mulch. L'analyse de l'utilisation des réserves en eau du sol montre que le SCV mobilise moins bien les réserves en eau du sol dans les couches profondes ; cette observation est en accord avec l'examen des profils racinaires. L'enracinement profond est moins développé dans ce traitement.

4.2.2. Synthèse des résultats 2005/2006 (blé dur)

4.2.2.1. Pluie et évapotranspiration 2005/2006

Les figures 13, 14 et le tableau 7 présentent la pluie et l'évapotranspiration au cours de la campagne 2005/2006 et aussi la différence par rapport à la moyenne 1991-2003. On constate un déficit de pluie de 190 mm par rapport à la moyenne de 1991-2004 et un surplus de demande climatique de 48 mm.

Après un automne-hiver 2005/2006 très pluvieux, notamment le mois de janvier avec un cumul de 195 mm, le printemps est extrêmement sec. La pluviométrie du mois de juin est proche de la normale. Globalement la pluviométrie annuelle est déficitaire avec une hauteur totale de 620 mm (Août 2005-Septembre 2006) donc inférieure à la moyenne qui est de 750 mm.

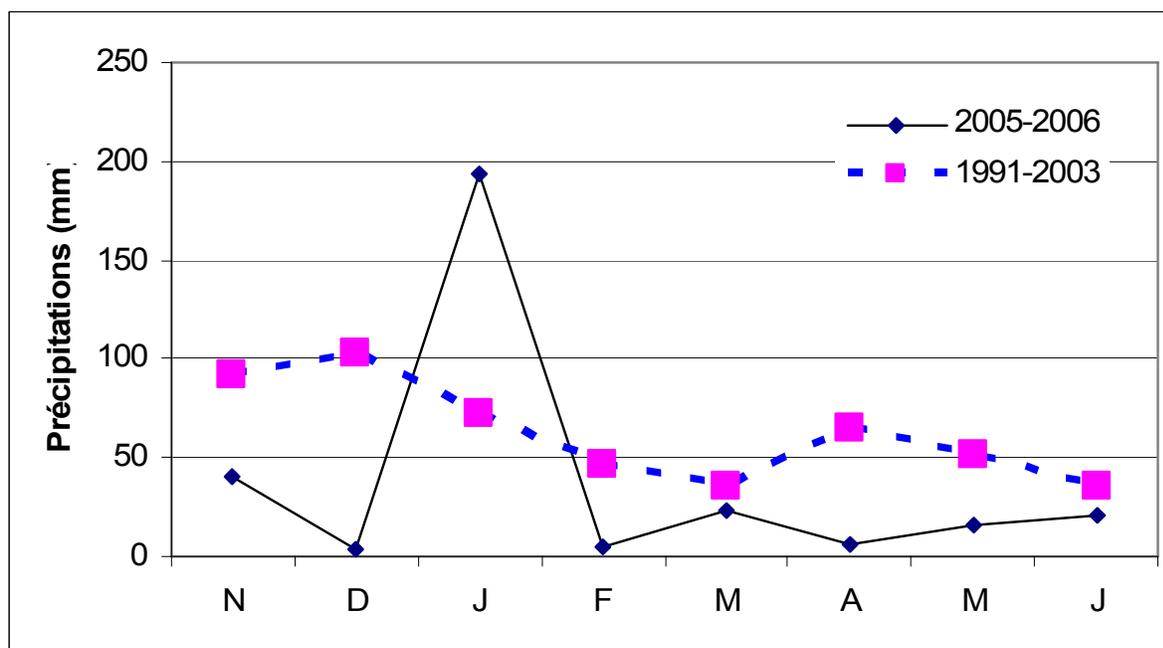


Figure 13 : Pluviométrie mensuelles de la campagne 2005-2006 vs la moyenne 1991-2003.

Tableau 7: La différence de pluie et l'évapotranspiration par rapport à une moyenne de 1991-2003

En mm	2005-2006	1991-2003	Différence
Pluie	331	501	-190
ETp (Penman)	524	476	+48

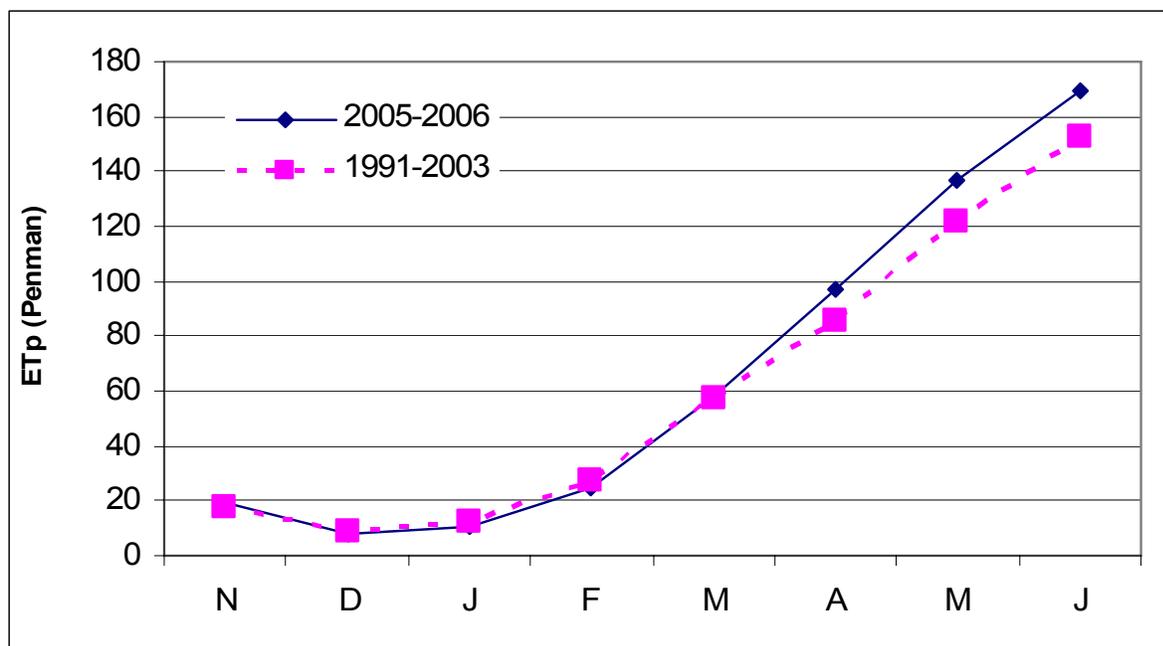


Figure 14 : Evapotranspiration mensuelles de la campagne 2005-2006 vs la moyenne 1991-2003.

Le Tableau 8 présente l'irrigation faite au cours de la campagne 2005/2006. Un manque de pluie, pendant la période où la plante en a le plus besoin a eu des répercussions importantes, et ce malgré les irrigations apportées, qui sont, en 2006, très voisines sur CT et SCV, mais leur répartition n'a pas été celle souhaitée, comme nous le verrons.

Tableau 8: Irrigation 2005/2006 sur les différents traitements

Date/traitements	CT	CT 0N	SCV	SCV 0N
24/04/2006			26	26
25/04/2006	26	26		
03/05/2006			32	32
05/05/2006	27	27		
30/05/2006	39	39		
06/06/2006			32	27
Total	92	92	90	85

4.2.2.2. Les rendements

Les conditions techniques (nombre et surfaces des placettes) sont les mêmes que lors de la précédente campagne et le même type de traitement statistique est utilisé pour comparer les traitements.

Les traitements de référence non irrigués obtiennent des rendements, aussi bien en grain qu'en matière sèche totale qui ne sont pas significativement différents (figure 15). Le peuplement plus faible sur SCV (mais avec des écarts nettement moins importants que l'année précédente puisqu'ils sont inférieurs à 15%) n'a pas impacté le rendement. Il est certain que les pluies

hivernales en favorisant des effets de compensation ont contribué à minimiser l'effet de l'écart de peuplement.

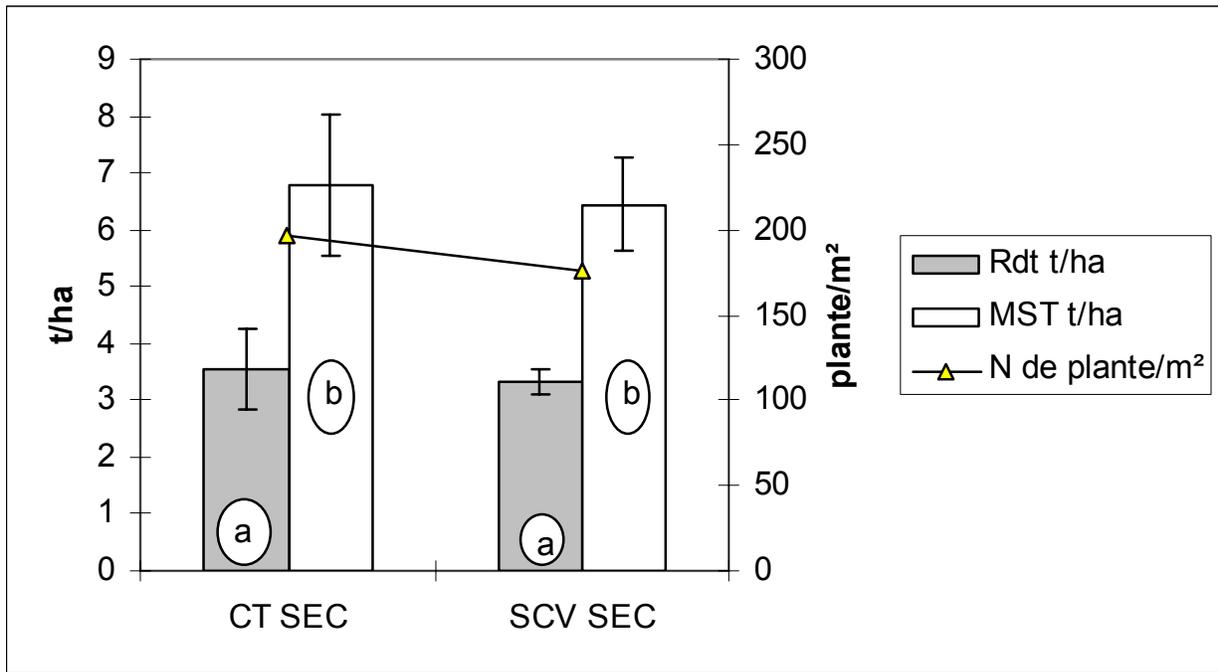


Figure 15 : Comparaison du rendement des traitements SEC SCV et CT en 2005/2006

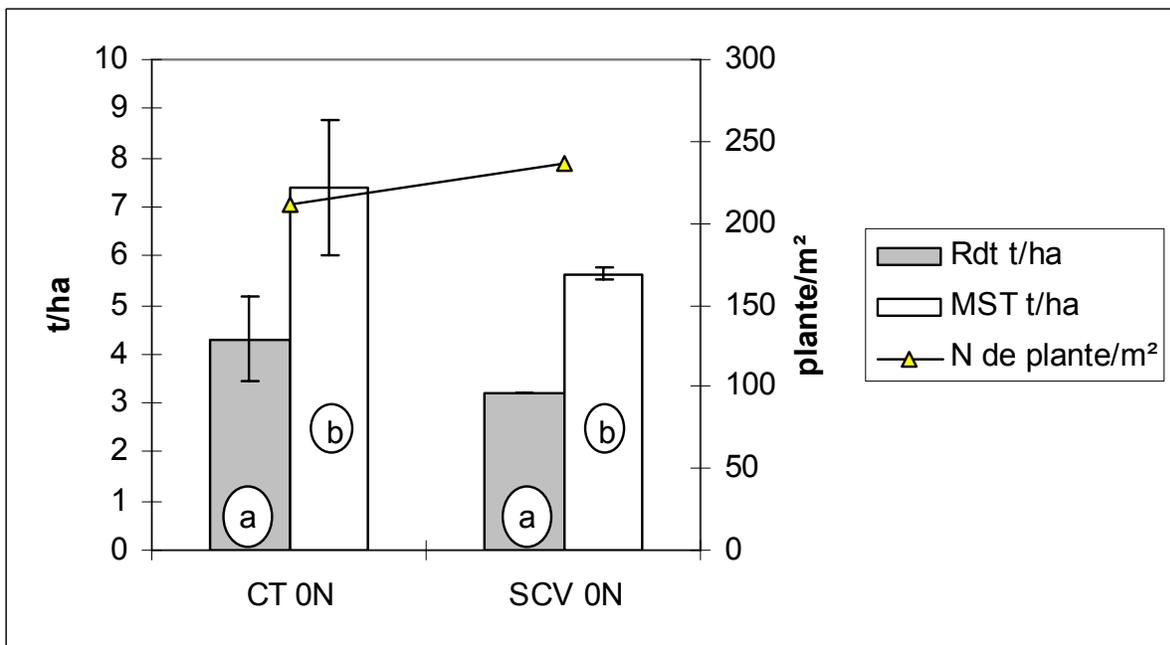


Figure 16 : Comparaison du rendement des traitements SCV ON et CT ON en 2005/2006

De même, dans le cas des traitements sans azote (figure 16) les rendements ne se différencient pas. Les écarts de peuplement étaient faibles et n'ont pas joué. Là encore, il est probable que l'effet des pluies d'hiver est important, mais surtout les stocks initiaux d'azote du sol ont été ramenés à des valeurs assez proches (38 et 84 kg N /ha respectivement pour CT et SCV), suite à une inondation qui a aussi réduit l'effet du mulch en emportant une partie des résidus de récolte. Lorsque l'on s'intéresse aux traitements principaux, dont les rendements sont représentés à la figure 17.

Pour le traitement CT, le rendement, qui présente une valeur significativement plus élevée que SCV, reste nettement inférieur à celui attendu. On ne peut remettre l'alimentation azotée ; le tableau 9 montre que le stock en sortie d'hiver a été complété par des apports importants ; seul le troisième apport d'azote initialement prévu n'a pas été fait eu égard aux potentialités de la culture en place et à ses besoins estimés en azote. En fait il apparaît nettement que suite au printemps sec, les irrigations ont été trop tardives. Des problèmes de pannes à la station de pompage et de disponibilité du matériel n'ont pas permis d'assurer une alimentation hydrique satisfaisante, vu le très faible cumul des pluies en février, mars et avril. Le retard n'a jamais pu être rattrapé.

Tableau 9 : Le stock initial d'azote et l'azote apporté

	CT	SCV
N sol initial (kg/ha) sur 0-150 cm	75	125 (67 kg/ha sur 0-100 cm)
N apporté (kg/ha)	160	140

Le faible gain de rendement obtenu (0, 6t/ha), en apportant une irrigation supplémentaire sur une partie de CT à titre de test, confirme qu'il n'était pas possible d'atteindre les potentialités de la variété, du fait d'un nombre d'épis et de grains par épis insuffisant par suite du démarrage retardé de l'irrigation.

Pour le traitement SCV, les écarts avec CT avoisinent 3 t/ha (Tableau 10) pour le rendement en grain, et 2,5 t/ha pour la matière sèche totale et ne peuvent être imputés au seul changement de technique, bien que la littérature s'accorde à annoncer des rendements inférieurs dans le cas du SCV pour les céréales d'hiver. Les disponibilités en azote étaient voisines et même un peu supérieures à celles de CT.

Pour le traitement SCV, le premier handicap a été celui du nombre de plantes à la levée, comme lors de la précédente campagne, même si l'écart était moins important. Le taux de levée a été moyen, du fait que la ligne de semis n'était pas parfaitement refermée. En dépit d'un tallage important, le nombre de tiges au m² était inférieur de près de 80 par rapport au traitement en CT. Il semble probable qu'ensuite l'absence d'irrigation précoce, au moment opportun qui a pénalisé à la fois l'alimentation en eau et l'accès à l'azote n'a pas permis d'atteindre un nombre d'épis suffisant. L'alimentation hydrique déficiente pendant la floraison a entraîné un taux élevé d'avortement des fleurs.

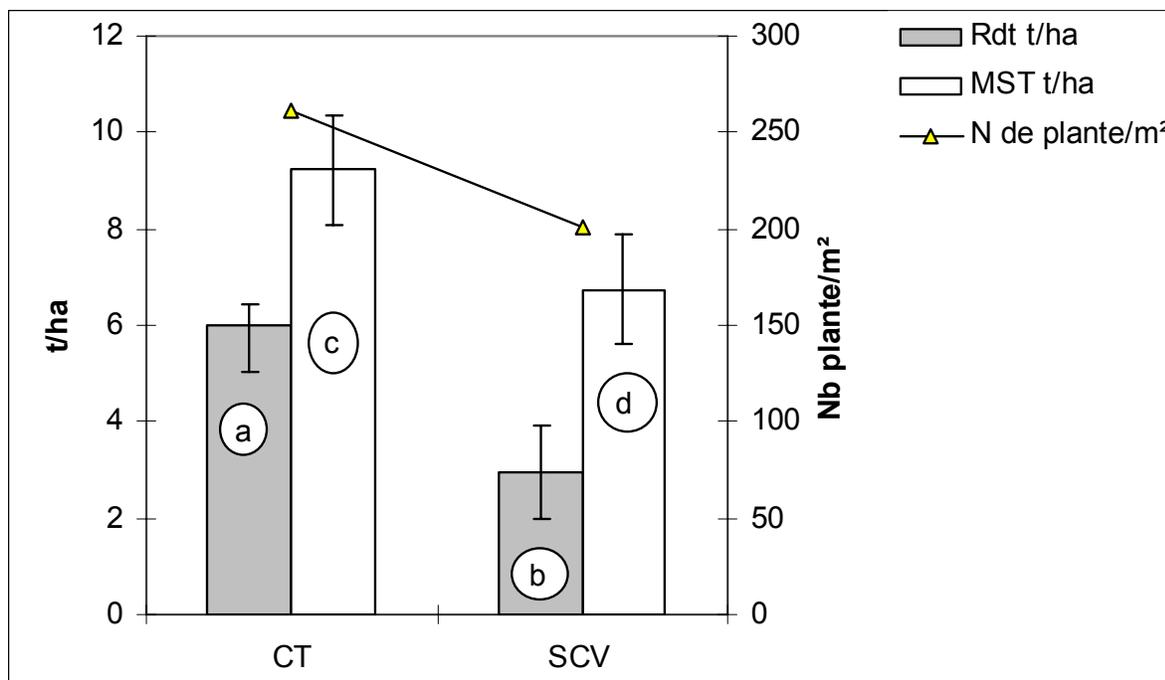


Figure 17 : Comparaison du rendement des traitements irrigués SCV et CT en 2005/2006

Ces effets ont été accentués par, la présence d'un ravageur, le criocère des céréales (Coléoptères-Chrysomelidae ; *Oulema melanopus* L.) (cf. annexe) qui, a provoqué une sénescence précoce des feuilles, ce qui peut expliquer la chute du poids de mille grain qui est faible pour une variété à gros grains, ainsi que de l'indice de récolte. Le stress pendant la maturation qui a perturbé le transfert des réserves vers le grain, l'indice de récolte, matière sèche du grain par rapport à la matière sèche totale est de 37 %, alors qu'il est de 55 % sur CT.

Tableau 10 : Composantes du rendement

	CT	SCV
Peuplement (/m ²)	261 a	201 b
Nombre de grains/m ²	9490 a	8069 b
Nombre de grains/épis	34 a	26 b
IR (%)	55 a	37 b
PMG (gr)	53.7 a	39.3 b

Finalement l'ensemble des composantes du rendement pour SCV s'avèrent significativement inférieures à celles de CT (Tableau 10).

4.2.2.3. Stock d'eau dans le sol en 2005/2006

Afin de préciser l'utilisation de l'eau du sol au cours de cette campagne, les mesures sonde à neutron ont été traitées de la même manière que précédemment pour caractériser l'évolution des stocks hydriques par couches.

Le figure 18 montre que les deux traitements CT et SCV ont mi-février le même stock d'eau disponible et que ce stock est très voisin de celui observé l'année précédente. CT et SCV ont utilisé pratiquement toute la réserve disponible en eau dans l'horizon 0-50 cm en mai et la couche de surface apparaît plus fortement desséchée que l'année précédente.

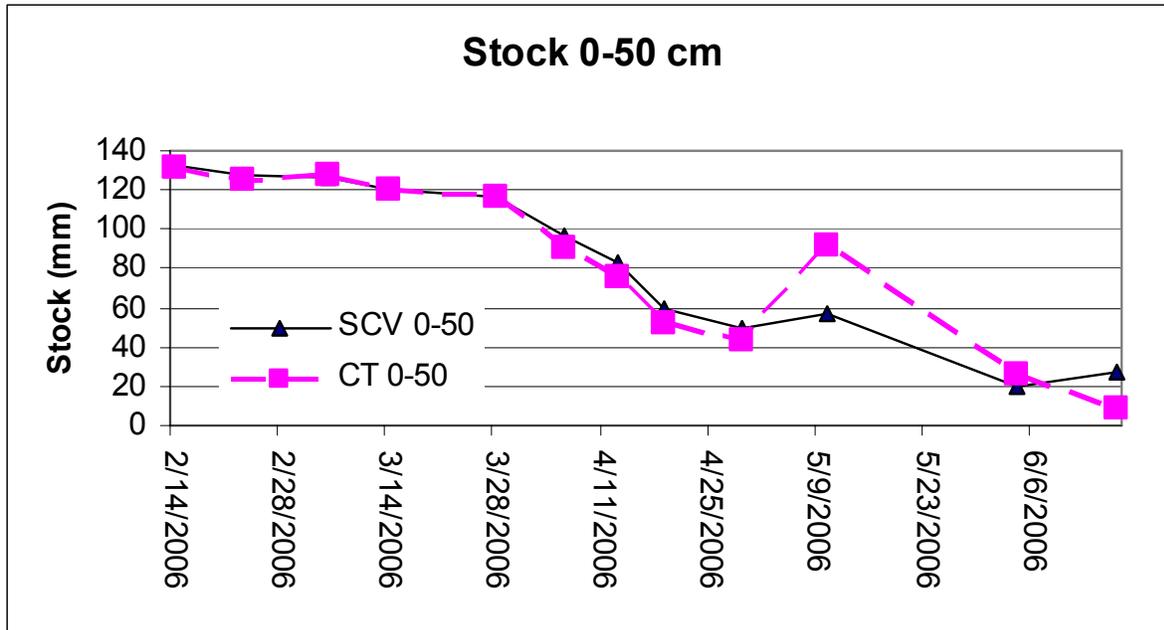


Figure 18 : Comparaison des stocks d'eau au cours de la campagne pour les deux traitements principaux, d'après les mesures sonde à neutrons sur 0-50 cm.

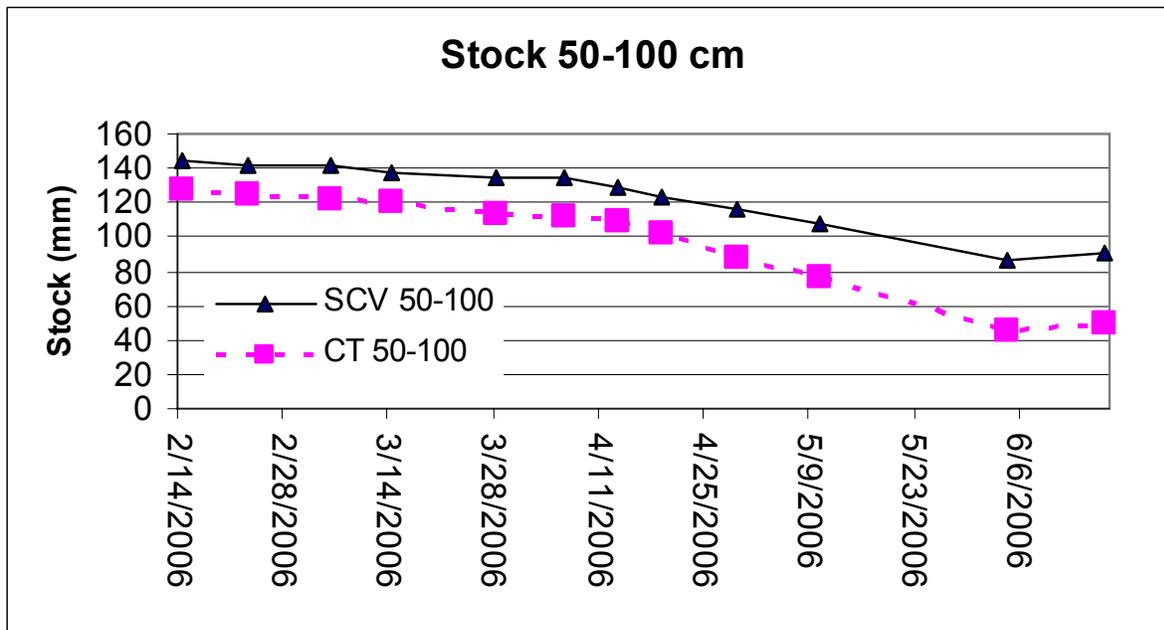


Figure 19 : Comparaison des stocks d'eau au cours de la campagne pour les deux traitements principaux, d'après les mesures sonde à neutrons sur 50-100 cm.

Dès avril, le traitement CT sollicite très fortement la couche de sol 50-100 cm (Figure 19). Le traitement CT prélève environ 70 mm contre 40 mm en SCV. L'aptitude moindre de ce dernier traitement à prélever dans les couches profondes est confirmée

L'examen des profils hydriques permet de préciser les profondeurs affectées par les prélèvements (figure 20). On peut voir que la vitesse de dessèchement est plus rapide sur le traitement CT. A la fin de mai et aussi début juin, le CT a bien sollicité les couches profondes ; des prélèvements s'effectuent jusqu'à une profondeur voisine de 1,4 m. Les évolutions des profils sont moins marquées sur SCV ; par contre des prélèvements plus faibles ont aussi lieu à des profondeurs importantes. Le peuplement plus élevé de SCV a entraîné une sollicitation plus marquée de couches profondes.

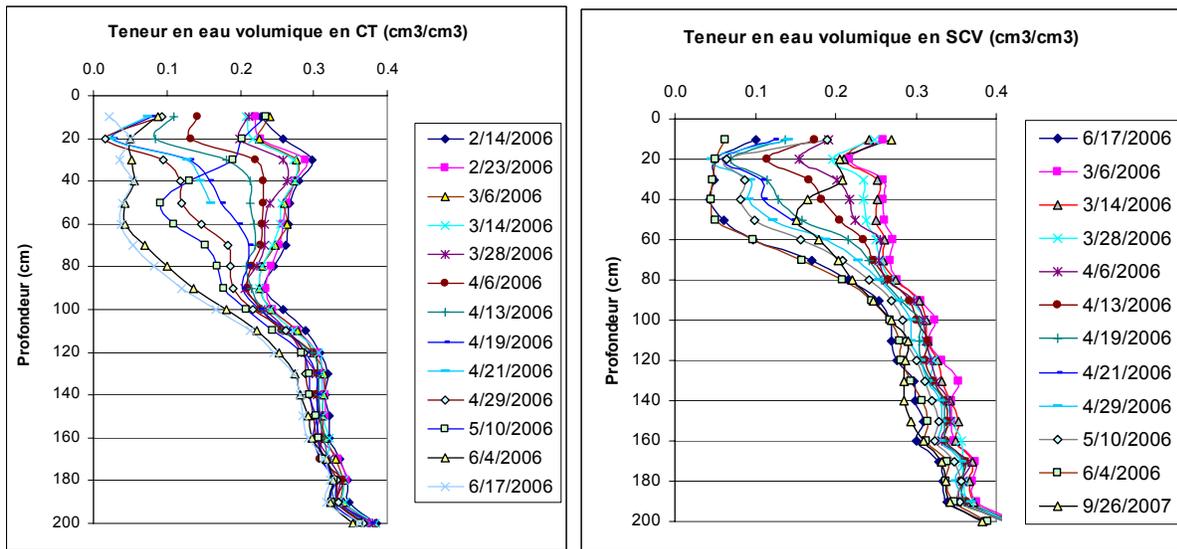


Figure 20 : Comparaison des profils hydriques au cours de la campagne obtenus par mesures sonde à neutron sur le CT

4.2.2.4. Surface foliaire : LAI

Contrairement à la campagne précédente on peut noter que la croissance foliaire a été presque identique sur les deux traitements (Figure 21), qui ont d'ailleurs reçu des doses d'eau similaires. La valeur maximale, LAImax a été atteinte de manière concomitante. Par contre la valeur maximale du LAI est de l'ordre de 2.5 m²/m², valeur assez faible même pour du blé dur et nettement plus basse que celle observée précédemment. Ce fait est à rapprocher des remarques faites plus haut, le dessèchement important du sol et le calendrier des irrigations laissent à penser que le stress hydrique, auquel s'est probablement ajouté une mobilisation plus difficile de l'azote disponible a entraîné une réduction du développement foliaire, ce qui est cohérent avec le plus faible rendement obtenu.

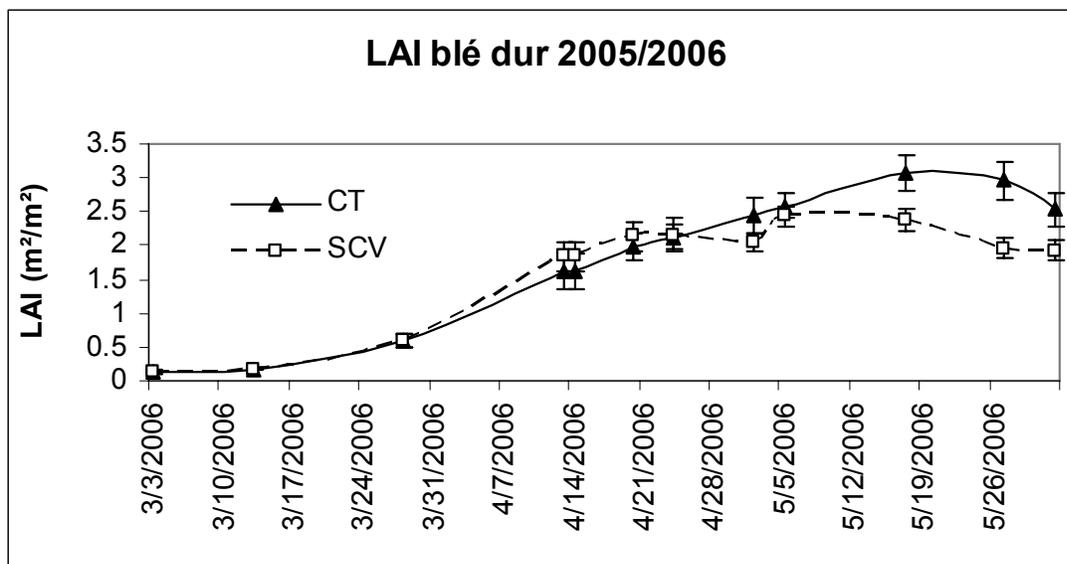


Figure 21 : LAI mesuré au cours de la campagne 2005/2006 pour blé dur

4.2.2.5. Enracinement

La figure 22, qui présente l'enracinement du blé dur, fait apparaître que l'enracinement maximum est proche de 1,2 m sur le traitement CT, par contre les racines atteignent 1,05 m sur SCV. La réduction de la profondeur totale d'enracinement à la récolte sur SCV, est peu importante, comme lors de la campagne précédente.

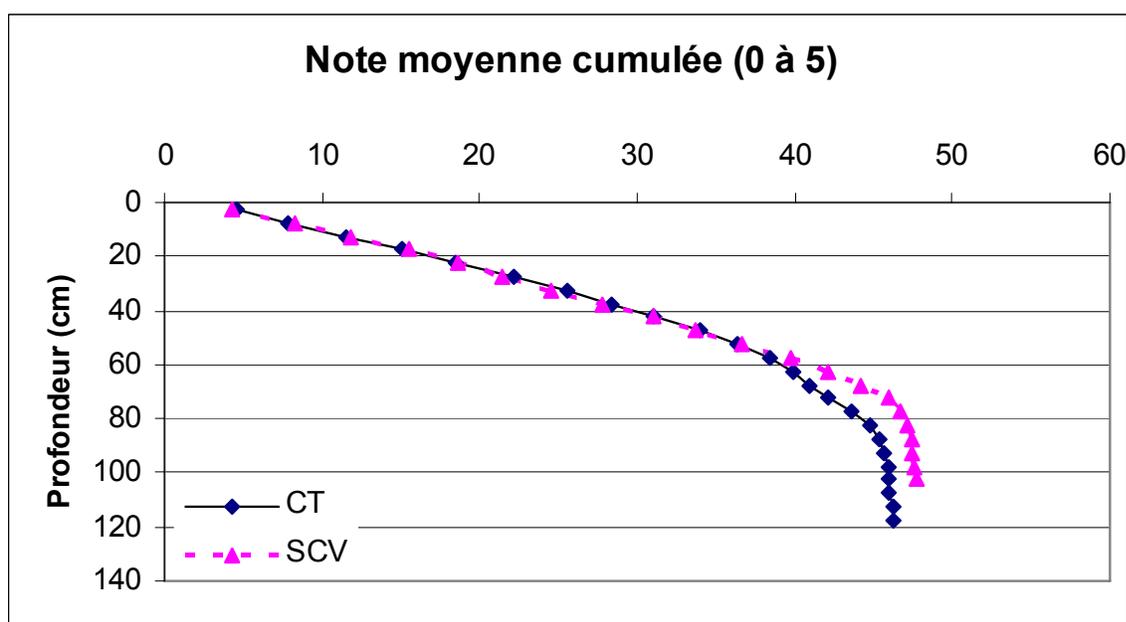


Figure 22 : L'enracinement de blé dur mesuré après la récolte de la campagne 2005/2006

Par contre la colonisation du sol par le système racinaire sur les deux traitements est voisine en 2006, alors qu'elle était nettement inférieure sous semis direct l'année précédente, cela confirme

l'effet du peuplement. De plus l'effet de la température du sol a été moindre au cours de cette année. En effet une partie des résidus laissés à la surface du sol sur SCV ont été emportés lors d'une inondation, ce qui a minoré l'effet d'écran thermique du mulch.

4.2.2.6. Conclusion sur la campagne 2005/2006

Cette deuxième année d'expérimentation sur blé dur a permis d'accéder à des informations complémentaires, qui ont confirmé les observations faites en 2004/2005. Les conditions particulières engendrées d'une part par une inondation qui a emporté une partie des résidus de récolte et d'autre part par les pannes sur la station de pompage n'ont pas permis de disposer de résultats exploitables pour des comparaisons directes entre traitement SCV et CT. Cependant la mobilisation de l'ensemble des informations disponibles fournit des indications concordantes sur plusieurs points en cohérence avec les rendements obtenus. L'analyse des rendements obtenus n'a d'ailleurs été possible qu'en prenant en compte l'ensemble des conditions pédoclimatiques pour intégrer leur impact sur les composantes du rendement (Bald, 1993 ; Mouret et al., 1991), ainsi que les attaques de ravageurs pour expliquer leur valeur faible.

En ce qui concerne une culture d'hiver comme le blé dur, la présence d'un mulch à la surface du sol, formé par les résidus de la récolte précédente puisque le temps est insuffisant pour mettre en place une inter-culture, a des influences fortes sur les conditions thermiques pendant l'hiver. Le maintien d'une température en permanence plus basse sur SCV par rapport à CT engendre des effets sur la culture qui semblent en particulier se traduire par un développement racinaire moins important. Il reste à préciser si les effets thermiques sont moins marqués sur la partie aérienne, ce qui est probablement le cas. L'enracinement serait alors doublement pénalisé, puisqu'il est bien connu que son développement est pratiquement stoppé au moment de la phase reproductive. Il en résulte une moindre mobilisation des réserves en eau du sol dès 50 cm et éventuellement des éléments fertilisants, avec des effets directs possibles sur le développement foliaire et la production.

Il convient de rappeler que le semis direct des cultures d'hiver est délicat à cause d'une surface du sol souvent humide à cause des pluies d'automne. Des lignes de semis mal refermées ont des conséquences difficilement rattrapables sur le peuplement et obèrent les potentialités de la culture. Enfin compte tenu des problèmes rencontrés avec les effets thermiques dus au mulch, il paraît intéressant d'envisager des dates de semis plus précoces en SCV qu'en itinéraire technique traditionnel afin de compenser les retards de développement de la culture.

4.2.3. Synthèse des résultats de la campagne 2007

4.2.3.1. Pluie et évapotranspiration au cours de la campagne 2007

Le climat de la campagne a été très favorable à l'implantation de la culture, comme le montre le graphique de la figure 23. Plus de 150 mm de pluies ont été reçues après le semis, en mai et début juin, ce qui a favorisé la levée et l'installation de la culture. Les pluies se sont ensuite complètement arrêtées et un fort déficit climatique en juillet-août a permis une différenciation nette des traitements.

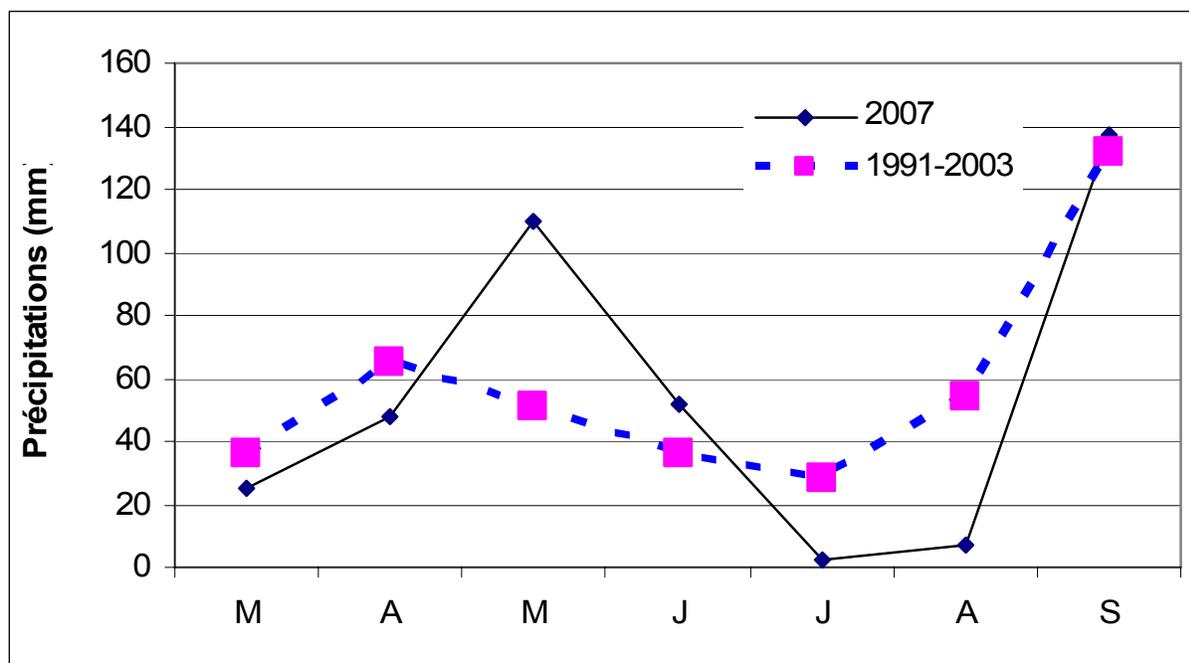


Figure 23 : Pluviométrie mensuelles de la campagne 2007 vs la moyenne 1991-2003.

Le Tableau 11 présente la pluie et l'évapotranspiration au cours de la campagne 2007. On note 21 mm en moins de pluie par rapport à la moyenne de 1991-2003. Au cours de la campagne, on constate également 62 mm d'évapotranspiration en plus et, comme l'illustrent les courbes de la figure 24, l'évapotranspiration de référence a été en permanence supérieure à la moyenne.

Tableau 11: la pluie et l'évapotranspiration totale et leurs différences par rapport à la moyenne 1991-2003.

En mm	2007	1991-2003	Différence
Pluie	381	402	-21
ETp (Penman)	886	804	+62

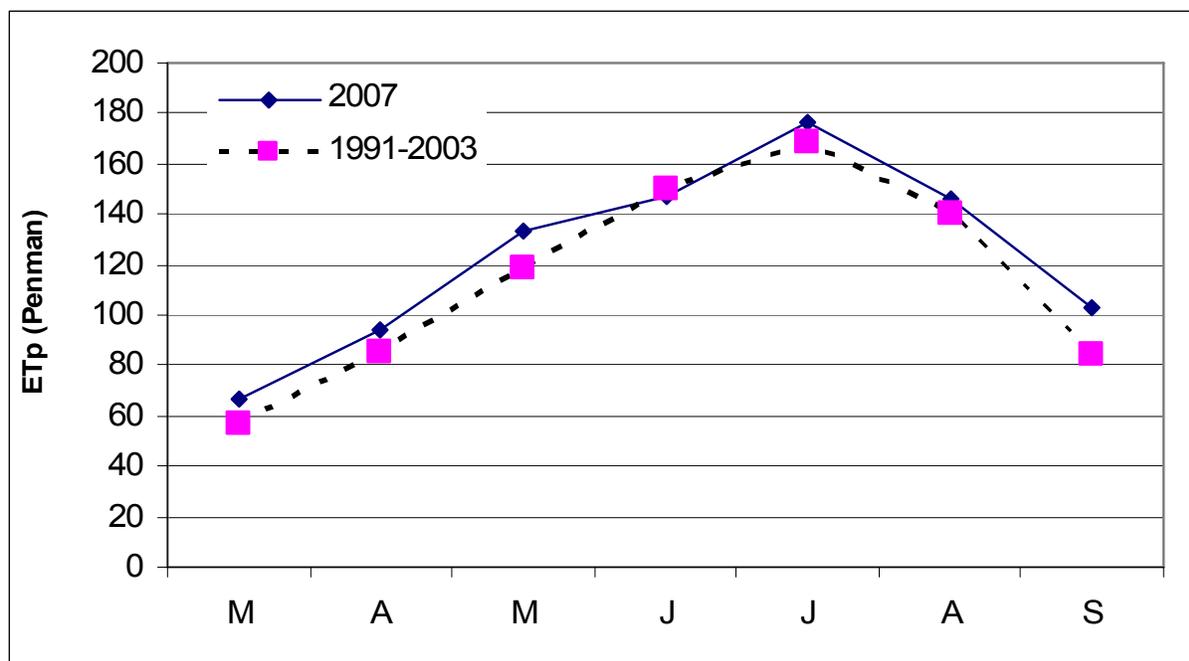


Figure 24 : Evapotranspiration mensuelle de la campagne 2007 vs la moyenne 1991-2003.

4.2.3.2. Irrigation 2007

En ce qui concerne l'irrigation, le dispositif a été modifié par la mise en place d'un traitement en irrigation localisé à la limite entre la parcelle CT et la parcelle SCV Nord, en utilisant des gaines T-Tape. Cette technique a été appliquée pour les traitements conduits sans restriction hydrique ainsi que pour des traitements restreints, comme nous le précisons ci-après. L'irrigation par aspersion a été conservée pour disposer de traitements de comparaisons, pour CT avec une aspersion au canon, mais comme le canon n'était pas toujours disponible les traitements SCV ont bénéficié d'une couverture intégrale. Les apports d'irrigation sont présentés dans le Tableau 12 concernant les traitements en aspersion.

Sur les traitements en goutte à goutte l'eau était livrée par des goutteurs intégrés dont l'espacement de 30 cm avec un débit de $3,67 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Une gaine a été installée toutes les deux rangées de plantes, ce qui donne un espacement latéral de 1,6 m.

La première irrigation a été appliquée le 19 Juin. Elle a duré environ 7h30 pour les deux traitements afin de garantir le maintien du bulbe humide tout au long de la saison. Par la suite, les traitements conduits à l'ETM étaient irrigués chaque jour et à raison d'un jour sur deux pour les traitements restreints. Sur la base des prévisions de la demande en eau des cultures, l'irrigation était appliquée pendant trois heures sur les traitements conduits à l'ETM. Comme il n'était pas possible d'irriguer le samedi et le dimanche, des irrigations de 6 heures ont été réalisées le vendredi et le lundi. Ce programme d'irrigation a été maintenu jusqu'à la dernière semaine de Juillet. Ensuite, le temps d'irrigation a été diminué pour passer à deux heures par jour (à l'exception du weekend), en tenant compte de l'évolution de l'évapotranspiration de référence. Dans les traitements restreints, le même régime d'irrigation a été appliquée mais à raison d'un

jour sur deux jusqu'à la fin de la saison d'irrigation. Les apports totaux ont été respectivement pour les traitements sans restriction hydriques de 430 et 310 mm pour les traitements restreints en eau.

Tableau 12 : Apports (en mm) pour les traitements arrosés par aspersion

Dates/sites	CT	SCV
19/06/2007	23	
23/06/2007		30
04/07/2007	5	
06/07/2007		25
14/07/2007	25	35
18 et 19/07/2007	49	
20 et 21/07/2007		25
29/07/2007		27
03/08/2007	35	
10/08/2007		10
14/08/2007	28	
17 et 18/08/2007		29
30/08/2007	33	
Total	198	181

4.2.3.3. Mise en place du maïs

La culture mise en place est un maïs tardif de variété Pioneer PR35Y65 à forte potentialité de rendement; l'objectif était de caractériser les possibilités de production des parcelles en semis direct depuis 7 campagnes en comparaison avec les parcelles avec labour.

Le semis a été effectué le 24 avril 2007 avec un semoir SEMEATO à cannelures aussi bien dans la partie SCV que dans la partie labourée. La régularité de distribution des graines a été excellente, le positionnement était un peu moins bon dans le cas du sol labouré. Un apport d'ammonitrate a été positionné au semis sous le lit de semence. La récolte manuelle des placettes a eu lieu à partir du 7 septembre et la récolte mécanique le 20 septembre 2007.

4.2.3.4. Rendement maïs 2007

Les graphes ci-dessous rassemblent les données sur les rendements obtenus à partir de la récolte de 5 placettes de 2.25 m².

Sur les traitements SEC, le rendement est 4.9 t/ha sur CT et 6 t/ha sur SCV (figure 25). La baisse de rendement est de 72 % et 58 % par rapport à CT ETM et SCV ETM, respectivement. La pluie totale de juillet et août a été quasiment nulle ce qui a conduit à des traitements SEC à faibles rendements, malgré l'écart sur le peuplement. Pour les deux traitements, les rendements ne sont pas significativement différents.

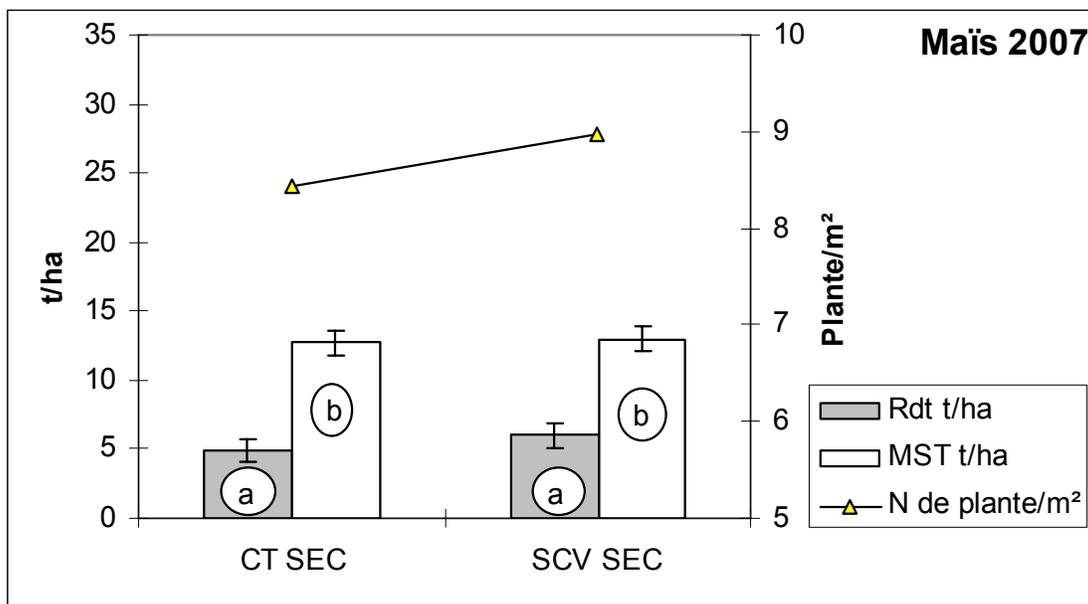


Figure 25 : Rendement en grain (Rdt) et en matière sèche totale (MST) sur les traitements en régime pluvial

Les contraintes techniques n'ont pas permis d'avoir un traitement sans azote en 2007, du fait d'un apport lors du semis, comme cela a été signalé. On peut néanmoins comparer les deux traitements qui n'ont reçu que 27kg N / ha au semis et leurs rendements sont très voisins (figure 26). Le fait que les teneurs en azote du sol au semis étaient très voisines a favorisé la comparaison entre les deux techniques de culture.

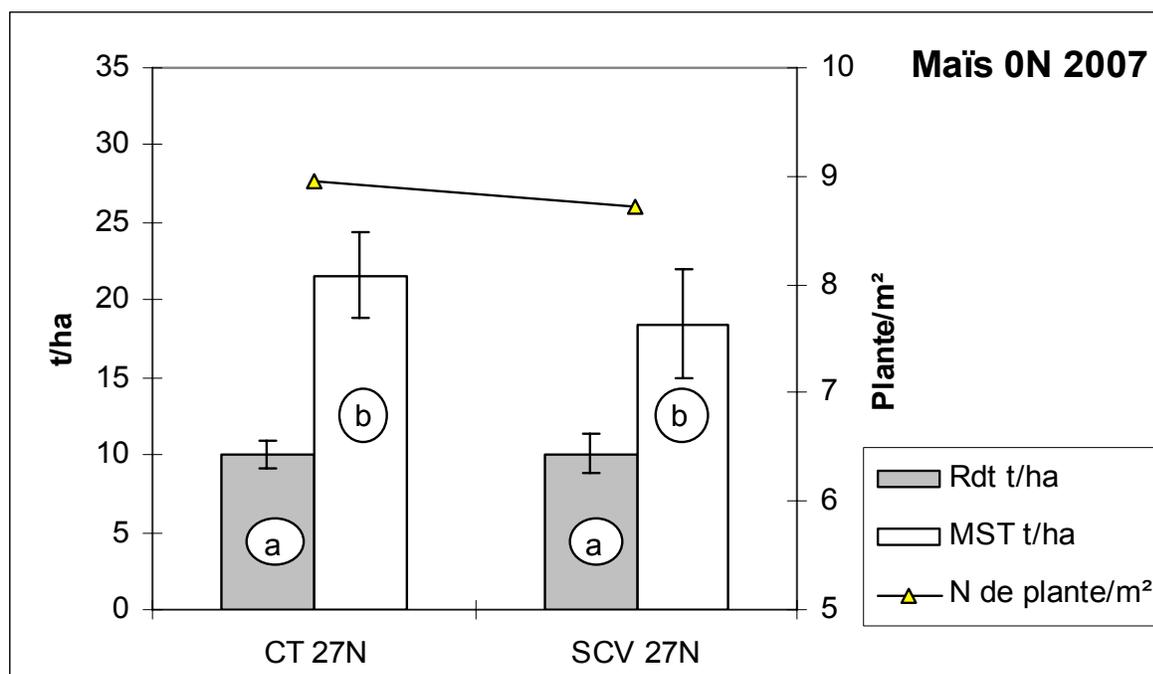


Figure 26 : Le rendement en grain (Rdt) et la matière sèche totale sur les traitements sans azote après le semis (apport de 27 kgN/ha au semis)

Quant aux traitements irrigués par aspersion (figure 27 et Tableau 13), les résultats montrent que dans ce cas aussi il n’y a pas de différence significative pour CT et SCV, bien que les valeurs soient un peu inférieures pour SCV, mais elles sont d’un très bon niveau, après 7 années de semis direct, ce qu’il convient de souligner ! On remarquera la forte homogénéité du comportement en conduite conventionnelle par contre en semis direct, des écarts forts existent entre les différentes placettes : on est en présence d’une hétérogénéité marquée que ne compense pas un travail du sol.

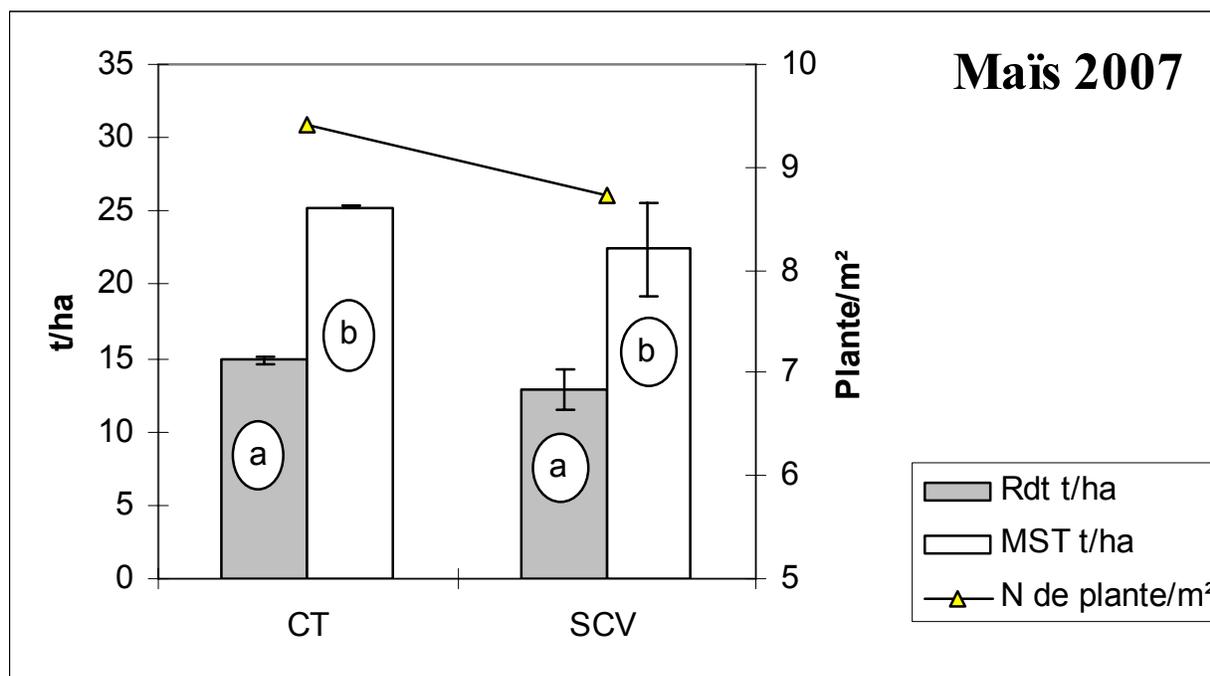


Figure 27 : Le rendement en grain (Rdt) et la matière sèche totale sur les traitements irrigués en aspersion

Tableau 13 : Composantes du rendement

	CT	SCV
Peuplement (/m²)	9.42 a	8.72 a
Nombre de grains/m²	5604 a	4589 a
IR (%)	59 a	57 a
PMG (gr)	265 a	280 a

Par contre, pour ce qui est des traitements sans restriction hydrique (figure 28), le rendement en grain et matière sèche totale sur SCV ETM est significativement différent de CT. Il est probable qu’il a subi de légers stress azotés fin juin ce qui ne lui a pas permis pas d’atteindre ses potentialités.

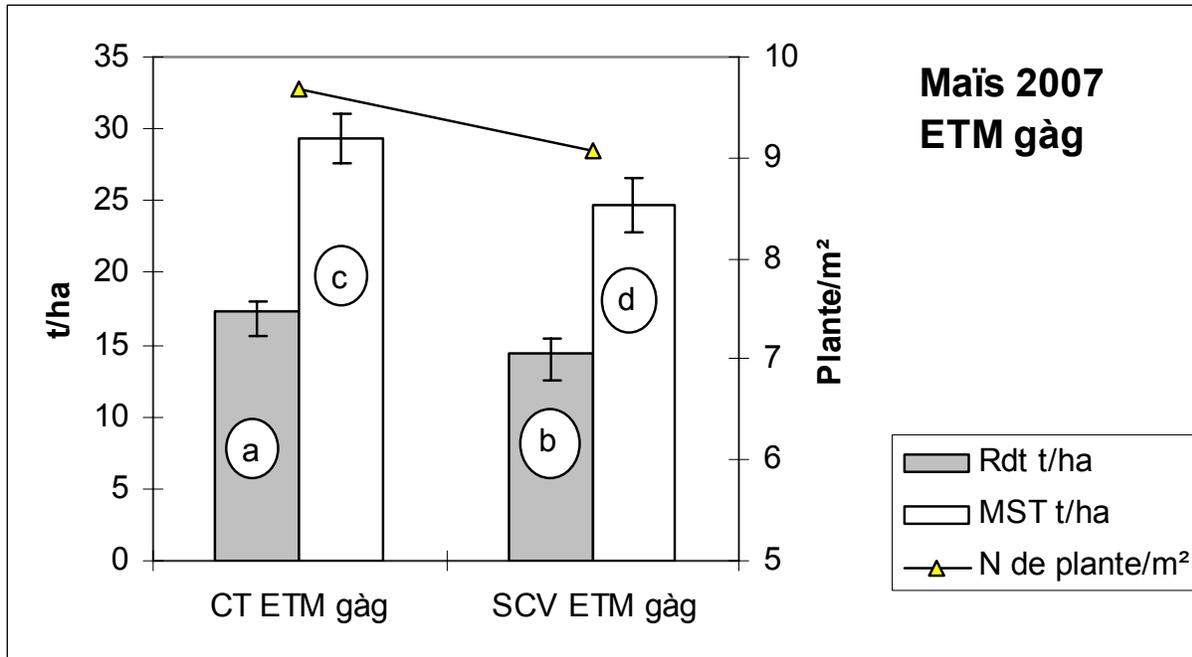


Figure 28 : Le rendement en grain (Rdt) et la matière sèche totale sur les traitements ETM

Des éléments d'informations supplémentaires sont apportés par les traitements avec des apports restreints en goutte à goutte. Leurs rendements en effet ne sont pas significativement différents (figure 29). Le rendement du traitement SCV est même un peu supérieur à celui de SCV sans restriction hydrique, ce qui paraît donc confirmer un possible stress azoté pour ce dernier.

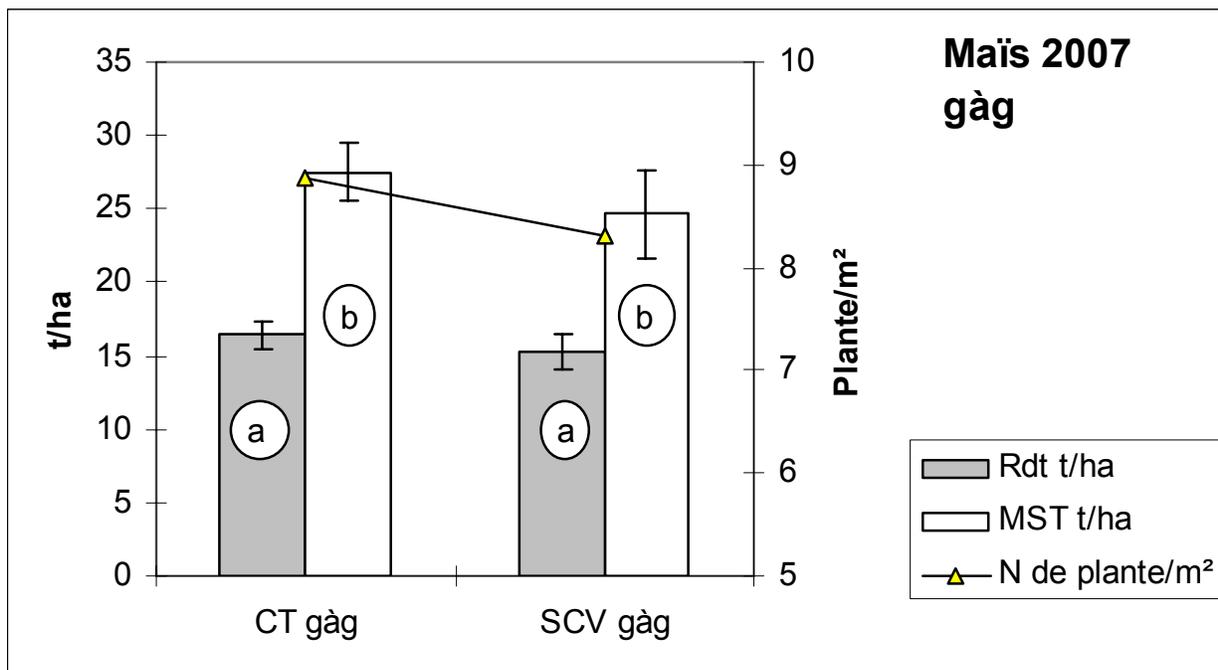


Figure 29 : Le rendement en grain (Rdt) et la matière sèche totale sur les traitements en goutte à goutte avec restriction hydrique

Le peuplement à la récolte est voisin de 92 000 plantes par ha pour 110 000 graines semées pour les traitements irrigués à « l'ETM », soit une perte de 15%, ce qui est assez élevé, le type de semoir utilisé peut expliquer ces manques ; ces pertes sont un peu supérieures en SEC.

Le nombre d'épis par plante n'est pas modifié sur SCV ; par contre il est sensible au stress hydrique ou azoté. La MST est très influencée par le régime hydrique et la concurrence avec les mauvaises herbes (sur SCV).

La diminution de rendement en SEC est due en grande partie à la chute du poids de 1000 grains, PMG (183 sur CT SEC contre 272 gr sur CT ETM et aussi 187 sur SCV SEC contre 257 gr sur SCV ETM).

4.2.3.5. Les profils d'humidité

A titre de comparaison avec les campagnes précédentes, l'évolution du stock d'eau peut être analysée sur deux couches : 0 à 50 cm et 50 à 100 cm pour les deux traitements en aspersion (figure 35 et 36). CT et SCV, affichent globalement la même évolution, à savoir une forte diminution de l'humidité dans l'horizon 0-50 cm. Mais l'évolution est moins rapide pour SCV. A partir de juillet le stock en eau de cette couche est faible et la couche 50-100cm, dont la teneur en eau avait commencé à décroître à partir de mi-juin, est fortement sollicitée dans le traitement CT. C'est moins le cas pour le traitement SCV, dont le développement racinaire sera analysé par la suite. Il est habituellement moins important, d'après le constat déjà été établi les années précédentes pour une culture de blé dur. L'effet du mulch qui a limité l'évaporation du sol au début du cycle, du fait des résidus de récolte et de l'absence de travail du sol conservent un stock d'eau plus élevé au début de la floraison, mi-juillet.

Finalement en ce qui concerne les prélèvements en eau du maïs entre fin mai et fin août, ce sont 100 mm qui sont déstockés sur le traitement CT contre 80 mm dans pour SCV sur 0-50 cm de profondeur. La couche 50-100 cm fournit 90 mm pour CT et 40 mm pour SCV. Les irrigations de mi-juillet n'ont permis qu'une recharge limitée du réservoir de 0-50 cm.

Les profils hydriques (figure 30 et 31) montrent clairement la différence entre les dynamiques des prélèvements des deux traitements. La vitesse de dessèchement est moins importante sur SCV par rapport à CT sur l'ensemble du profil et l'effet d'une quantité importante de mulch à la surface du sol est responsable du maintien d'une teneur en eau plus forte dans la première couche. Pour ce qui concerne le prélèvement sur tout le profil, la présence de mauvaises herbes en quantité plus importante sur SCV que sur CT conduit de plus à penser qu'une partie de l'eau a été consommée par ces adventices et non par la culture. Ainsi il apparaît clairement que la culture consomme globalement moins d'eau sur SCV aussi bien dans les couches de surface que dans les couches profondes. Tout se passe donc comme si les potentialités d'extractions étaient réduites par rapport à celles de CT. Selon la méthode du bilan hydrique, en faisant référence au concept du coefficient cultural K_c , on est donc amené à envisager une minoration des potentialités d'extraction en réduisant le coefficient cultural maximal. Ce taux de réduction pourra être estimé à partir du rapport entre $ETR(SCV)$ et $ETR(CT)$.

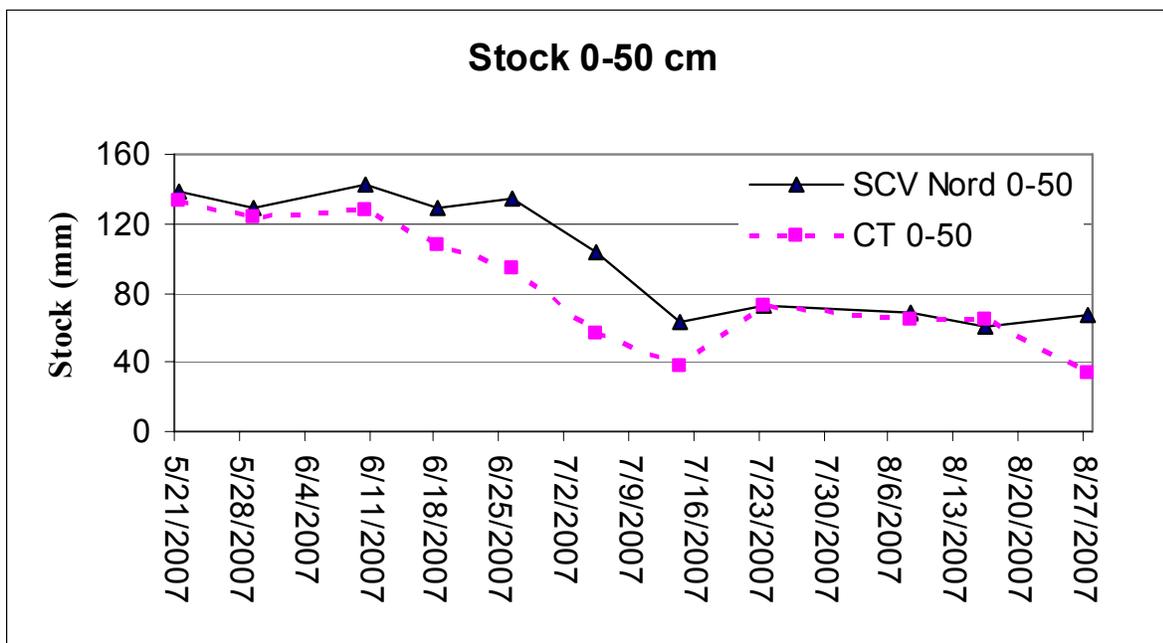


Figure 30 : L'évolution de stock d'eau sur 0-50 cm

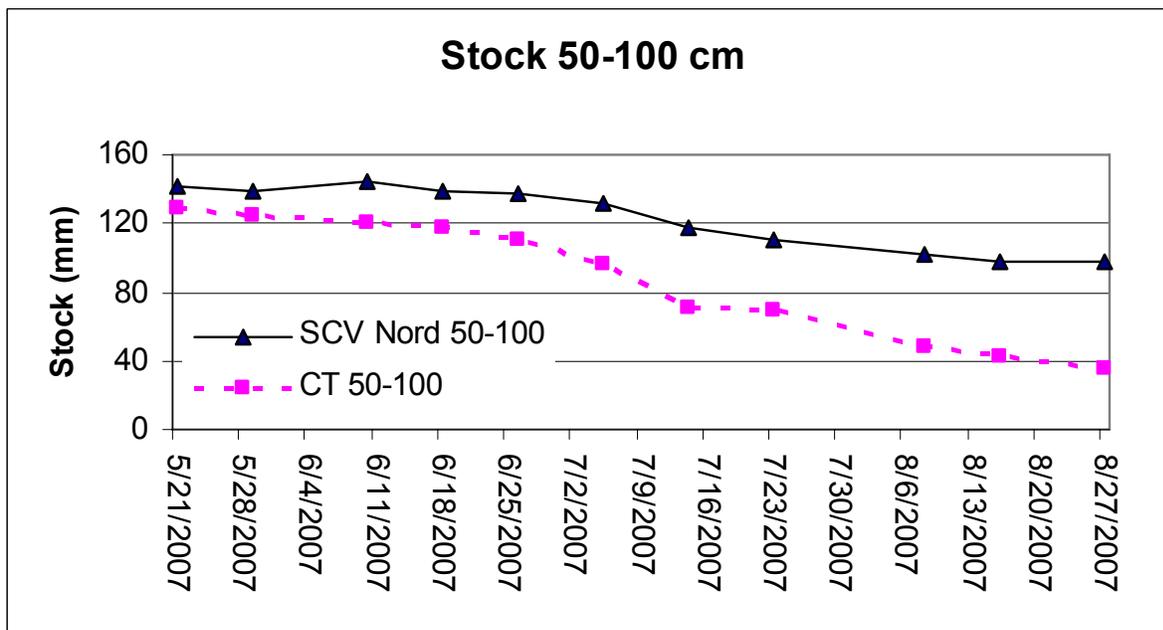


Figure 31 : L'évolution de stock d'eau sur 50-100 cm

Les variations d'humidité très faibles au-delà de 1,2 m et même 0,9 m pour SCV seront à rapprocher des profils racinaires (figure 31).

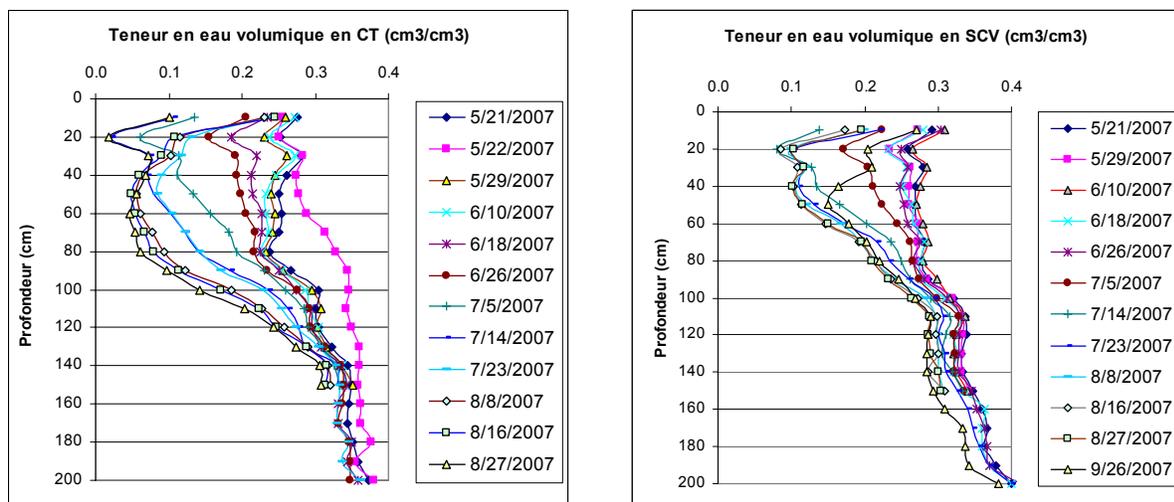


Figure 32 : Comparaison des profils hydriques au cours de la campagne obtenus par mesures sonde à neutron sur CT et SCV.

4.2.3.6. Analyse des LAI

L'indice foliaire a fait l'objet d'un suivi avec un LAImètre 2000 Li-Cor. Cet appareil en panne en début de campagne a été ré-étalonné par le constructeur, ce qui a permis par comparaison de valider les mesures effectuées avec un appareil de remplacement. En accord avec le fort peuplement et la quantité de matière sèche produite, les valeurs mesurées sont élevées (figure 33), puisqu'elles dépassent 4.5. La chute de la valeur observée en juillet est en accord avec les stress constatés sur CT.

Les nombreuses valeurs de LAI qui nous seront utiles pour le calage du modèle Pilote. Au début du cycle on peut noter que la croissance foliaire a été presque identique sur les deux sites. Ceci s'explique par le fait que les traitements n'étaient pas différenciés, en particulier en raison des fortes pluies de mai et début juin et ce résultat est en accord avec les mesures de MST. Par contre à partir de mi juin il y a un décalage entre SCV et CT. Ceci peut s'expliquer par le fait que le deuxième apport d'azote a été tardif sur SCV et le stock initial faible, et l'effet du mulch pourraient avoir entraîné un faible stress azoté

La valeur maximale du LAI se situe vers $4.8 \text{ m}^2/\text{m}^2$ pour CT et $4.0 \text{ m}^2/\text{m}^2$ pour SCV. Il faut noter que le LAI sur CT chute ensuite rapidement pour se stabiliser vers $4.2 \text{ m}^2/\text{m}^2$. La réduction des apports d'eau au début juillet due en partie à des problèmes de matériel d'irrigation peut expliquer cette évolution.

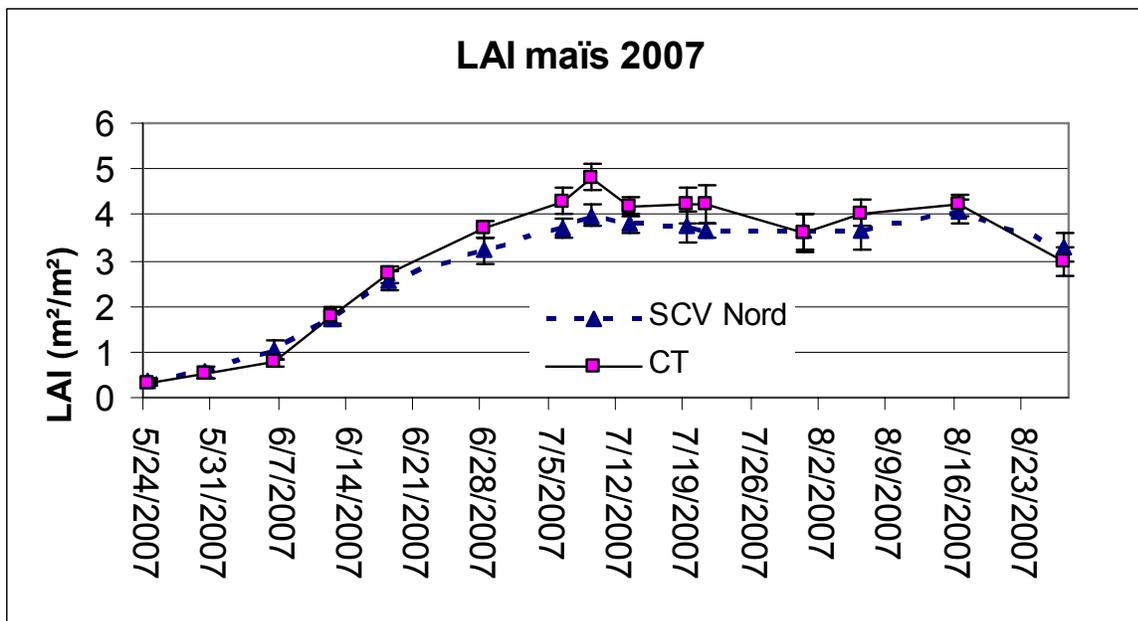


Figure 33 : L'évolution de surface foliaire (LAI) au cours de la campagne 2007

4.2.3.7. Profil racinaire

La figure 34, qui présente l'enracinement du maïs 2007, montre que l'enracinement maximum est proche de 1,25 m sur les deux traitements. Les enraccinements maximum ont pu être confirmés sur différents points des fosses qui ont été réalisées. Ils sont de 110 à 120 cm, voir exceptionnellement 125 à 130 cm sur SCV.

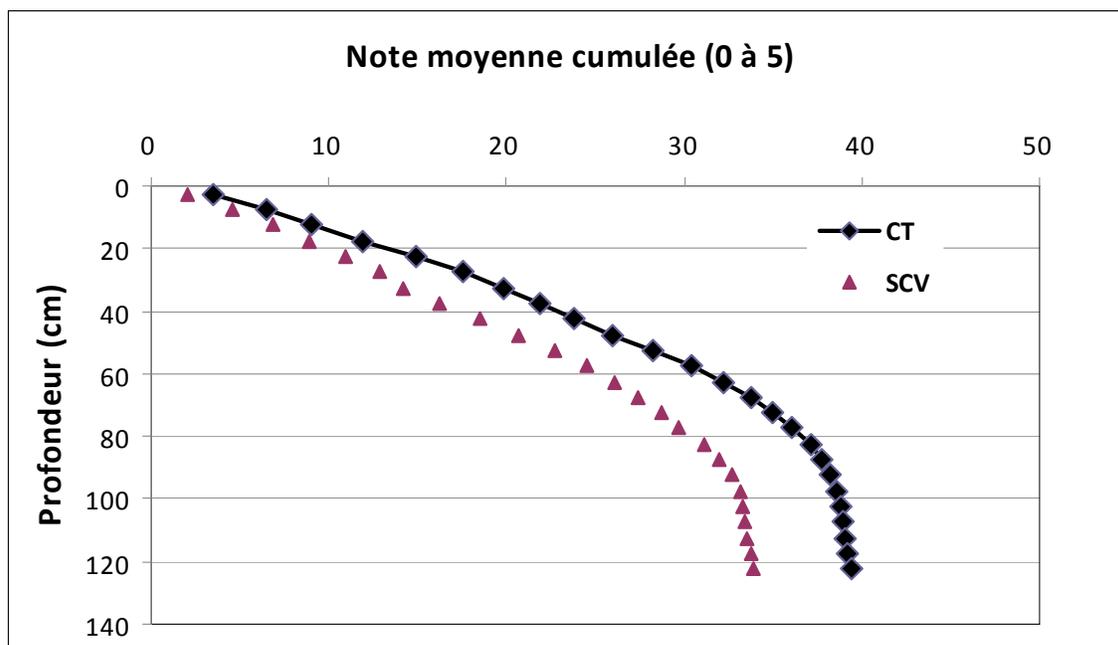


Figure 34 : Comparaison des profils d'enracinement sur les différents traitements en 2007 à la récolte du maïs

Un peuplement plus faible (9 pieds par rapport à 11 plantes par m²) sur SCV peut une nouvelle fois expliquer la colonisation racinaire un peu plus réduite pour l'ensemble du profil.

On note dans les deux cas une forte décroissance de l'enracinement au-delà de 80 cm et même dès 60 cm pour SCV. Comme cela avait été indiqué plus haut, cette répartition racinaire est un élément explicatif des prélèvements hydriques limités dans les couches profondes notamment sur SCV (Figure 31 et 32). Bien que l'intensité de l'activité racinaire ne doive pas être confondue avec la densité racinaire, il apparaît pour cette campagne, comme pour les précédentes, que l'on peut rapprocher une moins bonne utilisation des réserves hydriques du sol d'une réduction du nombre de racines observées sur SCV dès que l'on dépasse les couches de surface.

Il apparaît donc que l'exploitation du sol par les racines est en général moins bonne sur SCV. Plusieurs causes peuvent être invoquées pour cela. Tout d'abord des raisons mécaniques : la résistance à la pénétration, qui peut être évaluée par pénétrométrie ou indirectement à partir de la densité apparente du sol ; seules des mesures ponctuelles ont été effectuées (Khaledian et al., 2006), faute de temps, mais ce facteur n'apparaît pas le seul en cause puisque les différences observées sur l'enracinement ne sont pas constantes au cours des trois campagnes expérimentales. Les conditions de nutrition minérale, en particulier de la nutrition azotée, sont probablement aussi à prendre en compte. Des informations complémentaires sur ce point sont apportées dans le paragraphe sur l'analyse des bilans d'azote.

L'analyse du fonctionnement d'une culture nécessite de prendre en compte simultanément de nombreux facteurs ; le contrôle des conditions expérimentales au champ s'avère difficile, il n'a pas toujours pu être effectué de façon aussi rigoureuse que prévu et. Rend les interprétations plus délicates.

4.2.3.8. Conclusion pour la campagne 2007

La campagne d'expérimentation sur maïs a apporté des informations clés sur les potentialités du SCV dans le cas d'une culture irriguée d'été comme le maïs. Elle a montré qu'après 6 années sans labour, il est possible d'obtenir une production équivalente à celle d'une culture conduite avec un itinéraire conventionnel avec labour (CT), même si des aspects particuliers restent à améliorer, en particulier le contrôle des adventices.

Ce résultat est obtenu pour une irrigation réalisée par aspersion et en goutte à goutte, avec des gaines placées en surface. Le traitement SCV conserve une plus grande quantité d'eau dans le sol que CT lorsque les apports par irrigation sont les mêmes dans les deux traitements, même en conduite restrictive. On peut donc en conclure que sous SCV, les réserves en eau du sol sont moins bien utilisées, et l'observation des profils racinaires montre en effet une colonisation du sol par les racines qui est moins importante.

4.3. Evapotranspiration réelle calculée pour les trois campagnes

Le rapprochement de l'évolution au cours du temps du plan de flux nul, (objet d'un suivi systématique) de l'enracinement maximum valide en quelque sorte l'utilisation de la méthode du plan de flux nul pour le calcul du bilan hydrique sous culture irriguée en milieu méditerranéen. Cette méthode permet à une estimation de l'ETR sur le cycle de culture (Ruelle, 1995 ; Vauclin et al. , 1995).

L'évapotranspiration (ETR) entre deux dates successives de mesures a été déterminée à l'aide du bilan hydrique calculé jusqu'à la profondeur limitée par le plan de flux nul (PFN) à l'aide de l'équation (30) puisque d'après la loi de Darcy, le flux est nul à la cote correspondante. La variation de stock est obtenue à partir des mesures d'humidité effectuées à la sonde à neutron. Il faut noter que les valeurs des apports d'eau pris en compte pour l'irrigation sont ceux mesurés directement sur le site de mesures.

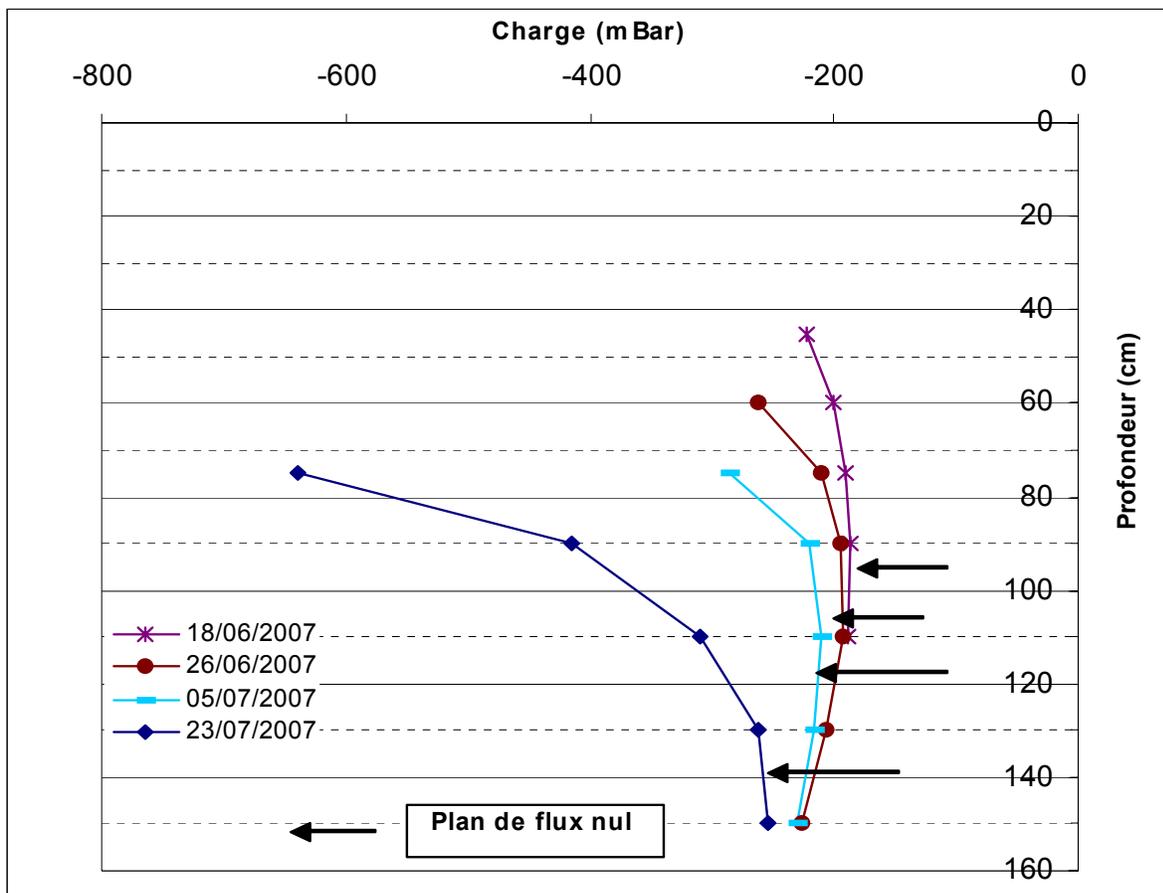


Figure 35 : Plan de flux nul à partir des mesures de tensiomètre pour CT

$$ETR = I + P - \Delta S$$

Équation 8

Avec :

- ETR évapotranspiration réelle [mm]
- P pluie [mm]
- I irrigation [mm]
- ΔS variation du stock d'eau dans le sol [mm]

Il convient de signaler que les gradients de charges très faibles, observés sur une partie du profil, ont rendu très difficile la détermination du PFN à certaines périodes. De plus le dysfonctionnement momentané de certains tensiomètres n'a pas permis de tracer des courbes complètes. La figure 35, montre à titre d'illustration l'évolution du PFN pour quelques dates pour le traitement CT sous maïs en 2007.

Le tableau 14, présente un récapitulatif de l'évapotranspiration réelle calculée selon la méthode du PFN. Afin de disposer des mesures sur l'ensemble du cycle, lorsque les mesures étaient incomplètes pour les premiers jours de la campagne et aussi en fin de la campagne, les valeurs de l'ETR ont été estimées à partir de $K_c * ETP$, la culture étant bien alimentée en eau. La valeur retenue est $K_c = 0.4$ pour le traitement conventionnel et 0.35 pour les traitements SCV (cette dernière valeur est évidemment à confirmer, mais elle n'induit qu'une différence de quelques mm pour la période). Ces valeurs de K_c correspondent à des valeurs observées dans les dispositifs expérimentaux lors de campagnes antérieures pour CT.

Pour blé dur 2004/2005 et 2005/2006, la valeur de l'ETR sur l'ensemble de la campagne (436 et 419 mm, respectivement) est à rapprocher des totaux communément admis par les organismes de développement pour le sud de la France, avec d'autres variétés et techniques culturales. Ainsi la Compagnie d'aménagement du Bas-Rhône Languedoc indique une consommation de 455 mm pour le blé dur (cv Ardente) en 190 jours avec un objectif de rendement de 6.5 t/ha pour une ETP cumulée de 460 mm (BRL, 1992 ; Ruelle, 1995).

Tableau 14 : l'ETR calculé et l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE)

Culture/année	Traitement	Pluie (mm)	Irrigation (mm)	ETR (mm)	WUE* (Kg.m ⁻³)
Blé dur 2004-2005	CT	229	88	436	1.35 a
	SCV	224	36	318	0.82 b
Blé dur 2005-2006	CT	71	92	419	1.93 a
	SCV	71	90	359	0.89 b
Maïs / 2007	CT	203	198	580	1.93 a
	SCV	203	182	504	2.16 a

* kg de RDT par 1 m³ de l'eau apportée

BRL (1992) indique une consommation de 680 mm pour le maïs, pour la variété Volga, avec un objectif de 120 q/ha. Cette consommation paraît élevée par rapport aux valeurs observées sur Lavalette, Nemeth (2001) a calculé une ETR de 515 mm pour un maïs avec une durée de cycle de 4 mois (qui est inférieur de 10 jours environ à celle de la variété cultivée en 2007).

La différence entre l'irrigation rend difficile la comparaison directe entre SCV et CT, dans plusieurs cas, comme nous l'avons indiqué. On peut constater que sur SCV, l'ETR est toujours plus faible, de l'ordre de 10 % en moyenne, les écarts significatifs de doses entre CT et SCV

n'expliquant pas les écarts d'ETR. La réponse attendue concernant le taux de réduction du K_{cmax} évoqué précédemment pourrait donc être de 10 % concernant les cultures d'été. La justification physique à cette réduction peut être aussi recherchée au niveau des phénomènes bioclimatiques. La présence d'un micro climat entretenu par le mulch a été évoquée à plusieurs reprises dans la littérature (Scopel, 1994). Ce micro climat aurait pour effet de réduire localement le pouvoir évaporant de l'atmosphère modifiant ainsi les phénomènes d'advection. Concernant les cultures d'hiver, les conditions thermiques sont moins favorables à l'entretien de ce micro climat. En outre, l'écart de profondeur d'enracinement et de colonisation racinaire entre les deux systèmes a été considéré comme étant aussi responsable de l'écart de consommation hydrique. La dernière colonne fait référence l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE). Nous avons retenu, en accord avec Howell (2001) :

$$WUE = RDT / ETR$$

Équation 9

avec RDT, rendement en grain.

Nous invitons le lecteur à se référer à l'annexe B où les différentes définitions de cette grandeur dans la littérature sont présentées.

Malgré des apports d'eau différents, on peut comparer les efficacités selon Howell et al., (2001) des traitements SCV et CT pour identifier des tendances dans l'évolution de WUE. Le SCV tend à réduire l'évaporation du sol du fait de la présence des résidus à la surface du sol et K_c , selon le fonctionnement même de la culture. Il en résulte une diminution de l'ETR. Par contre le rendement demeure encore insuffisant pour avoir une WUE significativement supérieure au CT.

4.4. Le bilan d'azote sur blé dur et maïs

La suppression du travail du sol et l'optimisation de la fumure azotée sont des stratégies importantes pour les sols, l'économie d'eau et la durabilité des systèmes agricoles méditerranéens. Ces pratiques induisent des modifications de la disponibilité en eau mais aussi en azote, qu'il convient de ne pas ignorer. Le rendement des cultures et donc en fin de compte l'efficacité d'utilisation de l'eau peuvent s'en trouver améliorée ou perturbée.

De nombreuses études ont été menées montrant les avantages et les inconvénients du travail du sol en relation avec le devenir de l'azote. Le travail du sol affecte le transport et l'évolution de N en particulier par des changements dans la structure du sol. Ils peuvent se traduire par l'aération, la création de macro-pores, le déplacement des résidus, la minéralisation de la matière organique, le lessivage, une réorganisation de l'azote disponible pour la culture (Golabi et al., 1995; Karlen et al., 1998). La décomposition et la minéralisation des résidus de cultures sont accélérées par le travail du sol (Wienhold et al., 1999) mais la dynamique minéralisation-immobilisation de N est affectée par la présence et le placement des résidus de culture (Creus et al., 1998 cités par Angas et al., 2006). En outre, le taux de minéralisation de la partie stable de la matière organique du sol augmente quand on pratique le labour, car les agrégats du sol sont détruits et l'exposition du sol aux micro-organismes s'accroît (Gregorich et al., 1998).

En SCV, le profil des éléments nutritifs du sol sera modifié (Unger, 1991) et ces changements peuvent être observés dès les premières années (McCarty et al., 1998). SCV induit la stratification en carbone organique (Franzluebbbers et al., 1999). En SCV, les pertes par volatilisation de certaines sources de N peuvent être élevées en raison d'une mauvaise incorporation de l'engrais. Par ailleurs, en SCV la présence de biopores, de vers de terre peut aussi accroître l'infiltration et les risques de lessivage (Zachmann et al., 1987).

La transition de la technique avec labour au SCV nécessite une modification quant à la gestion de l'azote parce qu'il y aura des effets sur sa dynamique dans le système sol-plante et donc sur l'efficacité d'utilisation de l'engrais et par voie de conséquence sur la production. Pendant les premières années du changement de système, les agriculteurs ont tendance à augmenter les apports d'azote pour garantir les rendements (Wienhold et al., 1999). Toutefois, dans certains cas, cette augmentation n'est pas nécessaire, parce que la distribution de l'azote minéral dans la partie supérieure du sol a été modifiée (Franzluebbbers et al., 1995), et la disponibilité de N est améliorée en quelques années (Rice et al., 1986). Franzluebbbers et al. (1995) et Riley (1998) conviennent qu'en SCV, les besoins en N sont plus élevés, mais selon ces auteurs, les différences disparaissent après 10 ans de pratique, ce qui est tout de même assez long.

La disponibilité de N pour la plante dépend des sources du nutriment et de son placement (Malhi et al., 1996). Elle peut varier en fonction du travail du sol. Lorsque l'urée est utilisée, les pertes peuvent être plus importantes en SCV en raison de l'uréease activité dans les résidus de culture (Fenn et Hossner, 1985).

Pour établir le bilan complet d'azote sur la campagne, il convient de disposer de la détermination de la teneur et du stock d'azote dans les différents compartiments du sol, de la plante ainsi que du paillis dans le cas du SCV.

Pour le blé dur le bilan est fait pour la période de forts besoins de la culture, c'est-à-dire entre la sortie d'hiver, avant le premier apport d'azote et la récolte. Compte tenu de l'enracinement du blé, le bilan est fait en prenant en compte une couche de sol de 1,5 m et 1,2 m pour 2004/2005 et 2005/2006, respectivement. Pour les cultures d'été, le bilan est fait entre le semis et la récolte.

Dans notre étude, nous utilisons la méthode simple qui est présentée par Angas et al. (2006) pour faire un bilan d'azote. La minéralisation de N (N_{min}) est calculée suivant l'équation (32) proposée par Sexton et al., (1996) pour le traitement sans azote (0N):

$$N_{min} = N_{final} - N_{ini} + N_{plante} \quad \text{Équation 10}$$

Où N_{ini} et N_{final} sont l'azote minéral du sol en début et en fin de la période d'études. N_{plante} est l'azote absorbé par la plante et présent dans la plante à la récolte.

Cette méthode suppose qu'il n'y a pas de perte d'azote dans ce traitement. On a d'autre part considéré que la minéralisation est la même pour tous les traitements qui ont le même itinéraire technique en ce qui concerne le travail du sol cependant des questions se posent, comme nous allons le voir.

Le lessivage et la volatilisation de N et aussi N de l'eau de pluie et l'irrigation n'ont été pas pris en considération dans le bilan (Nemeth, 2001).

Les pertes d'azote dans les parcelles fertilisées (P) ont été déduites du bilan entre N_{min} , N_{ini} , N_{final} , N_{plante} telle que défini ci-dessus et N_{fert} (N engrais appliqué) :

$$P = N_{final} - N_{ini} + N_{plante} - N_{fert} - N_{min} \quad \text{Équation 11}$$

Une valeur négative de P est interprétée comme une perte en N du système sol-plante. Les teneurs en azote dans les résidus en début de la campagne ($N_{m.ini}$) et à la récolte ($N_{m.final}$) sont présentées dans les tableaux (15-17).

Le taux de récupération de l'azote appliqué (RAN) a été calculée par la méthode décrite par Echeverri'a et Videla (1998) :

$$RAN = [(N_{plante} \text{ en parcelle fertilisée} - N_{plante} \text{ en 0N}) / (N_{fert})] \times 100 \quad \text{Équation 12}$$

L'efficacité d'utilisation de N (NUE) est définie ici comme la quantité de rendement en grains par unité d'azote appliquée (kg de céréales produits par 1 kg de N appliquée).

Le tableau (15) rassemble l'ensemble des résultats de la première campagne, obtenus après analyse des échantillons récoltés dans les différents traitements qui ont permis d'estimer la minéralisation. A partir du traitement 0N, on peut calculer une minéralisation nette moyenne sur le cycle cultural. On constate que la vitesse de minéralisation est voisine de 0.75 kg N/ha /jour ce qui est cohérent par rapport aux valeurs obtenues lors des campagnes précédentes (Nemeth, 2001) et aux valeurs données par la littérature.

Tableau 15 : Le bilan d'azote pour la campagne blé dur 2004/2005

	Nini	Nfinal	Nfert	Nmin	Nplante	Nm.ini*	Nm.final*	Perte	RAN	NUE
	Kg. ha ⁻¹								%	Kg/kgN
CT	73	77	151	84	143	-	-	88	52	37
CT 0N	47	67	0	84	64	-	-	0	-	-
SCV	111	200	115	91	102	30	30	15	10	23
SCV 0N	233	234	0	91	90	35	23	0	-	-

*Nm est la quantité d'azote contenue dans le mulch, issu des résidus de récolte

En ce qui concerne l'absorption par le blé, une différence a été observée entre SCV et CT ; il résulte de la différence de rendement et du peuplement inférieur en SCV. La perte d'azote est très faible en SCV par rapport à CT. On remarque que d'après le calcul de NUE, SCV a produit 23 kg de blé dur en consommant 1 kg N tandis que CT produit 37 kg blé dur pour 1 kg N. La campagne a commencé par une teneur en N très forte sur SCV et s'est terminée avec la même teneur sur SCV 0N et avec davantage d'azote sur SCV. On ne constate pas de défaut de bilan important en SCV, mais cependant l'azote n'est pas bien valorisé (RAN=10 % contre 52 % en CT), ce qui accroît le risque environnemental. Pour pallier à cela il serait nécessaire de mettre une couverture végétale (CIPAN) pour prélever et stocker cet azote en excès, si une culture de printemps était envisagée, pour éviter un sol nu en hiver.

Le printemps sec a limité la minéralisation, après un hiver relativement froid. Pour SCV, avec apport d'azote, l'augmentation du stock du sol s'explique par le fait que l'azote apporté par l'engrais a en partie été immobilisé par le pool de matière organique. Dans ces conditions, le calcul fait apparaître des pertes d'azote nettement plus faibles que dans le traitement en CT. Il est probable que les résidus de récolte ont piégé une part de l'engrais apporté. En effet, on a pu constater qu'une partie s'est introduite sous le paillis et de ce fait n'a pas eu moins tendance à se volatiliser comme dans le traitement conventionnel, après l'épandage. Pour SCV 0N le stock important en sortie d'hiver provient du reliquat de la culture précédent, le sorgho, sur cet emplacement le faible développement de la culture n'avait pas permis une absorption de l'engrais azoté apporté. On constate que la culture de blé a utilisé exactement la quantité d'azote produite par minéralisation.

Tableau 16 : Le bilan d'azote pour la campagne blé dur 2005/2006

	Nini	Nfinal	Nfert	Nmin	Nplante	Nm.ini	Nm.final	Perte	RAN	NUE
	Kg. ha ⁻¹								%	
CT	57	67	160	93	144	-	-	99	37	32
CT 0N	38	46	0	93	85	-	-	0	-	-
SCV	94	119	140	62	141	21	8	36	60	18
SCV 0N	84	89	0	62	57	21	6	0	-	-

Pour la campagne 2005/2006, on constate tout d'abord une forte chute du stock d'azote en sortie d'hiver par rapport aux valeurs présentes à la récolte lors de la campagne précédentes (Tableau

16). Ce lessivage de l'azote est du à une inondation qui a submergé sous une lame d'eau plus ou moins importante en fonction de la topographie les différentes parties de l'essai. Pour ce qui est de l'azote absorbé par la plante en SCV, elle est proche de celui de CT qui disposait d'un peuplement supérieur. Pour SCV la minéralisation calculée est faible et nettement inférieure à celle obtenue dans le traitement CT, contrairement à ce que l'on pouvait attendre. Ceci s'explique par le fait que lors de l'inondation les résidus du traitement SCV ont disparu. En conséquence, il ne restait peu de matière organique fraîche pour la minéralisation, tandis qu'en CT les résidus étaient déjà incorporés au sol. Par rapport à la campagne 2004/2005, RAN a augmenté en SCV et est aussi supérieur à celui de CT. Par contre la NUE est encore faible en SCV. En 2005/2006, le déficit de bilan (perte) en SCV reste inférieur à CT, ce qui est intéressant au niveau environnemental.

Pour le traitement CT, si on retient la même minéralisation que sur le traitement CT 0N, on trouve une perte d'azote de près de 99 unités. Comme il est certain qu'il n'y a eu aucun drainage entre mars et la récolte, ce résultat ne peut être validé. Deux hypothèses peuvent être présentées pour remettre en cause le calcul effectué :

- La minéralisation est surestimée. Le peuplement sur le traitement fertilisé est supérieur de 0N, donc il est certain que plus d'eau a été consommée et l'horizon de surface était sans doute plus sec que sur le traitement CT 0N. La minéralisation serait de ce fait un peu inférieure.
- Les apports d'engrais azotés ont été mal estimés ou il y a eu des pertes par volatilisation (il s'agissait d'ammonitrate). Pour le premier point, les apports ont été réalisés selon les conditions standards en réalisant un contrôle du réglage d'un épandeur centrifuge et en contrôlant la quantité totale apportée. Cette façon de procéder ne peut expliquer un écart de plus de 100 unités d'azote ! Pour le deuxième point il faut remarquer qu'après le premier apport il n'y a eu que deux pluies de 6 mm le 20 mars et 7 mm le 24 mars et pour le second apport, les irrigations n'ont eu lieu que deux semaines plus tard (les pluies annoncées n'ont pas eu lieu !). Il est donc possible que les pertes d'azote par volatilisation aient été importantes.

Cela souligne les difficultés auxquelles on est confronté pour réaliser un bilan azoté.

En 2007, le bilan d'azote d'avère être perturbé par un taux très élevé de résidus produits par la couverture végétale en SCV (environ 8 t.ha⁻¹, totalisant 180 kg N /ha). Avec un taux d'azote initial faible prélevé par la couverture végétale, la minéralisation a diminué en SCV (Tableau 17). Pour des problèmes de matériels, les apports d'azote n'ont pas été appliqués en même temps en CT et en SCV. En plus, il y a eu deux apports d'azote en SCV contre 3 en CT. Le deuxième apport a été trop tardif en SCV et n'a fort probablement pas été valorisé, comme le laisse supposer la teneur en N final très élevée. Cet état de fait augmente le risque de lessivage à la faveur des pluies d'automne. Comme on peut le constater le RAN est trop faible en SCV (4 % contre 70 % en CT). Un kilogramme d'azote N a produit 60 kg grain de maïs en SCV contre 70 kg en CT.

Dans la période où le maïs prélève la majorité des éléments minéraux dont l'azote disponible dans le sol, période qui coïncide sensiblement avec la période des besoins importants en eau,

l'immobilisation temporaire de l'azote par les résidus pailleux peut avoir une grande importance. Des mécanismes difficilement contrôlables comme la mobilisation de l'azote par les bactéries ont des effets notoires. Ces bactéries qui ont une durée de vie limitée en liaison avec le niveau de dégradation du mulch libèrent à leur mort une quantité d'azote importante selon certains auteurs (Birch, 1958 ; Blondel, 1971). Ce phénomène pourrait donc expliquer en partie ce taux d'azote élevé constaté en fin de cycle sur SCV. Il faut enfin remarquer que l'analyse des plantes à la récolte montre que la teneur en azote des grains est presque la même dans CT et SCV par contre la teneur des tiges et des feuilles est nettement inférieure dans SCV (0.674 % contre 0.952 % en CT).

Tableau 17 : Le bilan d'azote pour la campagne maïs 2007

	Nini	Nfinal	Nfert	Nmin	Nplante	Nm.ini	Nm.final	Perte	RAN	NUE
	Kg.ha ⁻¹								%	
CT	137	183	180	110	237	-	-	7	70	70
CT 0N	99	89	27	110	147	-	-	0	-	-
SCV	79	343	181	88	214	182	6	*	4	60
SCV 0N	86	79	27	88	122	174	3	0	-	-

L'analyse des bilans d'azote, montre qu'il est souhaitable de ne pas raisonner de la même manière les apports d'azote en SCV et en CT. Il faut changer le mode de calcul de besoins en N et aussi le mode d'épandage ; par exemple pour le maïs on peut enterrer une partie important de l'azote au moment de semis avec des semoirs possédant les équipements nécessaires. Concernant la réduction des risques environnementaux après la récolte, la mise en place d'une inter-culture à la fois pour fabriquer du mulch et prélever l'azote excédentaire semble de rigueur.

4.5. Conclusion de la partie expérimentale

Les observations obtenues lors des campagnes expérimentales synthétisées ci-dessus nous ont amené à mettre en évidence un certains nombre de comportements spécifiques pour le traitement SCV.

En ce qui concerne le comportement de la culture, il apparaît tout d'abord que la vitesse de croissance racinaire pour les cultures d'hiver est réduite ; du fait de la présence du mulch à la surface du sol, la température du sol est plus basse : le SCV bénéficie peu du réchauffement journalier de l'horizon de surface habituellement observé sous l'action du soleil en système de culture conventionnel avec labour. Il en résulte de fait un enracinement maximum un peu inférieur puisque la croissance racinaire s'arrête pour la majorité des plantes à la floraison, qui correspond aussi au LAI maximum (LAI_{max}).

Pour ce qui est du fonctionnement hydrique de la culture, compte tenu du fait que les couches du sol proches de la surface conservent un niveau élevé de teneur en eau, du fait de la présence du mulch, il paraît nécessaire de modifier le coefficient cultural maximum, K_{cmax} des cultures

d'été. La moindre sollicitations des réserves en eau du sol dans le cas du SCV et donc une consommation en eau inférieure pourrait découler d'une moindre colonisation du sol par les racines en semis direct ; cependant certains travaux (Prassat, 1997) attestent que les racines peuvent activer un processus de compensation. Une autre hypothèse est l'effet possible de la compaction du sol qui pourrait non seulement influencer sur le développement en profondeur des racines, mais aussi sur la masse racinaire par unité de volume du sol et donc limiterait les capacités d'absorption d'eau dans le sol.

Au niveau des bilans hydriques, les apports qui ont souvent été différents sur CT et SCV rendent les comparaisons directes difficiles. Par contre les calculs de l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE), selon la formule proposée par Howell (2001) montre que les valeurs obtenues sur SCV sont au moins équivalentes à celles de CT pour le maïs.

Au niveau du bilan d'azote, la méthode simplifiée mise en œuvre, par prélèvement au semis, ou en sortie d'hiver pour les cultures comme le blé dur et à la récolte avec un témoin sans azote laissent des interrogations en suspens en particulier en ce qui concernent les pertes. Ces défauts de bilan correspondent sans doute à une volatilisation de l'azote après les apports d'engrais et éventuellement au fait que la minéralisation a été évaluée à partir du traitement sans azote. Les résultats montrent néanmoins la nécessité de modifier les apports d'azote pour SCV en privilégiant un apport sous la ligne de semis à la mise en place de la culture.

Malgré les problèmes rencontrés au niveau des équipements de la station expérimentale, aussi bien pour les différents travaux et l'irrigation, puis une année l'inondations, les résultats expérimentaux permettent de disposer d'une base de données utile pour faire une comparaison entre le SCV et CT. Enfin ils confirment les hypothèses émises : pour les cultures d'été : le semis direct sous couvert végétal (SCV) permet d'obtenir des productions non significativement différentes du système traditionnel (CT) avec labour comme l'a montré le maïs en 2007. Le contrôle des adventices reste cependant une difficulté importante pour laquelle les rotations devraient permettre de contrôler des proliférations gênantes. Le cas des cultures d'hiver demande aussi des investigations supplémentaires.

Conclusion Générale

Le travail présenté a contribué à améliorer notre connaissance du système SCV par comparaison à un système conventionnel dans un contexte méditerranéen où ce système est mal connu surtout quant aux cultures irriguées.

Ces recherches ont conduit à mettre en évidence un certain nombre de résultats originaux et de nouvelles voies possibles de recherche en s'appuyant sur l'expérimentation pour le système SCV. L'expérimentation et les mises au point méthodologiques ont été réalisées sur la station expérimentale du Cemagref à Montpellier à partir des suivis d'apports d'eau et d'azote, de l'état hydrique du sol, de l'état phénologique, du développement foliaire (LAI), des bilans de l'eau et d'azote sur des parcelles en SCV et CT.

En ce qui concerne la comparaison des rendements, les résultats montrent que le rendement baisse en SCV pour le blé dur en traitement irrigué ce qui n'est pas le cas pour le traitement en pluvial (SEC) ou sans azote (0N). Par contre les différences de rendement pour le maïs ne sont pas significatives. Les problèmes de levée en 2004/2005 et aussi l'attaque des ravageurs et une alimentation hydrique déficiente pendant la floraison en 2005/2006 peuvent expliquer cette baisse de rendement en SCV pour le cas du blé dur.

L'augmentation de l'efficacité d'utilisation d'eau en agriculture est un moyen de contribuer à la lutte contre la pénurie d'eau. Nous avons montré dans le cadre de ce travail qu'un système SCV est capable d'augmenter l'efficacité d'utilisation d'eau en climat méditerranéen et d'apporter en conséquence une contribution à cette lutte. Pour maïs l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE), selon Howell (2001) n'est pas significativement différente entre SCV et CT, même si elle a la tendance à être plus élevée sur SCV. Les résultats de nos expérimentations confirment ceux issus de la littérature à savoir que le SCV réduit l'évaporation du sol du fait de la présence des résidus à la surface du sol et permet de conserver une plus grande quantité d'eau dans le sol.

Au niveau de l'azote, il se confirme que pour SCV, comme CT, des bilans peuvent être approchés par des méthodes simples, même si des questions restent posées, notamment dans le cas de résidus produits par la culture de couverture où lorsque les apports sont mal maîtrisés. Des échantillons composites (correspondant classiquement de 5 à 7 carottes pour le sol) ont été utilisés, ce qui a permis d'améliorer la précision des mesures et un processus similaire peut être mis en œuvre pour la culture et le mulch à la surface du sol pour SCV. Un traitement de référence sans azote peut fournir des estimations réalistes de la minéralisation locale.

En appliquant cette approche, ainsi en 2005/2006 on montre que, RAN (la récupération de l'azote appliqué) en SCV est supérieur à celui de CT bien que l'efficacité d'utilisation d'azote soit encore faible en SCV. Pour cette campagne, la perte d'azote en SCV est nettement inférieure par rapport à CT, ce qui est intéressant au niveau environnemental. En 2007, un taux très élevé de résidus produits par la couverture végétale en SCV conduit à des conditions particulières, la minéralisation a diminué en SCV, mais le stock d'azote du sol à la récolte est élevé du fait d'un apport trop tardif de fertilisant et de la libération probable d'azote par le couvert en fin de cycle de culture. Cet état de fait augmente le risque de lessivage à la faveur des pluies d'automne et montre l'exigence accrue d'une bonne maîtrise de l'ensemble de l'itinéraire technique pour SCV.

Le système de culture en semis direct sous couvert végétal, SCV apparaît donc comme un système durable pour les cultures d'été en climat méditerranéen et peut en conséquence être

conseillé. Une étude plus approfondie et des recherches complémentaires sont par contre nécessaires pour conclure à propos des cultures d'hiver.

Certains aspects négatifs relatifs au SCV doivent cependant être évoqués. Les résultats obtenus au cours de ce travail tout comme d'autres études montrent que si l'impact environnemental de SCV peut être bénéfique notamment pour la préservation des sols en revanche une vigilance particulière est nécessaire dans la lutte contre les adventices et les ravageurs. Le contrôle des mauvaises herbes est possible par une parfaite maîtrise du système de culture (Labreuche et al., 2007) avec des rotations de cultures adaptées et une très bonne gestion de la couverture à l'origine du mulch. Des progrès demeurent encore nécessaires pour améliorer la lutte contre certains ravageurs des cultures tout en respectant l'environnement. Là encore la conduite efficace du couvert végétal (choix des espèces, peuplement, dates de destruction...) associée à la rotation raisonnée des cultures apporte des solutions qui restent à conforter.

L'impact de SCV sur la gestion de l'azote (choix des doses, fractionnement, mode d'apport ou de placement) est une thématique de recherche qui se doit d'être approfondies au même titre que l'activité biologique participant au cycle de l'azote.

Références

- Abawi, G. S., Thurston, H. D. 1994. Effects of organic mulches, soil amendments, and cover crops on soilborne pathogens and their root diseases. A review. pp. 89-99. In Thurston, H. D. et al. (eds). Tapado-slash/mulch: How farmers use it and what researchers know about it. CATIE/CIIFAD, Cornell University, Ithaca, NY. 302 pp.
- ACTA. 2001. Résultats obtenus, Présentation à la chambre d'agriculture d'Indre et Loire.
- Adams, J.E., Arkin, G.F., Ritchie, J.T. 1976. Influence of row spacing and straw mulch on first stage drying. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 436-442.
- Adeoya, K. B. 1984. Influence of grass mulch on soil temperature, soil moisture and yield of maize and millet in a savanna zone soil Samaru *J Agnc Res* 2 (1-2) 87-97.
- Agu, S. 2000, Agriculture et effet de serre : adaptation des pratiques agricoles - alternatives énergétiques, rapport de DA environnement, ESAA.
- Aina, P.O., Lal, R., Roose, E.J. 1991. Tillage methods and soil and water conservation in West Africa. *Soil and Tillage Research* 20:165-186.
- Akobundu, I.O. 1987. *Weed Science in the Tropics: Principles and Practices*. Wiley, Chichester, England, 522p.
- Angas, P., Lampurlanés, J., Cantero-Martinez, C. 2006. Tillage and N fertilization: Effects on N dynamics and barley yield under semiarid mediterranean conditions. *Soil & Till. Res.* 87: 59-71.
- Aston, A., Fischer, R. 1986. The effect of conventional cultivation, direct drilling and crop residues on soil temperatures during the early growth of wheat at Murrumbateman, New South Wales. *Australian Journal of Soil Research*, 24 :49-60.
- Aulakh, M.S., Rennie, D.A. 1984. Transformation of autumn-applied nitrogen-15-labeled fertilizers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, 184-1189.
- Azooz, R. H., Lowery, B. Daniel, T.C., Arshad, M.A. 1997. Impact of tillage and residue management on soil heat flux. *Agricultural and Forest Meteorology* 84:207-222.
- Balabane, M., Bureau, F., Decaens, T., Akpa, M., Hedde, M., Laval, K., Puget, P., Pawlak, B., Barray, S., Cluzeau, D., Labreuche, J., Bodet, J.M., Le Bissonnais, Y., Saulas, P., Bertrand, M., Guichard, L., Picard, D., Houot, S., Arrouays, D., Brygoo, Y., Chenu, C., 2005. Restauration de fonctions et propriétés des sols de grande culture intensive: effets de systèmes de culture alternatifs sur les matières organiques et la structure des sols limoneux, et approche du rôle fonctionnel de la diversité biologique des sols. GESSOL/projet Dmostra. Rapport final, 119 pp.

Baldy, C. 1993. Effects de climat sur la croissance et le stress hydrique des blés en Méditerranée occidentale, in Tolérance à la sécheresse des cereals en zone Méditerranéenne. Diversité génétique et amélioration variétale, Montpellier, 15-17 Décembre 1992. Les colloques de l'INRA, n° 64, INRA, Paris, France, 83-99.

Baligar, V.C., Bennett, O.L. 1986. NPK-fertilizer efficiency. A situation analysis for the tropics. Fert. Res. 10, 147–164.

Barruiso, 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: Simplification du travail du sol, Paris, 16 mai 1991. Ed. INRA, Paris, les colloques n° 65. pp 105-124.

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 Till. Res. 68, 71–82.

Bayer, C. L. Martin-Neto, J., Mielniczuk, Ceretta, C.A. 2000. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. Soil and Tillage Research 53:95-104.

Bellido, R.J.L., Bellido, L.L. 2001. Efficiency of nitrogen in wheat under Mediterranean conditions: effect of tillage, crop rotation and N fertilization. Field Crops Res. 71, 31–46.

Bhagat, R.M., Verma, T.S. 1991. Impact of rice straw management on soil physical properties wheat yield. Soil Sci. 152, 108–115.

Birch, H. 1958. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. Plan and Soil: 10: 1-31.

Blondel, D. 1971. Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol sableux du Sénégal. Agronomie Tropicale, 26 :1303–1333.

Blondel, R., Heddadj, D. 2004. Epannage d'engrais de ferme et techniques sans labour. Colloque CORPEN sur les techniques culturales sans labour (TCSL). INRA, Résumé des communications, 21 pp.

Bond, J., Willis, W. 1969. Soil water evaporation : surface residue rate and placement effects. Soil Science Society of America Journal, 33 :445–448.

Bond, J., Willis, W. 1970. Soil water evaporation : first stage drying as influenced by surface residue and evaporation potential. Soil Science Society of America Journal, 34 :924–928.

Bonny, S. 1993. Is agriculture using more and more energy? A French case study. Agricultural Systems, 43(1), 51-66.

Braud, I. 1998a. Numerical discretisation of the version of SiSPAT model taking into account a mulch horizon. LTHE (CNRS UMR 5564, INPG, UJF), Grenoble.

Bristow, K.L., Campbell, G.S., Papendick, R.I., Elliott, L.F. 1986. Simulation of heat and moisture transfer through a surface residue--soil system. *Agricultural and Forest Meteorology* 36:193-214.

Bristow, K.L. 1988. The role of mulch and its architecture in modifying soil temperature. *Aust. J. Soil Res.* 26, 269–280.

BRL. 1992. Mémo irrigation. Compagnie d'Aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc Nimes, 49 p.

Brun, L. J., Enz, J. W., Larsen, J. K., Fanning, C. 1986 Springtime evaporation from bare and stubblecovered soil *J Soil Water Conserv* 41 (2) 120-122.

Buchholz, D. D., Hanson, R. G. 1982. Soil fertility considerations in conservation tillage systems. *Conservation Tillage Seminars Proceedings*. College of Agriculture, University of Missouri-Columbia, pp. 99-103.

Buckles, D., Triomphe, B., Sain, G. 1998. Cover Crops in Hillside Agriculture: Farmer Innovation with Mucuna. IDRC/CIMMYT, Ottawa, Canada.

Buckles, D., Triomphe, B. 1999. Adoption of Mucuna in the farming systems of Northern Honduras. *Agrofor. Syst.* 47 : 67-91.

Bumb, B.L. 1995. Global fertilizer prospective 1980–2000. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL, 69 pp.

Bussière, F. 1991. Transferts thermiques et hydriques dans le continuum sol-mulch végétal-atmosphère: modélisation et première validation expérimentale. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon et INRA, Paris. 60 p.

Bussière, F., Cellier, P. 1994. Modification of the soil temperature and water content regimes by a crop residue mulch: experiment and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology* 68:1-28.

Campbell, G.S., McArthur, A.J. Monteith, J.L. 1980. Windspeed dependence of heat and mass transfer through coats and clothing. *Boundary-Layer Meteorol.*, 18: 485-493.

Campbell, C. A. et R. P. Zentner. 1993. Soil Organic Matter as Influenced by Crop Rotations and Fertilization. *Soil Science Society of America Journal* 57: 1034-1040.

Campbell Scientific. 1997. CS615 Water content reflectometer. Campbell Scientific. 20 pp.

Carsky, J.R., Hayashi, Y., Tian, G. 1998. Benefits of Mulching in the Sub-humid Savanna Zone: Research Needs and Technology Targetting. *Resource and Crop Management Research Monograph*, IITA, Ibadan, Nigeria.

Casey, F. X. M., Logsdon, S. D., Horton, R., Jaynes, D. B. 1997. Immobile Water Content and Mass Exchange Coefficient of a Field Soil. *Soil Science Society of America Journal* 61: 1030-1036.

CCE. 2002. Vers une stratégie thématique pour la protection des sols, Bruxelles, 41p.

Chabanne, A. 2003. Les systèmes de culture avec couverture végétale pour les hauts de la Reunion. CIRAD/CA – GEC. Synthèse et bilan de l'opération AD101 du PADEF. 103 p.

Cheng-Hua Li, Ma. Cheng-Lin. 1997. Soil cover with organic mulch and its influences on soil physical parameters (III) - Soil temperature regime under organic mulch. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 13(3) : 80-83.

Chevrier, A., Barbier, S. 2002. Performances économiques et environnementales des techniques agricoles de conservation des sols Création d'un référentiel et premiers résultats. Mémoire de fin d'études. Institut National de la Recherche Agronomique de Versailles-Grignon Association pour la Promotion d'une Agriculture Durable. 96 pp.

Cho, Y. S., Choe, Z. R., Ockerby, S. E. 2001. Managing tillage, sowing rate and nitrogen topdressing level to sustain rice yield in a low-input, direct-sown, rice-vetch cropping system. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 41: 61-69.

Chopart, J.-L. 1989. Effects of Tillage on a Corn-Cotton Sequence in Côte d'Ivoire. Dans : *Water Management Systems for Rainfed Agriculture in the Soudano-Sahelian Zone*, p. 325–331, Niamey - Niger.

Choudhary, M. A., Lal, R., Dick, W. A. 1997. Long-term tillage effects on runoff and soil erosion under simulated rainfall for a central Ohio soil. *Soil and Tillage Research* 42:175-184.

Chung, S.O., Horton, R. 1987. Soil heat and water flow with partial surface mulch. *Water Resour. Res.* 23 (12), 2175–2186.

CILF. 1999. Dictionnaire d'Agriculture, CILF, Paris.

Clavier, P. 1998. Les adventices et leur contrôle dans les systèmes de culture de maïs pluvial en semis direct avec paillis de résidus. Etat de Jalisco, Mexique. Mémoire CNEARC-ESAT 2. CNEARC/CIRAD-CA/CIMMYT, janvier 1998, 55 pages + annexes.

Creus, C. J., Studdert, G. A., Echeverri'a, H. E., Sanchez, S. R. 1998. Descomposicio'n de residuos de cosecha de ma'z y dina'mica del nitro'geno en el suelo. *Ciencia del suelo* 16, 51–57. Citer par: Angas, P., Lampurlanés, J., Cantero-Martinez, C. Tillage and N fertilization: Effects on N dynamics and barley yield under semiarid mediterranean conditions. *Soil & Till. Res.* 87: 59-71.

Crovetto, L. C. 1996. Stubble over the soil: the vital role of plant residue in soil management to improve soil quality. *American society of agronomy Inc.* 245p.

Dahiya, R., Malik, R.S., Jhorar, B.S. 2003. Effect of sugarcane trash and enriched sugarcane trash mulches on ratoon cane yield and soil properties. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 51 (4), 504–508.

Dahiya, R., Ingwersen, J., Streck, T. 2007. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling. *Soil and Tillage Research* 96:52-63.

Debaeke, P., Orlando, D. 1994. Simplification du travail du sol et évolution de la flore adventice : conséquences pour le desherbage a l'échelle de la rotation Simplification du travail du sol ; INRA éditions, Paris. p.35-62.

De Raissac, M., Marnotte, P. Alphonse, S. 1998. Interactions entre plantes de couverture, mauvaises herbes et cultures : quelle est l'importance de l'allélopathie ? *Agriculture et Développement*, 17 :40–49.

Derpsch, R. 2001. Conservation tillage, no-tillage and related technologies, Keynote contributions of "First world Congress on Conservation Agriculture; 1-5 octobre 2001", Madrid, ECAF-FAO, pp161-170.

De Tourdennet, S. Saulas, P. 2004. Conception et évaluation de système de cultures sous couvert végétal vivant. Colloque CORPEN sur les techniques culturales sans labour (TCSL). INRA, Résumé des communications, 21 pp.

Diallo, S. 2002. Evaluation biophysique du semis sous couvert végétal en culture irriguée. Mémoire de DEA. Développement agricole tropical CNEARC Montpellier. 106 pp+annex

Dick, W. A. 1983. Organic carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations and pH in soil profiles as affected by tillage intensities. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 102-107.

Doran, J. 1980. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 765-771.

Dos Rei Castro, N. M. 1996. Ruissellement et érosion sur des bassins versants de grandes cultures du plateau basaltique du sud du Brésil (Rio Grande do sul). Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur - IRD, Strasbourg. 224 p.

Duchaufour, Ph. 1988. Abrégé de pédologie. 2^{ième} édition. Masson, Paris, 224 pp.

Echeverri'a, H. E., Videla, C. C. 1998. Eficiencia fisiológica y de utilización de nitrógeno en trigo en la región pampeana argentina. *Ciencia del suelo* 16, 83–87. Citer par: Angas, P., Lampurlanés, J., Cantero-Martinez, C. Tillage and N fertilization: Effects on N dynamics and barley yield under semiarid mediterranean conditions. *Soil & Till. Res.* 87: 59-71.

Edwards, W. M. 1982. Predicting tillage effects on infiltration. In: *Predicting Tillage Effects on Soil Physical Properties and Processes*. Am. Soc. Agron. Publ., No. 44, pp. 105-115.

Ehlers, W. 1975. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Sci.*, 119: 242-249.

Emmerling, Ch. 2001. Response of earthworm communities to different types of soil tillage, *Appl. Soil Ecol.* 17: 91–96.

Enz, J. W. Brun, L. J., Larsen, J. K. 1988 Evaporation and energy balance for bare and stubble covered soil *Agric. For Meteorol.* 43: 59-70.

Erenstein, O. 2003. Smallholder conservation farming in the tropics and sub-tropics: a guide to the development and dissemination of mulching with crop residues and cover crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 100 (1): 17-37.

Escoffier, I. 2002, Des sols déficitaires en matière organique, *La France Agricole*, 13.09.2002, p30.

Fenn, L. B. 1975. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils. III. Effect of mixing low and high loss ammonium compounds. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39 : 366-368.

Fenn, L. B., Hossner, L. N. 1985. Ammonia volatilization from ammonium or ammonium nitrogen fertilizers. In: Stewart, B.A. (Ed.), *Advances in Soil Science*, vol. 1. Springer-Verlag, New York, pp. 124–157.

Findeling, A. 2001. Etude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique, *Ecole nationale du génie rural des eaux et forêts*, Montpellier, thèse, 355 pp.

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.

Follett, R. F. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Tillage Res.* 61, 77–92.

Fox, R. H., Kern, J. M. Piekielek, W. P. 1986. Nitrogen fertilizer source and method and time of application effects on no-till corn yields and nitrogen uptakes. *Agron. J.*, 78: 741-746.

Franzluebbers, A. J., Hons, F. M., Zuberer, D. A. 1995. Tillage and crop effects on seasonal soil carbon and nitrogen dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1618–1624.

Franzluebbers, A. J., Langdale, G. W., Schomberg, H. H. 1999. Soil carbon, nitrogen, and aggregation in response to type and frequency of tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 349–355.

Ghadiri, H., Shea, P-J., Wicks, G-A. 1984. Interception and Retention of Atrazine by Wheat (*Triticum aestivum* L.) Stubble. *Weed Science*, 32(1) : 24-27.

Gilet, A. 2001. Le non labour impose de creuser la technique, La France Agricole, . 06.2001. pp 47-51.

Golabi, M. H., Radcliffe, D. E., Hargrove, W. L., Tollner, E. W. 1995. Macropore effects in conventional tillage and no-tillage soils. *J. Soil Wat. Cons.* 50: 205–210.

Goldberg, V. 2006. Programme national agriculture durable et développement durable 2003-2006, Synthèse sur les Techniques culturales sans labour TCSL ou TSL, Synthèse réalisée par V. Goldberg, EPN de Rambouillet, 13 pp.

Gonzalez-Sosa, E. 1999. Mesure et modélisation à long terme du bilan de masse et d'énergie d'une jachère du sud-ouest de la France. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble. 190 p.

Govaerts, B., Fuentes, M., Mezzalama, M., Nicol, J. M., Deckers, J., Etchevers, J. D., Figueroa-Sandoval, B., Sayre, K. D. 2007. Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements. *Soil and Tillage Research* 94: 209-219.

Govaerts, B., Mezzalama, M., Sayre, K.D., Crossa, J., Lichter, K., Troch, V., Vanherck, K., De Corte, P., Deckers, J. 2008. Long-term consequences of tillage, residue management, and crop rotation on selected soil micro-flora groups in the subtropical highlands. *Applied Soil Ecology* 38: 197-210.

Greb, B. W. 1966. Effect of surface-applied wheat straw on soil water losses by solar distillation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30: 786-788.

Gregorich, E. G., Greer, K. J., Anderson, D. W., Liang, B. C. 1998. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. *Soil Till. Res.* 47: 291–302.

Gregory, P. J., Simmonds, L. P., Pilbeam, C. J. 2000. Soil type, climatic regime, and the response of water use efficiency to crop management. *Agron. J.* 92: 814–820.

Groffman, P. M. 1985. Nitrification and denitrification in conventional and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 329–334.

Guedez, P.-Y. 2001. Environmental aspects of Conservation Agriculture in Europe, I World Congress on Conservation Agriculture, Madrid, 6p.

Gusev, E., Busarova, O. 1996. Calculation of the effective diffusion coefficient of water vapour in straw mulch. *Eurasian Soil Science*, 29(6) :782–792.

Gusev, E., Busarova, O., Yasitskiy, S. 1993. Impact of a mulch layer composed by organic remains on the soil the thermal conditions following snowmelt. *Journal of Hydrol. Hydromech.*, 41(1) :15–28.

Gusev, E. 2002. The technique of assessment of impact of mulching soil by plant remains on formation of water regime and yield of agricultural ecosystems. Water Problem Institute, Russian Academy of Sciences, In third international conference on water resources and environmental research, Dresden (Germany) 22-25 July 2002: 168-172.

Hangen, E., Buczko, U., Bens, O., Brunotte, J., Hüttl, R. F. 2002. Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity, *Soil Till. Res.* 63 (2002), pp. 181-186.

Harder, R. W. 1979. The relationship of three tillage systems to soil nitrate and phosphate, yield response of winter wheat. Proc. 30th Annu. Northwest Fert. Conference, Spokane, WA, pp. 63-71.

Harrington, L. W. 2001. A world of conservation agriculture, Keynote contributions "First World Congress on Conservation Agriculture; 1-5 octobre 2001", Madrid, ECAF/FAO, pp153-158.

Havercamp, R., Vauclin, M., Vachaud, G. 1984. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements : local standpoint. *Soil Science*, 137(2): 78-90.

Hillel, D. I., Van Bavel, C. H. M., Talpaz, H. 1975. Dynamic simulation of water storage in fallow soil as affected by mulch of hydrophobic aggregates *Soil Sci Soc Am Proc*, 39: 826-833.

Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego, CA, USA.

Howell, T. A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigation agriculture. *Agron. J.* 93 : 281-289.

Husson, J. 1997. La suppression du labour : Conséquences sur les exploitations céréalières de l'Oise, Mémoire de fin d'étude ISAB, 95 p + annexes.

Idso, S., Reginato, R., Jackson, R., Kimball, B., Nakayama, F. 1974. The three stages of drying of field soil. *Soil Science Society of America Journal*; 38 :831-836.

INRA/ITCF. 2001. Du labour au semis direct : enjeux agronomiques, INRA, Paris, 22p.

Jury, W. A., Gardner, W. R., Gardner, W. H. 1991. *Soil Physics*, 5th ed. Wiley, Toronto, Canada.

Kalra, N., Sarma, K. S. S., Nagarajarao, Y. 1984. Modification of hydro-thermal regimes by the application of residue mulch for better water use, root growth and yield of summer mungbean. *Transactions of Indian Society of Desert Technology and University Centre of Desert Studies*, 9(2) :68-71.

Karlen, D. L., Kumar, A., Kanwar, R. S., Cambardella, C. A., Colvin, T. S. 1998. Tillage system effects on 15-year carbon-based and simulated N budgets in a tile-drained Iowa field. *Soil Hill. Res.* 48: 155-165.

Kern, J. S., Johnson, M. G. 1993. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 200–210.

Khatibu, A. I., Lal, R., Jana, R.K. 1984. Effects of tillage methods and mulching on erosion and physical properties of a sandy clay loam in an equatorial warm humid region. *Field Crops Research*; 8: 239-254.

Kimball, B. A., Lemon, E. R. 1971. Air turbulence effects upon soil gas exchange. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35: 16-21.

Kosutic, S., Filipovic, D., Gospodaric, Z., Husnjak, S., Kovacev, I., Copek, K. 2005. Effects of different soil tillage systems on yield of maize, winter wheat and soybean on albic luvisol in North-West Slavonia. *Central European Agriculture Journal.* 6(3): 241-248.

Kradia, L. 2007. Methodes d'estimation du bilan hydrique pour ameliorer la gestion de l'eau. Cas d'une culture de maïs en système conventionnel et semis direct. *Memoire de fin d'étude.* SupAgro Montpellier. 65 pp.

Kushwaha, C.P., Tripathi, S. K., Singh, K. P. 2000. Variations in soil microbial biomass and N availability due to residue and tillage management in a dryland rice agroecosystem. *Soil and Tillage Research*; 56: 153-166.

Labreuche, J., Viloingt, T., Beets, B. 2005. Semis sous couvert, les conditions de semis sont primordiales ; La couverture du sol, un ingrédient à doser avec précaution. *Perspectives agricoles*, 309 : 46-50.

Labreuche, J., Viloingt, T., Caboulet, D., Daouze, J. P., Duval, R., Ganteil, A., Jouy, L., Quere, L., Boizard, H., Roger-Estrade, J. 2007. Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France N° de contrat ADEME : 04 75C 0014.

Lahmar, R. Adoption of conservation agriculture in Europe: Lessons of the KASSA project. *Land Use Policy* In Press, Corrected Proof.

Lal, R. 1974. Soil temperature, soil moisture and maize yield from mulched and unmulched tropical soils. *Plant Soil* 40: 129-143.

Lal, R. 1978. Influence of within- and between-row mulching on soil temperature, soil moisture, root development and yield of maize (*Zea Ma, s L*) in a tropical soil *Field Crops Res.* 1: 127-139

Lal, R. 1994. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. In: Lal, R. (Ed.), *Soil Erosion Research Methods.* Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, pp. 1–9.

Lal, R., Bruce, J. P. 1999. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environ. Sci. Pol.* 2 : 177–185.

Lal, R., Reicosky, D. C., Hanson, J. D. 2007. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research* 93:1-12.

Larue, B. 2000. Couverts végétaux, un atout indispensable en TCS. *Revue TCS*, 9 : 10-16.

Lavelle, P. 2000. Ecological Challenges for Soil Science. *Soil Science*. 165(1): 73-86.

Le Bissonnais, Y. 2004. Les TCS : impacts sur le ruissellement et l'érosion. 2004. Colloque CORPEN sur les techniques culturales sans labour (TCSL). INRA, Résumé des communications, 21 pp.

Le Garrec, L., Revel, A. 2004. Le non-labour en grandes cultures et élevage : évaluations environnementale et économique à l'aide de la marge directe et des indicateurs Deltameq et Indigo. *Ingénieries*, n° 38, 2004/06, pp 21-35.

Lemke, R. L., Izaurralde, R. C., Nyborg, M., Solberg, E. D. 1999. Tillage and N source influence soil-emitted nitrous oxide in the Alberta Parkland region. *Can. J. Soil Sci.* 78: 15–24.

Li, S., Xiao, L. 1992. Distribution and management of drylands in the People's Republic of China. *Adv. Soil Sci.* 18: 148–293.

Licht, M. A., Al-Kaisi, M. 2005. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. *Soil and Tillage Research*; 80: 233-249.

Lind-wall, C. W., Anderson, D. T. 1981. Agronomic evaluation of minimum tillage systems for summerfallow in southern Alberta. *Can. J. Soil Sci.*, 61: 247-253.

Linn, D. M., Doran, J. W. 1984. Aerobic and anaerobic microbial populations in no-till and plowed soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 794-799.

Locke, M. A., Hons, F. M. 1988. Effect of N rate and tillage on yield, N accumulation and leaf N concentration of grain sorghum. *Soil Till. Res.* 12: 223–233.

Logsdon, S. D., Jordahl, J. L., Karlen, D. L. 1993. Tillage and crop effects on ponded and tension infiltration rates. *Soil Tillage Res.* 28: 179–189.

MacGarry, D. M., Bridge, B. J., Radford, B., J. 2000 - Constrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics. *Soil and Tillage Research*, 53: 105-115.

Malhi, S. S., Grant, C. A., Johnston, A. M., Gill, K. S. 2001. Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review. *Soil and Tillage Research*; 60: 101-122.

Malhi, S. S., Mumey, G., O'Sullivan, P. A. Harker, K. N. 1988. An economic comparison of barley production under zero and conventional tillage. *Soil Tillage Res.*, 11 : 159-166.

Malhi, S. S., Nyborg, M. 1986. Increase in mineral N in soils during winter and loss of mineral N during early spring in north-central Alberta. *Can. J. Soil Sci.* 66: 397–409.

- Malhi, S. S., Nyborg, M. 1987. Influence of tillage on NO₃-N in soil. *Canadex (Tillage)*, No. 516, Communications Branch, Agriculture Canada, Ottawa, Ont., p. 530.
- Malhi, S. S., Nyborg, M. 1989. Improving barley yields under zero tillage. In: *Proceedings of the International Conference on Soil Quality in Semiarid Agriculture*, Saskatoon, Sask., June 12–14, 1989, 12 pp.
- Malhi, S. S., Nyborg, M. 1990. Effect of tillage and straw on yield and N uptake of barley grown under different N fertility regimes. *Soil and Tillage Research* 17: 115-124.
- Malhi, S. S., Nyborg, M. 1991. Recovery of ¹⁵N-labeled urea: influence of zero tillage, and time and method of application. *Fert. Res.* 28: 263–269.
- Malhi, S. S., Nyborg, M. 1992. Placement of urea fertilizer under zero and conventional tillage for barley. *Soil Till. Res.* 23: 193–197.
- Malhi, S. S., Nyborg, M., Solberg, E. D. 1996. Influence of source, method of placement and simulated rainfall on the recovery of ¹⁵-N-labelled fertilizers under zero tillage. *Can. J. Soil Sci.* 76: 93–100.
- Mailhol, J. C., Crevoisier, D., Triki, K. 2006. Impact of water application conditions on nitrogen leaching under furrow irrigation: Experimental and modelling approaches. *Agric. Water Manag.* 87 : 275-284.
- Mamarot, J. 2004. Gestion des adventices. Colloque CORPEN sur les techniques culturales sans labour (TCSL). INRA, Résumé des communications, 21 pp.
- Mando, A. 1997. The role of termites and mulch in the rehabilitation of crusted Sahelian soils. *Tropical resource management papers*, Wageningen Agricultural University. 99 p.
- Mannque, L. A. 1988. Effect of rainfall and cover on soil temperatures of an Isohyperthermic temperature regime in Panama *Geoderma*, 42 (2): 129-146.
- Maraux, F., Lafolie, F. 1998. Modeling Soil Water Balance of a Maize-Sorghum Sequence. *Soil Science Society American Journal.* 62 : 75-82.
- Mary, B., Recous, S., Darwis, D., Robin, D. 1996. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and Soil.* 181: 71-82.
- Masse, J., Labreuche, J., Cariolle, M., Reau, R. 2004. Technique sans labour : bilan des expérimentations françaises. Colloque CORPEN sur les techniques culturales sans labour (TCSL). INRA, Résumé des communications, 21 pp.
- McCarty, G. W., Lyssenko, N. N., Starr, J. L. 1998. Short-term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 564–1571.

Mengel, D. B., Nelson, D. W., Huber, D. M. 1982. Placement of nitrogen fertilizers for no-till and conventional till corn. *Agron. J.*, 74: 515-518.

Metay, A. 2005. Séquestration de carbone et flux de gaz à effet de serre: comparaison entre semis direct et système conventionnel dans les Cerrados brésiliens. Institut national agronomique Paris-Grignon, thèse, 232p.

Metay, A., Oliver, R., Scopel, E., Douzet, J.-M., Aloisio Alves Moreira, J., Maraux, F., Feigl, B. J., Feller, C. 2007. N₂O and CH₄ emissions from soils under conventional and no-till management practices in Goiânia (Cerrados, Brazil). *Geoderma*; 141:78-88.

Meyer, L. L., Mannering, J. V. 1967: Tillage and land modification for water erosion control. *Amer. Soc. Agric. Eng. Tillage for Greater Crop Production Conference. Proc. Dec. 11 - 12, 1967*, 58 - 62.

Michellon, R. 1996. Modes de gestion écologique des sols et systèmes de culture à base de géranium dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion. CIRAD, programme APAFP n° 47-96, Montpellier, France, 103 p.

Midmore, D. J., Bernos, D. Roca, J. 1986. Potato (*Solanum spp*) in hot tropics 11 Soil temperature and moisture modification by mulch in contrasting environments *Field Crops Res*, 15: 97-108.

Mitchell, J. P., Peters, D. W., Shennan, C. 1999. Changes in Soil Water Storage in Winter Fallowed and Cover Cropped Soils. *Journal of Sustainable Agriculture*. 15 (2/3): 19-31.

Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. *Proceedings Symposium Society of Experimental Biology*. 19: 205-234.

Monteith, J. L. 1986. How do crops manipulate water supply and demand? *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 316 : 245-259.

Mouret, J. C., Conesa, A. P., Bouchier, A., Gaid, M., Ould Said, O. 1991. Identification des facteurs de variabilité du rendement du blé dur en conditions hydriques limitantes dans la région de Sidi-bel-Abbès (Algérie), in *Physiology-breeding of winter cereals for stressed mediterranean environments*. 3-6 july 1989, Montpellier, Les colloques de L'INRA, n° 64, INRA, Paris, France, 36-47.

Nicoulaud, B., Darthout, R., Odile Duval. 1995. Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce. *Etude et Gestion des sols*, 2, 3, 1995, pages 183-200.

Norwood, C. 1994 - Profile water distributions and grain yield as affected by cropping system and tillage. *Agronomical Journal*, 86: 558-563.

Novak, M., Chen, W., Orchansky, A., Ketler, R. 2000a. Turbulent exchange processes within and above a straw mulch. Part I : Mean wind speed and turbulent statistics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102: 139–154.

Novak, M. D., Chen, W., Orchansky, A. L., Ketler, R. 2000b. Turbulent exchange processes within and above a straw mulch. Part II: Thermal and moisture regimes. *Agricultural and Forest Meteorology*. 102 : 155-171.

Novak, M., Chen, W., Hares, M. 2000c. Simulating the radiation distribution within a barleystraw mulch. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102: 173–186.

Nyborg, M., Malhi, S. S. 1989. Effect of zero and conventional tillage on barley yield and NO₃-N content, moisture and temperature of soil in north-central Alberta. *Soil Till. Res.* 15: 1–9.

Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A., Sombroek, W. G. 1990. World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation. UNEP/ISRIC, Nairobi, Kenya.

ONIC. 2001. Guide CTE et Grandes cultures. 45 p.

Parsons, B. C., Koehler, F. E. 1984. Fertilizer use by spring wheat as affected by placement. *Proceedings of the 35th Annual Northwest Fertilizer Conference, Pasco, WA*, pp. 101-105.

Pelosi, C., Bertrand, M., Roger-Estrade, J. 2006. Characteristics of earthworm population under various crop management systems. In: M. Fotyma and B. Kaminska, Editors, *Proceedings of the IX ESA Congress. Part II. Bibl. Frag. Agronom.*, vol. 11 Warsaw (2006), pp. 557–578.

Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 193 (1032): 120-145.

Phillips, R. E., Blevins, R. L., Thomas, G. W., Frye, W. W., Phillips, S. H. 1980. No tillage agriculture. *Science*, 208 : 1108–1113.

Pieri, C. 1989. Fertilité des terres de savanes: Bilans de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Ministère de la coopération et du développement—CIRAD, Paris.

Quansah, C., Asare, E., Ampontuah, E. O., Kyei-Baffour, N. 1997. The effect of mulching on soil loss, runoff and crop yield. In: *FAO-SRI Regional Workshop: Impact of Soil Erosion on Productivity. Kumasi, Ghana, 8–11 December 1997.*

Rasmussen, P. E., Collins, H. P. 1991. Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Adv. Agron.* 45: 93–134.

Rasmussen, P. E., Ramig, R. E., Wilkins, D. E. 1983. Wheat and barley fertilizer response in conservation tillage systems. In: *Proc. 34th Annu. Northwest Fert. Conference, University of Idaho, Moscow, ID*, pp. 49-56.

Rathke, G.-W., Wienhold, B. J., Wilhelm, W. W., Diepenbrock, W. 2007. Tillage and rotation effect on corn-soybean energy balances in eastern Nebraska. *Soil and Tillage Research*, 97(1): 60-70.

Reinertsen, M. R., Cochran, V. L., Morrow, L. A. 1984. Response of spring wheat to N fertilizer placement, row spacing, and wild oat herbicides in a no-till system. *Agron. J.*, 76: 753-756.

Résultats de 34 ans d'essais de culture sans labour à Changins (Suisse) ; évolution des rendements ; P.Vullioud et E.Mercier – Agroscope RAC Changins – *Revue suisse d'agriculture*. 36 (5) ; 201-212, 2004

Revel, A., Le Garrec, L. 2004. Bilan de suivi d'un réseau TCSL (indicateurs économiques et sociaux). Colloque CORPEN sur les techniques culturales sans labour (TCSL). INRA, Résumé des communications, 21 pp.

Rice, C. W., Smith, M. S. 1982. Denitrification in no till and plowed soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46: 1168-1173.

Rice, C. W., Smith, M. S., Blevins, R. L. 1986. Soil nitrogen availability after long-term continuous no-tillage and conventional tillage corn production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1206–1210.

Richard, G., Mary, B., Boizard, H., Estrade, J-R., Chenu, C. 2004. Impacts dec TCS sur le fonctionnement des sols cultivés (physique et organique). Colloque CORPEN sur les techniques culturales sans labour (TCSL). INRA, Résumé des communications, 21 pp.

Riley, H. C. F. 1998. Soil mineral-N and N-fertilizer requirements of spring cereals in two long-term tillage trials on loam soil in southeast Norway. *Soil Till. Res.* 48: 265–274.

Robert, M., Capillon, A. 2004. Historique mondial et enjeux environnementaux des techniques sans labour. Colloque CORPEN sur les techniques culturales sans labour (TCSL). INRA, Résumé des communications, 21 pp.

Rollin, D. 2002. Semis direct sous couvert végétal et contraintes de l'agriculture tropicale, Colloque: Vers une agriculture de conservation des sols, Salon International de l'Agriculture, Paris.

Ruelle, P. 1995. Variabilité spatiale à l'échelle de parcelles de cultures : étude expérimentale et modélisation des bilans hydriques et des rendements. Thèse, université Joseph Fourier-Grenoble I. 210 pp.

Salitot, G. 2001. Le non labour dans l'Oise : Etude des pratiques actuelles, effets de la structure du sol et conséquences sur le développement du maïs, Mémoire, ITIA, 49p + annexes.

Sauer, T. J., Hatfield, J.L., Prueger, J. H., Norman, J. M. 1998. Surface energy balance of a corn residue-covered field. *Agricultural and Forest Meteorology*. 89 : 155-168.

Schroth, G., Salazar, E., Da Silva Jr J. P. 2001. Soil Nitrogen Mineralization under Tree Crops and a Legume Cover Crop in Multi-Strata Agroforestry in Central Amazonia : Spatial and Temporal Patterns. *Experimental Agricultural*. 37: 253-267.

Scopel, E. 1994. Le semis direct avec paillis de résidus dans la région de V. Carranza au Mexique : Intérêt de cette technique pour améliorer l'alimentation hydrique du maïs pluvial en zones à viométrie irrégulière. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Montpellier. 334 p.

Scopel, E. 1999. Le semis direct avec paillis de résidus, vers de nouveaux itinéraires techniques pour la production du maïs pluvial dans l'ouest mexicain. Actes de l'atelier international, Antsirabe, Madagascar, 23-28 mars 1998.

Scopel, E., Chavez-Guerra, E., Arreola-Tostado, J. M. 1999. Le semis direct avec paillis de résidus dans l'ouest Mexicain: une histoire de l'eau ?. *Agriculture et développement*. 21: 71-86.

Scopel, E., Muller, B., Arreola-Tostado, J. M., Chavez Guerra, E., Maraux, F. 1998. Quantifying and modelling the effects of a light crop residue on the water balance: an application to rainfed maize in Western Mexico-. *World Congress of Soil Science*. Montpellier, France. Août, 1994.

SDEC. 1999. Système tensiométrique multivoies à mercure STM2150 (notice d'utilisation).

Sebillotte, M., Meynard, J-M. 2004. Enjeux agronomiques économiques et environnementaux. Colloque CORPEN sur les techniques culturales sans labour (TCSL). INRA, Résumé des communications, 21 pp.

Séguy, L., Bouzinac, S., Trentini, A., Cortes, N. A. 1996. L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. *Agriculture et Développement*, 12 : 1-76.

Sexton, B. T., Moncrief, J. F., Rosen, C. J., Gupta, S. C., Cheng, H. H. 1996. Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn on nitrate leaching and yield on a Coarse-Textured soil. *J. Environ. Qual.* 25 : 982-992.

Shaxson, T. F., Hudson, N. W., Sanders, D. W., Roose, E., Moldenhauer, W. C., 1989. *Land Husbandry: A Framework for Soil and Water Conservation*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.

Shukla, M. K., Lal, R., Ebinger, M. 2003. Tillage effects on physical and hydrological properties of a Typic Agriaquoll in central Ohio. *Soil Sci.* 168 (11): 802-811.

Sieling, K., Schroder, H., Finck, M., Hanus, M. 1998. Yield, N uptake, and apparent N use efficiency of winter wheat and winter barley grown in different cropping systems. *J. Agric. Sci.* 131: 375-387.

Smith, P., Powlson, D. S., Glendining, M. J. Smith, J. U. 1998, Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming, *Global Change Biology* 4, Blackwell Science Ltd., pp 679-685.

Steiner, J. L. 1989. Tillage and surface residue effects on evaporation from soils. *Soil Sci Soc Am J.* 53: 911-916

Sui, H. J., Zeng, D. C., Chen, F. Z. 1992. A numerical model for simulating the temperature and moisture regimes of soil under various mulches. *Agricultural and Forest Meteorology* 61: 281-299.

Tamlin, C., Olson, T., Horton, M. 1975. Influence of early, delayed, and no mulch residue management on corn production. *Soil Science Society of America Proceedings*, 39(2): 353–356.

Taupin, P. 1999. Ravageurs : le niveau de vie de la limace s'améliore, *Perspective Agricoles*, 251 : 67 –70.

Tebrügge, F., Düring, R. A.. 1999. Reducing tillage intensity -- a review of results from a long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research* 53: 15-28.

Thomas, G. W., Blevins, R. L., Phillips, R. E. McMahon, M. A. 1973. Effect of a killed sod mulch on nitrate movement and corn yield. *Agron. J.*, 65: 736-739.

Thurston, H. D. 1992. *Sustainable Practices for Plant Disease Management in Traditional Farming Systems*. Westview Press, Boulder CO, 279p.

Tian, G. 1998. Effet of soil degradation on leaf decomposition and nutrient release under humid tropical conditions. *Soil Science*. 163(11): 897-906.

Tolk, J. A., Howell, T. A., Evett, S. R. 1999. Effect of mulch, irrigation, and soil type on water use and yield of maize. *Soil Till. Res.* 50: 137–147.

Tripp, R., Barreto, H. J. 1993. Estimacion Aproximada de la Cantidad de Rastrojo de Maiz sobre el Suelo. Unpublished training material. CIMMYT, Mexico, DF.

Trocherie, F., Raboud, V. 2004. Le développement des techniques sans labour (enquêtes pratiques culturelles). Colloque CORPEN sur les techniques culturales sans labour (TCSL). INRA, Résumé des communications, 21 pp.

Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., Thornton, P. K. 1998. *Understanding Options for Agricultural Production*, pp. 399. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

UNCED. 1992. *The Global Partnership for Environment and Development: A Guide to Agenda 21*. UNCED, Geneva.

Unger, P. W. 1991. Organic matter, nutrient, and pH distribution in no- and conventional-tillage semiarid soils. *Agron. J.* 83: 186– 189.

Unger, P. W. 1994. *Residue Management—What does the Future Hold?* Lewis Publishers, Boca Raton, R, pp. 425–432.

Unger, P. W. Parker, J. J. 1976. Evaporation reduction from soil with wheat, sorghum and cotton residues, *Soil Sci Soc Am J*, 40: 938-942

Unger, P. W., Wiese, A. F. 1979. Managing irrigated winter wheat residues for water storage and subsequent dryland sorghum production. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 582-588.

Vachaud, G., Dancette, C., Sonko, S., Thony, J. L. 1978. Méthode de caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non saturé – Application à deux types de sol du Sénégal, en vue de la détermination des termes du bilan hydrique, *Ann. Agron.* 29 : 1-36.

Varadan, K., Rao, A. 1983. Effect of mulch on soil temperature in humid tropical latosols under coconut (*cocos nucifera* linn) and banana (*musa paradisiaca*). *Agricultural Meteorology*, 28 : 375–386.

Vauclin, M., Angulo-Jaramillo, R. 1995. Water and Solute Transport Processes in Unsaturated Soils : Some Hydrological and Geotechnical Aspects. 1st. Conf. On Unsaturated Soils, 1995. Paris.

Viloingt, T. 2005. Identification et quantification des risques liés à l'implantation des cultures de printemps en semis direct derrière une culture intermédiaire. ESA Angers, Mémoire de Fin d'Etudes.

Voorhees, W. B. Lindstrom, M. J. 1983. Soil compaction constraints on conservation tillage in the northern Corn belt. *Journal of soil and water conservation*, p. 307–311.

WCED. 1987. Our Common Future—The 'Brundtland Report'. Oxford University Press, Oxford.

Wicks, G. A., Smika, D. E. 1973. Chemical fallow in a winter wheat fallow rotation. *Weed Sci.*, 21: 97-102.

Wielemaker, W. G. 1984. Soil formation by termites. Doctoral Thesis. Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. 132 p.

Wienhold, B. J., Ardell, D., Halvorson, A. D. 1999. Nitrogen mineralization responses to cropping, tillage, and nitrogen rate in the northern great plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 192–196.

Woomer, P. L., Martin, A., Albrecht, A., Resck, D. V. S. 1994. The importance and Management of Soil Organic Matter in the Tropics. *The Biological Management of Tropical Soil Fertility. J. W. S. C. TSBFP*: 47-80.

World Bank. 1992. World Development Report 1992: Development and the Environment. Oxford University Press, Oxford.

Zachmann, J. E., Linden, D. R., Clapp, C. E. 1987. Macroporus infiltration and redistribution as affected by earthworms, tillage, and residue. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51 : 1580–1586.

Zachmann, J., Linden, D. 1989. Earthworm effects on corn residue breakdown and infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, 53: 1846–1849.

Zhang, S., Lövdahl, L., Grip, H., Jansson, P. E., Tong, Y. 2007. Modelling the effects of mulching and fallow cropping on water balance in the Chinese Loess Plateau. *Soil and Tillage Research* 93: 283-298.

Annexes

Annexe A :

Dispositifs de mesure de l'humidité du sol

Suivis hydriques par humidimétrie neutronique et tensiométrie

-Par humidimétrie neutronique (Sonde à neutrons)

Description : ils mesurent l'humidité volumique du sol en utilisant la propriété qu'ont les neutrons rapides d'être ralentis (thermalisés) préférentiellement par les atomes d'hydrogène, qui dans le sol sont majoritairement inclus dans les molécules d'eau. Les mesures se font au moyen d'un tube en alliage d'aluminium enfoncé verticalement dans le sol où il est laissé en permanence. L'interaction entre neutron-aluminium est pratiquement nulle, d'où le choix de ce matériau. Un bon contact entre le sol et le tube est une condition essentielle à la précision de la mesure. La source de neutrons rapides (Radium-Béryllium ou Américium-Béryllium) est amenée à la profondeur désirée, accompagnée du détecteur de neutrons lents. La mesure consiste à compter pendant un temps déterminé (1 min) le nombre de neutrons thermalisés qui reviennent vers la sonde, et qui est proportionnel à l'humidité volumique du sol.

La mesure par sonde à neutrons prend en compte un volume d'échantillon plus important que les prélèvements à la tarière, annulant ainsi l'effet de certaines micro-hétérogénéités du sol. Le rayon théorique de la sphère d'influence R (qui est plutôt un ellipsoïde allongé selon l'axe du tube d'accès) peut varier dans une gamme de 7 à 14 cm pour un sol humide, et de 10 à 25 cm pour un sol sec (Hillel, 1974).

Ses avantages : rapidité d'exécution et bonne précision sur des périodes assez longues ; facile à maîtriser ; le dispositif (tube) ne déstructure quasiment pas le sol. Cependant, son utilisation présente des risques et nécessite une réglementation stricte du fait de la présence d'une source radioactive ; son coût d'achat reste élevé.

Etalonnage de l'appareil

Il permet de passer du comptage des neutrons à la mesure d'humidité, en tenant compte aussi des éléments chimiques du sol (atomes d'hydrogène de la matière organique...) et de sa densité, raison pour laquelle l'étalonnage est différent selon la profondeur.

Profondeur	Formule d'étalonnage
0-15 cm	$\theta = 0.8093 \times (N/N_0) + 0.0139$
15-95 cm	$\theta = 0.7651 \times (N/N_0) - 0.0079$
95-265 cm	$\theta = 0.678 \times (N/N_0) + 0.0152$

Avec N_0 , la mesure de référence obtenue dans un fût de 200 litres d'eau au centre duquel est disposé un tube d'accès en aluminium d'environ 1.2 m de long. Le protocole impose dix mesures avant et dix mesures après celles au champ, de façon à établir une moyenne et évaluer les écarts.

L'étalonnage consiste à obtenir une fonction du type $\theta = f(N/N_0)$, à partir de données de densité apparente (D_a) à diverses profondeurs jumelées avec des valeurs d'humidité pondérales (H_p) aux mêmes cotes selon la formule : $\theta = D_a \times H_p$. Les densités ont été obtenues grâce à une sonde gamma de profondeur, et les humidités pondérales par prélèvements gravimétriques.

Installation de sites de mesure :

Le forage du trou a été fait à la tarière manuelle de diamètre 45 mm. Les échantillons de sol à l'installation des tubes ont été utilisés pour la détermination de l'humidité pondérale. Le tube de sonde à neutrons doit permettre des mesures jusqu'à 2m au moins.

Un dispositif classique est utilisé : un site tensio-neutronique avec contrôle des flux de drainage (ou percolation profonde) à 1,40m.

Pas de temps de mesure :

Les mesures à la *sonde à neutrons* Campbell "CPN" sont effectuées tous les 5 jours environ, et obligatoirement avant et après (environ 48h) irrigation ou pluie. L'objectif est de pouvoir effectuer un bilan sur une période ne comportant pas d'apport pour éviter les problèmes liés à la redistribution.

Par tensiométrie (Tensiomètre à mercure)

Description : système constitué d'un tube généralement en plastique transparent avec à la base une bougie poreuse en céramique. Ce tube comporte deux ouvertures : l'une sert à la saturation en eau et à la purge en air, l'autre est destinée à la lecture de la pression de l'eau pouvant être reliée à différents systèmes.

Dans notre cas, il s'agit de tensiomètres à mercure, donc à lecture directe sur une règle graduée (en mbar). Le tube de réservoir est relié à un réservoir de mercure dans lequel plonge le capillaire. La masse volumique du mercure étant de 13.6 kg/dm^3 et 1 kg/dm^3 pour l'eau, les dépressions sont visualisées beaucoup plus facilement avec le mercure. Ces tensiomètres classiquement utilisés en science du sol ont des risques de pollution beaucoup plus importants que les tensiomètres de type manomètres, mais ils sont les seuls à offrir une bonne précision (hormis les capteurs électroniques dont le coût est très élevé).

Avantages : cette gamme de tensiomètres offre des mesures relativement précises, leur installation est rapide et peu destructrice. Néanmoins, certains inconvénients rendent leur utilisation et interprétations délicates en particulier si leur nombre est insuffisant :

- la plage de mesure, de 0 à - 850 mbar, couvre seulement une partie de la pression de l'eau disponible pour la plante ;
- les mesures ne sont plus fiables dans la gamme la plus significative de succion pour les plantes (1 à 15 bars) ;
- ils nécessitent une surveillance permanente du circuit d'eau dans le capillaire pour repérer la présence éventuelle des bulles d'air, il faut donc procéder à des purges ;

- ils présentent une certaine sensibilité à la température (partie supérieure) ;
- la mise en place est difficile dans les sols caillouteux, la bougie poreuse est relativement fragile.

Annexe B

L'efficience d'utilisation de l'eau

Quels mécanismes permettraient d'atteindre les plus fortes efficacités d'utilisation de l'eau (WUE) afin de permettre à la production alimentaire mondiale de suivre le rythme d'augmentation de la population. Sinclair et al. (1984) définit la WUE à diverses échelles : de la feuille au champ. Dans sa plus simple expression, elle se caractérise comme le rendement par unité d'utilisation d'eau. À un niveau plus biologique, il est l'hydrocarbure formé par la photosynthèse : le CO₂, la lumière du soleil, et de l'eau par unité de transpiration. Brown (1999) a proposé que la prochaine référence en matière de rendement exprime la quantité d'eau nécessaire pour produire une unité de rendement des cultures, qui est tout simplement l'inverse de WUE. Souvent, le terme WUE devient confus lorsqu'il est utilisé dans l'agriculture irriguée. Bos (1980, 1985) a recommandé que WUE pour les cultures irriguées se fonde sur l'écart de rendement par rapport à la production pluviale divisé par la différence d'évapotranspiration (ET) entre la culture irriguée et la culture pluviale. Il a également proposé de prendre le rapport de la différence du rendement entre irrigué et pluvial, par la quantité d'eau apportée. Ces définitions sont intéressantes mais difficiles à appliquer parce que de nombreux facteurs comme la fertilité, la variété, la lutte chimique, la date de semis, la teneur en eau du sol au semis, la densité de semis et l'espacement pourrait affecter les rendements.

Bien que beaucoup de choses aient changé avec la gestion de l'eau d'irrigation et les techniques d'irrigation au cours des 20 dernières années, le plus grand défi pour l'agriculture est de développer la technologie pour améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau (Karasov, 1982).

D'après Viets (1962) WUE est généralement définie dans l'agronomie comme :

$$WUE = \frac{\text{Rendement (normalement rendement en grain)}}{\text{l'eau appliqué}} \quad (1)$$

Si le rendement des cultures est exprimé en g/m² et l'utilisation de l'eau est exprimée en mm, puis WUE sera en kg.m⁻³.

Bien utile dans de nombreuses analyses, WUE ne tient pas compte du rôle de l'irrigation. Bos (1980, 1985) a mis au point des expressions qui peuvent davantage mettre en évidence le rôle de l'irrigation. Son expression peut être écrite pour ET_{wue} comme:

$$ET_{WUE} = \frac{(Y_i - Y_d)}{(ET_i - ET_d)} \quad (2)$$

et I_{wue} comme

$$I_{WUE} = \frac{(Y_i - Y_d)}{I_i} \quad (3)$$

Où Y_i est le rendement et ET_i est l'ETR pour l'irrigation de niveau i , Y_d est le rendement et l'ETd est l'ETR pour le traitement pluvial et $L'I_i$ est l'irrigation appliquée pour l'irrigation de niveau i . Dans la plupart des zones arides, Y_d serait nulle ou faible; ETd pourrait cependant être beaucoup plus près (?) de zéro et variable selon les pratiques agronomiques. Toutefois, les pratiques agronomiques diffèrent souvent sensiblement entre pluvial et irriguée (par exemple, la variété, date de semis, la gestion de la fertilité, la lutte antiparasitaire, densité de semis, la géométrie et la plantation). Ainsi, les résultats qui sont tout à fait différents pourraient être obtenus pour Y_d et ETd en se basant sur des différences en matière de gestion. L'utilisation de l'eau dans l'équation [1] est difficile à déterminer précisément. Ainsi, dans certaines situations, une référence WUE (WUE_b) est utilisée par de nombreux praticiens de l'irrigation (Howell, 2001). Il peut être défini comme :

$$WUE_b = \frac{\text{Rendement}}{(P + I + \Delta S)} = \frac{\text{Rendement}}{ETR} \quad (4)$$

Où P est la pluviométrie, I est l'irrigation appliquée, et ΔS est l'épuisement de la zone racinaire au cours de la saison. On a choisi l'équation (4) pour calculer le WUE, faute de données concernant les traitements pluviaux. Dans notre cas, $ETR = P + I + \Delta S$, calculée à partir du PFN. En plus pour les cultures étudiées le rendement sera le rendement en grains.

RESUME en français

D'après Labreuche et al. (2007) il n'y quasiment pas de données sur la pratique à long terme du semis direct sous couverture végétale (SCV) en France. La motivation provoquée par la PAC au début des années 90 a favorisé le développement du SCV. La réduction du temps du travail occasionnée par le SCV est une source importante de motivation en France. Quel que soit le pays, la suppression ou la réduction du travail du sol n'est pas sans poser de problèmes techniques. Certaines conséquences agronomiques doivent également être gérées, comme la maîtrise des adventices.

Les résultats du travail présenté ici, nous permettent d'améliorer notre connaissance du SCV par rapport au système conventionnel (CT). Ces deux systèmes, sont comparés à l'échelle parcellaire au niveau du rendement, du bilan hydrique, du bilan d'azote, et de l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE : Water Use Efficiency).

Les résultats issus de nos expérimentations montrent qu'en SCV, pour le blé dur irrigué, le rendement baisse (en raison de problèmes de levée, et d'attaques de ravageurs) en revanche on a obtenu presque le même rendement pour les traitements sans azote et aussi le traitement pluvial. Pour une culture d'été comme le maïs, on a obtenu le même rendement en SCV qu'en CT.

En ce qui concerne la WUE pour maïs, elle n'est pas significativement différente même si elle a la tendance à être plus élevée sur SCV. En accord avec les résultats de la littérature, le SCV réduit l'évaporation du fait de la présence des résidus à la surface du sol.

L'analyse du devenir de l'azote montre qu'en dépit d'un déficit de bilan plus faible, l'efficacité d'utilisation de l'azote a diminué en SCV. Cela milite en faveur d'un changement de gestion d'azote en SCV.

TITRE en anglais

Evaluating of direct seeding system for irrigated crops compared with conventional tillage

RESUME en anglais

According to Labreuche et al. (2007) there are almost no data on long-term practice of direct seeding into mulch (DSM) in France. The motivation caused by the common agricultural policy in the early 90s has promoted the development of DSM. The reduction of working time caused by the DSM is a major source of motivation in France. Whatever the country, the no tillage or minimum tillage are not without technical problems. Some agronomic consequences must also be managed as weed control.

The results of our study can improve our knowledge about DSM by comparing it to conventional tillage (CT). These two systems are compared on a field scale related to crop yield, water balance, nitrogen balance, and water use efficiency (WUE).

The results from our experiments show that the yield of DSM for irrigated durum wheat decreased due to plant density and pest attack; however we had almost the same yield for without nitrogen and rainfed treatments. For a summer crop such as corn, we had the same yield with both systems.

Regarding WUE for corn WUE was not significantly different even if it has the tendency to be higher on DSM. In agreement with literature, DSM reduces evaporation by the presence of residues on the soil surface.

The analysis of nitrogen (N) balance shows that despite lower N losses, N use efficiency has declined in DSM. This militates in favor of a nitrogen management change in DSM.

DISCIPLINE

Eaux continentales et Société

MOTS-CLES : Semis direct sous couverture végétal, système conventionnel, bilan hydrique, bilan d'azote, climat Méditerranéen, l'efficacité d'utilisation de l'eau

INTITULE ET ADRESSE DE L'U.F.R. OU DU LABORATOIRE : SIBAGHE, UMII-Bât. 22- Place Eugène Bataillon- 34095 Montpellier