



HAL
open science

Analyse du fonctionnement d'une association de blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) et d'une plante de couverture sur une échelle annuelle par modélisation et expérimentation

Inès Shili-Touzi

► **To cite this version:**

Inès Shili-Touzi. Analyse du fonctionnement d'une association de blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) et d'une plante de couverture sur une échelle annuelle par modélisation et expérimentation. Agronomie. AgroParisTech, 2009. Français. NNT : 2009AGPT0082 . pastel-00606113

HAL Id: pastel-00606113

<https://pastel.hal.science/pastel-00606113>

Submitted on 5 Jul 2011

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.

THÈSE

Pour l'obtention du titre de

Docteur

de

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech)

Présentée et soutenue publiquement par

Inès SHILI-TOUZI

Le 16/12/2009

**Analyse du fonctionnement d'une association de
blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) et d'une
plante de couverture sur une échelle annuelle
par modélisation et expérimentation**

Directeur de thèse : **Thierry Doré**

Codirecteur de thèse : **Stéphane de Tourdonnet**

UMR 211 Agronomie INRA/AgroParisTech, F-78850 Thiverval Grignon

Devant le jury :

Sylvie Recous, Directrice de recherche INRA

Sylvain Plantureux, Professeur ENSAIA-INPL

Jean Roger-Estrade, Professeur AgroParisTech

Halim Ben Haj Salah, Maître de conférences INAT

Eric Scopel, Chercheur CIRAD

Stéphane de Tourdonnet, Maître de conférences AgroParisTech

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

À mon père

Avant-Propos

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrants, Thierry Doré et Stéphane de Tourdonnet, pour l'attention qu'ils m'ont accordée durant ces trois ans de thèse, pour leur disponibilité, les conseils précieux et fructueux qu'ils n'ont cessé de me prodiguer, ainsi que pour les moyens qu'ils ont déployés pour la bonne réalisation de ce travail. Merci énormément Thierry pour tout ce que tu as pu apporter dans la lecture et les corrections pertinentes de ce document. Ton esprit critique et ta capacité impressionnante à dénicher les erreurs ont été un atout dans la réussite de ce travail de thèse. Merci Stéphane pour ton enthousiasme, pour ta bonne humeur, pour ta pertinence et ta patience. Tu as su amoindrir certains de mes nombreux défauts et renforcer certaines de mes qualités. Je vous remercie sincèrement tous les deux de m'avoir permis de connaître la recherche agronomique.

Je remercie également Marie-Hélène Jeuffroy, directrice de l'UMR Agronomie où cette thèse s'est déroulée, pour son accueil et l'écoute qu'elle réserve particulièrement aux thésards de l'unité. Un grand merci à Didier Picard pour son aide et pour ses qualités scientifiques autant qu'humaines que j'ai pu découvrir lors de nos fructueux échanges scientifiques.

Je remercie Sylvie Recous et Sylvain Plantureux d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail ainsi que Eric Scopel, Halim Ben Haj Salah et Jean Roger-Estrade, d'avoir accepté d'en être les examinateurs.

Un grand merci aux membres de mon comité de thèse, Marie Launay, Marie-Odile Bancal et Guénaelle Corre-Hellou pour tous les conseils et les critiques toujours constructives qu'elles ont pu m'apporter pour le bon déroulement de la thèse.

La partie expérimentale de cette thèse n'aurait pu avoir lieu sans la participation active du personnel de l'équipe technique. Je tiens à remercier particulièrement Mathieu Bazot pour son humour et pour les idées pertinentes qu'il a pu m'apporter dans l'élaboration des protocoles de mesures ainsi que pour son aide très précieuse dans la réalisation des prélèvements racines. Merci également à Dominique Le Floch pour sa patience, son soutien et sa motivation. Ses connaissances techniques ont été déterminantes pour la réussite des mesures biophysiques réalisées durant la thèse. Je souhaite aussi exprimer toute ma gratitude à Patrick Saulas, Richard Gosse et Gilles Grandeau pour leur aide et leur contribution au bon déroulement de cette partie expérimentale.

Un grand merci également à Radhouan Nciri, pour la motivation qu'il a montrée pour mener à bien le travail expérimental qui lui a été confié. Je n'oublie pas également Christine Souin, Béatrice Le Fouillen et Véronique Tanneau avec qui j'ai effectué mes prélèvements d'échantillons et mes dépouillements au laboratoire. Je remercie également Alain Bône pour son aide. Je leurs dis à tous un grand merci !

La partie modélisation de cette thèse n'aurait pu aboutir sans l'aide indispensable de Marie Launay et des collègues de l'UMR Agroclim d'Avignon, particulièrement Nadine Brisson et Dominique Ripoché. Merci beaucoup pour votre accueil et pour l'énorme avancée des résultats de cette thèse grâce à vous.

Merci à tous mes collègues et mes amis qui m'ont entourée durant ces trois années : Arnaud, Lorène, Elise, Marion, Adrien, Fleur, Aicha, Céline Ronfort, sans oublier bien sûr Mourad et la très charmante Julie, merci à tous pour votre soutien. Je n'oublierai jamais les moments qu'on a passés à la cantine ou en train, qui furent toutefois rares pendant la dernière période de la thèse. Une grande pensée à Tatiana avec qui j'ai partagé de très bons moments au bureau et surtout la pause énergie « avec les morceaux de chocolat noir » que tu n'as cessé de m'offrir. Les pauses thés avec toi me manqueront ! Une pensée particulière à mes amis Rym Ben Salem, Rim Baccar, Omar kheder, Asma Ben Othmen, Nourchène Sadkaoui et mes amies de Reims Ahléme et Youser qui n'ont pas cessé de m'encourager durant mon parcours. Je garde des souvenirs inoubliables depuis notre arrivée en France !

Je ne remercierai jamais assez mon mari ADEL pour m'avoir supportée au quotidien pendant cette dernière période. Merci pour ta confiance en moi, ton optimisme sans limites ainsi que le soutien sans failles que tu as pu m'apporter. Sans toi, je sais que je n'aurais jamais pu dépasser toutes les épreuves que j'ai rencontrées sur mon chemin.

Un grand merci à mes parents Sadok et Samira, à ma grand-mère Mima et à mes frères et sœurs Sami, Ikram et Asma qui m'ont toujours encouragée et soutenue dans mes choix. Je ne vous remercierai jamais assez de m'avoir toujours poussée à aller le plus loin possible. Je remercie aussi profondément ma belle famille pour leur soutien au quotidien.

Que toutes ces personnes reçoivent ici l'expression de ma profonde gratitude.

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Schéma simplifié d'organisation des différents modules du modèle de culture STICS.

Figure 2.2 : Moyenne de température journalière (°C), cumul de pluie et de l'évapotranspiration (ETP) (mm) par décade durant les deux années expérimentales 2008 et 2009. La phase Φ 1 représente la période avant le semis de la luzerne, Φ 2 représente le cycle cultural (association) et Φ 3 représente la période d'interculture (après récolte du blé).

Figure 2.3 : Plans expérimentaux des deux essais conduits en 2007-08 et 2008-09, avec les différents emplacements de TDR et des capteurs de rayonnement. La couleur jaune représente la culture de blé pur (B), celle en vert foncé les traitements de luzerne pure (L) et celle en vert clair les traitements des associations de culture (BL). Pour les deux années les bandes ON ont été placées sur tous les traitements sauf sur la luzerne pure (L0)

Figure 2.4 : Positionnement des capteurs PAR pour les traitements de cultures pures (a) et pour les traitements en association de culture (b).

Figure 3.1 : Résultats simulés et observés des variables plantes : accumulation de la matière sèche aérienne (a), surface foliaire (LAI) (b) et azote absorbé dans la partie aérienne des plantes (c) des traitements de blé pur et de la fétuque pure pour les deux années expérimentales (1999-2000 et 2000-2001).

Les barres verticales représentent les écart-types et les lignes discontinues représentent la date de la récolte du blé.

Figure 3.2 : Résultats simulés et observés des stocks d'azote minéral du sol au niveau de l'horizon (0-90 cm) pour les traitements de blé pur (a) et de la fétuque pure (b) pour les deux années expérimentales (1999-2000 et 2000-2001). Les barres verticales représentent les écart-types et les lignes discontinues représentent la date de la récolte du blé.

Figure 3.3 : Résultats simulés et observés des stocks d'eau du sol au niveau de l'horizon (0-90 cm) pour les traitements de blé pur (a) et de fétuque pure (b) pour les deux années expérimentales (1999-2000 et 2000-2001). Les barres verticales représentent les écart-types et les lignes discontinues représentent la date de la récolte du blé.

Figure 3.4 (Fig. 1.) Weather data (cumulative daily mean temperature, cumulative rainfall and cumulative solar radiation) calculated over the total period of simulation (10 October (year n) until 31 December (year n+1)) for each climatic year (35 years from 1970 to 2004) at Versailles, northern France. Open symbols correspond to the two experimental years (1999 and 2000)

Figure 3.5 (Fig. 2.) : Observed (obs) and simulated (sim) aerial dry matter accumulation (a), leaf area index (LAI) (b) and nitrogen (N) acquisition (c) in intercropped wheat plus fescue for the two experimental years (1999 and 2000). Vertical bars indicate the least squares difference (0.05) and the dashed vertical line shows the date of wheat harvest.

Figure 3.6 (Fig. 3.) : Observed (line) and simulated (symbols) inorganic nitrogen in the soil (a) and soil water content (b) in wheat-fescue intercrops for the two experimental years. Vertical bars are least squares differences (0.05) and the dashed vertical line shows the date of harvest

Figure 3.7 (Fig.4) : Simulated daily proportion of PAR intercepted by the sole-crop wheat (a) and wheat plus fescue intercrop (b) in 2000. The pattern of change in the proportion of light intercepted was observed in 1999.

Figure 3.8 (Fig. 5.) : Frequency analysis for managing scenario 0 (sole-crop wheat), 1 (wheat-fescue double cropping), 2 (relay intercropping) and 3 (full intercropping) over the 35 climatic years, for wheat yield (a), wheat-fescue aerial dry matter (b), PAR interception by crops (c), PAR transmitted to the soil (d), crop transpiration (e), soil evaporation (f), N acquisition by crops (g), mineral nitrogen in the soil in the end of the simulation on 31 December (h).

Figure 4.1 a : Evolution au cours du temps de la biomasse aérienne de la luzerne pour les associations de culture (BL0, BL1 et BL2) et les cultures pures correspondantes (L0, B) conduites en travail superficiel (Ts) et en labour (La), depuis le semis de la luzerne jusqu'à la fin de la période d'interculture en 2008 (a) et du semis de la luzerne jusqu'à la récolte du blé en 2009 (b). Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

Figure 4.1b: Evolution au cours du temps de la biomasse aérienne du blé pour les associations de culture (BL0, BL1 et BL2) et les cultures pures correspondantes (L0, B) conduites en travail superficiel (Ts) et en labour (La), depuis le semis du blé jusqu'à la récolte pour les deux années expérimentales 2007-2008 (a) et 2008-2009 (b). Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

Figure 4.1c: Evolution au cours du temps de la biomasse aérienne des adventices pour les associations de culture (BL0, BL1 et BL2) et les cultures pures correspondantes (L0, B) conduites en travail superficiel (Ts) et en labour (La), depuis le semis de la luzerne jusqu'à la période d'interculture en 2007-2008 (a) et jusqu'à la récolte du blé en 2008-2009 (b). Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

Figure 4.2 : Biomasse racinaire du blé pur (B) et de l'association (BL1) mesurée en 2008 au stade floraison du blé sur deux horizons : 0-20 cm et 20-40 cm pour les deux types de travail du sol, labour (La) et travail de sol superficiel (Ts). Les barres verticales représentent les valeurs des écarts-types.

Figure 4.3 a : Land Equivalent Ratio (LER) global pour les différents traitements de cultures associées (BL0, BL1 et BL2) calculé pour les deux années expérimentales 2008 et 2009.

Figure 4.3b : Land Equivalent Ratio (LER) partiel du blé (a) et de la luzerne (c) pour les différents traitements de cultures associées (BL0, BL1 et BL2) calculé pour les deux années expérimentales 2008 et 2009.

Figure 4.4 : Evolution au cours du temps de l'indice foliaire (LAI *Leaf Area Index*) du blé (a) et de la luzerne (b) pour les associations de culture (BL0, BL1 et BL2) et les cultures pures correspondantes (L0, B) conduites en travail superficiel (Ts) et en labour (La) pour les deux années expérimentales 2008 et 2009. Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

Figure 4.5 : Evolution de la hauteur du blé (a) et de la luzerne (b) pour les associations de culture (BL0, BL1 et BL2) et les cultures pures correspondantes (L0, B) conduites en travail superficiel (Ts) et en labour (La) pour les deux années expérimentales 2008 et 2009. Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

Figure 4.6 : Evolution en fonction du temps du PAR absorbé par les cultures de blé et de luzerne pure (a) conduites en travail superficiel (Ts) et des associations de culture (BL0 et BL1) (b) pour l'année expérimentale 2008.

Figure 4.7 : Evolution au cours du temps du stock d'eau dans le sol à 90cm de profondeur pour les traitements de blé et de la luzerne purs (B, L0) et en association (BL0 et BL1) pour l'année expérimentale 2008.

Figure 4.8 : Evolution au cours du temps du stock d'eau dans le sol à 60cm de profondeur mesuré grâce aux sondes TDR pour les traitements de blé et de luzerne pure (a), des

associations conduites en travail superficiel (BL0 et BL1) (b) et de l'association (BL1) conduite en labour et en travail superficiel (c) pour l'année expérimentale 2008. Sur les différents graphes, les vides représentent les points de mesures aberrants qui ont été supprimés.

Figure 4.9 : Evolution du profil des teneurs en eau du sol (en %) à 90cm de profondeur mesuré pour les dates (08/04, 23/05, 31/07 et 27/10) pour les traitements de blé et de la luzerne purs (B, L0) et pour les associations (BL0 et BL1) pour l'année expérimentale 2008.

Figure 4.10 : Evolution au cours du temps de la quantité d'azote minéral du sol dans les différents horizons et de son stock à 90cm de profondeur du sol pour les traitements de blé (B) et de luzerne pure (L0) et des associations de culture (BL0 et BL1) conduits en travail superficiel (Ts) et en labour (La) pour l'année expérimentale 2008.

Figure 4.11 : Fourniture du sol mesurée sur les bandes sans apports d'azote (0N) à la récolte du blé pour les traitements de blé (B) et de luzerne pure (L0) et en association (BL0 et BL1) conduits en travail superficiel (Ts) et en labour (La) pour l'année expérimentale 2008.

Figure 4.12 : Evolution au cours du temps de l'indice de nutrition azotée (INN) du blé pur (B) en association (BL0 et BL1) conduits en travail superficiel (Ts) et en labour (La) pour l'année expérimentale 2008. Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

Figure 4.13 : Evolution en fonction du temps du taux de fixation symbiotique de la luzerne pure (L0) et de la luzerne en association (BL0, BL1) pour l'année expérimentale 2008.

Figure 4.14 : Evolution au cours du temps de l'accumulation de l'azote absorbé par les plantes ainsi que de la part fixée par la luzerne pour les traitements de blé et de luzerne purs (B et L) et en association (BL) pour l'année expérimentale 2008.

Figure 4.15 : Analyse du rendement du blé cultivé seul (B) et en association (BL0 et BL1) conduit en travail superficiel (Ts) et en labour (La) pour l'année expérimentale 2008. Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

Figure 4.16 : Analyse des composantes du rendement blé pour les différents traitements de blé pur (B) et en association (BL0, BL1, BL2) pour les deux années expérimentales 2008 et 2009. Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Description des stades de développement clés dans STICS en fonction des stades physiologiques du blé d'hiver.

Tableau 2.2 : Liste des paramètres de STICS optimisés pour le blé et la fétuque.

Tableau 2.3 : Noms des différents traitements expérimentaux avec leurs symboles.

Tableau 2.4 : Récapitulatif des dates de mesures réalisées pour les deux années expérimentales (2007-08 et 2008-09) en fonction des stades de développement du blé. En 2008-09 les cases grisées représentent les variables non intégrées dans le manuscrit.

Tableau 3.1 : Résultats de paramétrage de STICS- cultures pures selon les critères statistiques l'écart quadratique moyen (RMSE) et l'efficacité du modèle (EF) entre les valeurs simulées et observées pour les variables plantes et sol pour les deux années expérimentales (1999-2000 et 2000-2001).

Tableau 3.2 (Table 1.) : Results of calibration of the STICS model for varietal parameters (wheat and fescue), for specific site context and radiative transfer parameters, based on experimental data for sole crops.

Tableau 3.3 (Table.2) : Root mean square error (RMSE) and efficiency (EF) of the model obtained for the plant and soil variables for wheat-fescue intercrops, for the two experimental years (1999 and 2000).

Tableau 3.4 (Table.3.) : Simulated results for the performance criteria of sole-crop wheat and wheat-fescue intercrops during the crop growth period and the interculture period for the two experimental years.

Tableau 4.1 : Récapitulatif des analyses statistiques des différentes variables plantes et sols selon l'effet de travail du sol (Tableau a), de la présence de la luzerne (Tableau b) et de l'effet du contrôle chimique (Tableau c) pour les deux années expérimentales (2007-08 et 2008-09). Le signe (-) signifie qu'il n'y a aucune différence statistique. Le signe (+) signifie qu'il y a une différence significative au seuil de 5%.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1. Etude bibliographique et problématique.....	5
1.1 Contexte et enjeux	5
1.1.1 Présentation des systèmes en semis direct sous couvert (SCV):.....	5
1.1.2 Quelles sont les fonctions remplies par la plante de couverture vivante dans un système en SCV ?	7
1.1.3 Qu'est ce que changent les associations dans le fonctionnement de l'agrosystème ?.....	9
1.1.4 Quelle gestion des associations de cultures ?.....	13
1.2 Problématique de la thèse :	15
1.3 Stratégie de recherche :	16
Chapitre 2. Matériels et méthodes	20
2.1 Approche de modélisation (cas blé*Fétuque)	20
2.1.1 Présentation du modèle STICS	20
2.1.2 Présentation des jeux de données expérimentales.....	23
2.1.3 Méthodes de paramétrage et d'évaluation du modèle	24
2.2 Approche expérimentale (Cas blé*luzerne).....	27
2.2.1 Conditions expérimentales	27
2.2.2 Dispositif et traitements expérimentaux.....	29
2.2.3 Itinéraire technique.....	32
2.2.4 Mesures réalisées.....	33
2.2.5 Indicateurs calculés	43
2.2.6 Analyses statistiques	45

Chapitre 3. Modélisation du fonctionnement de l'association

Blé * Fétuque.....	47
3.1 Evaluation de la qualité du paramétrage du modèle	47
3.1.1 Qualité de l'ajustement des paramètres plante.....	47
3.1.2 Qualité de l'ajustement des paramètres sol.....	49
3.2 Etude des performances agronomiques et environnementales de l'association blé * fétuque à l'échelle annuelle : Approche de modélisation.....	52
1. Introduction.....	54
2. Materials and methods	55
2.1. Model overview.....	55
2.2. Experimental data.....	57
2.3. Calibration and evaluation of the model	58
2.4. The scenarios simulated	59
3. Results....	61
3.1. Evaluation of the model	61
3.2. Performance of wheat-fescue intercropping, as assessed by the model.....	63
3.3. Analysis of four simulated scenarios for emergence dates over 35 climatic years	66
4. Discussion.....	69
4.1. Model performance	69
4.2. Effects of intercropping on plant growth	71
4.3. Effect of intercropping on water and nitrogen fluxes	73
4.4. Impact of the timing of the fescue growth cycle on the performance of the system	74
5. Conclusion.....	75

Chapitre 4. Approche expérimentale de l'association blé * luzerne...78

4.1 Evolution des biomasses de blé, luzerne et adventices.....	78
4.1.1 Evolution de la biomasse aérienne de la luzerne.....	78
4.1.2 Evolution de la biomasse aérienne du blé	83
4.1.3 Evolution de la biomasse aérienne d'aventices.....	84
4.1.4 Biomasses racinaires	86
4.1.5 Analyse de la productivité de l'association.....	88
4.2 Interception des ressources lumineuses.....	90
4.2.1 Structure aérienne des deux espèces associées	90
4.2.2 Absorption du rayonnement par les deux espèces associées :	95
4.3 Evolution du statut hydrique	97
4.3.1 Evolution du stock hydrique	97
4.3.2 Profils de teneur en eau du sol	100
4.4 Evolution du statut azoté	102
4.4.1 Disponibilité de l'azote dans le sol	102
4.4.2 Statut azoté des espèces en association	106
4.4.3 Fixation symbiotique de la luzerne	108
4.4.4 Dynamique d'accumulation de l'azote dans l'association.....	109
4.5 Impact de l'association sur l'élaboration du rendement du blé.....	112
4.6 Discussion.....	117
4.6.1 Effet du travail du sol sur le fonctionnement de l'association.....	117
4.6.2 Effet de la présence de la luzerne sur l'élaboration du rendement du blé	118
4.6.3 Evaluation de l'effet compétitif et facilitatif de l'insertion de la plante de couverture en association avec le blé	120
4.6.4 Efficacité des techniques pour piloter l'équilibre entre compétition et facilitation.....	124

Chapitre 5. Discussion générale et perspectives.....128

BIBLIOGRAPHIE

136

ANNEXES... ..

149

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'agriculture mondiale a connu au cours des dernières décennies une augmentation forte de sa productivité, nécessaire pour satisfaire les besoins nutritionnels d'une population mondiale en constante augmentation (Tilman *et al.*, 2002). Cette augmentation de la productivité a été le fruit d'une intensification de la conduite des systèmes de culture, à travers en particulier une utilisation massive des intrants (tels que les engrais et les produits phytosanitaires) associée à un recours intense à la mécanisation (Mignolet, 2003). Ces transformations ont cependant eu des conséquences néfastes significatives sur l'environnement (*Millenium Ecosystems Assessment*, 2005). Ainsi, on assiste notamment depuis quelques décennies à des pollutions importantes des eaux souterraines et de surface dues à l'utilisation des pesticides et des fertilisants (Glibert *et al.*, 2006 ; Csatho *et al.*, 2007 ; IFEN, 2007) et à une dégradation de la qualité des sols (baisse de la teneur en matière organique, altération des propriétés physico-chimiques) engendrant une baisse de fertilité des sols et des déclenchements de processus érosifs.

Face à ces pollutions et à la dégradation du patrimoine « sol », les chercheurs et les agriculteurs sont amenés à repenser leur mode de gestion des systèmes de culture et à concevoir des systèmes de culture innovants. L'objectif est désormais d'orienter les systèmes agricoles vers des systèmes plus respectueux de l'environnement qui répondent à la fois aux enjeux d'une agriculture durable (Meynard et Baudry, 2008) et aux enjeux de la sécurité alimentaire mondiale (Tilman *et al.*, 2002 ; Tubiana et jacquet, 2007).

La France, troisième consommateur mondial de produits phytosanitaires (Aubertot *et al.*, 2005), a accéléré depuis le Grenelle de l'environnement ses actions visant à limiter les pollutions issues des résidus de ces produits avec l'objectif de diminuer d'ici 2018 de moitié l'usage de ces intrants tout en accélérant la mise au point et la diffusion de méthodes alternatives de lutte contre les bioagresseurs (Ministère de l'écologie du développement et de l'aménagement durables, 2007). Pour répondre à ces objectifs, les agriculteurs seront donc confrontés à la nécessité de réduire leurs utilisations de pesticides et particulièrement d'herbicides. Toutefois, une réduction de l'usage d'herbicides entraînera un risque de perte de la maîtrise de la flore adventice qui reste un facteur sanitaire problématique pour tout type de culture (Valantin-Morison *et al.*, 2008).

Un des moyens proposé pour limiter l'utilisation d'herbicides est de substituer au contrôle chimique des adventices un contrôle biologique en augmentant l'usage des régulations biologiques par l'utilisation de plantes de couverture (Liebman and Dick, 1993 ; Teasdale, 1996 ; Carof *et al.*, 2007a, b). Ce type de système innovant appelé SCV (Semis direct sous couvert végétal) a été développé en premier lieu en zone tropicale depuis les années 1960 afin de palier aux problèmes d'érosion dans ces types de climat suite à la fragilisation des couches superficielles du sol, due à des interventions répétées d'outils de travail du sol. L'objectif principal de l'usage de ces plantes de couverture dans ce contexte était d'augmenter la couverture du sol par la biomasse végétale afin d'assurer une certaine protection du sol, tout en réduisant au maximum le travail du sol. Ces systèmes de culture ont conduit à l'émergence de l'agriculture de conservation (AC), qui obéit à trois principes fondamentaux : i) une perturbation minimale du sol, ii) le maintien d'une couverture végétale en surface et iii) une diversification des rotations des cultures (FAO, 2008). Ces systèmes innovants qui combinent techniques de travail du sol simplifié et plantes de couverture présentent de nombreuses externalités positives et sont susceptibles d'assurer certains services écologiques et agronomiques : étouffement des adventices, mais aussi protection du sol, augmentation de la biodiversité, de l'activité biologique et du taux de matière organique des sols, diminution de l'érosion (Lahmar *et al.*, 2006 ; Triomphe *et al.*, 2007 ; Teasdale *et al.*, 2007 ; De Tourdonnet *et al.*, 2008).

Généralement, cette plante de couverture est semée en période d'interculture mais il est possible d'amplifier les régulations biologiques dans le système en la maintenant vivante pendant la culture commerciale, conduisant ainsi à un système de cultures associées. La plante de couverture dans ce cas peut être soit pérenne, soit annuelle maintenue vivante après la récolte de la plante commerciale, ce qui permet une couverture permanente du sol. Toutefois, l'expérience issue des milieux tropicaux montre que la réussite de ces systèmes repose sur la capacité à maîtriser les relations de compétition et de facilitation qui s'exercent entre les cultures associées. La cohabitation spatiotemporelle de deux espèces peut entraîner une réduction du rendement de la culture de vente suite aux relations de compétition qui peuvent avoir lieu entre les deux espèces pour les ressources du milieu (White and Scott, 1991 ; Samarajeeva *et al.*, 2005 ; Carof *et al.*, 2007a). Par conséquent, il est nécessaire d'étudier les régulations biologiques à l'origine de cet

équilibre compétition/facilitation, ainsi que l'impact des techniques culturales susceptibles de déplacer cet équilibre, d'autant plus que peu de travaux de recherche ont été menés à ce jour sur ce sujet (Holland, 2004, le Roux *et al.*, 2008) surtout dans les régions de climat tempéré (de Tourdonnet *et al.*, 2006).

Ce travail de thèse mené au sein de l'UMR d'Agronomie INRA/AgroParisTech de Grignon vise à étudier la capacité de plantes de couverture associées avec un blé d'hiver cultivé en technique de travail du sol simplifié (TCS) ou en labour à améliorer les performances agronomiques et environnementales du système et à tester différentes modalités de gestion de la plante de couverture afin d'améliorer le fonctionnement de l'association de culture. Cette étude est réalisée sur une échelle annuelle, dans le climat des régions tempérées. Le sujet de la thèse s'inscrit dans un objectif général d'approfondissement des connaissances sur les interactions (compétition et/ou facilitation) entre les deux espèces en associations pour les ressources du milieu et plus particulièrement pour la lumière, l'eau et l'azote, ainsi que d'évaluation de l'impact du maintien de la plante de couverture vivante en période d'interculture sur les performances du système.

Le manuscrit s'organise autour de cinq chapitres. Un premier chapitre présentera une analyse bibliographique autour des connaissances actuelles sur l'association d'une plante de couverture et d'une culture de vente, débouchant sur la problématique de la thèse et les hypothèses que nous avons testées. Le second chapitre sera consacré à la présentation des deux approches complémentaires que l'on a adoptées pour répondre aux objectifs de la thèse : l'approche de modélisation et l'approche expérimentale. Les résultats obtenus concernant l'étude du fonctionnement de l'association « blé- Poacée » (cas de la fétuque) ainsi que les résultats de stratégies de conduite de la plante de couverture testées grâce à l'approche de modélisation seront exposés dans le troisième chapitre, tandis que les résultats relatifs à l'étude du fonctionnement de l'association « blé- Légumineuse » (cas de la luzerne) grâce à l'approche expérimentale fera l'objet du quatrième chapitre. Enfin, une synthèse générale des résultats obtenus par les deux approches suivie par l'analyse des limites et des perspectives de ce travail de recherche sera présentée dans un dernier chapitre.

Chapitre 1.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE & PROBLEMATIQUE

Chapitre 1. Etude bibliographique et problématique

1.1 Contexte et enjeux

1.1.1 Présentation des systèmes en semis direct sous couvert (SCV):

Les SCV regroupent les systèmes de culture dans lesquels la plante commerciale est semée directement au travers d'une couverture végétale, morte ou vivante. Cette couverture peut être constituée de résidus des cultures commerciales qui ne sont plus enfouis par le travail du sol ou bien d'une plante de couverture spécifiquement semée à cet effet et non récoltée, qui joue le rôle d'une « plante de service » dans l'agrosystème. En conditions tropicales, où ces systèmes de culture sont largement répandus pour leur rôle protecteur du sol contre les processus d'érosion et la perte de fertilité des sols (Scopel *et al.*, 2005), on distingue trois types de SCV selon la nature de la couverture végétale (Séguy et Bouzinac, 1998 ; Teasdale, 2003) :

- *Les systèmes avec une couverture morte :*

La couverture du sol est assurée par des résidus de culture qui proviennent soit de la culture commerciale précédente soit d'une culture implantée en été (en interculture) et détruite avant le semis de la culture principale. La destruction de la plante de couverture est assurée par l'utilisation d'herbicide pour laisser la place à la culture principale.

- *Les systèmes avec une couverture vivante ou « living mulch »:*

La couverture du sol est cultivée en même temps que la culture commerciale sur une période significative de leurs croissances, conduisant ainsi à un système de cultures associées. La plante de couverture dans ce système est présente en permanence sur la parcelle. Le développement du couvert est freiné avant le semis de la culture commerciale par des herbicides ou des moyens mécaniques pour réduire sa compétition vis-à-vis de la culture principale. A la récolte de la plante commerciale, la plante de couverture est maintenue vivante et sa croissance reprend activement en période d'interculture.

- *Les systèmes mixtes*

Ces systèmes sont construits sur des successions annuelles comprenant deux cultures commerciales (apportant une récolte de grain et une production de biomasse végétale importante) associées à une culture fourragère qui est aussi exploitée qui tient aussi le rôle de couverture. Les cultures principales sont récoltées pendant la saison des pluies tandis que les cultures fourragères sont pâturées par les bétails durant la saison sèche.

En régions tempérées, notamment en France, ce type de système reste encore peu étudié malgré l'existence de quelques études récentes (Carof, 2006, 2007a, b, c ; Lahmar *et al.*, 2006 ; Labreuche *et al.*, 2007 ; Picard *et al.*, in press), et marginal dans la pratique (de Tourdonnet *et al.*, 2006). Les techniques sans labour (TSL) quant à elles ont connu un développement rapide : ainsi en 2006, un tiers des terres cultivées en cultures annuelles en France ont été conduites sur des terres non retournées contre 21% en 2000 (Rabaud, 2004). Cette forte tendance à la diminution du travail du sol est liée principalement à la performance économique de ces systèmes: diminution du temps de travail et du carburant nécessaires, ainsi que des charges de mécanisation (de Tourdonnet *et al.*, 2006). Toutefois, si ces systèmes présentent de nombreuses externalités positives (augmentation de la biodiversité, de l'activité biologique et du taux de matière organique des sols, diminution de l'érosion, stockage du carbone (Tebrügge and Düring, 1999 ; Wander and Yang, 2000 ; Labreuche *et al.*, 2007) ils restent néanmoins souvent dépendants de l'utilisation de pesticides et particulièrement d'herbicides, ce qui remet en cause leur durabilité (Chapelle-Barry, 2008). L'insertion de la plante de couverture dans ces systèmes peut permettre, sous nos climats, de substituer le contrôle chimique des adventices par le contrôle biologique (de Tourdonnet *et al.*, 2008).

L'enjeu de ce travail de thèse est de fournir des éléments de réponse complémentaires aux travaux antérieurs par la compréhension du fonctionnement des systèmes sous couvert végétal afin de contribuer à concevoir et à évaluer ces systèmes pratiquement inexistantes en France.

L'étude bibliographique sur ce système est séparée en trois parties. La première partie concerne l'analyse des fonctions agronomiques et environnementales remplies par la plante de couverture dans un système fondé sur la réduction de travail du sol. La deuxième partie présente l'impact d'une association de cultures sur le fonctionnement de l'agrosystème ; il nous paraît en effet important de ne pas limiter notre approche bibliographique aux associations avec plante de service, en explorant également la littérature sur les cultures commerciales associées. La troisième partie traite de la maîtrise technique des systèmes qui associent une plante de couverture avec une plante commerciale.

1.1.2 Quelles sont les fonctions remplies par la plante de couverture vivante dans un système en SCV ?

L'introduction d'une plante de couverture présente des intérêts multiples pour le fonctionnement de l'agrosystème. Les plantes de couverture assurent une couverture permanente du sol, luttant ainsi contre la dégradation des sols (Lal *et al.*, 1991). Elles contribuent ainsi à limiter les processus d'érosion en protégeant les agrégats du sol en surface de l'action déstabilisante des gouttes de pluies et en diminuant très fortement le transport de particules solides par ruissellement (Gallien, 1995 ; Kwaad *et al.*, 1998 ; Doring *et al.*, 2005). Elle permet aussi l'accroissement de la stabilité structurale des sols grâce à la création d'une porosité biologique (Dexter, 1991) par l'action de ses racines et par l'apport de matières organiques au sol, source de carbone nécessaire à la croissance des micro-organismes (Angers et Caron, 1998). Cela permet de stimuler et d'améliorer l'activité biologique des sols (creusement de galeries) ce qui participe également à l'augmentation de la porosité (Kushwaha *et al.*, 2000). Carof, (2007 c) a observé de larges pores fonctionnels et un grand nombre de tubules en présence d'une plante de couverture en non travail du sol (semis direct), il a attribué cette propriété à l'activité racinaire ce qui permet d'une part la stabilisation des agrégats du sol et d'autre part une meilleure infiltration des eaux de surface (Triomphe, 1996).

Il est généralement admis aussi dans les conditions tropicales que la présence d'une plante de couverture du sol en l'absence de travail du sol permet à long terme la séquestration accrue du carbone organique au niveau des horizons superficiels (Triomphe, 1999 ; Scopel *et al.*, 2005). Six *et al.* (2002) montrent qu'en milieu tropical, le stockage moyen de carbone est de 325 Kg C. ha⁻¹. an⁻¹. Ce stockage est lié essentiellement à une diminution de la minéralisation en non travail du sol combiné à l'apport d'amendement organique par les exsudats racinaires et les résidus de la plante de couverture (Fortin *et al.*, 1996).

Une plante de couverture permanente permet une absorption efficace de l'azote disponible dans le sol jouant ainsi le rôle de plante piège à nitrate dès la récolte de la plante commerciale alors que les cultures intermédiaires des systèmes conventionnels nécessitent un délai pour leur implantation et leur développement (Dorsainvil, 2002). Hartwig and Ammon (2002) mentionnent que les plantes de couverture légumineuses peuvent fixer l'azote, dont une partie sera disponible à la culture suivante, et permettent ainsi d'améliorer la gestion de la

fertilisation azotée pour la culture suivante, même si leur capacité d'absorption d'azote minéral est généralement plus faible que d'autres espèces comme par exemple les crucifères (Mueller and Thorup-Kristensen, 2001 ; Justes *et al.*, 2009). Les plantes de couverture peuvent agir aussi comme une « pompe biologique » grâce au recyclage et au transfert des éléments nutritifs des horizons profonds vers les horizons de surface par l'intermédiaire de leurs système racinaire, ce qui les rend plus accessibles à la culture commerciale (Capillon and Séguy, 2002).

L'insertion de la plante de couverture peut également permettre de réduire le développement des adventices (Liebman and Dick, 1993 ; Teasdale, 1996). En occupant la même niche écologique que les adventices, les plantes de couverture sont capables de modifier le milieu pour le rendre défavorable à leur développement (Teasdale *et al.*, 2007). La plante de couverture a donc la capacité d'étouffer les adventices en exerçant sur elles une compétition pour les ressources en lumière, en eau et en éléments minéraux (den Hollander *et al.*, 2007), rendant leurs conditions de germination et de croissance défavorables. Cet effet compétitif est dépendant de la nature du couvert (Carof *et al.*, 2007b). Le choix variétal de la plante de couverture s'avère donc déterminant de sa capacité à réduire la flore adventice. Valantin-Morison *et al.* (2008) montrent qu'il existe des espèces de plante plus ou moins « étouffantes » caractérisées par une croissance rapide, un port étalé ou haut qui monte plus vite avec de larges feuilles permettant une fermeture plus ou moins rapide du couvert ce qui défavorise la croissance des adventices. Toutefois le succès d'une plante de couverture pour éliminer les adventices dépend aussi des espèces d'adventices présentes sur la parcelle (Hiltbrunner *et al.*, 2007).

Certaines plantes de couverture présentent aussi un effet dépressif sur les adventices grâce à l'allélopathie en produisant des composés polyphénoliques et des exsudats racinaires toxiques pour la croissance des adventices. Plusieurs études montrent que l'effet allélopathique de certaines plantes comme par exemple le sorgho et l'orge (Kruidhof, 2008 ; Alsaadawi and Dayan, 2009 ; Kremer et Ben-Hammouda, 2009), peut être très efficace quant à la réduction du développement des mauvaises herbes. Walters et Young (2008) en testant le seigle comme couvert végétal vivant dans un système avec un travail minimum du sol, montrent que grâce à l'effet allélopathique, la biomasse de l'Amarante (considérée comme une adventice dans le système) est réduite d'une manière comparable à celle d'un système désherbé sans plante de

couverture. Cependant, ce phénomène reste difficile à distinguer des mécanismes de la compétition pour les ressources du milieu.

Malgré les avantages liés à l'utilisation des plantes de couverture pour la lutte contre les adventices, elles sont connues pour leur manque de sélectivité entre les adventices et la plante commerciale (Teasdale, 2003). Cela peut entraîner une limitation de la croissance de cette dernière et induire des pertes de rendement de la culture commerciale, même si quelques études montrent que ce n'est pas toujours le cas (Ateh and Doll, 1996). Picard *et al.*, (in press) montrent que la réduction du rendement d'un blé en présence d'une fétuque par rapport à une culture de blé pur est faible (entre 5 et 10%). den Hollander *et al.* (2007) montrent que le choix de la plante de couverture est un aspect important pour limiter ces pertes de rendement.

1.1.3 Qu'est ce que changent les associations dans le fonctionnement de l'agrosystème ?

Les associations d'espèces sont la culture simultanée de deux espèces ou plus sur la même surface pendant une période significative de leur croissance mais sans nécessairement être semées et récoltées en même temps (Willey, 1979). L'association de culture peut induire deux types d'interaction (Vandermeer, 1989) : la compétition et la facilitation. La compétition d'une plante sur une autre a lieu quand une espèce modifie d'une façon négative l'environnement pour la seconde : effet d'ombrage, réduction des ressources du milieu... La facilitation intervient lorsque le changement se fait d'une manière positive en améliorant les conditions du milieu pour la deuxième espèce : réduction des maladies, des adventices, accroissement des ressources...(Bruno *et al.*, 2003). Ces deux types d'interactions interviennent dans la productivité de l'association de culture, en réduisant ou en améliorant la productivité de l'association des deux espèces.

Les phénomènes de compétition peuvent induire un gain de rendement lorsque les deux espèces en association utilisent des niches différentes des ressources du milieu (Anil *et al.*, 1998) ou/et lorsqu'il existe une complémentarité d'utilisation de ces ressources entre les deux espèces (Willey, 1979). Ceci a été observé dans différents travaux d'une association d'une céréale avec une légumineuse (Jensen and Hauggaard-Nielsen 2003 ; Stevenson and van Kessel, 1996) qui montrent une plus grande stabilité des rendements en association en comparaison avec la légumineuse cultivée seule. Toutefois, dans le cas d'une association de

culture avec une plante de couverture, il est généralement démontré que le rendement de la plante commerciale est pénalisé. Hilbrunner *et al.* (2007a) montrent que la réduction du rendement d'un blé associé à différentes espèces de plante de couverture peut dépasser 60% lorsque la compétition pour les ressources est intense. La même tendance a été rapportée par den Hollander *et al.* (2007) dans la réduction du rendement du poireau en association avec le trèfle et par Carof *et al.* (2007a) avec une réduction du rendement du blé associé à différentes espèces de graminées et de légumineuses. Ceci peut mettre en péril la durabilité économique de ces systèmes. Toutefois, grâce aux phénomènes de facilitation, il est possible d'améliorer la performance agronomique de ces associations de culture en réduisant par exemple la prolifération des adventices et les attaques par les maladies (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001a).

Quel que soit le type d'association, les différents travaux d'expérimentation menés sur l'étude du fonctionnement des associations de cultures montrent qu'en général il y a une meilleure valorisation des ressources du milieu en association par rapport aux cultures pures, conduisant à une productivité supérieure en termes de biomasse totale produite par l'association (Jensen 1996 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2003 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009). Cela est dû en partie à une meilleure efficacité d'interception de rayonnement par l'association en comparaison avec les cultures pures. Différents travaux (Tsubo *et al.*, 2001 ; Tsubo and walker, 2004 ; Poggio, 2005) montrent que cette plus grande interception de la lumière provient principalement d'une complémentarité de l'architecture aérienne des deux espèces et d'une densité globale plus élevée en association qu'en culture pure ce qui permet une fermeture rapide du couvert. Il a été démontré par exemple pour les associations blé-pois que la distribution verticale de la surface foliaire était différente entre les deux espèces pour une hauteur identique : la céréale occupant généralement la strate supérieure présente des feuilles longues et érigée en association alors que le pois avec un port plus étalé et des feuilles plus larges occupe la strate inférieure. Cela permet une meilleure couverture du sol et surtout de favoriser la productivité du blé en lui permettant un accès plus facile à la captation de l'énergie solaire par rapport au pois en association (Baccar, 2007). La compétition aérienne a été mise en avant par différents travaux comme première cause de diminution du rendement des cultures en association, plus particulièrement dans le cas d'une association de culture avec une plante de couverture (Carof *et al.*, 2007b ; den Hollander *et al.*, 2007). Corre-Hellou, (2005) montre que la dominance d'une culture par rapport à une autre dépend de la

distribution et de l'évolution de l'architecture aérienne des deux espèces en association ainsi que de leurs vitesses de croissance au cours du cycle.

Cette meilleure interception de rayonnement en association de culture est souvent citée comme la première cause de réduction des adventices (Tsubo *et al.*, 2001 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001 ; Tsubo et Walker, 2004 ; Poggio, 2005 ; Oliosio 2005 ; den Hollander *et al.*, 2007; Hilbrunner *et al.*, 2007 ; Bilalis *et al.*, 2008) considérée comme un des avantages de l'association. Christoffoleti *et al.*, (2007) montrent que l'étouffement des adventices en association peut être lié à l'installation des conditions défavorables soit à la germination, soit à la croissance et à l'émergence des adventices. En effet, par leur pouvoir couvrant, les plantes associées filtrent les radiations qui arrivent au sol ce qui modifie la qualité et la quantité de la lumière reçue par les adventices, et également l'amplitude thermique nécessaire à l'émergence des adventices (Christoffoleti *et al.*, 2007). Certains auteurs attribuent aussi cette réduction de pression des adventices à un effet d'allélopathie observé dans certains cas d'association de culture (White *et al.*, 1989 cité par Banik *et al.*, 2006; Liebman and Dyck, 1993). Par exemple l'allélopathie est le facteur expliquant le mieux la réduction d'infection du pois et de la fève par *Orobanche crenata* en culture associée à une céréale grâce à la sécrétion de substances allélopathiques inhibant la germination d'*O. crenata* (Fernandez-Aparicio *et al.*, 2006).

Les associations de culture peuvent aussi réduire le développement des adventices en réduisant la ressource en azote disponible dans le sol grâce à une meilleure complémentarité généralement observée pour l'utilisation de cette ressource en association par rapport aux cultures pures (Corre-Hellou *et al.*, 2004). Hauggaard-Nielsen *et al.*, (2001) montrent que l'exploitation optimale des ressources en azote du sol par l'association diminue l'azote disponible pour les adventices et par conséquent leur croissance. Cette complémentarité a lieu lorsque les deux espèces en association utilisent différemment cette ressource, ou lorsqu'elles les utilisent à des périodes différentes de leur cycle de croissance. L'association d'une céréale avec une légumineuse par exemple est présentée dans différents travaux comme une association très compétitive vis-à-vis de la ressource en azote (Liebman and Dick, 1993 ; Bulson *et al.*, 1997; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001). La céréale très compétitive pour l'azote minéral du sol absorbe prioritairement cette ressource forçant ainsi la légumineuse à assurer ses besoins azotés par la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique ce qui expliquerait à

la fois la réduction de la disponibilité de cette ressource pour les adventices et le gain en rendement (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001). Cela montre l'importance des légumineuses dans l'approvisionnement du milieu en azote grâce à la fixation symbiotique (Maingi *et al.*, 2001). Un tel avantage pourrait avoir les mêmes répercussions pour une association de culture avec une plante de couverture type légumineuse. Toutefois, Martin *et al.*, (1999) montrent que la plante de couverture peut concurrencer la plante commerciale pour l'absorption de l'azote, ce qui réduit ainsi son rendement.

Cette complémentarité observée dans le cas d'une association d'une céréale et d'une légumineuse peut également provenir d'une différence dans les profondeurs et les densités d'enracinement des deux espèces liée à un écart de demande qui conditionne leurs accès à cette ressource (Corre-Hellou and Crozat, 2004 ; Corre-Hellou, 2005). Dans une association pois-orge, les céréales caractérisées par un système racinaire dense, profond et au développement rapide, sont ainsi plus concurrentielles que les légumineuses vis-à-vis de l'azote minéral du sol (Corre-Hellou *et al.*, 2007). Le choix de l'espèce de la plante de couverture en termes de croissance aérienne pour l'interception de rayonnement et racinaire pour l'acquisition de l'azote apparaît donc primordial pour la conduite des SCV.

L'association de culture est proposée aussi comme un moyen de réduire les risques de pertes d'azote minéral par lessivage (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2003) grâce à une meilleure valorisation de la ressource en azote par rapport aux cultures pures. La présence de la plante de couverture après la récolte de la plante commerciale permet aussi de réduire le stock d'azote susceptible d'être lessivé (Hartwig and Ammon, 2002) ce qui met en valeur l'avantage de l'utilisation des couverts végétaux en association avec une culture commerciale sur ce problème environnemental majeur. Toutefois, peu de travaux se sont intéressés sur l'impact de la plante de couverture sur le lessivage d'azote.

L'impact de l'association de culture sur les ressources en eau a été aussi peu étudié en zone tempérée. Szumigalski and Acker (2008) montrent que pour l'association blé-canola, l'efficacité d'utilisation de l'eau dépasse légèrement celle des cultures pures. Ceci a été attribué dans le cas d'une association de blé-trèfle blanc à l'augmentation de la transpiration des plantes suite à l'augmentation de la biomasse totale produite en association ce qui entraîne une évapotranspiration plus élevée que celle des cultures pures (Thorsted *et al.*, 2006c).

Toutefois, l'impact de l'association sur la réduction des réserves en eau dépend certainement des conditions du milieu.

1.1.4 Quelle gestion des associations de cultures ?

Les interactions au sein de l'association de culture sont donc complexes. Dans le cas d'une association d'une plante de couverture avec une culture commerciale il existe un double enjeu de gestion : assurer une production satisfaisante de la plante commerciale et maintenir vivante la plante de couverture pour les services écologiques qu'elle peut apporter au système. Ceci ne peut être réalisé que si les relations de compétition sur les ressources du milieu (lumière, eau et nutriments) qui s'exercent entre les deux espèces en association sont maîtrisées (Carof *et al.*, 2007b) et orientées au détriment des adventices.

Différents travaux montrent que le choix variétal de la plante de couverture est déterminant pour la réussite de ce système (Ross *et al.*, 2001 ; Bergkvist, 2003). den Hollander *et al.*, (2007) en testant différents variétés de trèfle comme couverts végétaux, concluent que la sélection selon les traits morphologiques et physiologiques de l'espèce conduit à une variabilité importante de la durée de la période de leur croissance, de leur capacité à couvrir le sol, de leur capacité à accumuler de la biomasse et de l'azote. Buhler *et al.*, (2001) montrent aussi que le choix de la plante de couverture doit se faire sur la base de leur vitesse de croissance, dont le pic doit coïncider avec la croissance des adventices mais pas avec celle de la plante commerciale pour ne pas pénaliser son rendement.

Plusieurs travaux montrent aussi qu'il est possible d'éviter cette compétition sur la plante commerciale en jouant sur les décalages des cycles de croissance entre culture commerciale et plante de couverture. Picard *et al.*, (in press) montrent que la faible réduction du rendement du blé semé en même temps que la fétuque est due à l'émergence plus tardive de la fétuque de quatre mois après celle de la plante commerciale. Des résultats similaires ont été obtenus sur des systèmes avec couverture végétale en décalant la date de semis de la plante commerciale et la plante de couverture. Lawson *et al.*, (2007) ont testé différents intervalles de date de semis entre le maïs et deux types de couverts (le Canavalia et le pois mascate) et montrent que dans tous les cas, le semis du couvert un mois après celui de la plante commerciale permet une réduction efficace des adventices et le maintien d'un bon rendement en grain du maïs.

Le contrôle mécanique et/ou chimique de la plante de couverture constitue un autre moyen pour réduire la compétition exercée sur la plante commerciale vis-à-vis des ressources du milieu (Teasdale and Shirley 1998 ; Teasdale, 1996 ; Thorsted *et al.*, 2006a; Carof *et al.*, 2007b, Hiltbrunner *et al.*, 2007). Il est en effet possible de broyer ou de faucher mécaniquement le couvert ou d'utiliser des herbicides sélectifs à des doses non létales pour freiner la croissance du couvert sans forcément le tuer à certaines dates clés du cycle (De Tourdonnet *et al.*, 2008). Carof *et al.*, (2007a) montrent qu'en l'absence de contrôle chimique de la plante de couverture, le rendement du blé diminue significativement à cause de la prolifération du couvert et d'un manque de compétition exercé sur les adventices. Cette diminution varie de 35 à 81% selon l'espèce (poacée ou légumineuse) de plante de couverture. Un contrôle chimique à des doses non létales de la plante de couverture permet de réduire ces pertes de rendement dans une fourchette de 12 à 40% selon l'espèce. La gestion de la plante de couverture apparaît donc comme un point clé pour la réussite de ces systèmes. Par exemple, Thorsted *et al.*, (2006a) montrent que l'augmentation des fréquences de fauchage du trèfle entre les lignes du blé augmente le rendement du blé et la teneur en azote des grains.

Toutefois, l'optimisation de ces techniques de gestion de la plante de couverture ne peut se faire que si les connaissances sur les différentes interactions (compétition / facilitation) qui ont lieu entre les deux espèces en association sont cernées. Devant la complexité de ces interactions, et la variabilité des réponses en fonction des contextes pédoclimatiques, le recours à la modélisation est une méthode moins coûteuse et moins longue que l'expérimentation, qui permet de comprendre le fonctionnement de l'association et de tester des stratégies de gestion de la plante de couverture.

De nombreux travaux de recherche ont utilisé des modèles de simulation de fonctionnement des associations de culture (Baumann *et al.*, 2002a ; Berntsen *et al.*, 2004; Tsubo *et al.*, 2005a; Corre-Hellou *et al.*, 2007 ; Whitmore and Schröder, 2007 ; Corre-Hellou *et al.*, 2009; Launay *et al.*, 2009). La modélisation a été utilisée dans ces travaux pour plusieurs types de finalité : i) quantifier les processus qui interviennent dans les mécanismes de facilitation et de compétition pour la lumière, eau et azote, ii) accéder à des variables difficilement mesurables par expérimentation afin d'identifier les processus responsables de la mise en place de ces interactions et enfin iii) tester des scénarios de conduite de l'association afin d'améliorer son fonctionnement.

1.2 Problématique de la thèse :

D'après la synthèse bibliographique qui précède, l'insertion d'une plante de couverture en association avec une plante commerciale modifie le fonctionnement de l'agrosystème par les différentes interactions qu'elle est susceptible d'apporter au système. L'enjeu principal pour la réussite d'un tel système est de réduire la compétition du couvert sur les ressources du milieu par rapport à la plante commerciale en la déplaçant vers les adventices. Cela est possible mais dépend fortement du choix et de la conduite technique de la plante de couverture. Ces systèmes encore peu développés en France et en régions tempérées font donc l'objet de notre étude. Le blé étant la céréale principale cultivée en France, l'évaluation du système blé-plante de couverture présente un enjeu fort.

Dans la littérature internationale, beaucoup de travaux ont porté sur l'étude des interactions (compétition ou facilitations) dans le cas d'une association de culture entre deux plantes récoltées généralement implantées sur des sols travaillés. Toutefois, très peu d'études se sont intéressées à des systèmes conduits avec les techniques de travail du sol simplifié qui génèrent des conditions dans lesquelles ces phénomènes peuvent être modifiés (via la dynamique d'enracinement par exemple) et dans lesquels la pression accrue des adventices renforce l'intérêt d'utiliser des plantes de couverture pour réduire cette pression. Se pose alors la question de l'impact du changement du contexte de travail du sol sur le fonctionnement de l'association de culture, particulièrement dans le cas de l'association entre une culture commerciale et une plante qui n'est pas récoltée mais assure d'autres fonctions agro-écologiques.

Comme on l'a déjà évoqué la réussite de l'association de culture avec une plante de couverture ne peut se faire que si la compétition pour les ressources entre les deux espèces est limitée. Les différents travaux qui ont porté sur l'étude de cet aspect mentionnent que le contrôle de la plante de couverture reste la technique la plus efficace pour améliorer les performances agronomiques du système. Ce point nous a encouragé à tester différentes dates de contrôles de la biomasse de la plante de couverture à certains stades clés de la croissance du blé afin de situer les périodes durant lesquelles il faudra limiter la compétition.

Notre travail repose sur les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : L'insertion d'une plante de couverture en association avec un blé modifie les dynamiques de croissance des peuplements dans le système blé- plante de couverture -adventices ce qui détermine, *in fine*, le rendement du blé.

Hypothèse 2 : L'insertion d'une plante de couverture en association avec un blé modifie les ressources du milieu (lumière, eau et azote), ce qui peut affecter la croissance du blé (compétition) et des adventices (facilitation) mais également accroître la quantité de ressources disponibles (facilitation). Par ailleurs, après la récolte du blé, la plante de couverture peut continuer à exercer une compétition sur les adventices et modifier les flux d'eau de d'azote dans le sol, limitant les risques de lessivage du nitrate. L'équilibre entre aspects négatifs (compétition) et positifs (facilitation et prévention de la pollution) dépend des dynamiques de croissance en biomasse aérienne, racinaire et de l'espèce de la plante de couverture.

Hypothèse 3 : L'équilibre entre les relations de compétition et de facilitation peut être modifié sous l'effet de certaines techniques culturales : le type de travail du sol, la date de semis de la plante de couverture et la gestion de sa biomasse aérienne par broyage ou utilisation d'herbicides non létaux.

1.3 Stratégie de recherche :

Les processus de compétition et de facilitation mentionnés dans les hypothèses de recherche ont des impacts sur le fonctionnement de l'agrosystème essentiellement à court terme, que ce soit pendant la phase de culture associée entre le blé et la plante de couverture ou pendant la phase d'interculture qui suit. Si dans certains cas, il est nécessaire d'évaluer les SCV sur des échelles de temps pluriannuelle (Maltas *et al.*, 2007) pour prendre en compte certains processus comme l'accumulation de la matière organique ou la création de la porosité biologique par exemple, nous nous sommes restreint pour notre étude à un suivi sur un pas de temps plus court qui s'étale sur la période culturale (association) et sur la période

d'interculture (couvert maintenu vivant après la récolte). Cela ne nous permettra pas d'étudier les effets à moyen et long termes de l'insertion d'une plante de couverture, sur les populations d'adventices ou les flux d'azote par exemple, mais devrait nous permettre de tester les trois hypothèses mentionnées dans le paragraphe précédent.

Un autre choix de la thèse est de coupler deux approches complémentaires pour cette étude : l'expérimentation et la modélisation. L'expérimentation doit permettre (i) d'évaluer directement la compétition pour la lumière entre le blé et la plante de couverture ainsi que la quantité de rayonnement disponible au niveau du sol pour la croissance des plantules d'adventices ; (ii) de mesurer l'évolution des stocks d'azote et d'eau dans les différents compartiments du système ; (iii) de mesurer les dynamiques de croissance en biomasse aérienne et racinaire ainsi que les composantes du rendement du blé. La modélisation doit permettre (i) d'accéder à des variables difficilement mesurables comme les flux d'azote ou d'eau entre les différents compartiments du système ; (ii) d'affiner l'étude des interactions entre lumière, azote et eau ; (iii) de gagner en généralité en testant par simulation d'autres scénarios climatiques ou d'autres techniques culturales que ceux qui auront été testés expérimentalement.

Pour la modélisation, nous avons travaillé sur des données expérimentales déjà disponibles réalisées sur une association blé-poacée (fétuque). Cette expérimentation a été menée à Grignon en 1999-2000 et 2000-2001 dans le cadre de la thèse de Mouna Ghiloufi, ce qui nous a permis de valoriser cette base de données dans notre travail de modélisation. Pour réaliser ce travail de modélisation, le choix s'est porté sur le modèle STICS Cultures associées. Ce modèle a été déjà testé dans différents travaux qui portent sur les cultures associées (Brisson *et al.*, 2004 ; Corre-Hellou *et al.*, 2009, Launay *et al.*, 2009) et paramétré pour des cultures de blé, de fétuque. Cela nous a permis de s'affranchir du paramétrage complet de ces deux cultures qui constituent notre association. Ce modèle permet de simuler la compétition entre les espèces associées pour la lumière, eau et azote avec un pas de temps journalier et de tester par simulation différentes stratégies de conduite technique et divers scénarios climatiques ce qui correspond bien aux objectifs de notre étude :

- Etudier les interactions entre eau – azote – lumière à partir de l'analyse des relations offre / demande au cours du cycle et de leurs conséquences sur les processus impliqués et certains indicateurs (indicateur de nutrition azotée...).

- Tester la sensibilité de l'équilibre compétition / facilitation aux facteurs climatiques en réalisant des simulations sur une série de scénarios climatiques.
- Tester une modalité technique : la date de semis de la plante de couverture afin d'évaluer son impact sur les indicateurs clés de performance du système.

Le travail expérimental repose sur une série d'expérimentations menées en plein champ à Grignon en 2007-2008 et en 2008-2009 sur une association blé - légumineuse (luzerne). Pour le choix de la plante de couverture nous avons opté pour l'insertion d'une légumineuse afin de tester une espèce différente de celle qui a été déjà testée par modélisation en enrichissant ainsi la gamme du choix spécifique pour notre étude. De plus, les associations céréales – légumineuses apparaissent dans la littérature comme les plus efficaces pour favoriser certains processus de facilitation comme l'accroissement des ressources azotées (par fixation symbiotique) et l'étouffement des adventices.

Pour répondre à l'objectif d'étudier ces processus dans différents contextes de travail du sol, nous avons mis en place cet essai sur une parcelle conduite sous deux modalités de travail du sol (travail superficiel et labour) depuis plus de trente ans. Pour répondre à l'objectif d'évaluer l'impact de la gestion technique sur l'équilibre compétition / facilitation, nous avons choisi de nous centrer sur les modalités de contrôle de la plante de couverture à l'aide d'un herbicide non létal appliqué à faible dose afin de ralentir sa croissance sans la tuer.

Chapitre 2.

MATERIELS & METHODES

Chapitre 2. Matériels et méthodes

2.1 Approche de modélisation (cas blé*Fétuque)

2.1.1 Présentation du modèle STICS

Le modèle STICS-culture pure a été créé en 1996, il simule le fonctionnement des cultures à pas de temps journalier, à l'échelle de la parcelle agricole. Ses variables d'entrées concernent le climat, le sol et le système de culture. Le système de culture est défini par un peuplement de plantes (espèce et variété) et l'itinéraire technique appliqué dans la parcelle. Ses variables de sorties concernent la production (quantité et qualité) et l'environnement (flux d'eau et d'azote). Les processus simulés sont la croissance et le développement de la culture, ainsi que les bilans hydriques et azotés. La culture est représentée par sa biomasse aérienne et sa teneur en azote, son indice foliaire ainsi que le nombre et la biomasse des organes récoltés (Brisson *et al.*, 2009). STICS permet de simuler le bilan hydrique, carboné et azoté en intégrant les effets de stress hydrique et azoté sur le fonctionnement des cultures.

STICS a été développé pour simuler différentes cultures et itinéraires techniques, sans que sa structure globale soit modifiée. Cette généricité est facilitée par l'organisation du modèle en modules faisant appel à un certain nombre de sous-modules traitant de mécanismes spécifiques (Figure 2.1).

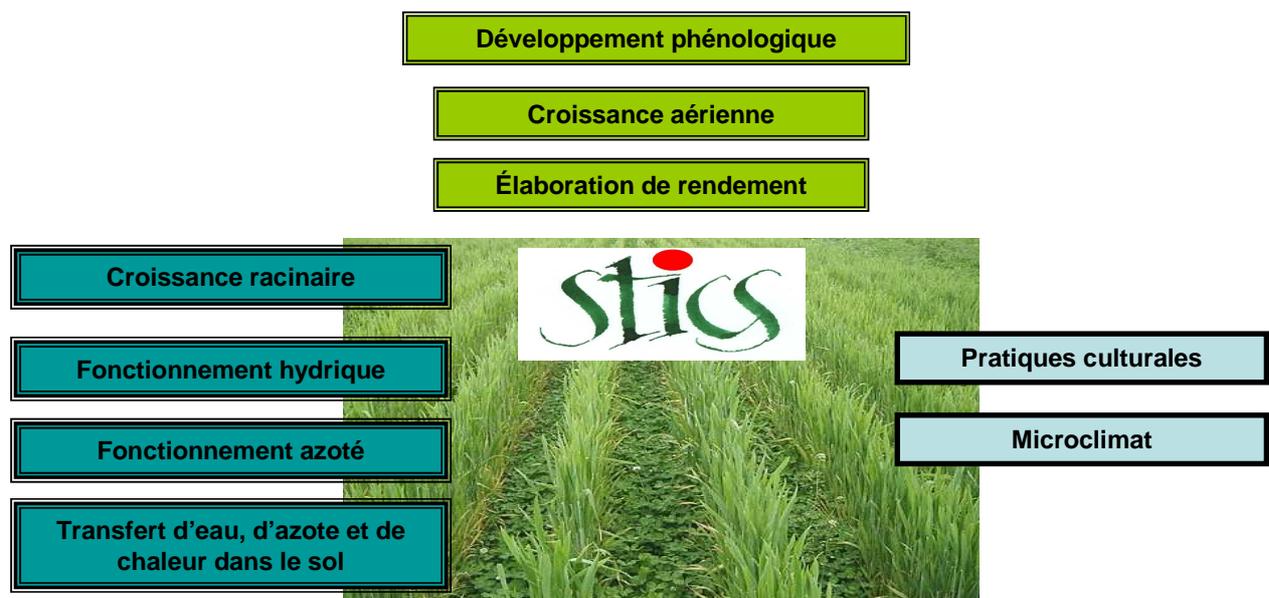


Figure 2.1 : Schéma simplifié d'organisation des différents modules du modèle de culture STICS.

Ces modules peuvent être classés en trois groupes : un premier ensemble de trois modules traite de l'écophysiologie des parties aériennes des plantes (modules de développement, croissance aérienne, élaboration du rendement) ; un second ensemble de quatre modules concerne le fonctionnement du sol en interaction avec les parties souterraines des plantes (modules croissance racinaire, bilan hydrique, bilan azoté, transferts) ; un troisième ensemble permet la gestion des interactions entre les techniques culturales et le système sol - culture, qu'il s'agisse des apports d'eau, d'engrais ou du microclimat (Brisson *et al.*, 2009). Il existe également des options de choix de formalisme pour chaque module qui permet d'adapter l'utilisation du modèle à des systèmes de culture variés.

La version STICS-Cultures associées est une extension de STICS-culture pure qui considère le système non pas composé d'une seule espèce mais de deux espèces cultivées en même temps. Pour pouvoir utiliser cette version, il est nécessaire d'activer trois options du formalisme qui sont le « transfert radiatif » pour le rayonnement, « la densité vraie » pour la croissance racinaire et « le modèle résistif » pour les besoins des cultures en eau. Pour STICS-cultures associées, l'adaptabilité des principaux formalismes avait été déjà réalisée par Brisson *et al.*, (2004). La description suivante des modules de STICS n'est pas exhaustive ; seuls les modules indispensables à la compréhension de notre travail de modélisation sont présentés. La description de chaque module et les différents formalismes sont détaillés par Brisson *et al.*, (2009).

2.1.1.1 *Le développement*

Le développement de la plante dans le modèle STICS prend en compte plusieurs stades d'évolution de l'indice foliaire et des stades reproducteurs. Les durées séparant les stades successifs sont propres à l'espèce et à la variété. Ces durées sont évaluées en unités de développement, reproduisant le temps physiologique de la plante (conditionné par la température de l'air). La signification de chaque stade en fonction des stades physiologiques du blé est représentée dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Description des stades de développement clés dans STICS en fonction des stades physiologiques du blé d'hiver.

Stades STICS	Signification	Blé
LEV	Germination-levée	Levée
AMF	Fin phase juvénile	Epi 1 cm
LAX	Indice foliaire maximale	Epiaison
SEN	Début scénescence nette	Peu après début du remplissage des grains
LAN	Indice foliaire nul	Maturité physiologique
FLO	Floraison	
DRP	Début remplissage des grains	
MAT	maturité physiologique	

2.1.1.2 *Interception du rayonnement*

L'interception du rayonnement dans la version STICS-cultures associées est calculée par le formalisme "Transfert radiatif", qui prend en compte la géométrie du couvert (espacement et orientation des rangs) et la forme du profil de densité foliaire. L'ensemble constitue le volume du couvert de chaque espèce (Brisson *et al.* 2004). Ce volume, défini par une hauteur et une largeur, présente une forme simple avec une section soit triangulaire ou rectangulaire. Cette forme est supposée constante tout au long du cycle. En revanche, le modèle est capable de simuler des inversions de dominance entre les deux espèces au cours du cycle de croissance.

2.1.1.3 *Croissance aérienne : LAI, biomasse totale*

Le module « croissance aérienne » permet de calculer le LAI (Leaf Area Index), et la croissance en biomasse. Le LAI dépend à la fois du stade de développement, de la température et de l'état trophique, hydrique et azoté de la plante. La croissance en biomasse aérienne est calculée à partir de l'efficacité de conversion du rayonnement intercepté. Cette efficacité est dépendante du stade de développement de la plante et des stress hydrique et azoté. Les stress sont représentés par des indices variant entre 0 et 1, qui vont réduire les fonctions vitales de la plante. Ces stress sont de nature abiotique exogène (stress azoté, hydrique, thermique, dont l'effet du gel) et endogène (stress trophique : concurrence entre les feuilles et les fruits pour les assimilés disponibles).

2.1.1.4 *L'azote*

L'accumulation journalière de l'azote dans la plante dépend de l'accumulation du carbone et de la disponibilité de l'azote dans le sol. L'absorption de l'azote par chaque espèce dépend de la profondeur des racines, de leurs distributions dans les couches du sol et de la demande de la culture en azote. La demande de la culture est définie par le concept de courbe maximale de dilution d'azote. L'offre du sol est déterminée au niveau des couches élémentaires de 1 cm jusqu'à la profondeur maximale atteinte par les racines.

2.1.1.5 *Croissance racinaire*

Le module « croissance racinaire » calcule la croissance du front racinaire et la densité racinaire en fonction de la température du sol, l'humidité du sol et de sa densité apparente. Dans STICS, la croissance des racines est déconnectée de la croissance aérienne. Les racines jouent uniquement un rôle fonctionnel d'absorbeur d'eau et d'azote minéral. Il existe toutefois un lien indirect entre aérien et souterrain par l'intermédiaire de la température qui intervient aux deux niveaux et par l'efficacité de conversion au stade juvénile. L'arrêt de la croissance du front racinaire peut être conditionné par la présence de contraintes liées au sol (par exemple, roche mère, sécheresse, pénétrabilité).

2.1.1.6 *Fonctionnement hydrique :*

Le module fonctionnement hydrique s'appuie sur le calcul des différents termes d'offre et de demande hydrique de la plante. L'offre du sol est déterminée par le bilan entre la somme d'apports (la pluie, l'irrigation et les remontées capillaires) et la somme de pertes (évaporation, ruissellement et drainage). La demande en eau des plantes ainsi que l'évaporation du sol, sont calculées grâce à une approche "résistive" décrite dans Brisson *et al.*, (2004).

2.1.2 Présentation des jeux de données expérimentales.

Le jeu de donnée utilisé pour le paramétrage du modèle a été obtenu d'une expérimentation menée durant deux campagnes culturales en 1999-2000 et en 2000-2001, à la station expérimentale de l'INRA à Thiverval-Grignon (48°50'N, 1°56'E). L'objectif de cette expérimentation était d'étudier le fonctionnement d'une association entre le blé (*Triticum aestivum*, cv Isengrain) et la fétuque (*Festuca rubra*, cv Sunset), comparé à un blé pur et à une fétuque pure. Le blé et la fétuque ont été semés le même jour : le 14/10/1999 et le 10/11/2000, selon un système additif. Les densités de semis ont été de 150 grains par m² pour le blé et de

1600 graines par m² pour la fétuque. Les mesures réalisées concernent les variables plantes comme les stades de développement, l'évolution de la biomasse aérienne, l'évolution de l'indice foliaire (LAI) et l'accumulation de l'azote par les deux espèces. Les données qui décrivent le sol proviennent des prélèvements in situ et concernent les caractéristiques physico-chimiques du sol, les densités apparentes des horizons, les stocks d'azote minéral et les teneurs en eau mesurées pour chaque couche du sol.

Les mesures ont été réalisées pendant deux phases : une première phase culturale qui s'étend du semis à la récolte du blé et une deuxième phase d'interculture caractérisée par le maintien de la fétuque vivante après la récolte du blé. A la fin de cette période, la fétuque est détruite par le labour juste avant le semis de la culture suivante.

Plus de détails sur cette expérimentation sont présentés dans la partie 'Matériel et méthodes' de l'article soumis sur la modélisation et reproduit dans le chapitre 3 de ce document.

2.1.3 Méthodes de paramétrage et d'évaluation du modèle

Pour simuler l'association blé-fétuque nous avons utilisé la version 6.0 du modèle STICS.

Le paramétrage de ce modèle pour le blé et la fétuque n'a pas concerné l'ensemble des paramètres du modèle mais uniquement les paramètres spécifiques au contexte pédoclimatique et variétaux. Pour la fétuque, les paramètres du module « transfert radiatif » ont été optimisés pour la première fois dans STICS pour pouvoir les utiliser dans la version de STICS-cultures associées. Certains de ces paramètres (pédoclimatique, variétaux et bilan radiatif) ont été estimés à partir des observations obtenues directement par l'expérimentation, d'autres ont été ajustés par optimisation lorsque le paramètre a une valeur purement statistique ou lorsqu'il est difficilement mesurable. STICS, grâce à l'option « Optimiser », offre la possibilité d'ajuster jusqu'à 5 paramètres sur une seule variable de sortie. Le calcul se fait grâce à l'algorithme du simplexe (Sorooshian and Gupta, 1993) qui donne une gamme de valeurs possibles de ce paramètre, la valeur retenue est celle qui présente la valeur la plus faible du critère des moindres carrés pondérés (Makowski *et al.*, 2006).

Le paramétrage du modèle a été réalisé en utilisant uniquement les résultats obtenus sur les cultures pures (blé et fétuque) pendant les deux années d'expérimentation alors que l'évaluation du modèle a été réalisée en utilisant les résultats obtenus sur les cultures associées. Le paramétrage du modèle pour chaque espèce a été réalisé en trois étapes:

- **Optimisation des stades de développement** : cette étape consistait à forcer les stades de développement du blé et de la fétuque pour recalculer les stades spécifiques à chaque espèce à partir des observations expérimentales. Cela a pour but de s'affranchir des erreurs éventuelles sur le calcul des paramètres des autres modules de STICS qui dépendent des stades de développement phénologique (comme par exemple l'indice foliaire, LAI).
- **Optimisation et ajustement des paramètres du sol** : La deuxième étape était d'optimiser les paramètres liés au sol en i) modifiant les caractéristiques hydrodynamiques initiales du sol (humidité à la capacité au champ, humidité au point de flétrissement permanents), les teneurs initiales en azote nitrique (NO_3^-) et les valeurs des densités apparentes au niveau des différentes couches du sol, renseignés dans STICS à partir des mesures expérimentales réalisées sur les deux essais pour les deux années expérimentales et en ii) ajustant le paramètre « q_0 » à partir de la variable réserve hydrique totale du sol : ce paramètre détermine le calcul de l'évaporation du sol et donc agit sur le bilan hydrique.
- **Optimisation des paramètres variétaux qui dépendent du LAI** ;
L'optimisation de ces paramètres a été réalisée en deux phases :

- i) Les valeurs des paramètres qui déterminent la croissance des espèces ainsi que l'absorption d'azote ont été optimisées dans un premier temps en forçant le modèle par l'indice foliaire (LAI) à partir des données mesurées. La LAI représente la variable d'état centrale dans le modèle, nous avons donc fait le choix d'ajuster en premiers ces paramètres afin d'éviter toute erreur faite à cause de la variables (LAI) sur les autres modules.

Les paramètres qui ont été ajustés concernent le module de croissance racinaire (croirac) calé à partir de la profondeur d'enracinement, le module de croissance aérienne (adens, durvieF) calé sur la LAI, les paramètres de la courbe de dilution réalisée spécifiquement pour la fétuque (adilmax, bdilmax) calés sur la quantité d'azote total de la plante.

- ii) En deuxième temps, le LAI n'était plus forcé et les paramètres relatifs au module de développement qui interviennent sur l'évolution du LAI ont été déterminés (stlevdrp, JVC).

- *Optimisation du module « transfert radiatif » ;*

Pour la fétuque, nous avons optimisé le module de transfert radiatif en utilisant seulement les données mesurées en (1999-2000) à cause du nombre d'observation trop faible en (2000-2001). Les paramètres de ce module (Ktrou, Rapforme) ont été calés sur les mesures de LAI et de la matière sèche après forçage du LAI.

Le tableau 2.2 récapitule la liste des paramètres optimisés et leurs significations pour le blé et la fétuque ainsi que leur mode d'optimisation (par expérimentation ou par optimisation).

Après cette phase d'optimisation, nous avons réalisé une validation de ce paramétrage sur les traitements de cultures associées (blé-fétuque) pour les deux années expérimentales 1999-2000 et 2000-2001 afin de tester la robustesse de ces paramètres dans la version STICS-cultures associées (voir la partie 'Matériel et méthodes' du chapitre 3)

Les critères statistiques utilisés pour l'estimation des paramètres et l'évaluation de la « robustesse » du modèle sont: l'écart quadratique moyen (RMSE) et l'efficacité du modèle (Ef) entre valeurs observées et simulées (Wallach and Goffinet, 1987).

Tableau 2.2 : Liste des paramètres de STICS optimisés pour le blé et la fétuque.

Paramètres	Description des paramètres	Unités	Détermination des paramètres
Variétaux			
Croirac	Vitesse de croissance du front racinaire	cm degré.jours ⁻¹	Optimisation sur profondeur d'enracinement (Zrac)
JVC	Nombre de jours vernalisants	jours	Optimisation sur
stlevamf	Cumul d'unités de développement entre les stades LEV et AMF	degré.jours	Données expérimentales
stamflax	Cumul d'unités de développement entre les stades AMF et LAX	degré.jours	Données expérimentales
stleldr	Cumul d'unités de développement entre les stades LEV et DRP	degré.jours	Optimisation sur LAI
stdrpmat	Cumul d'unités de développement entre les stades DRP et MAT	degré.jours	Données expérimentales
nbgmax	Nombre maximal de grains	grains m ⁻²	Données expérimentales
durvieF	Durée de vie d'un cm de feuille adulte	Q10	Optimisation sur LAI
sea	Surface spécifique des enveloppes des fruits	cm ² g ⁻¹	Optimisation sur matière sèche (masec)
adens	Paramètre de compensation entre le nombre de tiges et la densité de plantes	non dimensionnel	Optimisation sur LAI
adilmax	Paramètre de la courbe de dilution maximale [Nplante]=adilmax MS [^] (-bdilmax)	N%	Optimisation sur azote total plante (QNplante)
bdilmax	Paramètre de la courbe de dilution maximale [Nplante]=adilmax MS [^] (-bdilmax)	N%	Optimisation sur azote total plante (QNplante)
Sol			
q0	Paramètre d'évaporation en sol nu	mm	Optimisation sur réserve hydrique du sol (Resmes)
Hcc	Teneur en eau du sol à la capacité au champ	%	Données expérimentales
Hmin	Teneur en eau du sol au point de flétrissement permanent	%	Données expérimentales
da	Densité apparente	g.cm ⁻³	Données expérimentales
Transfert radiatif			
ktrou	Coefficient d'extinction du PAR à travers le végétal	cm ⁻¹	Optimisation sur LAI et matière sèche (masec)
Rapforme	Rapport épaisseur/largeur de la forme du végétal	non dimensionnel	Optimisation sur LAI et matière sèche (masec)

2.2 Approche expérimentale (Cas blé* luzerne)

Pour l'expérimentation, le choix initial était de travailler sur le dispositif expérimental « SCV » hérité de la thèse de Matthieu Carof (2006). Un dispositif expérimental devant servir de support à cette thèse a donc été mis en place en 2006 sur cette parcelle mais nous n'avons pas réussi à maîtriser suffisamment les adventices pour obtenir des résultats valables dans le cadre de cette étude (ces résultats ne seront donc pas présentés). Cela s'explique tout d'abord par un stock de semences d'adventices important hérité des essais précédents. Par ailleurs, l'infestation par les adventices (notamment ray gras, géranium, chardons...) a été particulièrement forte en 2006 en raison d'un semis du blé trop précoce et d'un hiver doux ce qui a rendu de plus en plus difficile la maîtrise technique de l'essai. Ces difficultés de maîtrise technique sur le moyen terme nous ont conduits à abandonner l'essai et à mettre en place un nouvel essai en 2007 et en 2008 sur une autre parcelle, sur lequel ont été obtenus les résultats présentés dans ce document. Toutefois, les contraintes liées à la durée de la thèse nous ont conduit à présenter l'ensemble des résultats acquis en 2007-2008 (pendant la culture associée et l'interculture) et uniquement les résultats acquis en 2008-2009 sur la période s'étalant du semis du blé jusqu'au mois de mai 2009. La valorisation des données obtenues sur l'ensemble de ces deux années d'expérimentation sera faite par une publication postérieure à ce mémoire.

2.2.1 Conditions expérimentales

Les deux expérimentations ont été menées en plein champ pendant deux campagnes culturales 2007-2008 (2007) et 2008-2009 (2008) à l'unité expérimentale « Grandes cultures » de l'INRA à Thiverval-Grignon (48°50'N, 1°56'E), sur une parcelle conduite depuis 1975 en monoculture de blé sous deux modalités de travail du sol qui sont le travail superficiel (Ts) et le labour (La). Le sol de cette parcelle (Orthic Luvisol, (FAO, 2006)) est constitué d'un horizon limono-argileux reposant sur une couche calcaire. Le pH des horizons de surface (0-20 cm) est basique (pH égale à 8.08). Pour les parcelles conduites en travail superficiel, les résultats de l'analyse granulométrique montrent que le sol est riche en limon avec une quantité égale 580 g.kg⁻¹. Les quantités d'argile et de sable sont plus faibles égales respectivement à 286 g.kg⁻¹ et 134 g.kg⁻¹. Pour les parcelles labourées, le sol présente des quantités similaires en limon, en argile et en sable par rapport aux parcelles conduites en travail superficiel égales respectivement à 586 g.kg⁻¹ de limon, 283 g.kg⁻¹ d'argile et 131 g.kg⁻¹ de sable. Pour ces différentes parcelles la couche calcaire limite la profondeur du sol à 90-120 cm.

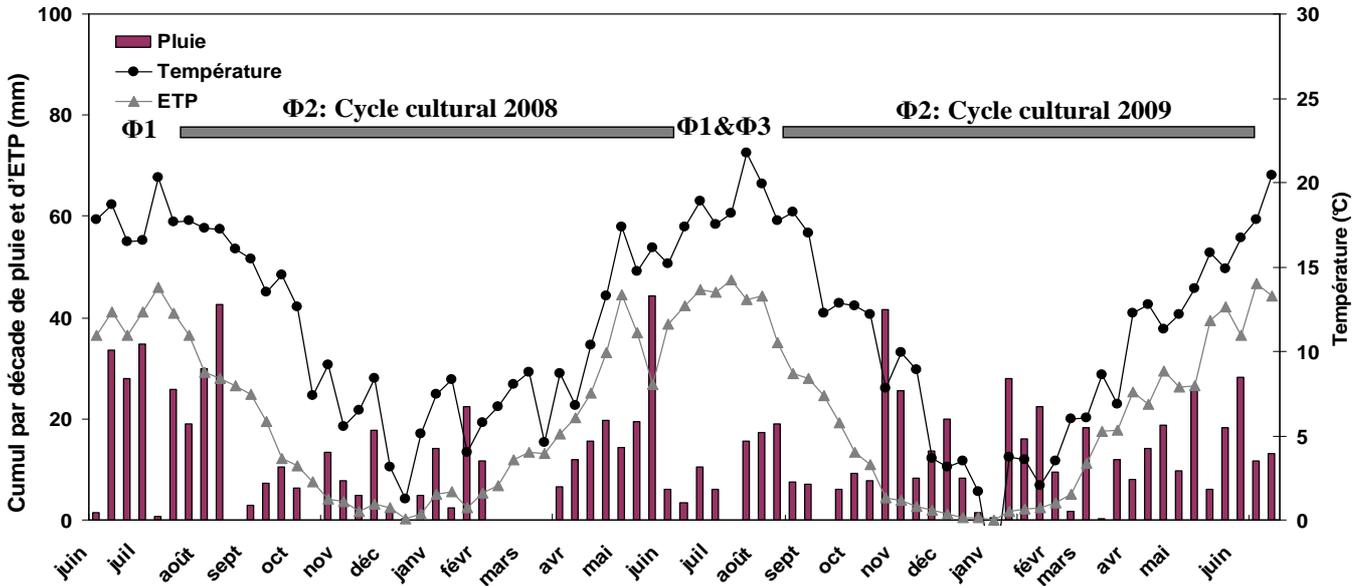


Figure 2.2 : Moyenne de température journalière (°C), cumul de pluie et de l'évapotranspiration (ETP) (mm) par décade durant les deux années expérimentales 2008 et 2009. La phase $\Phi 1$ représente la période avant le semis de la luzerne, $\Phi 2$ représente le cycle culturale (association) et $\Phi 3$ représente la période d'interculture (après récolte du blé).

Tableau 2.3 : Noms des différents traitements expérimentaux avec leurs symboles.

Travail du sol	Traitements	Contrôle chimique de la luzerne	Symbole
Travail superficiel	Blé pur	-	Ts_B
Labour	Blé pur	-	La_B
Travail superficiel/ Labour	Luzerne pure	Sans contrôle	Ts ou La_L0
Travail superficiel	Association	Sans contrôle	Ts_BL0
Travail superficiel	Association	Contrôle précoce	Ts_BL1
Travail superficiel	Association	Contrôle Tardif	Ts_BL2
Labour	Association	Contrôle précoce	La_BL1
Labour	Association	Contrôle Tardif	La_BL2

Les données climatiques (pluie, température moyenne, évapotranspiration (ETP)) ont été enregistrées par une station météorologique sur le site expérimental. Ces données sont représentées à la figure 2.2 en distinguant trois périodes :

- La première période se situe entre le semis de la luzerne et le semis du blé (juillet - septembre). Pour la première année d'essai cette période a bénéficié de pluies abondantes (35 mm en moyenne par décade) en comparaison avec la deuxième année. Par contre, les valeurs de température et d'ETP étaient comparables entre les deux années.
- La deuxième période concerne la période culturale qui se situe depuis le semis du blé jusqu'à sa récolte. La comparaison entre les données climatiques des deux années expérimentales montre qu'en 2008 les pluies enregistrées ont été plus faibles, surtout à la fin du cycle cultural, par rapport à 2009. En revanche, les températures enregistrées ont été plus froides en 2009, avec une période de gel qui a eu lieu entre décembre et janvier. Les ETP enregistrées présentent la même allure de distribution entre les deux années.
- La troisième période concerne la période d'interculture, présentée uniquement pour 2008. Pour cette période, les pluies enregistrées ont été faibles au mois de juillet (ne dépassant pas 10 mm par décade). Alors qu'à la fin de cette période, les pluies ont été plus régulières et plus abondantes. Les températures enregistrées représentent les températures moyennes de saison estivale (entre 18 et 20°C), avec des valeurs d'ETP élevées.

2.2.2 Dispositif et traitements expérimentaux

Le dispositif expérimental mis en place vise à étudier les performances agronomiques d'une association de blé d'hiver (*Triticum aestivum*, cv Isengrain) et d'une luzerne (*Medicago sativa*, cv Luzelle) pour deux modalités de travail du sol et différentes modalités de gestion de la biomasse aérienne de la plante de couverture afin de vérifier les différentes hypothèses énoncées précédemment. Le tableau 2.3 résume les différents traitements et leur nomination qui sera adopté dans l'ensemble du document.

Sur chaque essai, le blé et la luzerne ont été cultivé en association (BL) et comparé aux cultures pures correspondantes (B et L) afin d'évaluer l'effet compétitif de l'insertion de la luzerne sur la croissance du blé en association en fonction de son comportement en culture

pure. Le choix de l'association de cultures s'est porté sur un système additif (les espèces sont semées à la même densité en association que celle des cultures pures), ce qui signifie un contexte de forte compétition. Dans les associations, nous avons testé trois modalités de contrôle de la luzerne par un herbicide sélectif à dose non létale : aucun contrôle (BL0), un contrôle précoce (BL1) et un contrôle tardif (BL2).

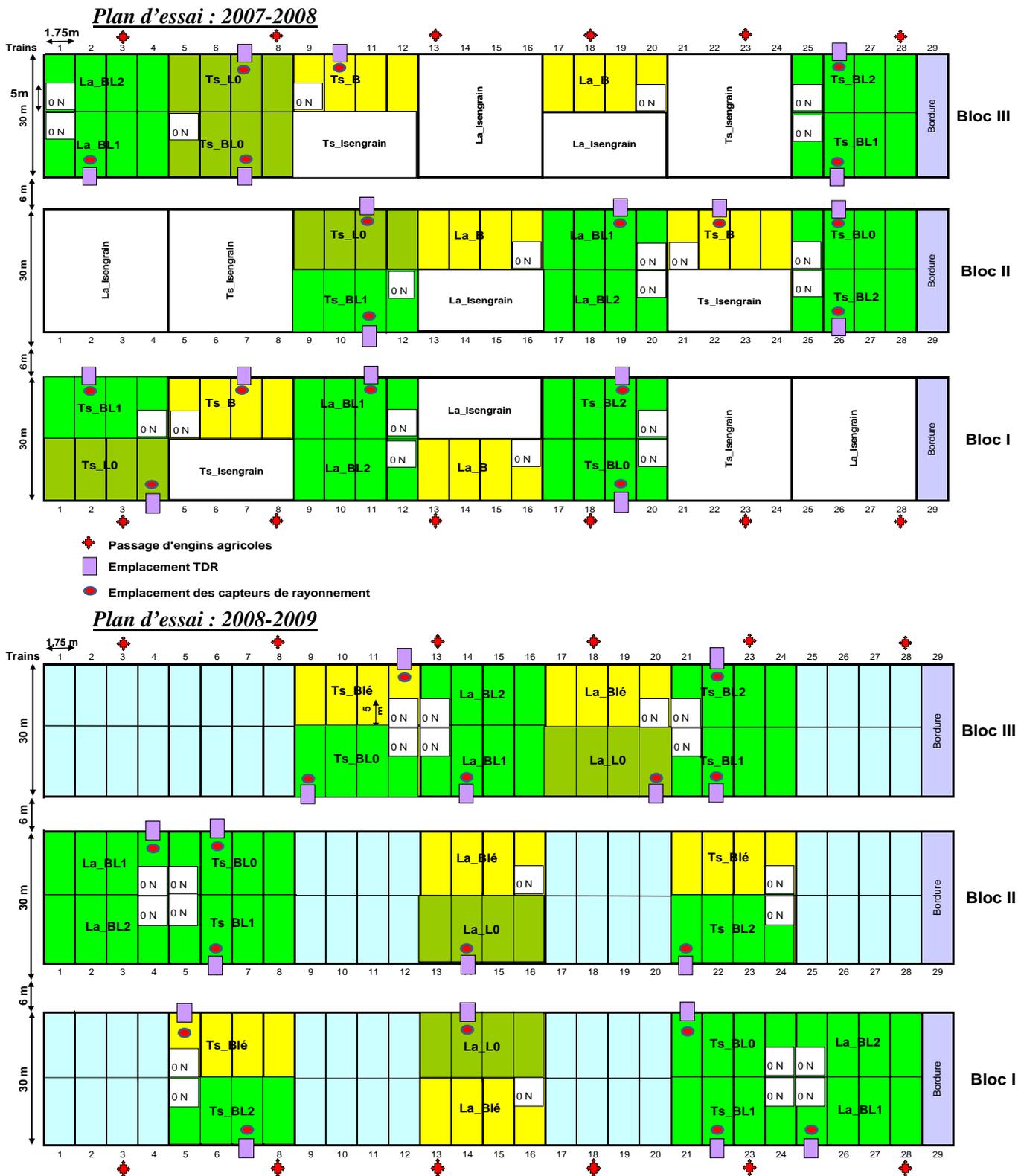
Ces différents traitements expérimentaux (B, L, BL0, BL1 et BL2) ont été conduits en labour et en travail superficiel comme le montre le plan de l'essai (Figure 2.3). Afin d'assurer la reproductibilité de l'expérimentation et pour des raisons de place, nous nous sommes focalisés sur l'étude de tous ces traitements en travail superficiel (qui représente le noyau de notre travail de recherche) tandis qu'en labour, nous avons choisi d'étudier que les associations contrôlées (BL1 & BL2) et de supprimer le traitement témoin de l'association sans contrôle de la luzerne (BL0). Pour le traitement luzerne pure (L0) nous étions obligés de le déplacer en labour en deuxième année d'essai (2009) à cause d'un manque de place en travail superficiel. Pour chaque année expérimentale, l'expérimentation a donc été constituée de quinze parcelles élémentaires conduites en travail superficiel et neuf parcelles élémentaires conduites en labour de 105 m² chacune (7m x 15 m).

Le dispositif expérimental est constitué de trois blocs pour les deux années expérimentales. Les différents traitements expérimentaux ont été disposés d'une façon aléatoire au sein de chaque bloc. Ce dispositif est constitué de deux sous-dispositifs qui ont été raisonnés en fonction de deux questions principales :

1. Quel est l'impact de travail du sol sur le fonctionnement de l'association en comparaison avec les cultures de blé pur ?
2. Quel est l'impact de la présence et du contrôle chimique de la luzerne sur le fonctionnement de l'association conduite uniquement en travail superficiel en comparaison avec les traitements témoins (B et BL0) ?

Pour répondre à la première question nous avons pris en compte que les traitements communs (B, BL1 et BL2) conduits en travail superficiel et en labour selon un dispositif en bloc randomisé.

Pour répondre à la deuxième question, nous avons pris en compte que les traitements conduits en travail superficiel selon un dispositif en split-plot dont le facteur principal est l'espèce cultivée (B, L ou BL) et le facteur secondaire est la présence ou l'absence du contrôle chimique appliqué sur la luzerne (BL0, BL1, BL2).



Ancien Essai 2007-2008

Figure 2.3 : Plans expérimentaux des deux essais conduits en 2007-08 et 2008-09, avec les différents emplacements de TDR et des capteurs de rayonnement. La couleur jaune représente la culture de blé pur (B), celle en vert foncé les traitements de luzerne pure (L) et celle en vert clair les traitements des associations de culture (BL). Pour les deux années les bandes 0N ont été placées sur tous les traitements sauf sur la luzerne pure (L0)

2.2.3 Itinéraire technique

La variété de blé choisie est Isengrain ; c'est une variété adaptée aux conditions pédo-climatiques du bassin parisien. C'est un blé tendre d'hiver, demi précoce, peu sensible à la verse, caractérisé par un port étalé et une forte capacité à taller mais présentant un comportement assez sensible aux maladies, principalement pour la fusariose et la septoriose. Pour la luzerne on a choisi la variété « Luzelle » qui est de type « Flamande » et présente une bonne résistance au froid ; sa hauteur varie de 30 à 90 cm. Elle présente un système racinaire pivotant qui peut pénétrer profondément dans un sol, avec une capacité élevée de fixation de l'azote atmosphérique. Sa floraison a lieu entre juin et septembre.

Pour les deux années expérimentales, le précédent cultural a été un blé d'hiver. Juste avant le semis de la luzerne, les pailles du précédent ont été exportées, le sol a été travaillé soit avec une charrue sur une profondeur de 20 cm pour les parcelles labourées, soit superficiellement avec une herse rotative sur les 7 premiers cm du sol pour les parcelles en travail superficiel.

Le semis de la luzerne a été réalisé avec un semoir « Fiona » avant le semis du blé, le 30 juillet 2007 et le 27 août 2008. La densité de semis de la luzerne a été de 25 kg.ha^{-1} (soit environ $1250 \text{ graines.m}^{-2}$) avec un écartement entre les lignes de 17.5 cm pour les deux années expérimentales. Afin de faciliter le contact sol-graine, une opération de roulage a été réalisée juste après le semis.

Pour le blé, le semis a été réalisé les 5 novembre 2007 et 15 octobre 2008 avec un semoir spécialisé pour le semis direct de marque SEMEATO, à une profondeur de 3cm. Pour la première année d'essai, le couvert de luzerne était assez développé, ce qui nous a conduit à réaliser une coupe mécanique, à la tondeuse à gazon, pour faciliter le semis du blé. La seconde année, la biomasse de luzerne était plus faible en raison d'un semis plus tardif de la luzerne et plus précoce du blé. De ce fait, nous avons semé le blé directement sans tondre la luzerne auparavant. La densité de semis du blé pour les deux années a été égale à $250 \text{ grains.m}^{-2}$ avec un écartement de 17.5 cm. L'écartement entre un rang de blé et un rang de luzerne était donc de 8.75 cm.

Le contrôle chimique de la luzerne (traitements BL1 et BL2) a été réalisé avec l'herbicide « Aminugec 600 » (matière active 2,4-D : 2,4-Dichlorophénoxyacétique) à $\frac{1}{4}$ de la dose homologuée soit $0,35 \text{ l.ha}^{-1}$. En 2008, le premier contrôle réalisé sur le traitement (BL1) a été fait le 16/04/2008 au stade 2 nœuds du blé. Cette date d'application a été conditionnée par les

conditions climatiques qui ont été défavorables avant ce stade (conditions optimales d'application de l'herbicide se situant à des températures entre 12 et 25°C). La deuxième date de contrôle a été réalisée sur le traitement (BL2) le 09/05/2008 au stade début épiaison du blé. Ce traitement n'a donné aucun résultat sur la réduction de la biomasse de la plante de couverture. Cela a été attribué à la dose appliquée (1/4 de dose) qui n'était pas suffisante pour agir en regard du développement important de la luzerne. Pour la partie résultats expérimentaux (chapitre IV) ce traitement ne sera pas présenté vu qu'il est identique au traitement sans contrôle (BL0).

Pour la deuxième année d'expérimentation (2009), nous avons choisi d'avancer ces dates de contrôle pour les réaliser le 02/04/2009 correspondant au stade « épi 1cm » du blé en (BL1) et le 23/04/2009 correspondant au stade « 2 nœuds » du blé en (BL2) avec le même herbicide qu'en 2008 (Aminugec 600) à 1/4 de dose homologuée.

Pour la fertilisation azotée, la dose totale d'azote a été de 210 et de 205 unités respectivement en 2008 et 2009 apportée uniquement sur les traitements de blé pur (B) et sur les associations de culture (BL0, BL1, BL2). Cette dose a été calculée selon la méthode du bilan prévisionnel sur la base d'un objectif de rendement du blé égal à 9 t.ha⁻¹ et fractionnée en trois apports d'azote (apporté en sortie hiver, stade épi 1 cm et montaison) pour les deux années expérimentales. Pour tous les traitements de blé pur et d'association de culture, une bande « sans apport d'azote » (dimension 7 x 5 m) a été délimitée afin de mesurer à la récolte la fourniture en azote du sol.

Des traitements phytosanitaires ont été réalisés au cours du cycle de culture afin de contrôler la prolifération des adventices et des maladies. Il faut préciser, cependant, que pour l'année expérimentale 2008 un traitement à base de « Glyphosate » a été réalisé juste avant le semis du blé qui a éradiqué les adventices au cours du cycle, intervention qui n'a pas été réalisée en 2009.

L'annexe 1 récapitule toutes les interventions réalisées sur les deux essais expérimentaux.

2.2.4 Mesures réalisées

Toutes les mesures expérimentales réalisées en 2008 et en 2009 sont représentées dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Récapitulatif des dates de mesures réalisées pour les deux années expérimentales (2007-08 et 2008-09) en fonction des stades de développement du blé. En 2008-09 les cases grisées représentent les variables non intégrées dans le manuscrit.

Année 2007-2008

Dates de mesures	26/07/2007	15/10/07	26/10/07	11/12/07	31/01/08	19/02/08	20/03/08	04/04/08	14/04/08	22/04/08	13/05/08	28/05/08	23/06/08	15/07/08	29/07/08	02/09/08	23/09/08	14/10/08
Stades de blé	Avant semis Luz	Avant semis blé		Levée	5 feuilles	Début tallage	Fin tallage	Epi 1cm	1 nœud	2 nœuds	Debut epiaison	Floraison	DRP	Récolte	Post récolte			
Nb pieds.m ⁻²				X		X		X										
Nb épi.m ⁻²												X	X	X				
Rendement blé														X				
Biomasse aérienne																		
Blé						X		X			X	X	X	X				
Luzerne& adv		X	X			X		X			X	X	X	X	X	X		X
Biomasse racinaire												X						
Azote plante (N et ¹⁵ N)						X		X			X	X	X	X	X	X		X
Surface foliaire																		
Blé						X		X			X	X	X	X				
Luzerne		X	X			X		X			X	X	X	X	X	X		X
Hauteur plantes																		
Blé				X		X	X	X	X	X	X	X	X	X				
Luzerne		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
Bilan radiatif																		
Mesure TDR																		
Stocks eau et azote sol	X		X			X		X				X			X			X
Fourniture sol (0N)														X				
Densité apparente					X													

Suite Tableau 2.4 : Année 2008-2009

Dates de mesures	27/10/2008	14/10/08	19/11/08	23/12/08	17/02/09	31/03/09	15/04/09	22/04/09	30/04/09	11/05/09	19/05/09	04/06/09	25/06/09	15/07/09	18/08/09	08/09/09	25/09/09	19/10/09
Stade de blé	Avant sem Luz	Avant semis blé	Levée	3 feuilles	Début tallage	Epi 1 cm	1 noeud	2 noeuds	2 noeuds	Gonflement	Epiaison	Floraison	DRP	Récolte	Post récolte			
Nb pieds.m ⁻²			x		x	x				x								
Nb épi.m ⁻²												x	x	x				
Rendement blé																		x
Biomasse aérienne																		x
Blé					x	x				x		x	x	x				
Luzerne& adv		x			x	x				x		x	x	x	x	x	x	
Biomasse racinaire											x							
Azote plante (N et ¹⁵ N)		x			x	x				x		x	x	x	x	x	x	
Surface foliaire																		
Blé					x	x				x		x	x	x				
Luzerne		x			x	x				x		x	x	x	x	x	x	
Hauteur plantes																		
Blé		x				x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	
Luzerne		x				x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	
Bilan radiatif					Mesures en continues													
Mesure TDR					Mesures deux fois par semaine													
Stocks eau et azote sol	x				x			x				x		x	x			
Fourniture sol (0N)																		x
Densité apparente				x														

2.2.4.1 Stades de développement du blé

Les principaux stades de développement du blé ont été suivis grâce à des observations visuelles tout le long du cycle de culture pour les deux années expérimentales. Ainsi, on a daté les stades : début tallage (dT), Epi 1cm (E1c), Gonflement (G) ou Epiaison (Ep), Floraison (F), début de remplissage des grains (DRP) et récolte (R).

2.2.4.2 Biomasses

a) Biomasse aérienne

Afin de suivre la croissance des deux espèces en association et en cultures pures, des prélèvements ont été réalisés pour les deux années expérimentales à chacun des stades de développement du blé cité dans le premier paragraphe (Cf § 2.2.4.1). Les prélèvements de plantes ont été faits sur des placettes de 0.56 m² pour l'association de culture (4 rangs de chaque espèce sur une longueur de 75 cm) et de 0.25 m² pour les cultures pures (3 rangs sur une longueur de 50 cm). A chaque prélèvement les biomasses du blé, de la luzerne et des adventices ont été séparées et séchées à 80°C pendant 48h à l'étuve pour déterminer les matières sèches correspondantes.

b) Biomasse racinaire

Les biomasses racinaires des cultures de blé pur (Ts_B et La_B) et des cultures associées (Ts_BL1 et La_BL1) ont été mesurées au stade « floraison » en 2008 et au stade « début épiaison » du blé en 2009 avec trois répétitions pour chaque traitement. Ces prélèvements ont été réalisés au niveau de deux horizons (0-20 et 20-40 cm) à l'aide de « planches à clous » qui ont été positionnées perpendiculairement au profil du sol, sur deux rangs pour chaque espèces. Les blocs de terre (dont les dimensions sont de 20 cm de largeur, 35 cm de longueur et 10 cm de longueur des clous) ont été découpés à la bêche et trempés dans une solution de chlorure de sodium pendant 24h puis lavés avec un « Root Washer », machine à laver les racines qui sert à séparer la terre des racines grâce à un circuit fermé de jet d'eau (photo annexe 2)). Les racines ont été ensuite mises à l'étuve à 80°C pendant 48h. Parallèlement à ces prélèvements, on a isolé des fragments de racine de chaque espèce en association situés dans les premiers centimètres de sol, où il est encore possible de différencier les espèces. La part de chaque espèce dans le mélange a été déterminée en utilisant les différences des teneurs

d'azote total et de l'abondance isotopique (voir chapitre 2.2.4.4) mesurée sur les fragments de racines isolés et ceux du mélange.

Le calcul de la part de chaque espèce dans la biomasse racinaire du mélange pour les traitements association a été réalisé en considérant que les teneurs en azote N^{15} et en azote total ne sont pas les mêmes pour les deux espèces considérées : le blé, plante non fixatrice d'azote, et la luzerne, plante fixatrice. Connaissant les teneurs en N^{15} et en azote total de chaque espèce (mesurées sur des plantes isolées dans le mélange), les teneurs en N^{15} et N total du mélange indiquaient la proportion de chacune des espèces.

Le calcul de la part de chaque espèce est réalisé comme suit (Corre-Hellou, 2005)

$$\begin{aligned} Q^{15} N_m &= Q^{15} N_B + Q^{15} N_{Luz} = DM_m \times \%N_m \times \%^{15} N_m \\ &= (DM_B \times \%N_B \times \%^{15} N_B) + (DM_{Luz} \times \%N_{Luz} \times \%^{15} N_{Luz}) \quad (1) \end{aligned}$$

Avec DM_m , DM_B , DM_{Luz} représentant respectivement la biomasse racinaire du mélange, du blé et de la luzerne isolés. $\%N_m$, $\%N_B$, $\%N_{Luz}$ sont respectivement les teneurs en azote total au niveau des racines du mélange, du blé et de la luzerne des plantes isolées. $\%^{15} N_m$, $\%^{15} N_B$, $\%^{15} N_{Luz}$ sont respectivement l'enrichissement en N^{15} mesuré au niveau des racines du mélange, du blé et de la luzerne en plantes isolées.

La biomasse de chaque espèce dans le mélange est calculée en prenant en compte l'équation (2) développée à partir de l'équation (1) :

$$[(DM_B \times \%^{15} N_B \times \%N_B) + ((DM_m - DM_B) \times \%^{15} N_{Luz} \times \%N_{Luz})] = [DM_m \times (\%^{15} N_m \times \%N_m)] \quad (2)$$

Qui peut s'écrire aussi de cette manière :

$$[DM_B (\%^{15} N_B \times \%N_B) - (\%^{15} N_{Luz} \times \%N_{Luz})] = [DM_m ((\%^{15} N_m \times \%N_m) - (\%^{15} N_{Luz} \times \%N_{Luz}))]$$

Dans ce cas, la détermination de la part de chaque espèce se fait selon les équations suivantes:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{DM_B}{DM_m} &= \frac{(\%^{15} N_m \times \%N_m) - (\%^{15} N_{Luz} \times \%N_{Luz})}{(\%^{15} N_B \times \%N_B) - (\%^{15} N_{Luz} \times \%N_{Luz})} \\ DM_{Luz} &= DM_m - DM_B \end{aligned} \right.$$

2.2.4.3 Composantes de rendement du blé

Les composantes de rendement du blé ont été déterminées pour les deux années expérimentales grâce à des comptages réalisés directement au champ ou bien sur les placettes de prélèvements de biomasse aérienne du blé depuis la levée jusqu'à la récolte du blé. Ainsi, des comptages de plantes ont permis de mesurer le nombre de plantes par m² depuis la levée jusqu'à la mi-montaison. A partir de l'épiaison, le nombre d'épis par m² a été déterminé. Enfin à la récolte, le nombre d'épis par pieds, le nombre des grains et le poids d'un grain ont été mesurés sur 4 placettes de prélèvement de biomasse afin de calculer le rendement du blé.

2.2.4.4 Teneur en azote

a) Azote total des plantes

Les échantillons de biomasse aérienne de blé et de luzerne auparavant séchés, ont été broyés finement à un diamètre de 80 µm. L'azote total est ensuite dosé avec la méthode Dumas. Nous ne présenterons dans ce document que les résultats de la première année d'essai (2008), les résultats de 2009 n'étant pas encore disponibles.

b) Azote ¹⁵N des plantes

Sur les mêmes échantillons d'azote total du blé pur et de la luzerne (pure et en association), des micro-pesées ont été réalisées afin de déterminer les teneurs en azote isotopique (¹⁵N) à l'aide d'un spectromètre de masse à double collecteur. Disposant des résultats de la teneur en azote ¹⁵N des plantes, la quantification de la fixation symbiotique a été réalisée par la méthode de l'abondance naturelle. Cette méthode exploite les différences en enrichissement en ¹⁵N qui existent naturellement entre le sol et l'atmosphère (Amarger *et al.*, 1979). Le blé pur a servi de plante de référence pour calculer la fixation de la luzerne en association et en culture pure. Habituellement, l'estimation de la fixation symbiotique dans le cas des traitements fertilisés est réalisée par la méthode de dilution isotopique basée sur l'apport d'un engrais marqué afin d'augmenter l'écart entre le sol et l'air. Dans notre étude, nous nous sommes basés sur les résultats présentés par Corre-Hellou (2005) qui montrent que la comparaison de ces deux méthodes donne des résultats proches. Ceci nous a permis d'utiliser la première méthode dans notre cas et de s'affranchir des coûts très élevés liés à la mise en oeuvre de la deuxième méthode.

Le pourcentage d'azote issu de la fixation symbiotique (*% Ndfa : N derived from air*) est calculé alors comme suit:

$$\% \text{ Ndfa} = 100 \times \left(\frac{\% {}^{15}\text{N}_{\text{luz}} - \% {}^{15}\text{N}_{\text{blé}}}{\text{Beta fix} - \% {}^{15}\text{N}_{\text{blé}}} \right)$$

Avec :

$\% {}^{15}\text{N}_{\text{blé}}$: enrichissement isotopique de la plante non fixatrice de référence.

$\% {}^{15}\text{N}_{\text{luz}}$: enrichissement isotopique de la légumineuse, cas de la luzerne.

Beta fix : enrichissement en ${}^{15}\text{N}$ de la légumineuse quand son alimentation en azote repose uniquement sur la fixation symbiotique.

Le Beta fix est calculé comme suit :

$$\text{Beta fix} = \left(\frac{\% {}^{15}\text{N}_{\text{luz}} - \% {}^{15}\text{N}_{\text{blé non fertilisé}}}{\% \text{Ndfa}} \right) + \% {}^{15}\text{N}_{\text{blé non fertilisé}}$$

Dans notre cas, la luzerne pure non fertilisée est conduite au champ, ce qui signifie que le %Ndfa n'est pas égal à 100% (vu qu'elle absorbe une partie d'azote qui provient du sol):

Dans ce cas le calcul du %Ndfa ce fait comme suit :

$$\begin{aligned} \% \text{ Ndfa} &= \frac{Q \text{ N luz pure}_{\text{fix}}}{Q \text{ N luz pure}_{\text{total}}} \\ &= \frac{Q \text{ N luz pure}_{\text{fix}} - Q \text{ N luz pure}_{\text{absorbé}}}{Q \text{ N luz pure}_{\text{total}}} \end{aligned}$$

Et puisque : $Q \text{ N luz}_{\text{absorbé}} = Q \text{ N blé}_{\text{non fertilisé}}$

Alors :

$$\% \text{ Ndfa} = \frac{Q \text{ N luz pure}_{\text{fix}} - Q \text{ N blé}_{\text{non fertilisé}}}{Q \text{ N luz pure}_{\text{total}}}$$

Avec : Q N luz et Q N blé sont les quantités d'azote totale présentent respectivement dans la luzerne et dans le blé.

c) *Azote minéral du sol*

Pour les deux années expérimentales, la dynamique de l'azote minéral du sol a été suivie pour tous les traitements de culture pure et de culture associées depuis le semis de la luzerne jusqu'à la fin de la période d'interculture (Tableau 2.4), avec un intervalle de temps qui varie

de deux à trois mois, soit au total sept dates de mesures. Les prélèvements du sol ont été réalisés à l'aide d'une tarière hydraulique sur 5 horizons (0-7; 7-20 ; 20-40 ; 40-60 et 60-90 cm). Chaque échantillon de terre est constitué à partir d'un mélange de neuf carottes élémentaires par traitement.

L'extraction de l'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) des échantillons préalablement conservés à 4°C a été réalisée en agitant 100g de terre humide pendant 30 min à 20°C en présence de 200ml de chlorure de Potassium KCl 1M. La concentration de l'azote minéral a été déterminée par calorimétrie en flux continu (TRAACS 2000, Bran & Luebbe, Norderstedt, Allemagne) selon la méthode de Kamphare *et al.* (1967) pour mesurer les teneurs de nitrate et de nitrite et de celle de Krom (1980) pour l'ammonium.

2.2.4.5 Architectures aériennes

a) Surface foliaire

Les surfaces foliaires de chaque espèce ont été mesurées à l'aide d'un planimètre (Li-3100, Li-cor.inc, Lincoln Nebraska, USA). Cette mesure a été réalisée à chaque prélèvement de biomasse aérienne pour les deux années expérimentales en considérant uniquement les parties vertes du feuillage de chaque espèce. Pour le blé, un sous-échantillon de cinq plantes a été choisi aléatoirement lors des prélèvements pour réaliser cette mesure. Pour la luzerne, un sous-échantillon représentant le dixième de la matière fraîche totale de la luzerne a été séparé de la placette de prélèvement puis passé au planimètre. La surface foliaire de l'ensemble de la placette a été estimée en considérant la surface massique ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) du sous-échantillon planimétré. L'Indice foliaire (LAI, exprimé en surface de feuilles en m^2 par m^2 de sol) a été par la suite calculé.

b) Hauteur des plantes

Des mesures de hauteur du couvert de blé et de la luzerne ont été effectuées à douze et à neuf dates de mesure respectivement en 2008 et 2009 pour le blé depuis la levée jusqu'à la récolte. Pour la luzerne ces mesures ont été poursuivies en période d'interculture avec au total quatorze (2008) et douze (2009) dates de mesure. Pour chacune de ces dates, les mesures ont été réalisées à six endroits par parcelle élémentaire en utilisant une règle graduée qu'on positionne entre la base de la plante et le point le plus haut.

2.2.4.6 Bilan radiatif

Le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) a été mesuré à l'aide de capteurs en silicium amorphe (Solems, Palaiseau, France) pour les traitements pur (Ts_B, Ts_L0) et des traitements de cultures associées (Ts_BL0, Ts_BL1 et La_BL1) avec une mesure par bloc pour chaque traitement. Les mesures de rayonnement ont été réalisées depuis le stade « début tallage » du blé jusqu'à la période de récolte pour les deux années expérimentales. Chaque mesure a été la moyenne de six mesures prises automatiquement et moyennées toutes les heures. L'enregistrement de ces données a été réalisé en continu durant toute la période de mesure dans une centrale d'acquisition Campbell CR10X (*Campbell Scientific Inc., Shepshed, R-U*).

Pour les cultures de blé et de la luzerne pure, les mesures du PAR reçu au niveau du sol (PARs) ont été réalisées en plaçant les capteurs selon un angle de 45° par rapport à la ligne de semis des cultures. Le PAR incident (PARi) et le PAR réfléchi (PARr) ont été mesurés grâce à des capteurs cylindriques placés au-dessus du couvert et d'une façon parallèle. Pour les associations de culture, le même dispositif a été mis en place et complété par la mesure du rayonnement transmis au niveau de la strate constituée du couvert de la luzerne en mélange avec la partie basse des tiges de blé (PAR2) (Figure 2.4).

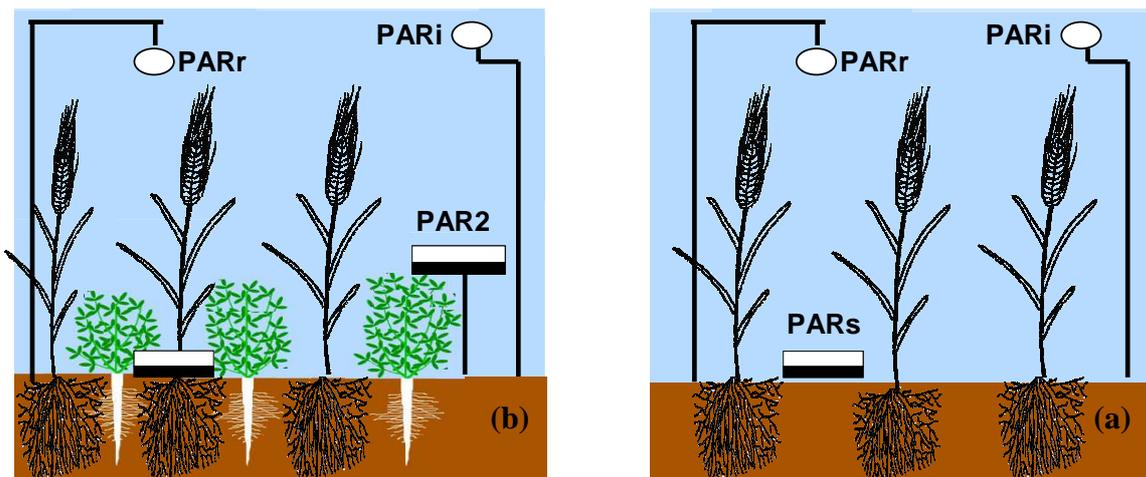


Figure 2.4 : Positionnement des capteurs PAR pour les traitements de cultures pures (a) et pour les traitements en association de culture (b).

Ces capteurs ont été rehaussés régulièrement en fonction de la hauteur du couvert de la luzerne. Par la suite, la fraction du PAR absorbé par le couvert blé et/ou luzerne (ϵ) a été calculé grâce aux équations suivantes :

- Pour les cultures pures (Ts_B ; Ts_L0) :

$$\epsilon = \frac{\text{PAR}_i - \text{PAR}_s - \text{PAR}_r}{\text{PAR}_i}$$

- Pour les associations (Ts_BL0, Ts_BL1 et La_BL1) :

$$\epsilon_{\text{blé}} \text{strate 1} = \frac{(\text{PAR}_i - \text{PAR}_s - \text{PAR}_r)}{\text{PAR}_i}$$

$$\epsilon_{\text{blé}} \text{strate 2} + \epsilon_{\text{luz}} = \frac{(\text{PAR}_i - \text{PAR}_2 - \text{PAR}_r)}{\text{PAR}_i} - \epsilon_{\text{blé}} \text{strate 1}.$$

2.2.4.7 Teneur en eau du sol

a) Mesures TDR

La mesure de l'humidité volumique (WVC (*Volumetric soil water content*) ; $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) du sol a été mesurée par des sondes TDR (Time Domain Reflectometry) aux profondeurs 10, 20, 35 et 50 cm pour tous les traitements en travail superficiel (Ts_B, Ts_BL1, Ts_BL0, Ts_L0) et pour l'association La_BL1 en labour. Les capteurs ont été positionnés à l'horizontale par rapport à la surface du sol en gardant le parallélisme entre les tiges, ce qui permet de détecter avec précision le passage de fronts humides ou d'autres flux verticaux. Ces mesures ont été réalisées pour les deux années expérimentales depuis le stade « 3 feuilles » du blé jusqu'à la fin de la période d'interculture. L'acquisition des données a été réalisée deux fois par semaine grâce au TRASE (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA, USA).

La réserve en eau dans le profil du sol (AWR (*available water reserve*) ; mm) a été estimée au niveau de le profil du sol (0-60 cm) en calculant la quantité d'eau accumulé au niveau de chaque profondeur (WC (water content) ; mm), comme suit :

$$\text{WC}_p \text{ (mm)} = \text{WVC}_p \times V_p \times 10$$

$$\text{WR}_{60} \text{ (mm)} = \sum \text{WC}_p$$

Avec :

WC_p = quantité d'eau mesurée pour une profondeur p (en mm)

WVC = mesure de l'humidité volumique mesurée une profondeur p (en $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)

V_p = Volume de la terre sur 1 m^2 de surface du sol à une profondeur p .

WR_{60} = réserve en eau dans le sol à 60 cm de profondeur

$\sum WC_p$: somme des WC pour les quatre horizons.

b) Mesures gravimétriques

La teneur en eau gravimétrique des échantillons de terre prélevés pour les mesures d'azote minéral du sol sur les horizons (0-7; 7-20 ; 20-40 ; 40-60 et 60-90 cm) ont été mesurées après passage des échantillons frais mis dans des boites en aluminium à l'étuve à 105°C pendant 24h.

2.2.5 Indicateurs calculés

2.2.5.1 Productivité de l'association : Land equivalent ratio

(LER)

Le rapport de surface équivalente (LER, *Land Equivalent Ratio*), proposé par Willey (1979) est défini comme la surface relative de culture pure nécessaire pour produire le rendement ou la biomasse de la culture dans l'association. Dans notre cas, on ne peut pas calculer le LER sur le rendement puisque la plante de couverture n'est pas récoltée. Par contre, on peut calculer le LER sur le niveau de production de biomasse des deux espèces. Le LER pour l'association est égal à la somme des LER partiels calculé pour le blé (LER_{blé}) et la luzerne (LER_{luz}). Le calcul de LER a été réalisé pour les deux années expérimentales, pour toutes les associations (BL0, BL1 et BL2) conduites sur les deux types de travail du sol (Ts et La). Pour le calcul de LER partiel de la luzerne, nous avons utilisé les valeurs de biomasse aérienne de la luzerne pure indépendamment du travail du sol. Pour le blé, ce problème ne s'est pas posé vu que nous disposions des traitements purs (B) sur les deux modalités de travail du sol.

Les LER partiels et le LER global sont calculés comme suit :

$$\text{LER}_{\text{partiel blé}} = \frac{\text{MS}_{\text{blé-IC}}}{\text{MS}_{\text{blé-SC}}}$$

$$\text{LER}_{\text{partiel luz}} = \frac{\text{MS}_{\text{luz-IC}}}{\text{MS}_{\text{luz-SC}}}$$

$$\text{LER}_{\text{global}} = \text{LER}_{\text{blé}} + \text{LER}_{\text{luz}}$$

Avec $\text{MS}_{\text{blé-IC}}$ et $\text{MS}_{\text{luz-IC}}$, la matière sèche respective du blé et de la luzerne dans l'association et $\text{MS}_{\text{blé-SC}}$ et $\text{MS}_{\text{luz-SC}}$ dans le cas des cultures pures.

Un LER avec une valeur supérieure à 1 indique que l'association a une productivité surfacique plus élevée (souvent liée à une meilleure valorisation des ressources) que les cultures pures choisies pour la comparaison. Inversement un LER avec une valeur inférieure à 1 indique que les ressources du milieu sont utilisées de manière plus efficiente dans les cultures pures comparativement aux associations. Cet indicateur permet donc d'évaluer le gain de productivité en matière sèche entre les associations et les cultures pures.

Le LER est pertinent si on s'intéresse à l'effet global de l'association, à savoir si l'on accorde la même importance aux deux cultures. Par contre, si l'on souhaite connaître l'effet sur l'une des deux espèces, il faut observer le LER partiel. Une valeur de LER partiel supérieure à 0,5 pour une espèce A signifie qu'il faut cultiver, en culture pure, une surface supérieure à la moitié de la surface en association pour obtenir le même rendement. Dès lors, pour de telles densités, un LER partiel supérieur à 0.5 correspond à une meilleure efficacité dans l'association qu'en culture pure.

2.2.5.2 Indices de nutrition azotée

L'indice de nutrition azotée (INN) proposé par Lemaire et Gastal (1997) est un indicateur de l'état de nutrition azotée de la culture (satisfaction ou non). Cet indicateur est le rapport entre la teneur en azote mesurée au niveau de la plante (N_0) et la teneur en azote critique (N_c) :

$$\text{INN} = \frac{N_0(\%)}{N_c(\%)} \quad (3)$$

N_c correspond à la plus faible concentration d'azote nécessaire pour la production de biomasse maximale en l'absence d'autre facteur limitant que l'azote (Lemaire and Gastal, 1997). Une valeur inférieure à 0.9 traduit un état de carence azotée, s'il est supérieur ou égal à 0.9, l'azote n'est pas facteur limitant de la croissance de la culture (Jeuffroy and Bouchard, 1999). Cette teneur en azote critique évolue au cours du temps, en fonction de la biomasse aérienne de la culture, selon une équation de référence propre à chaque espèce. En association, le calcul de la teneur en azote critique a été réalisé à partir des courbes de dilution de chaque espèce mais en considérant la matière sèche totale de l'association (Soussana and Arregui, 1995), d'après les équations suivantes :

Pour le blé : La teneur en azote critique est donnée par l'équation proposée par Justes *et al.* (1997)

$$\text{Si } MS_{\text{blé}} < 1.55 \text{ t.ha}^{-1} \text{ alors } N_c = 4.4\% \text{ sinon } N_c = 5.35 (MS_t)^{-0.442} \quad (4)$$

Avec comme valeur de matière sèche (MS_t) la valeur totale du mélange.

Pour la luzerne : La teneur en azote critique est donnée par l'équation proposée par Gastal et Lemaire (1997) pour les plantes en C3.

$$\text{Si } MS_{Luz} < 1 \text{ t.ha}^{-1} \text{ alors } Nc = 4.8\% \text{ sinon } Nc = 4.8 (M_t)^{-0.34} \quad (5)$$

Avec comme valeur de matière sèche (MS_t) la valeur totale du mélange.

Suite à l'étude méthodologique présentée par Bedoussac (2006), nous avons choisi de calculer l'indice de nutrition azotée pour l'association en prenant en compte la part de chaque espèce dans le mélange, selon les équations suivantes:

$$INN_{blé} = \frac{N_{blé}}{[(Nc_{blé} \times (\frac{MS_{blé}}{MS_{tot}})) + (Nc_{luz} \times (\frac{MS_{luz}}{MS_{tot}}))]}$$

$$INN_{luz} = \frac{N_{luz}}{[(Nc_{blé} \times (\frac{MS_{blé}}{MS_{tot}})) + (Nc_{luz} \times (\frac{MS_{luz}}{MS_{tot}}))]}$$

Avec :

$N_{blé}$, N_{luz} la teneur en azote mesurée respectivement pour le blé et la luzerne en association.

$MS_{blé}$, MS_{luz} et MS_{tot} respectivement la matière sèche du blé, de la luzerne en association et la somme des matières sèches des deux plantes dans le mélange.

$Nc_{blé}$, Nc_{luz} la teneur en azote critique du blé et de la luzerne calculée respectivement selon l'équation (4) et (5).

Pour les cultures de blé pur, l'INN est calculé suivant l'équation (3).

2.2.6 Analyses statistiques

L'analyse statistique est réalisée avec le logiciel R (V2.7.0-win32). Après vérification de la normalité et de l'homoscédasticité des résidus, des analyses de variance au seuil $\alpha=5\%$ ont été réalisées. Les différences significatives entre traitements ont été identifiées avec un test de Tukey au seuil de $\alpha=5\%$. Toutes les analyses statistiques réalisées sur les différentes variables mesurées sur les deux essais sont représentées dans l'annexe 3.

Chapitre 3.

MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DE L'ASSOCIATION BLE * FETUQUE

Chapitre 3. Modélisation du fonctionnement de l'association Blé * Fétuque

Ce chapitre a fait l'objet d'un article soumis à Field Crop Research « FCR » (chapitre 3.2). Dans cet article, nous présentons les résultats du paramétrage du modèle, réalisé sur les cultures pures, et l'évaluation du modèle réalisé sur les cultures associées. On complète ici avec l'évaluation de la qualité du paramétrage du modèle, réalisé sur les deux cultures pures de blé et de fétuque.

3.1 Evaluation de la qualité du paramétrage du modèle

3.1.1 Qualité de l'ajustement des paramètres plante

Les résultats simulés de l'évolution de la matière sèche aérienne du blé et de la fétuque cultivés en culture pure (Figure 3.1a), se sont avérés satisfaisants par rapport aux données observées des deux années expérimentales. Les valeurs de RMSE obtenues sont assez faibles (Tableau 3.1), ce qui traduit une simulation satisfaisante de cette variable.

Tableau 3.1 : Résultats de paramétrage de STICS- cultures pures selon les critères statistiques l'écart quadratique moyen (RMSE) et l'efficacité du modèle (EF) entre les valeurs simulées et observées pour les variables plantes et sol pour les deux années expérimentales (1999-2000 et 2000-2001).

Variables	Experimentation	RMSE	EF
Plante			
Matière sèche blé	1999-2000	1,69 (t.ha ⁻¹)	0,97%
	2000-2001	1,02 (t.ha ⁻¹)	0,97%
Matière sèche fétuque	1999-2000	1,50 (t.ha ⁻¹)	0,74%
	2000-2001	0,63 (t.ha ⁻¹)	0,89%
LAI blé	1999-2000	0,45 (m.m ⁻²)	0,92%
	2000-2001	0,75 (m.m ⁻²)	0,81%
LAI fétuque	1999-2000	1,80 (m.m ⁻²)	-0,10%
	2000-2001	1,59 (m.m ⁻²)	-0,41%
Azote absorbé blé	1999-2000	21,6 (kg.ha ⁻¹)	0,97%
	2000-2001	23,7 (kg.ha ⁻¹)	0,87%
Azote absorbé fétuque	1999-2000	65,9 (kg.ha ⁻¹)	0,38%
	2000-2001	8,15 (kg.ha ⁻¹)	0,94%
Sol			
Azote minéral au sol (0-90 cm)	1999-2000	28,2 (kg.ha ⁻¹)	0,32%
	2000-2001	97,0 (kg.ha ⁻¹)	-0,70%
Eau sol (0-90 cm)	1999-2000	13,4 (mm)	0,78%
	2000-2001	268 (mm)	-0,01%

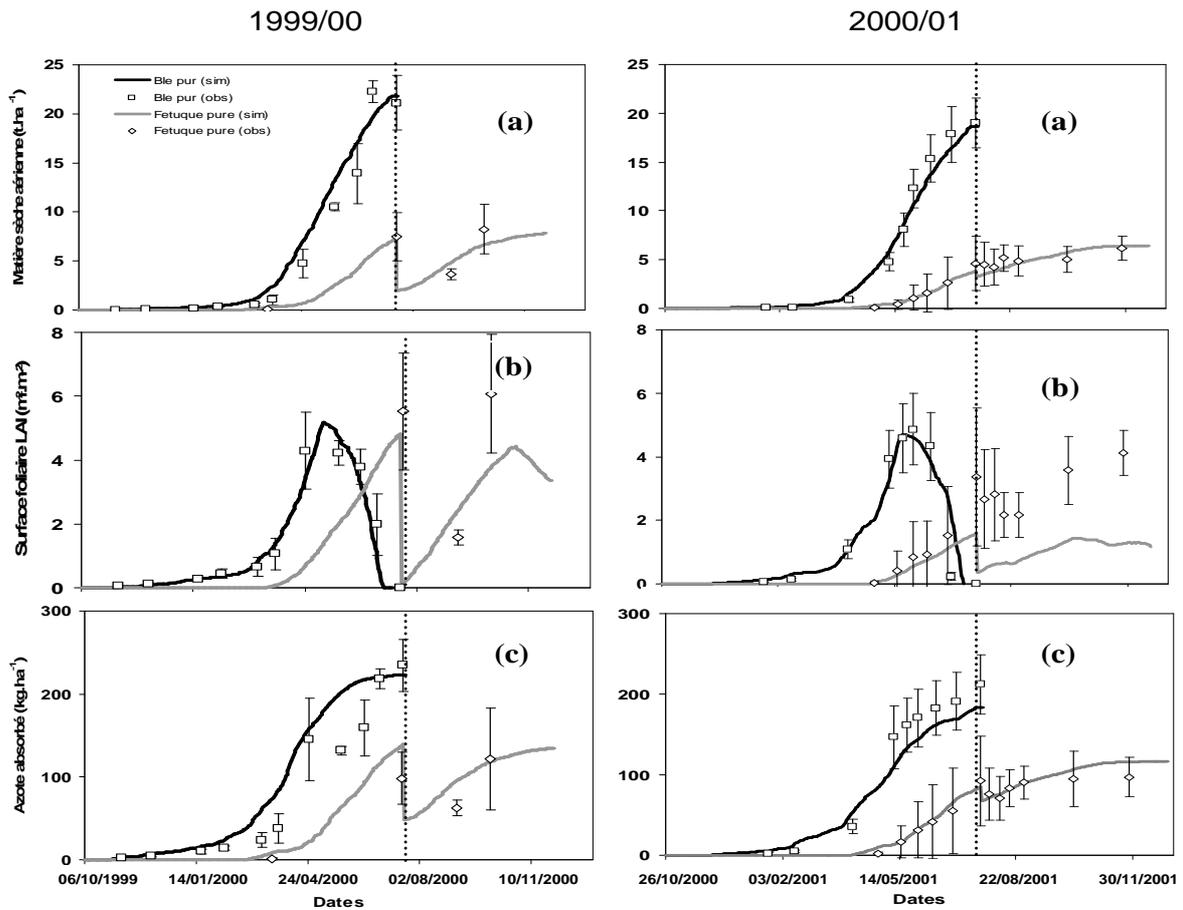


Figure 3.1 : Résultats simulés et observés des variables plantes : accumulation de la matière sèche aérienne (a), surface foliaire (LAI) (b) et azote absorbé dans la partie aériennes des plantes (c) des traitements de blé pur et de la fétuque pure pour les deux années expérimentales (1999-2000 et 2000-2001). Les barres verticales représentent les écart-types et les lignes discontinues représentent la date de la récolte du blé.

La figure (3.1b) illustre la cinétique de croissance de la surface foliaire des deux cultures pour les différents traitements des deux années expérimentales. Pour le blé, l'indice foliaire connaît d'abord une phase de croissance jusqu'à une valeur maximale avant de diminuer à cause de la sénescence. Les simulations de cette cinétique d'apparition puis de décroissance de l'indice foliaire du le blé pur sont très satisfaisantes, mais sont moins bonnes pour la fétuque, comme le montrent les valeurs des RMSE et de l'efficacité (EF) (Tableau 3.1). A partir de la récolte du blé, en période d'interculture, le modèle diverge car il sous-estime systématiquement la LAI de la fétuque, surtout en 2000. Ce résultat paraît donc préjudiciable dans l'estimation de l'absorption d'azote par la culture de fétuque à cette période. Cependant, cette divergence ne se répercute pas sur la qualité de simulation de l'accumulation de matière sèche ainsi que l'absorption d'azote de la fétuque en période d'interculture. La simulation de

l'absorption d'azote par STICS est particulièrement satisfaisante (Figure 3.1c) : le modèle arrive à bien reproduire la cinétique d'absorption de l'azote pour le blé et la fétuque purs, comme en témoignent les faibles valeurs de RMSE et les valeurs de EF (Tableau 3.1).

Globalement, les simulations des variables d'état des deux espèces cultivées en pure sont assez satisfaisantes pour espérer reproduire les différentes interactions qui peuvent avoir lieu entre le blé et la fétuque en culture associée pour les ressources du milieu. Ceci suggère que le paramétrage réalisé sur le module de « transfert radiatif » pour la culture de fétuque pure et l'optimisation des différents paramètres (variétaux et sol) permettent de simuler correctement le partage des ressources du milieu entre les deux espèces en association.

3.1.2 Qualité de l'ajustement des paramètres sol

Les résultats de simulation (Figure 3.2) montrent que globalement le modèle arrive à bien simuler l'évolution du stock d'azote minéral du sol sur le profil (0-90 cm) pour les deux années expérimentales. Toutefois, juste après les deux pics qui correspondent aux apports d'azote, le modèle a tendance à sous-estimer le stock d'azote mesuré pour le blé pur pour l'année expérimentale 2001 en raison probablement d'une forte absorption de l'azote du sol par la culture. Juste après cette phase, le modèle a tendance à bien simulé cette variable en période d'interculture. Pour le traitement de fétuque pure, le modèle diverge car il surestime ces quantités d'azote dans le profil pour la même année (2001). En effet, compte-tenu de la profondeur d'enracinement du blé qui excède 1 mètre, le modèle permet une simulation correcte du stock alors que les racines de la fétuque restent dans les 30 premiers cm du sol, ce qui peut expliquer la divergence du modèle traduite par des valeurs de RMSE très élevées (Tableau 3.1). En association, cette divergence du modèle n'aura probablement aucune conséquence sur notre étude puisque les racines des deux espèces proliféreront simultanément dans le sol ce qui permettra une absorption de l'azote par les deux espèces sur tout le profil.

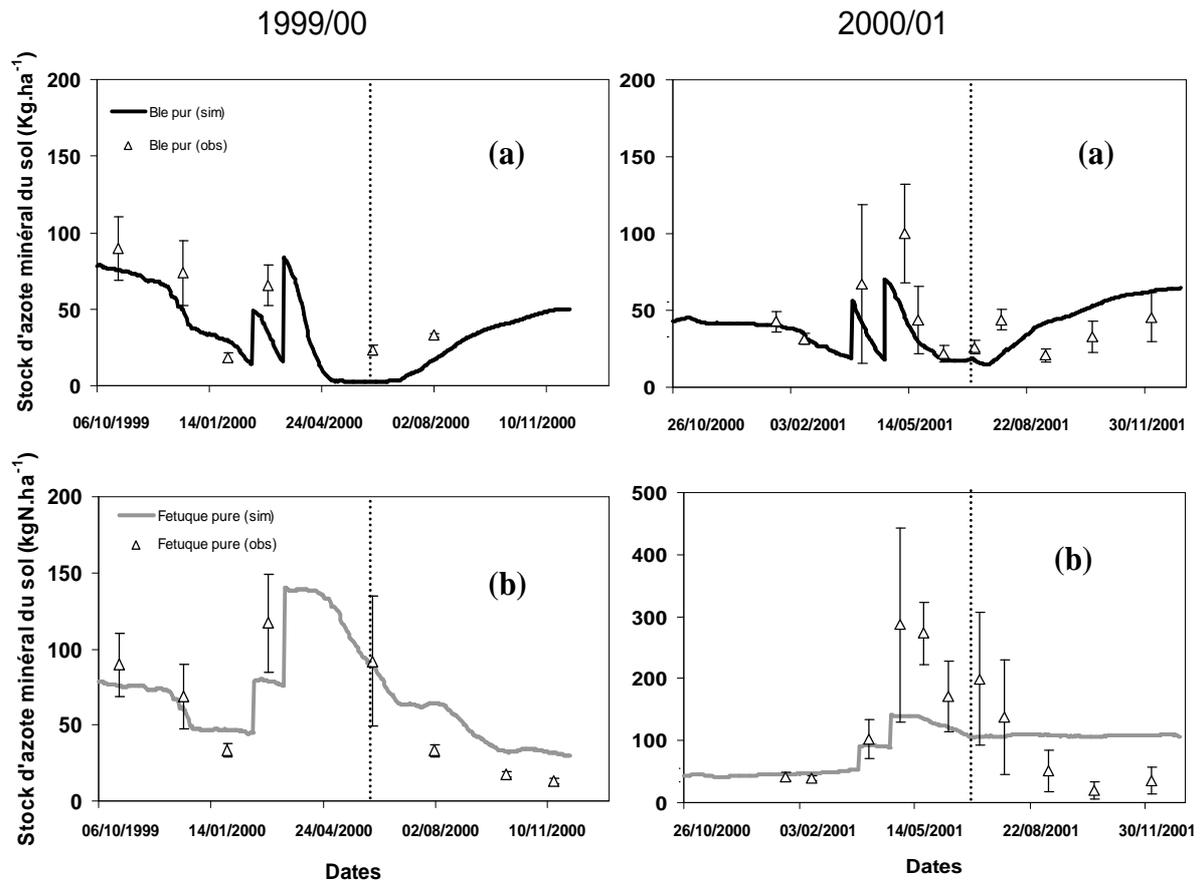


Figure 3.2 : Résultats simulés et observés des stocks d'azote minéral du sol au niveau de l'horizon (0-90 cm) pour les traitements de blé pur (a) et de la fétuque pure (b) pour les deux années expérimentales (1999-2000 et 2000-2001). Les barres verticales représentent les écart-types et les lignes discontinues représentent la date de la récolte du blé.

Les dynamiques d'évolution du stock d'eau mesurée et simulée (Figure 3.3) au niveau du profil du sol (0-90 cm) montrent une absence de stress hydrique en 2000 et une très bonne simulation du stock pour cet essai. En revanche en 2001, le stock d'azote décroche fortement en fin de cycle cultural (depuis mai jusqu'à début juillet) pour les deux cultures pures. Les résultats de simulation montrent que pour cet essai, le modèle surestime légèrement le stock pendant cette période de dessèchement du profil. Ceci suggère qu'en période de forte intensité évaporatoire, STICS a tendance à sous-estimer légèrement l'évaporation du sol. Après cette période, le modèle arrive à bien simuler la restitution des stocks et ceci pour tous les traitements. Notons cependant que les quantités mises en jeu ne peuvent pas trop influencer les quantités d'eau drainée ni la quantité d'eau évaporée dans les traitements en cultures pures. Nous pouvons donc considérer que les formalismes du modèle concernant la simulation de l'eau reproduisent bien l'évaporation et le transfert d'eau pour les différents traitements simulés dans les conditions climatiques des deux essais.

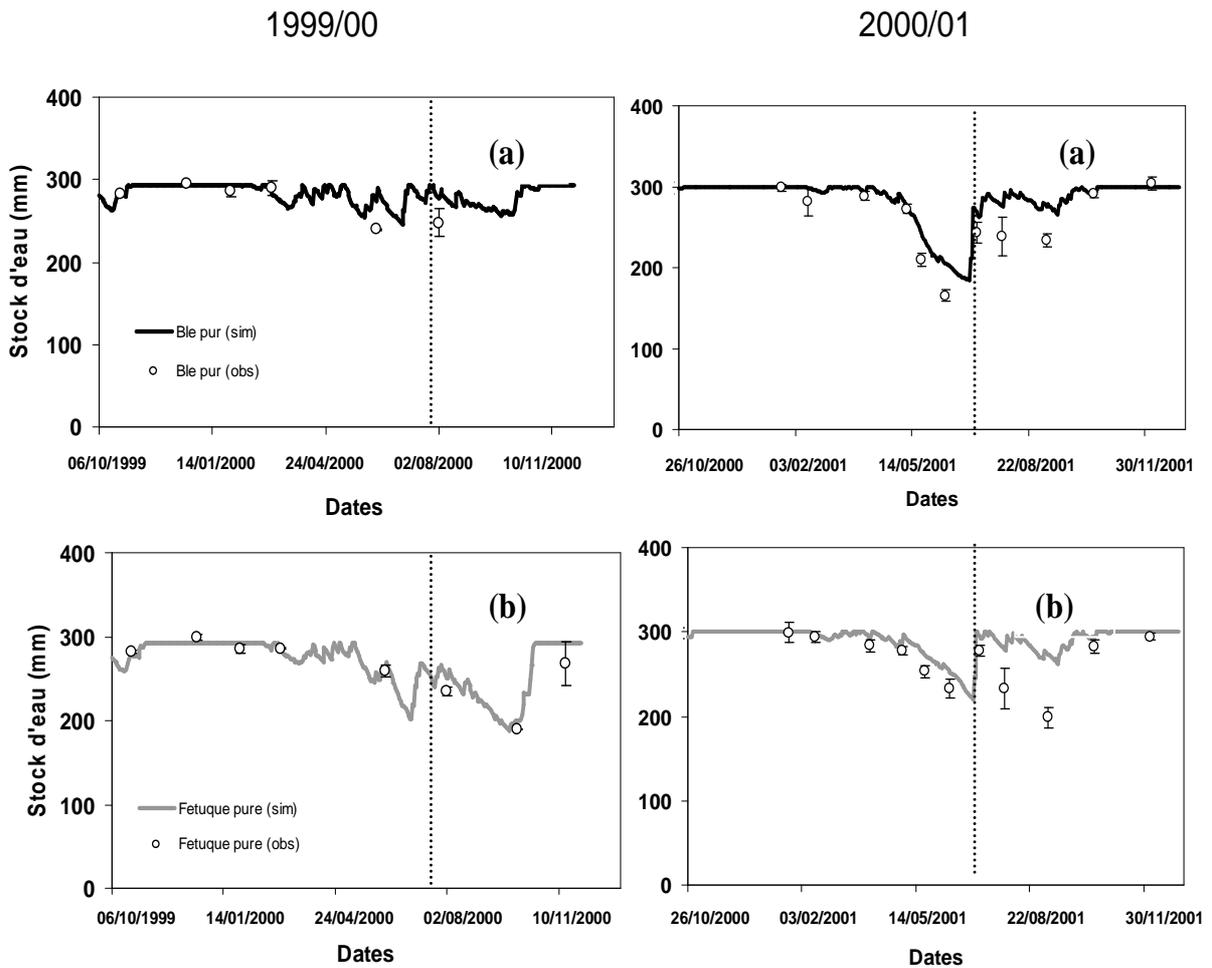


Figure 3.3 : Résultats simulés et observés des stocks d'eau du sol au niveau de l'horizon (0-90 cm) pour les traitements de blé pur (a) et de fétuque pure (b) pour les deux années expérimentales (1999-2000 et 2000-2001). Les barres verticales représentent les écart-types et les lignes discontinues représentent la date de la récolte du blé.

En conclusion, l'analyse de la simulation de l'azote minéral et de l'eau dans le profil du sol confirme que le modèle est capable de reproduire les situations pédoclimatiques de l'essai sur les deux années expérimentales. Cela nous confirme aussi la capacité de STICS à prendre en compte les effets combinés des stress hydriques et azotés sur la croissance des cultures dans les conditions de cette expérimentation.

3.2 Etude des performances agronomiques et environnementales de l'association blé * fétuque à l'échelle annuelle : Approche de modélisation

Cette partie du travail a fait l'objet d'un article accepté à la revue « Field crops research ». Le travail mené vise à approfondir les connaissances sur le fonctionnement des associations de culture fondées sur une association de blé d'hiver et d'une plante de couverture (fétuque) en étudiant les différentes interactions (facilitation ou de compétition) qui peuvent coexister entre les deux espèces pour les différents ressources du milieu (lumière, eau et azote) grâce au modèle STICS. Cet article est constitué d'une première partie qui concerne l'évaluation du modèle sur les cultures associées suivie par l'analyse des performances de l'association grâce à différents indicateurs issus des variables simulées. Différents scénarios de décalage des cycles de croissance des deux espèces sont ensuite testés en réalisant des simulations sur une série de scénarios climatiques afin de voir leurs impacts sur les indicateurs clés de performance du système qui sont le rendement du blé, la quantité de rayonnement transmis au sol tout au long de l'année (étouffement des adventices) et les flux d'eau et d'azote. Une dernière partie de cet article est consacrée à la discussion de ces résultats.

Does intercropping winter wheat (*Triticum aestivum*) with red fescue (*Festuca rubra*) as a cover crop improve agronomic and environmental performance? A modeling approach

I. Shili-Touzi¹, S. De Tourdonnet², M. Launay³, T. Doré²

¹ INRA, UMR211 Agronomie INRA-AgroParisTech, BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon, France

² AgroParisTech, UMR211 Agronomie INRA-AgroParisTech, BP 01, F- 78850 Thiverval-Grignon, France

³ INRA, Unité Agroclim, Site Agroparc, 84914 Avignon, cedex 9, France

Abstract

The introduction of a living cover crop during a cash crop growth cycle (relay intercropping) and its maintenance after the cash crop harvest may help to preserve biodiversity, increase soil organic matter content and carbon sequestration and provide other ecosystem services, such as natural pest regulation or nutrient recycling, by increasing useful biotic interactions within the agroecosystem. We studied the impact of various approaches to managing a red fescue cover crop in a winter wheat crop in terms of light, water and nitrogen competition, using the STICS crop model adapted for intercropping. The STICS model for wheat/fescue intercropping was first evaluated on two years of experimental data obtained in the field. It gave satisfactory statistical results for the prediction of dry matter, leaf area index (LAI) and nitrogen accumulation in the two species, and for nitrogen and water dynamics in the soil. By simulating unmeasured variables, such as transpiration, the model improves our understanding of the performance of the intercrop in the field. For example, we showed that the intercropping system was more efficient than wheat grown as a sole crop, in terms of nitrogen accumulation and decreasing soil nitrogen levels before the leaching period. However, it also resulted in lower wheat yields. We then used the STICS model to compare four intercropping management scenarios differing in terms of the date of red fescue emergence, over 35 climatic years. We found that, in most climatic scenarios, the emergence of the fescue crop during the late tillering phase of the wheat crop gave the best compromise between wheat yield overall nitrogen accumulation and radiation interception.

Keywords: Competition; Facilitation; Relay intercropping; Yield; Biomass; Light; Water; Nitrogen

1. Introduction

A cover crop, grown between two main crops, changes the physical (Zibilske and Makus, 2009), chemical (Rinnofner et al., 2008) and biological (Isik et al., 2009) conditions of both the soil and the crop. The use of cover crops in cropping systems therefore has interesting agronomic and environmental effects, including protecting the soil against erosion, contributing to the control of weeds and diseases, providing the next crop with nitrogen and preventing nitrate leaching (Hartwig and Ammon, 2002). Cover crops are frequently managed by sowing after the harvest of the main crop, with subsequent destruction by chemical or mechanical techniques. The introduction of a living cover crop during the cash crop growth cycle (intercropping) and its maintenance after the cash crop harvest are less frequently observed. However, this approach has several advantages, including the preservation of biodiversity, increasing soil organic matter content and carbon sequestration (Scopel et al., 2005; Lahmar et al., 2006; Teasdale et al., 2007), and increasing biotic interactions within the agroecosystem (Hartwig and Ammon, 2002). Direct and indirect interactions between the cash crop and the cover crop generate opposing facilitative and competitive effects. A facilitative effect is a positive interaction between the intercropping species (Vandermeer, 1989). Such effects occur when one crop increases the availability of resources to the other crop. For example, a living cover crop can decrease weed growth in the cash crop (Brandsaeter et al., 1998; den Hollander et al., 2007), improve soil structure regeneration and provide nitrogen to the following cash crop (if the cover crop is a legume). This may make it possible to reduce costs, by decreasing herbicides and N fertilizer requirements. However, when the cash crop and the cover crop are intercropped during the cash crop growth cycle, they generally have to compete for the same resources, which may decrease cash crop yields and returns (Carof et al., 2007a, b). The success of the intercropping system, which may be combined with reduced or no-tillage systems (Holland, 2004), therefore depends on maximizing facilitation and minimizing competition between the two crops, in terms of light, water, and nutrients. Little is currently known about these aspects, particularly for temperate crops.

Modeling can be used to simulate and to improve our understanding of the partitioning of resources in these complex systems. It is therefore a useful tool for identifying ways to increase facilitation or to curb competition. Most of the agronomic intercropping models studied to date are used as tools for achieving three main objectives. The first one of these

objectives is the analysis of biotic interactions and resource partitioning in an intercropping system (Berntsen et al., 2004; Tsubo et al., 2005a; Corre-Hellou et al., 2007). In this case, modeling provides a straightforward quantification of the processes involved in facilitative and competitive relationships, through the explicit representation of fundamental processes such as photosynthesis, dry matter partitioning, leaf area growth, root growth, plant development, the nutrient cycle and energy balance. It is also possible to fine-tune interactions between light, water, and nitrogen on the basis of analyses of the relationships between supply and demand and between related indicators, such as nitrogen nutrition index (NNI) or interception efficiency. The second objective of these models is to assess intercropping performances (Baumann et al., 2002a; Jensen, 2006; Whitmore and Schröder, 2007). In this case, modeling provides access to intermediate variables that are of considerable importance for assessment but difficult to measure, such as nitrogen and water fluxes between different compartments of the system. The third objective is to use modeling to explore scenarios defined in terms of climate or management strategy (Tsubo, 2005b; Baumann et al., 2002b; Launay et al., 2009).

In this study, we used a modeling approach to investigate facilitation and competition for resources in terms of light, water and nitrogen, in a cropping system based on the intercropping of winter wheat and red fescue. We investigated the extent to which the STICS model (Brisson et al., 2009) accurately reflected the functioning of the intercropping system over a two-year period of experimentation (Picard et al., in press), and used this model to test various cover crop management strategies in terms of competition for light, water and nitrogen, with the aim of enhancing the agronomic and environmental performances of the system.

2. Materials and methods

2.1. Model overview

The model used was an intercropping extension of the sole crop model STICS (Brisson et al., 2009) considering the system to consist of two species rather than one (Brisson et al., 2004). This model is based on a daily time-step that integrates input variables related to climate, soil properties and cropping system, to calculate both agricultural and environmental variables

(Brisson et al., 2009). STICS is a generic model that can readily be adapted to various crop types and is known to be robust, based on parameterizations in various soil and weather conditions; this model also has a high level of plasticity, based on options in terms of formalism for both physiology and management (Brisson et al., 2009). The crop is characterized by its aerial biomass and leaf area index and in terms of the number and biomass of harvested organs. The soil is divided into a succession of horizontal layers, each of which is characterized by its water and mineral N content. The soil environment is assumed to be identical for both crops in the intercropping system. Soil and crop interact through the roots, via the root density distribution in the soil profile.

STICS simulates daily biomass accumulation in the canopy and the water and nitrogen balances of the system. Crop development is driven by thermal time and is used principally to calculate leaf area and to define the filling phase of the harvested organ. The corresponding phenological stages depend on the species and variety. Crop growth is driven by plant carbon accumulation, through the interception of solar radiation by the canopy and its transformation into biomass. This biomass is thus the net result of the processes of photosynthesis, respiration, and root/shoot partitioning. The STICS intercropping model simulates the sharing of light between the two crops, by calculating radiation transfer as a function of the volume of the canopy (height and width) of each species (Brisson et al., 2004). The fraction of the photosynthetically active radiation (PAR) actually absorbed by the two crops depends greatly on their respective heights, which depend in turn on both the characteristics of the plants concerned and the growth conditions. Crop nitrogen content depends on carbon accumulation and soil nitrogen availability. The amount of nitrogen taken up by each species depends on root depth penetration, root distribution in the soil layers, and N demand. Daily absorption of N by each species is determined by the smaller of two quantities: the amount of N available through the soil-root system or crop N requirements. Crop requirements are calculated with the N concentration/biomass relationship established from the upper limit of N dilution curves. The possible existence of water stress and N stress is taken into account with indices decreasing leaf growth and biomass accumulation in conditions of water or nutrient limitation (Brisson et al., 2009). Water is transported downwards in the soil when water content exceeds field capacity in a particular layer. For nitrate, transport within the soil

profile is simulated with the “mixing cells” concept, which accounts for convection and dispersion.

2.2. Experimental data

The results used for model parameterization and evaluation were obtained in two field experiments carried out in the 1999-2000 (referred to as the 1999 experiment) and 2000-2001 (referred to as 2000) growing seasons at the INRA Grignon experimental station, located in northern France (48°50'N, 1°56'E). The soil was an orthic luvisol (FAO, 2006) containing 281 g kg⁻¹ clay, 599 g kg⁻¹ silt, and 120 g kg⁻¹ sand in the 0-90 cm soil layer, in the 1999 experiment, and 261 g kg⁻¹ clay, 649 g kg⁻¹ silt, and 90 g kg⁻¹ sand in the 0-90 cm soil layer, in the 2000 experiment. Weather conditions during the experimental period are shown in Fig.1. Cumulative daily mean temperature and cumulative solar radiation were similar in 1999 and 2000 (4895 and 4891 degree days, respectively, for temperature and 4259 and 4319 MJ m², respectively, for solar radiation), whereas cumulative rainfall was greater in 1999 than in 2000 (1164 and 867 mm, respectively; Fig.1). The preceding crop was barley in 1999 and rapeseed in 2000. The experimental treatments were winter wheat grown as a sole crop (*Triticum aestivum*, cv Isengrain), red fescue grown as a sole crop (*Festuca rubra*, cv Sunset) and winter wheat intercropped with red fescue. The intercropped crops and sole crops were sown at the same time (14 October 1999 and 10 November 2000) and at the same sites. The sowing densities were 18 kg seed ha⁻¹ for fescue and 150 plants m⁻² for wheat. These crops were grown in mixtures with an additive design in 1999 and 2000 (identical sowing densities were used for sole-crop wheat and for intercropped wheat). A split-plot design was used for both experiments, with cropping system as the main plot (sole crops and intercropping) and wheat variety as the subplot (cv Isengrain and Scipion). We used only results for cv Isengrain in this study, because STICS has been calibrated on this variety. Four experimental blocks were used in the first experiment and six were used in the second experiment. Nitrogen fertilizer applications were similar for all treatments of the two experiments, including sole-crop red fescue. The total amount of N fertilizer applied was 166 kg N ha⁻¹ in 1999 and 160 kg N ha⁻¹ in 2000. These amounts were applied in two applications, between tillering and anthesis, in each year. Weeds, pests and diseases were controlled with appropriate pesticides. Wheat (both sole-crop and intercropped wheat) was harvested on 18 July 2000 for the 1999

experiment and on 23 July 2001 for the 2000 experiment. The fescue was effectively mowed when the wheat was harvested, because the cutting bar was set at a height of 20 cm.

In each year, measurements were taken during two periods: the intercropping period (referred to hereafter as ϕ 1) and after the harvest of the wheat crop, when the fescue was growing as a sole crop (ϕ 2), until the end of the year. For these two periods, we collected the following data: oven-dried aerial dry matter, leaf area index (LAI) and nitrogen accumulation in crops, together with soil mineral nitrogen and soil water content. The experiments are described in detail elsewhere Picard *et al.* (in press).

2.3. Calibration and evaluation of the model

The parameters of STICS defined by Brisson *et al.* (2009) were used to simulate the wheat-fescue intercrops. Only varietal parameters, site-specific soil parameters and radiative transfer parameters for fescue (not available in the paper by Brisson *et al.*, 2009) were calibrated, using experimental data for sole crops only (Table 1). The model was then evaluated with intercrop data.

Tableau 3.2 (Table 1.) : Results of calibration of the STICS model for varietal parameters (wheat and fescue), for specific site context and radiative transfer parameters, based on experimental data for sole crops.

	Description of the parameters	Unity	Wheat	Fescue	Site context
Croirac	Growth rate of root front	cm degree.days ⁻¹	0.12	0.06	
JVC	Number of vernalizing days	day	55	-	
stlevamf	Sum of development units between the stages LEV and AMF	degree.days	245	116	
stamflax	Sum of development units between the stages AMF and LAX	degree.days	375	-	
stlevdrp	Sum of development units between the stages LEV and DRP	degree.days	878	1000	
stdrpmat	Sum of development units between the stages DRP and MAT	degree.days	780	600	
nbgmax	Maximum number of grain	grains m ⁻²	41.5	-	
durvieF	maximal lifespan of an adult leaf	Q10	236	303	
sea	specifique surface of fruit envelops	cm ² g ⁻¹	142	-	
adens	Interplant competition parameter	adimensional	-	-3.30E-04	
adilmax	Parameter of the maximum curve of nitrogen needs [Nplante]=adilmax MS ^A (-bdilmax)	N%	-	3.003	
bdilmax	Parameter of the maximum curve of nitrogen needs [Nplante]=adilmax MS ^A (-bdilmax)	N%	-	3.02E-01	
q0	Parameter of the end of the maximum evaporation stage	mm	-	-	2,21
Hcc	Soil water content at field capacity	%	-	-	(22 - 27)*
Hmin	Soil water content at the wilting point	%	-	-	(11 - 12)*
da	Bulk density	g.cm ⁻³	-	-	(1.14 - 1.54)*
ktrou	Extinction Coefficient of PAR through the crop (radiation transfer)	cm ⁻¹	-	0.50	
Rapforme	Ratio thickness/width of the crop form (negative when the base of the form < top)	adimensional	-	0.85	

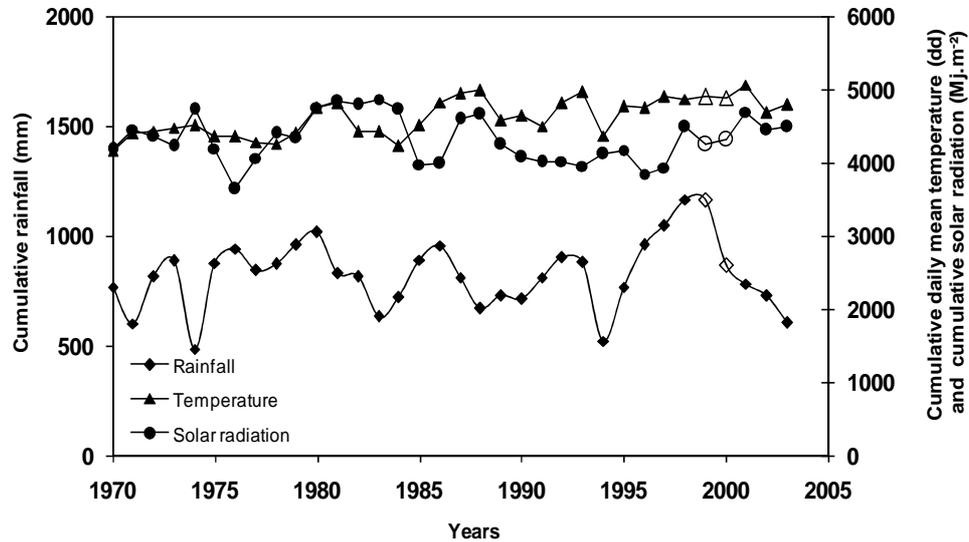
Varietal parameter calibration was carried out in two steps for wheat and fescue. We first forced leaf area index with the measured values and then calibrated the other modules closely related to this variable, such as aerial biomass and nitrogen accumulation. In the second step, we calibrated the parameters determining LAI, without forcing LAI, on the same data set. For site-specific soil parameters, we calibrated potential soil evaporation (q_0), by optimizing water content dynamics for sole-crop data. Soil water content was estimated at field capacity ($WC_{pF2.0}$) and at wilting point ($WC_{pF4.2}$), together with bulk density, for each year, on the basis of observed soil data. For fescue, we also calibrated the “radiative transfer” module in two steps, using data for sole-crop fescue (1999, 2000). First, leaf area index (LAI) parameters used to simulate changes in LAI in STICS were optimized on the basis of observed LAI data. We then used observed LAI and biomass data for sole-crop fescue to optimize the two parameters of the “radiative transfer” module mentioned in Table 1.

We used several criteria to compare simulated and experimental results in intercrops (Wallach and Goffinet, 1987). The root mean square error (RMSE) was used to evaluate the prediction error of the model, by heavily weighting large errors. We assessed the predictive ability of the model by calculating the root mean square error of prediction (RMSEP) and model efficiency (EF). A detailed description of the estimation of these criteria was provided by Wallach et al. (2006).

2.4. The scenarios simulated

Simulations were used to study several management scenarios, to analyze the impact of the timing of the fescue cycle on the agronomic and environmental performance of the system. These simulations were run over 35 years of climatic data (1970-2004) from Versailles (48°48'N, 2°04'E), which is situated close to the Grignon experimental station, to enable us to take climate variability into account in the scenario assessment (Fig. 1). We compared four management scenarios, assessing the performance of the system during the two phases considered ($\phi 1$ and $\phi 2$). We stopped the simulation on 31 December, because STICS cannot run simulations over more than two consecutive years.

Figure 3.4 (Fig. 1.) : Weather data (cumulative daily mean temperature, cumulative rainfall and cumulative solar radiation) calculated over the total period of simulation (10 October (year n) until 31 December (year n+1)) for each climatic year (35 years from 1970 to 2004) at Versailles, northern France. Open symbols correspond to the two experimental years (1999 and 2000)



Scenario 0 simulated wheat grown as a sole crop and was treated as the reference scenario against which the performance of the other three scenarios was assessed. In scenario 1, we simulated fescue emergence one week after the harvest of the wheat crop (in July, precise date depending on wheat maturity), corresponding to a double-cropping system: sole-crop wheat followed by sole-crop fescue. In scenario 2, we simulated fescue emergence in the spring (18 March), corresponding to relay intercropping: wheat grown as a sole crop from October to March and then intercropped with fescue. In scenario 3, we simulated the simultaneous emergence of wheat and fescue (10 October), corresponding to full intercropping. In scenarios 2 and 3, fescue was not destroyed after wheat harvest, therefore remaining alive during ϕ 2.

Some of the other simulated cropping practices and initial data for state variables were similar over the 35 years for the four scenarios. Three applications of N fertilizer were carried out, on 25 February, 25 March and 30 April. The amounts of N fertilizer applied during the first and third applications were fixed at 50 and 40 kg ha⁻¹, respectively. The amount of N fertilizer applied during the second application was estimated with the balance-sheet method (Rémy and Hébert, 1977), with a target yield of 9 t ha⁻¹ for each climatic year.

3. Results

3.1. Evaluation of the model

Good agreement was found between the observed and simulated data obtained for wheat-fescue intercrops, for both years (Fig. 2 and 3), as indicated by the RMSE value and the efficiency (EF) of the model (Table 2). In both years of experimentation, the model reproduced the marked predominance of wheat over fescue. Dry matter levels were much lower for fescue than for wheat (Fig. 2a): at harvest, mean observed wheat dry matter content was about 17.6 t ha^{-1} and mean observed fescue dry matter content was about 0.42 t ha^{-1} , in both years. The wheat developed leaf area more quickly than fescue during $\phi 1$ (Figure 2b). Just before the wheat harvest, wheat LAI decreased due to senescence, leading to an increase in fescue LAI, which was overestimated by the model but with no effect on the simulation of dry matter and N accumulation.

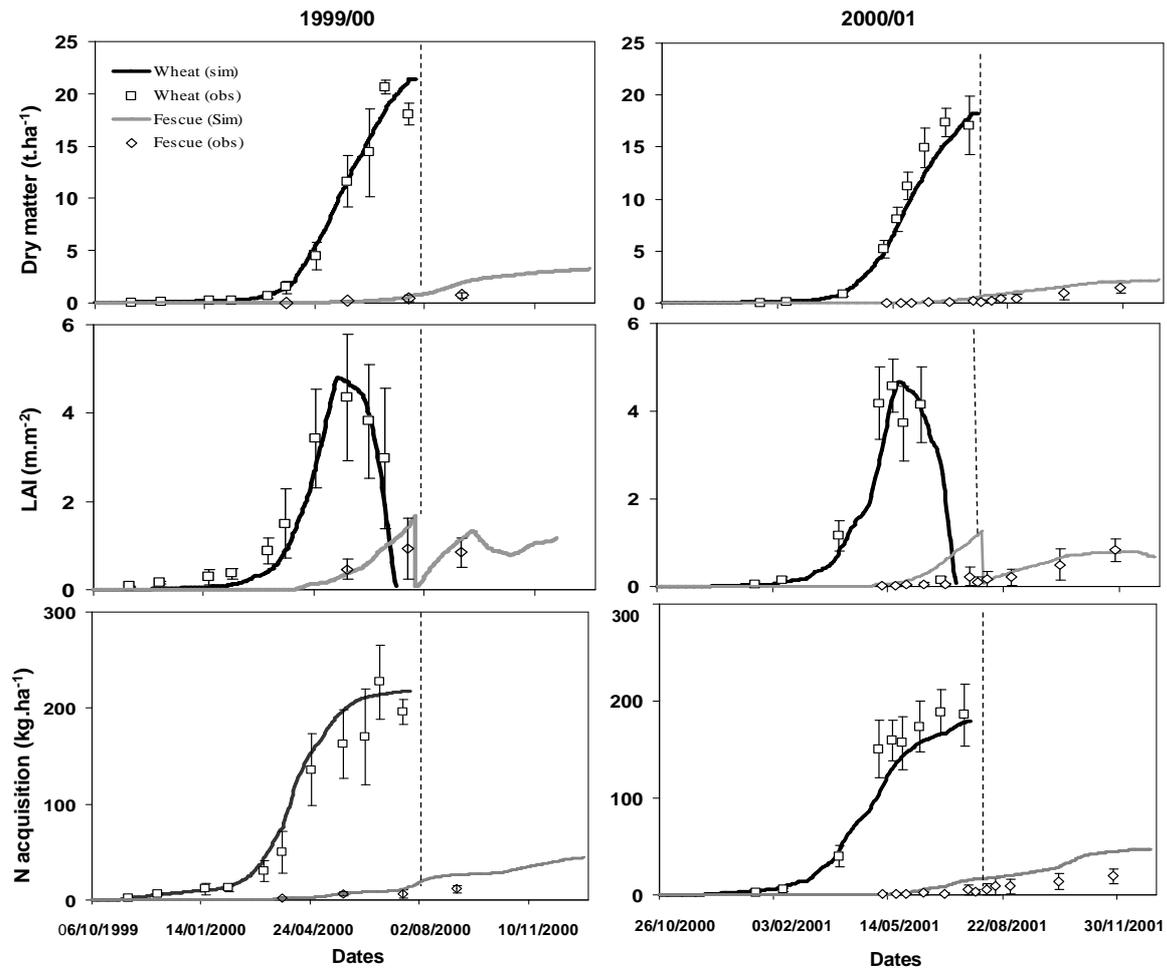


Figure 3.5 (Fig. 2.) : Observed (obs) and simulated (sim) aerial dry matter accumulation (a), leaf area index (LAI) (b) and nitrogen (N) acquisition (c) in intercropped wheat plus fescue for the two experimental years (1999 and 2000). Vertical bars indicate the least squares difference (0.05) and the dashed vertical line shows the date of wheat harvest.

Wheat absorbed much more nitrogen than fescue during ϕ 1 (Fig. 2c). At harvest, the mean amount of nitrogen absorbed was $190.7 \text{ kg N ha}^{-1}$ for wheat and 6.5 kg N ha^{-1} for fescue. However, the fescue absorbed the residual soil mineral nitrogen just after wheat harvest. The simulations for this variable were of better quality for ϕ 1 than for ϕ 2. The model overestimated nitrogen accumulation by fescue during this period. However, the differences between the observed and simulated values remained small. The observed and simulated yield values were 8.47 and 10.7 t ha^{-1} , respectively, in 1999 and 8.9 and 8.57 t ha^{-1} , respectively, in 2000, giving a RMSEP of 2.27 t ha^{-1} ($n=2$).

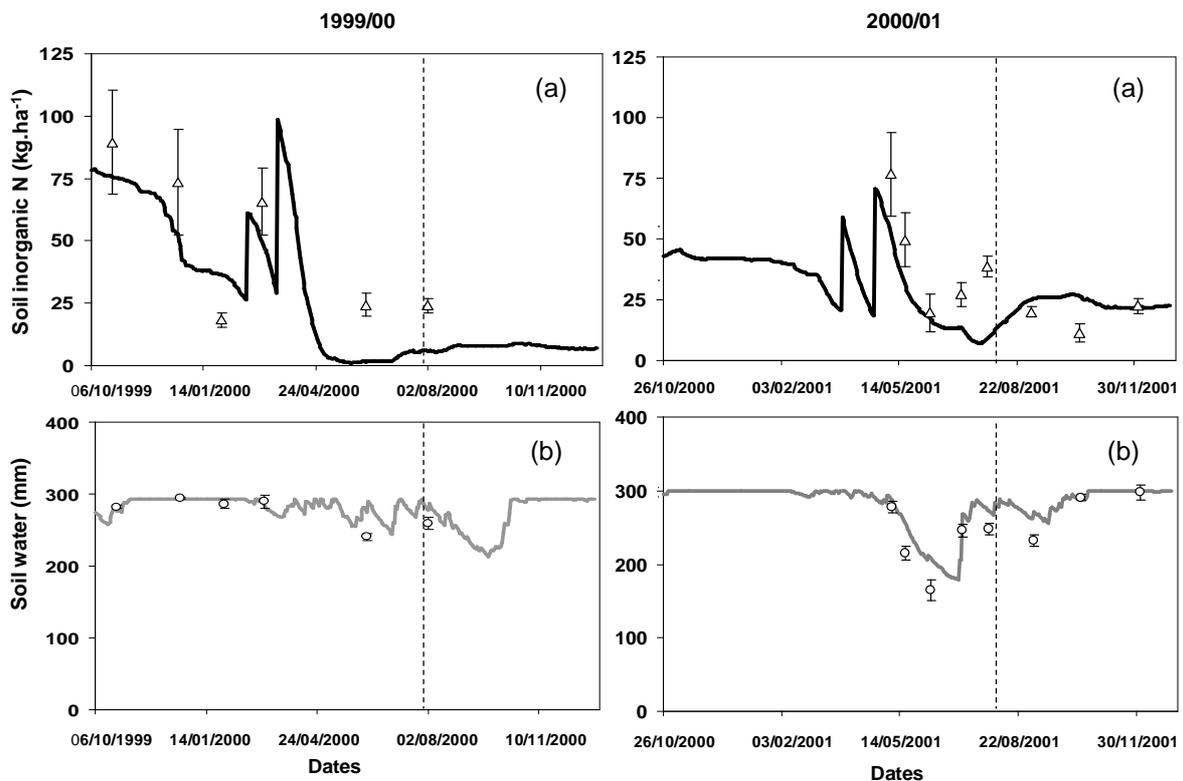


Figure 3.6 (Fig. 3.) Observed (line) and simulated (symbols) inorganic nitrogen in the soil (a) and soil water content (b) in wheat-fescue intercrops for the two experimental years. Vertical bars are least squares differences (0.05) and the dashed vertical line shows the date of harvest

The agreement between the observed and simulated data for inorganic N in the soil (Fig. 3a) was less satisfactory than for the results presented above, as indicated by the RMSE and the EF of the model (Table 2). Nevertheless, the model reproduced the principal changes in soil inorganic N and water content well until the wheat harvest. The model simulated overall changes in soil water content well during the two contrasting experimental years (Fig. 3b). The model also simulated accurately a dry period observed at the end of the summer of 1999 and at the end of the growth cycle in 2000. However, for 2000, the model tended to

overestimate soil water content just after a dry period (beginning of June until October). However, the amount of water involved in this overestimate was not very large: the difference between observed and simulated soil water contents varied between 20 and 40 mm during this period. After the dry period, the model accurately simulated the reconstitution of soil water stores.

Tableau 3.3 (Table.2) : Root mean square error (RMSE) and efficiency (EF) of the model obtained for the plant and soil variables for wheat-fescue intercrops, for the two experimental years (1999 and 2000).

Variables	Experiment	RMSE	EF
Plant variables			
Wheat dry matter	1999	1.28 (t.ha ⁻¹)	0.97 %
	2000	0.98 (t.ha ⁻¹)	0.97 %
Fescue dry matter	1999	0.40 (t.ha ⁻¹)	0.56 %
	2000	0.35 (t.ha ⁻¹)	0.72 %
Wheat LAI	1999	0.47 (m.m ⁻²)	0.91 %
	2000	0.86 (m.m ⁻²)	0.75 %
Fescue LAI	1999	0.15 (m.m ⁻²)	0.72 %
	2000	0.37 (m.m ⁻²)	0.12 %
Wheat N acquisition	1999	20.6 (kg.ha ⁻¹)	0.94 %
	2000	18.4 (kg.ha ⁻¹)	0.91 %
Fescue N acquisition	1999	7.44 (kg.ha ⁻¹)	0.46 %
	2000	9.71 (kg.ha ⁻¹)	0.49 %
Soil variables			
Soil inorganic N (0-120 cm)	1999	18.7 (kg.ha ⁻¹)	0.58 %
	2000	35.5 (kg.ha ⁻¹)	-0.73 %
Soil water (0-120 cm)	1999	16.1 (mm)	-1.23 %
	2000	255 (mm)	-0.02 %

3.2. Performance of wheat-fescue intercropping, as assessed by the model

Simulation results showed that wheat yield was not overly affected by fescue development in the intercropping system (table 3): yield differences between sole-crop and intercropped wheat were about 0.43 t ha⁻¹ in 1999 and 0.39 t ha⁻¹ in 2000, corresponding to a difference of less than 5%. The modeling results provide an explanation for this difference, through analyses of the partitioning of resources between the two crops. The model provides insight into the contribution of each species to dry matter production, light interception, water consumption and N acquisition in the intercropping system. The comparison between simulated aerial dry matter for intercropped wheat and sole-crop wheat showed that dry matter levels were slightly lower (about 2%) for intercropped than for sole-crop wheat in both

years. However, dry matter levels for wheat plus fescue were 11% and a 9% higher than for sole-crop wheat, in both 1999 and 2000, due to the growth of fescue during ϕ 1 and, particularly, ϕ 2. PAR interception by intercropped wheat was similar to that for sole-crop wheat in both years (Table 3). Nevertheless, over the complete cycle (ϕ 1 and ϕ 2), the model simulates 27% and a 21% higher levels of total absorbed radiation in 1999 and 2000, respectively, due to the greater LAI of the fescue. Indeed, fescue intercepted 51 and 35 MJ m⁻² of light, respectively, in 1999 and 2000 during ϕ 1, and about 178 and 119 MJ m⁻², respectively, in 1999 and 2000 during ϕ 2 (Fig. 4). Thus, 19% and 15% less radiation reached the soil in the intercropped system in 1999 and 2000.

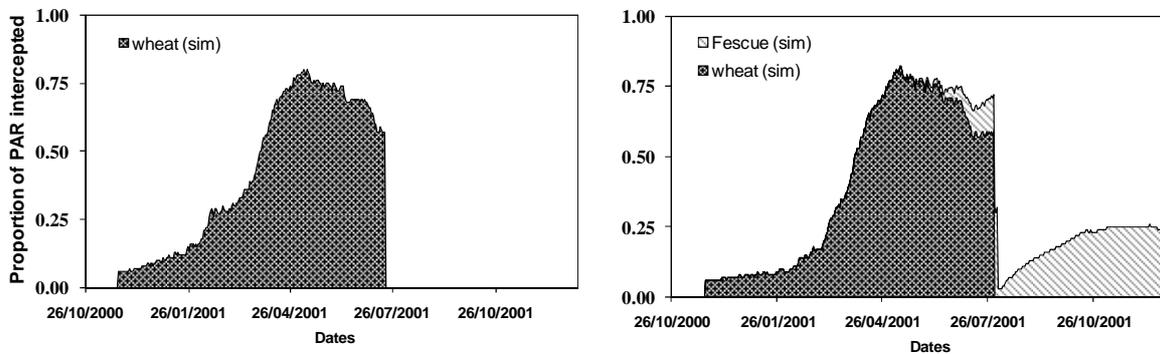


Figure 3.7 (Fig.4.) Simulated daily proportion of PAR intercepted by the sole crop wheat (a) and wheat plus fescue intercrop (b) in 2000. The pattern of change in the proportion of light intercepted was observed in 1999.

Simulation showed that the intercropped wheat absorbed 2% less nitrogen in 1999 and 2000 than did sole-crop wheat (Table 3). However, overall nitrogen absorption by wheat plus fescue in the intercropped system was greater than nitrogen absorption by sole-crop wheat. Indeed, an additional 43 and 46 kg of nitrogen per hectare was absorbed by the fescue in 1999 and 2000, respectively, during ϕ 1 and ϕ 2. The nitrogen absorbed by the two crops reduced residual soil nitrogen levels by 8 and 9 units after harvest in 1999 and 2000, respectively, and by 39 and 42 units by 31 December, in 1999 and 2000, respectively (Table 3). This decrease in soil nitrogen stores before the end of December decreased the amounts of nitrogen likely to be leached during January-April leaching period.

The simulated transpiration for intercropped wheat was slightly lower (about 1%) than that for sole-crop wheat, in both years (Table 3). Nevertheless, the total water transpired by the two crops over the whole cycle (ϕ 1 and ϕ 2) was 22% in 1999 and 15% higher in 2000 than

that transpired by sole-crop wheat. This had a direct effect on evaporation from the soil: in both years, intercropping wheat and fescue resulted in 12% less evaporation from the soil than growing wheat as a sole crop. This difference results mostly from the presence of the fescue during $\phi 2$, which limits water loss by evaporation from the soil (Table 3). The simulated amount of below-ground water drainage differed considerably between the two experimental years (Table 3), due to climatic differences. Drainage levels were 11% lower in 1999 and about 4% lower in 2000 in intercropped wheat and fescue than in sole-crop wheat.

Tableau 3.4 (Table.3.) : Simulated results for the performance criteria of sole-crop wheat and wheat-fescue intercrops during the crop growth period and the interculture period for the two experimental years.

Period System Crops	Experiment	Crop period ($\phi 1$)			Interculture ($\phi 2$)		Difference*
		Monoculture	Intercropping		Monoculture	Intercropping	
		Wheat	Wheat	Fescue	None	Fescue	
Crop production							
Wheat Yield (t.ha ⁻¹)	1999	10.7	10.3	0	0	0	-4%
	2000	8.57	8.18	0	0	0	-5%
Dry matter (t.ha ⁻¹)	1999	21.8	21.4	0.59	0	2.19	11%
	2000	18.6	18.2	0.49	0	1.69	10%
Light							
PAR intercepted by the canopy (Mj.m ⁻²)	1999	854	854	51	0	178	27%
	2000	729	764	35	0	119	21%
PAR transmitted to the soil (Mj.m ⁻²) at harvest ($\phi 1$) and at 31 December ($\phi 2$)	1999	1556	1372		1596	1174	-19%
	2000	1206	1121		1526	1204	-15%
Water							
Crops water transpiration (mm)	1999	226	225	13	0	38	22%
	2000	215	213	11	0	24	15%
Soil water evaporation (mm) at harvest ($\phi 1$) and at 31 December ($\phi 2$)	1999	269	266		184	139	-11%
	2000	185	186		163	120	-12%
Drainage (mm) at harvest ($\phi 1$) and at 31 December ($\phi 2$)	1999	247	245		126	88	-11%
	2000	325	320		14	4	-4%
Soil water (mm) 0-120 cm at harvest ($\phi 1$) and at 31 December ($\phi 2$)	1999	293	293		293	293	0%
	2000	282	277		299	299	-1%
Nitrogen							
N acquisition (kg .ha ⁻¹)	1999	223	218	15	0	28	17%
	2000	183	179	15	0	31	23%
Soil inorganic N (kg.ha ⁻¹) 0-120 cm at harvest ($\phi 1$) and at 31 December ($\phi 2$)	1999	13	5		47	8	-78%
	2000	17	8		65	23	-63%

Soil water content was slightly lower at harvest (5 mm) in 2000 and complete replenishment occurred by the end of December in both years (Table 3). Overall, the intercropping of fescue with wheat did not decrease the availability of water resources for the following crop.

3.3. Analysis of four simulated scenarios for emergence dates over 35 climatic years

The simulated yield for sole-crop wheat (scenario 0) varied from 7.60 to 10.9 t ha⁻¹ (Fig. 5a), and simulated aerial dry matter varied from 18.0 to 22.5 t ha⁻¹ (Fig. 5b), depending on the year considered. Yield (5.70 t ha⁻¹) and dry matter (15.8 t ha⁻¹) levels were exceptionally low in 1975, due to the occurrence of a very dry season with mean rainfall levels of 277 mm over the simulated period, whereas mean rainfall over the 35 years was 540 mm. Over the 35 years considered, intercropping fescue with wheat was predicted to result in a 0.52 t ha⁻¹ lower wheat yield, on average, in scenario 3 than obtained for wheat as a sole crop (scenario 0), with a high level of variability between years (Fig. 5a). If the fescue emerged in spring (scenario 2), wheat yield losses did not exceed 0.5 t ha⁻¹ (0.18 t ha⁻¹ on average). No difference in wheat yield was predicted for scenario 1, in which the fescue was sown after wheat harvest and could therefore not affect wheat growth. Yield variability over time was similar for all four scenarios. Aerial dry matter levels for intercropped wheat were systematically lower in scenarios 2 and 3 than for scenario 0: with a 0.5 to 1.75 t ha⁻¹ yield loss in scenario 3 and a loss of no more than 1 t ha⁻¹ in scenario 2 (results not shown). By contrast, overall dry matter production (wheat plus fescue) was greater than for sole-crop wheat, by 1.26, 1.84 and 2.19 t ha⁻¹ on average for scenarios 1, 2 and 3, respectively (Fig. 5b), due to the production of 1.26, 2.30, 3.36 t ha⁻¹ dry matter, on average, by fescue for scenarios 1, 2 and 3, respectively (results not shown). The variability of dry matter production over time was slightly higher for earlier fescue emergence dates.

The difference between the scenarios is linked to differences in the timing of fescue dry matter production, which varied from 0.8 to 1.9 t ha⁻¹ in scenario 1, from 0.5 to 1 t ha⁻¹ in scenario 2 and from 1.5 to 2.5 t ha⁻¹ in scenario 3, depending on the year (results not shown). Analyses of intermediate variables related to resource capture (indices of nitrogen and water stress, radiation interception efficiency) identified no single major factor explaining the effect of intercropping with fescue on wheat growth and yield. This effect resulted from complex interactions between competition for light, water and nitrogen, which differed from year to year over the 35-year period.

The simulated PAR intercepted by wheat grown as a sole crop varied from 636 to 892 MJm⁻², as a function of the year considered. Regardless of the year considered, intercropping fescue

with wheat had no effect on the capacity of wheat to intercept light radiation (data not shown), but increased light interception by the whole canopy over the two phases considered (ϕ 1 and ϕ 2), with only low levels of variability over the 35 years (Fig. 5c). Overall light interception was a mean of 101, 234 and 398 MJ m⁻² higher, on average in scenarios 1, 2 and 3, respectively. Mean PAR interception over the 35 years was 13%, 31% and 52% higher in scenarios 1, 2 and 3, respectively, than for sole-crop wheat. The simulated PAR reaching ground level over the entire simulated period varied with the year, from 2339 to 3119 MJ m⁻² for sole-crop wheat. Adding fescue to the system decreased radiation transmission by a mean of 201, 497 and 839 MJ m⁻², for scenarios 1, 2 and 3, respectively, corresponding to decreases of 7%, 18% and 31% of radiation available for weed growth, respectively (Fig. 5d).

Simulated transpiration levels from sole-crop wheat (scenario 0) varied over time, from 189 to 265 mm (Fig. 5e). When wheat was intercropped with fescue (scenarios 2 and 3), the wheat crop transpired less water than did sole-crop wheat: from 0 to 15 mm in scenario 2 and from 15 to 35 mm in scenario 3 (results not shown). However, overall canopy transpiration was higher when fescue was also sown, by 17, 50 and 55 mm on average in scenarios 1, 2 and 3, respectively (Fig. 5e). The calculation of water uptake per tone of dry matter for the two crops showed that in scenarios 2 and 3 this variable was similar, for all years, over the 35-year period (11.35 to 13.75 mm/t of dry matter). The longer fescue growth cycle in scenario 3 did not affect this variable. However, in scenario 1, in which fescue emerged after the wheat harvest, this ratio was smaller and varied less (9.92 to 12.91 mm t⁻¹ of dry matter). The simulated water evaporation from the ground varied between years, from 222 to 400 mm for sole-crop wheat (Fig. 5f). Intercropping with fescue decreased evaporation, by a mean of 13, 68 and 89 mm in scenarios 1, 2 and 3, respectively.

Simulated below-ground water drainage varied from 108 to 652 mm over time for sole-crop wheat (scenario 0). Intercropping with fescue had a very slight effect on water drainage, which decreased in half the situations, and increased in the others (result not shown). In 95% of cases, the impact of intercropping was limited, corresponding to less than 10% of total water drainage in the soil profile. The balance between a higher level of transpiration, a lower level of evaporation and similar levels of drainage when fescue was sown had only a very small effect on water stores at the end of the two phases (ϕ 1 and ϕ 2) in these three scenarios, as shown by comparisons with sole-crop wheat: the differences simulated were less than 10 mm in 90% of cases (results not shown).

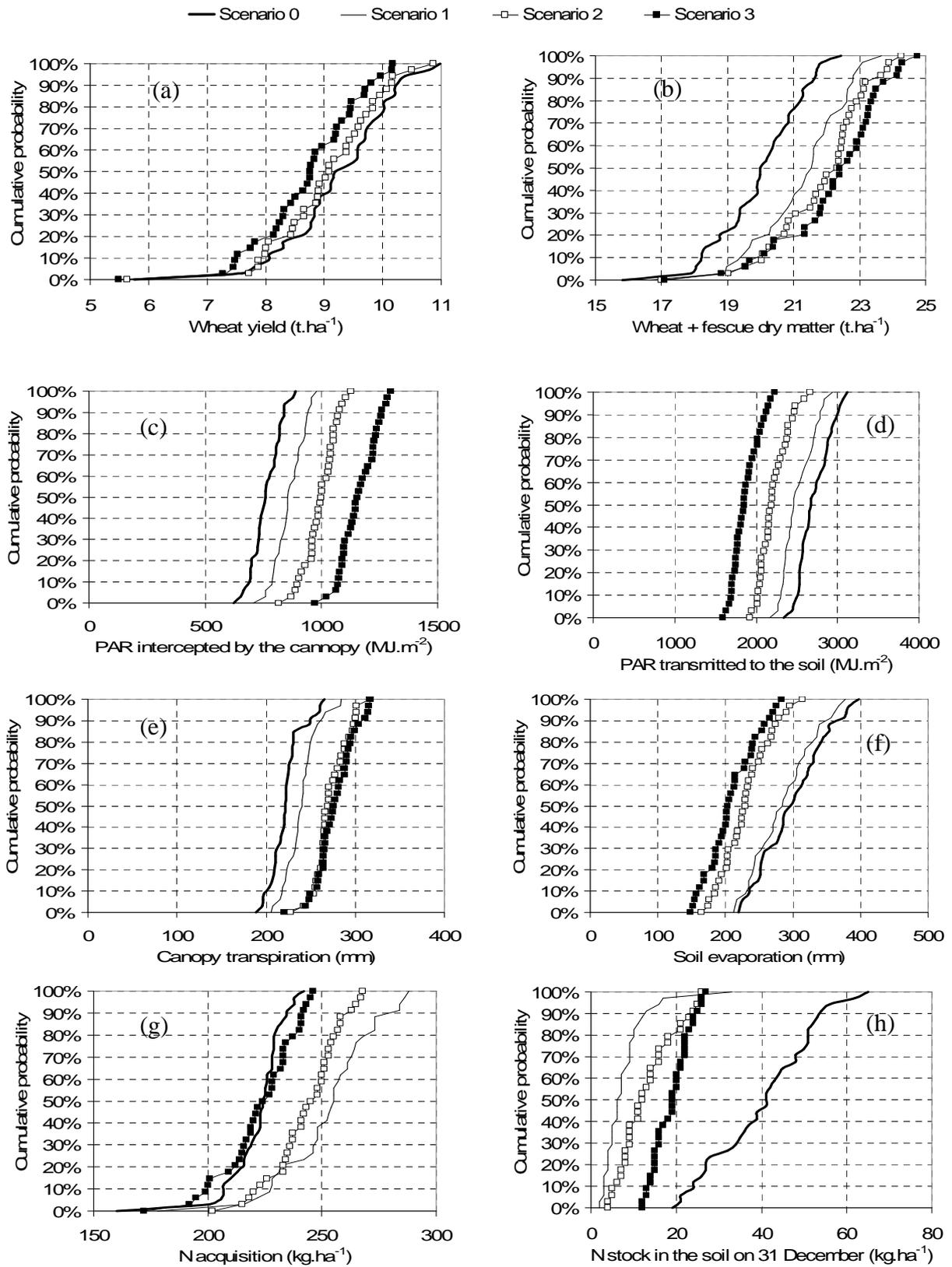


Figure 3.8 (Fig. 5.) Frequency analysis for managing scenario 0 (sole-crop wheat), 1 (wheat-fescue double cropping), 2 (relay intercropping) and 3 (full intercropping) over the 35 climatic years, for wheat yield (a), wheat-fescue aerial dry matter (b), PAR interception by crops (c), PAR transmitted to the soil (d), crop transpiration (e), soil evaporation (f), N acquisition by crops (g), mineral nitrogen in the soil in the end of the simulation on 31 December (h).

Simulated N acquisition by sole-crop wheat varied over time, from 200 to 242 kg N ha⁻¹, except for 1975, when it was exceptionally low, at 160 kg N ha⁻¹. Intercropping wheat and fescue (scenarios 2 and 3) decreased N acquisition by the wheat crop, by 10 to 35 kg N ha⁻¹ in scenario 2 and by 40 to 75 kg N ha⁻¹ in scenario 3 (data not shown). The difference in N acquisition between scenarios 2 and 3 resulted from the greater nitrogen stress in scenario 3. Over the 35-year period, an increase in N acquisition by both crops was possible only in scenarios 1 and 2 (Fig. 5g), for which intercropping increased total N acquisition by a mean of 30.5 and 21.6 kg N ha⁻¹, respectively. In scenario 3, intercropping did not systematically increase N acquisition, and the increases observed never exceeded 18 kg N ha⁻¹. Results showed that, in 50% of cases, N acquisition even decreased, by up to 20 kg N ha⁻¹. At the end of the simulated period (31 December), regardless of the scenario considered, intercropping with fescue resulted in lower soil inorganic N content than leaving the soil bare after the wheat harvest (Fig. 5h). Mean soil inorganic N content on 31 December was 40.2 kg N ha⁻¹ for sole-crop wheat (scenario 0) and varied considerably over the years, reaching a mean of 7.7, 13.1 and 18.9 kg N ha⁻¹ in scenarios 1, 2 and 3, with lower levels of variability for scenario 3.

4. Discussion

4.1. Model performance

Our approach, based on parameterization of the model with experimental data obtained for sole crops and evaluation of the model with an intercropping system, has been adopted in various studies modeling intercropping (Baumann et al., 2002b; Berntsen et al., 2004; Corre-Hellou et al., 2007). This approach gave good results in our study, showing that the model essentially used the same processes to describe the functioning of the system for both sole crops and intercropping systems. The changes in state variables observed for the intercropping system in this study therefore resulted essentially from resource sharing and changes in growth conditions (simulated by STICS) rather than processes occurring specifically in the intercropping system and relating to architectural plasticity or specific biotic constraints. Baumann et al. (2002b) showed that, in certain cases, the model makes errors, due to different leaf morphology responses in mixtures and in sole crops. In such cases, models parameterized for sole crops cannot take into account adaptations occurring in mixtures. In our conditions, any morphological adaptations occurring in intercropped plants

probably had only a very small effect on the simulated processes, due to the very strong dominance of wheat over fescue. For example, the etiolation of fescue plants would probably have been insufficient to increase their access to radiation.

Evaluation of the STICS model during the cropping cycle ($\phi 1$) indicated that this model accurately simulated biomass production, changes in leaf area and nitrogen accumulation for the two species. It also accurately simulated nitrogen and water fluxes. In other modeling studies based on the use of STICS and focusing on pea/barley intercropping systems (Jensen, 2006; Corre-Hellou et al., 2007, 2009; Launay et al., 2009), the model accurately reproduced the state variables of the intercropped species, and gave RMSE values of the same order to those obtained here. These previous results were obtained for production levels well below ours (7-14 t ha⁻¹ total biomass, versus 24 t ha⁻¹ in our study), indicating that our results were better. Corre-Hellou et al. (2007) attributed the differences between observed and simulated data to poor simulation of the partitioning of radiation between the two species in cases in which the dominance relationship between the species was inverted at the end of the cropping cycle. For our intercropping system, no such inversion occurred, with wheat continuing to dominate over fescue from sowing until harvest. Nitrogen and biotic stresses were also weaker in our experimental conditions, which were not subject to the constraints of organic farming. This may account for the differences in the level of production and the better performance of the model (as STICS models cannot take biotic stresses into account) in our study.

During the intercropping period, the model tended to overestimate the amount of mineral nitrogen taken up by the fescue after the wheat had been harvested ($\phi 2$). This decreases the quality of the model's predictions for the variable "plant nitrogen" for fescue during this period. It also implies a possible underestimation of the amount of mineral nitrogen remaining in the soil during the winter period and therefore likely to be leached. The results obtained for simulations with the model indicate that the model allowed the uptake of nitrogen by fescue roots when nitrogen levels in the soil were very low. Dorsainvil (2002) modeled intermediate crops and attributed the overestimation of nitrogen uptake by crops in the STICS model during the intercropping period to this factor, which is a generic parameter of the model that we did not modify (we modified only site-specific parameters).

In this study, model calibration and validation were limited to a specific form of multiple cropping — full intercropping — whereas the long-term simulation study involved three multiple-cropping scenarios: double cropping, relay intercropping and full intercropping. However, the validity of the simulation model for relay intercropping remains unconfirmed. The use of modeling to explore scenarios often leads to an enlargement of the climatic and cropping system conditions beyond those used for calibration (Baumann et al., 2002a; Launay et al. 2009). The STICS model has already been validated in double-cropping situations (Beaudoin et al., 2008; Gabrielle et al. 2001), in which it has been shown to perform well. However, STICS has less frequently been used to simulate relay intercropping scenarios. Nevertheless, Corre-Hellou et al. (2009) and Launay et al. (2009) reported that this model performed well in simulations of relay intercropping in which the second crop was sown several weeks after the first. Moreover, in the experiments used for model validation in this study, fescue sown at the same time as wheat began to grow during the spring — a situation not far removed from that for relay intercropping. Hence, the performance of the STICS model could be improved by more complete parameterization, but we feel that the error in the estimation of nitrogen absorption by fescue inherent to the STICS model is acceptable given the intended use of this model.

4.2. Effects of intercropping on plant growth

Although we simulated a strong domination of wheat over fescue, intercropping decreased wheat yields by about 5%. This yield-decreasing effect of intercropping on wheat has been reported in studies of other types of mixed cultures involving wheat and legumes, or on competition between wheat and weeds. In studies of competition between wheat and weeds, particularly for grass weeds, decreases in wheat yields of more than 20% have been systematically reported, with yield loss even reaching 90% in some cases, due to competition for environmental resources (Lemerle et al., 2004; Vandeleur and Gill, 2004; Blackshaw et al., 2005). In studies of wheat-legume intercropping, yield losses generally vary between 10 and 30% with respect to sole-crop wheat sown at the same density (Bulson et al., 1997; Haymes and Lee, 1999; Banik et al., 2006; Thorsted et al., 2006 b; Carof et al., 2007a), but may reach 70% in some cases in which there is intense competition for resources (Haymes and Lee, 1999; Hiltbrunner et al., 2007). This variability may be accounted for principally by the intensity of competition between wheat, the leguminous crop and weeds. In studies in

which wheat yields were little affected by intercropping, the authors generally attributed this result to a difference in the use of environmental resource niches by the two crops (Anil et al., 1998) or to the complementary use of these resources by the two species (Willey, 1979). For our intercropping system involving two members of the grass family, the small decrease in wheat yields under intercropping is unlikely to be attributable to the use of different niches. Instead, it is due to the strong dominance of wheat over fescue, resulting from an earlier onset of the growth cycle, with fescue emerging four months later than wheat. This difference in emergence times allowed the wheat crop to outcompete the fescue, particularly for the interception of solar radiation.

Intercropping may facilitate the better use of environmental resources, thereby increasing productivity (Vandermeer, 1989; Willey, 1990). In the situation studied here, intercropping did not increase total yields because the fescue was not harvested. By contrast, intercropping did increase the total amount of biomass produced, consistent with the results of various studies on intercropping (Hauggaard-Nielsen et al., 2001a; Thorsted et al., 2006c). Teasdale et al. (2007), in a long-term study of the functioning of an intercropping system involving a living cover crop, showed that the biomass produced accumulated in the soil, helping to increase the organic matter content of the soil. We showed that this increase in primary productivity resulted essentially from improvements in radiation interception when crops were grown together, particularly after the wheat harvest, consistent with the results obtained for other combinations of crops (Tsubo et al., 2001; Carof et al., 2007b). Some of these authors suggested that their results were due to the complementary nature of the aerial architecture of the two species. In our case, this complementarity results primarily from the vertical distribution of the leaves, with the taller wheat crop shading the shorter fescue (simulated data not shown).

The dominance of wheat over fescue results from its genetic characteristics rather than from an adaptation of its aerial architecture during intercropping. The simulation results, confirmed by experimental observations (Picard et al., in press), demonstrate that the LAI and height of wheat are similar in the sole crop and intercropping systems. This complementarity is also achieved through the offset of the growth cycles of the two crops, enabling the fescue to intercept solar radiation during wheat senescence and after the wheat harvest (Fig. 4). This greater radiation interception efficiency after the wheat harvest may result in the suppression

of weed populations (Bulson et al., 1997; Hauggaard-Nielsen et al., 2001a; Thorsted et al., 2006c; den Hollander et al., 2007; Hilbrunner et al., 2007). However, some studies have attributed this decrease in weed populations to an allelopathic effect observed in some crop combinations (White et al., 1989 cited by Banik et al., 2006).

4.3. Effect of intercropping on water and nitrogen fluxes

The presence of a second crop may also affect water balance, by increasing transpiration by the canopy, as shown by several authors (Thorsted et al., 2006c). Morris and Garrity (1993) showed that intercropping slightly modified water uptake, which varied between -6 and +7% of the levels recorded for sole crops, whereas the intercropping system used water much more efficiently than sole crops. In our intercropping system, the water stress indices obtained with the STICS model showed that, in the trial conditions, neither of the two crops experienced water stress during the intercropping trial. This finding may be accounted for in part by the low levels of biomass production by the fescue during $\phi 1$. Fescue contributed 2.5% of the total biomass produced during intercropping. It may also be accounted for by the decrease in evaporation and drainage due to the presence of the fescue, resulting in an absence of water deficiency in the climatic conditions occurring during the experiments. Consistent with this finding, Carof et al. (2007b) showed that intercropping did not affect water availability to cultures in this type of climate.

The dominance of wheat at the start of the growth cycle limited both nitrogen availability to the fescue and the fescue's nitrogen demand. Corre-Hellou (2005) showed, for the pea-barley combination, that a species with a rapid growth rate at the start of the cycle could rapidly come to dominate in competition for this resource. This is due to a difference in access to nitrogen, due to the difference in rooting patterns between the two species. In our situation, the dominance of wheat over fescue was also due to a difference in root architecture. Simulation results showed that the wheat roots penetrated the soil to a depth of 120 cm, whereas the fescue roots remained in the first 30 cm of soil. Hauggaard-Nielsen et al. (2001b) also observed, for a combination of pea and barley, that the barley root system penetrated to greater depths in intercropping conditions than in sole crops. This difference in rooting pattern allows the barley crop to use resources more effectively, by exploring the soil more efficiently than barley grown as a sole crop. In our conditions, the simulation data, confirmed by

experimentation (not shown) showed no difference in root length between intercropped wheat and sole-crop wheat. Maintenance of the living fescue crop immediately after the wheat harvest significantly decreased nitrogen levels in the soil on December 31 (Table 3). Fescue is thus an effective catch crop during this period, like other members of the grass family (Dorsainvil, 2002; Känkänen and Eriksson, 2007).

4.4. Impact of the timing of the fescue growth cycle on the performance of the system

Simulation results demonstrated that the system was highly sensitive to the timing of the fescue growth cycle, particularly in terms of dry matter production, the interception of radiation and nitrogen capture (Fig. 5). Effects on yield were more limited and there was almost no effect on water balance in this study. These results are consistent with studies on the impact of the sowing date of a cover crop after the main crop (Vos and van der Putten, 1997; Dorsainvil, 2002) or of an intercrop (Whitmore and Schöder, 2007; Launay et al., 2009). In the case of a cover crop introduced after the harvest (our scenario 1), Dorsainvil (2002) showed that the establishment of grasses (ryegrass in the studied concerned) was very slow if they were sown just after the cereal harvest, resulting in low levels of biomass production, principally due to water stress. We may have overestimated the emergence rate of fescue sown after the wheat harvest (scenario 1). Indeed, the simulation conditions for the emergence of a spring- or summer-sown crop are poorly described in the model: STICS takes into account only the mean water content of the soil layer containing the seeds, but large gradients in water content are often observed in the first few centimeters of the soil in summer. This might lead to the overestimation of fescue growth and resource uptake. In intercropping situations (our scenarios 2 and 3) Launay et al. (2009) obtained results similar to ours for a pea-barley system, in which barley yields were 30% higher if barley was sown two weeks before pea.

Advancing the sowing date of the fescue increases both competition effects (decreasing wheat biomass and yield) and facilitation effects (increasing total biomass and soil cover, decreasing the amount of solar radiation reaching the soil). It also increases the efficiency of radiation and nitrogen use. The sowing date for the fescue is therefore a key technical choice determining the balance between competition and facilitation. Other canopy management techniques can also be used to adjust this balance. These techniques include the mechanical

(Thorsted et al., 2006a) or chemical (Carof et al., 2007a) control of the cover crop during the growth cycle. We studied this balance over only one cropping and intercropping cycle. However, certain facilitation processes may occur more slowly. For example, the nitrogen absorbed by the fescue during the intercropping period may be supplied to the next crop, thereby reducing its nitrogen fertilizer requirements. Similarly, the increase in biomass production due to the fescue may increase the organic matter content of the soil in the medium term, thereby improving its fertility. Longer term experimental and modeling studies are required to determine the consequences of these processes for agronomic and environmental performance.

5. Conclusion

The inclusion of a fescue as a cover crop in a wheat intercropping system therefore improves environmental performance, by favoring certain biotic processes, such as the production of primary biomass, the interception of radiation that might otherwise reach weeds and the recycling of nutrient elements. A comparison of the simulated and observed results showed that the “STICS intercropping” model accurately simulated these processes and can be used to evaluate their impact on the agronomic and environmental performance of the system for different climatic and technical scenarios. The simulated results show that the use of fescue as a cover crop increases the efficiency of radiation interception by up to 50%, thereby resulting in higher levels of biomass production and a decrease, by up to 30%, in the amount of radiation reaching the ground and available to weeds. This makes it possible to recycle mineral nitrogen efficiently during the intercropping period, with no effect on water balance in the climatic conditions of the Parisian Basin. Despite the strong dominance of wheat over fescue, the simulation data nonetheless showed mean yield losses of 2 to 6%, depending on the sowing date for the fescue. Thus, the sowing date for the fescue appears to be a key technical choice for controlling the balance between competition and facilitation. Agronomic performances are slightly affected by competition in the short term, but may be improved in the long term by the facilitation processes induced by cover crops, such as nutrient recycling, increases in soil organic matter content and the improvement of soil structure. The design and assessment of cropping patterns at the level of the rotation are thus essential to maximize the benefits of facilitation. Further experimental and simulated results are required to address important points, such as rotation management for both cash and cover crops (impact on crop

establishment and growth the following crop, choice of species for intercropping), weed and cover crop management in the long term (efficiency of the cover crop for reducing weed pressure, risk of the cover crop itself becoming a weed) and nitrogen management (possibilities for reducing fertilizer requirements through recycling and/or nitrogen fixation by the cover crop). These studies should provide useful information for extension of the results presented here and for the design of cropping systems making use of facilitation through intercropping while reducing competition with cash crops.

Acknowledgments

We would like to thank Didier Picard, Mouna Ghiloufi and Patrick Saulas for providing experimental data. We also thank the STICS team of INRA Avignon for adapting the intercrop model. We are grateful to S. Tanis-Plant for fruitful discussions and editorial advice in English. The government of Tunisia and the *Institut National de la Recherche Agronomique* (INRA, France) funded the scholarship of I. Shili-Touzi. This work was partly funded by the *Agence Nationale de la Recherche* under the Systema Program: ANR-08-STRA-10 (Ecological, technical and social innovation processes in Conservation Agriculture).

Chapitre 4.

APPROCHE EXPERIMENTALE DE L'ASSOCIATION BLE*LUZERNE

Chapitre 4. Approche expérimentale de l'association blé * luzerne

4.1 Evolution des biomasses de blé, luzerne et adventices

4.1.1 Evolution de la biomasse aérienne de la luzerne

L'évolution de la biomasse de la luzerne pure (Figure 4.1a, traitements Ts_L0 et La_L0) a été différente en début de cycle de culture au cours des deux années. L'écart de production de biomasse observé entre les deux années est dû à une différence de conduite de la luzerne, semée 99 jours avant le blé en 2008, et 50 jours en 2009. Afin de réduire le développement de ce couvert (atteignant $1.2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ au semis du blé), une coupe mécanique a été réalisée en 2008 ce qui a permis une diminution de la biomasse de la luzerne à une valeur égale à $0.90 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ jusqu'au stade début du tallage du blé. En 2009, le semis plus tardif de la luzerne a engendré une production de biomasse plus faible au semis du blé ($0.40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) et une croissance plus faible qu'en 2008 jusqu'au stade « épi 1 cm » : $2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 2008 contre $0.57 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 2009. Le plateau de biomasse est atteint dès le stade épiaison avec des valeurs voisines entre les deux années ($5.23 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 2008 et $5.72 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 2009). La récolte du blé a conduit à une coupe de la luzerne dont la biomasse est descendue à $0.20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 2008. Après la coupe, la luzerne a développé une biomasse atteignant $2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ à la fin de la période d'interculture.

L'association de la luzerne avec le blé (BL0) a réduit significativement la biomasse produite par la luzerne, de 24% et 71% respectivement en 2008 et 2009, par rapport à la luzerne cultivée seule. Cela montre que la compétition exercée par le blé a été relativement faible en 2008 mais beaucoup plus importante en 2009. Cet effet année est dû à un effet positionnement du cycle de la luzerne, qui était moins défavorable au blé en 2009.

Pour les deux années, le contrôle chimique de la luzerne cultivée en association sur les traitements BL1 et BL2 a réduit la croissance de la plante de couverture quelle que soit la date de contrôle (« épi 1 cm » ou « 2 nœuds »). En 2008, le contrôle réalisé au stade « 2 nœuds » a permis de stabiliser la biomasse de la luzerne à une valeur égale à $2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ et cela jusqu'à la récolte du blé, ce qui correspond à une réduction de 50% de la biomasse par rapport au traitement BL0. En 2009, le contrôle plus précoce de la plante de couverture réalisé au stade « épi 1 cm » sur les traitements BL1 a été beaucoup plus efficace que le contrôle

réalisé au stade « 2 nœuds » sur les traitements BL2, les biomasses atteintes juste avant la récolte du blé ont été réduites de 51% et de 37% respectivement pour les associations BL1 et BL2 en comparaison avec le traitement de référence BL0. Après la récolte en 2008, aucun effet du contrôle chimique, ni de l'association n'a été observé sur l'évolution de la biomasse de la luzerne pour les traitements BL0 et BL1 en période d'interculture, correspondant à une évolution similaire à la luzerne pure.

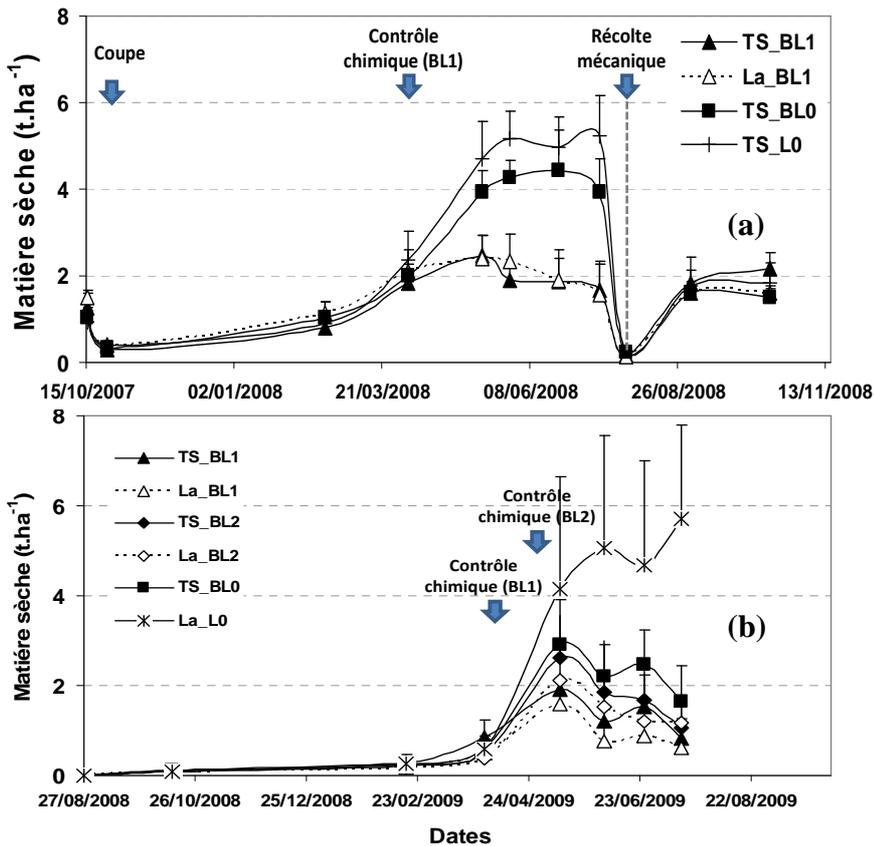


Figure 4.1 a: Evolution au cours du temps de la biomasse aérienne de la luzerne pour les associations de culture (BL0, BL1 et BL2) et les cultures pures correspondantes (L0, B) conduites en travail superficiel (Ts) et en labour (La), depuis le semis de la luzerne jusqu'à la fin de la période d'interculture en 2008 (a) et du semis de la luzerne jusqu'à la récolte du blé en 2009 (b). Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

Pour les deux années expérimentales, la biomasse de la luzerne n'est pas significativement différente pour tous les traitements (B, BL1 et BL2) entre les deux types de travail du sol (Tableaux 4.1). On note toutefois une tendance en 2009 d'une production de biomasse légèrement plus élevée en travail superficiel qu'en labour pour les associations BL1 et BL2. En revanche, en 2008 aucune différence de biomasse n'a été observée entre les deux types de travail du sol pour l'association BL1.

Tableau 4.1 (a) : Récapitulatif des analyses statistiques des différentes variables plantes et sols selon l'effet de travail du sol pour les deux années expérimentales (2007-08 et 2008-09). Le signe (-) signifie qu'il n'y a aucune différence statistique. Le signe (+) signifie qu'il y a une différence significative au seuil de 5%.

Année 2007-2008

		26/07/2007	15/10/07	11/12/07	31/01/08	19/02/08	20/03/08	04/04/08	14/04/08	22/04/08	13/05/08	28/05/08	23/06/08	15/07/08	29/07/08	02/09/08	23/09/08	14/10/08
Stades de blé		Av Semis Luz	Av Semis	Levée	5 feuilles	Début tallage	Fin tallage	Epi 1cm	1 nœud	2 nœuds	Debut epiaison	Floraison	DRP	Récolte	Post récolte			
Effet travail du sol (Ts-La)	<i>Composantes de rdt blé</i>																	
	Nb pieds.m ⁻²			-		-		-										
	Nb épi.m ⁻²											-	-	-				
	Rendement blé																	+
	<i>Biomasses</i>																	
	Biomasse aérienne blé					-		-				-	-	-	-			
	Biomasse aérienne luz		+			-		-				+	+	+	-	+	-	-
	Biomasse aérienne adv		+			-		-				-	-	-	-	-	-	-
	Biomasse racinaire												-					
	<i>Azote plante (N)</i>																	
	Azote blé						-		-			-	-	-	-			
	Azote luzerne						-		-			-	-	-	-	-	-	-
	<i>Architecture aérienne</i>																	
	Surface foliaire blé						-		-			-	-	-				
	Surface foliaire luz		+				-		-			+	+	-	-	-	-	-
	Hauteur plantes blé					-	-		-	+	+	-	-	-	-			
Hauteur plantes luz					-	+	+	+	-	+	-	+	-	-			-	
<i>Sol</i>																		
Stock d'eau		-				-		-				-			-			
Stocks azote sol		-				-		-				-			-			
Fourniture sol (0N)														-				

Année 2008-2009

		14/10/08	19/11/08	23/12/08	17/02/09	31/03/09	15/04/09	22/04/09	30/04/09	11/05/09	04/06/09	25/06/09	15/07/09
Stades de blé		Avant semis blé	Levée	3 feuilles	Début tallage	Epi 1 cm	1 noeud	2 nœuds	2 noeuds	Gonflement	Floraison	DRP	Récolte
Effet travail du sol (Ts-La)	<i>Composantes de rdt blé</i>												
	Nb pieds.m ⁻²		+		+	-							
	<i>Biomasses</i>												
	Biomasse aérienne blé				-	-				-	-	-	-
	Biomasse aérienne luz		-		-	+	-			-	-	-	-
	Biomasse aérienne adv		-		-	-				+	-	-	-
	<i>Architecture aérienne</i>												
	Surface foliaire blé				-	-	-			-	-	-	-
	Surface foliaire luz		-		-	-	+			-	-	-	-
	Hauteur plantes blé				-	-	+	+	-	-	-	-	-
Hauteur plantes luz		+		-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tableau 4.1 (b) : Récapitulatif des analyses statistiques des différentes variables plantes et sols selon l'effet de la présence de la luzerne pour les deux années expérimentales (2007-08 et 2008-09). Le signe (-) signifie qu'il n'y a aucune différence statistique. Le signe (+) signifie qu'il y a une différence significative au seuil de 5%.

Année 2007-2008

Dates de mesures		26/07/2007	15/10/07	11/12/07	31/01/08	19/02/08	20/03/08	04/04/08	14/04/08	22/04/08	13/05/08	28/05/08	23/06/08	15/07/08	29/07/08	02/09/08	23/09/08	14/10/08		
Stades de blé		Av Semis Luz	Av Semis	Levée	5 feuilles	Début tallage	Fin tallage	Epi 1cm	1 nœud	2 nœuds	Debut epiaison	Floraison	DRP	Récolte	Post récolte					
Effet luzerne (B/L-BL)	Composantes de rdt blé																			
	Nb pieds.m ⁻²				-		+			-										
	Nb épi.m ⁻²													+	+					+
	Rendement blé																			+
	Biomasses																			
	Biomasse aérienne blé						+			+			+	+	+	+				
	Biomasse aérienne luz			-			-			-			-	+	-	+	-	-		-
	Biomasse aérienne adv			+			-			-			-	+	-	-	-			-
	Biomasse racinaire													-						
	Azote plante (N)																			
	Azote blé						+			+			+	+	+	+				
	Azote luzerne						-			-			-	-	-	-	-			+
	Architecture aérienne																			
	Surface foliaire blé						-			+			+	+	+					
	Surface foliaire luz			-		-	-			-			+	+	-	-	-			-
Hauteur plantes blé								-	-	-		+	+	+	+					
Hauteur plantes luz			-		+			+	+	+	+	-	+	+	+	-			-	
Sol																				
Stocks eau		+				+			-				-			+			+	
Stocks azote sol		+				+			-				-			+			+	
Fourniture sol (0N)															+					

Année 2008-2009

Dates de mesures		14/10/08	19/11/08	23/12/08	17/02/09	31/03/09	15/04/09	22/04/09	30/04/09	11/05/09	04/06/09	25/06/09	15/07/09	
Stades de blé		Avant semis blé	Levée	3 feuilles	Début tallage	Epi 1 cm	1 nœud	2 nœuds	2 nœuds	Gonflement	Floraison	DRP	Récolte	
Effet luzerne (B&L-BL)	Composantes de rdt blé													
	Nb pieds.m ⁻²			-		-		-						
	Biomasses													
	Biomasse aérienne blé					-		-			-	+	+	+
	Biomasse aérienne luz		-		-	+		-			-	+	+	+
	Biomasse aérienne adv		-		-	-		-			-	-	-	-
	Architecture aérienne													
	Surface foliaire blé					-		-			-	-	+	+
	Surface foliaire luz		-		-	-		-			+	+	+	+
Hauteur plantes blé					-		-	-	+	+	-	-	-	
Hauteur plantes luz		+			-	+	-	+	+	-	-	-	-	

Tableau 4.1 (c) : Récapitulatif des analyses statistiques des différentes variables plantes et sols selon l'effet du contrôle chimique pour les deux années expérimentales (2007-08 et 2008-09). Le signe (-) signifie qu'il n'y a aucune différence statistique. Le signe (+) signifie qu'il y a une différence significative au seuil de 5%.

Année 2007-2008

Dates de mesures		26/07/2007	15/10/07	11/12/07	31/01/08	19/02/08	20/03/08	04/04/08	14/04/08	22/04/08	13/05/08	28/05/08	23/06/08	15/07/08	29/07/08	02/09/08	23/09/08	14/10/08	
Stades de blé		Av Semis Luz	Av Semis	Levée	5 feuilles	Début tallage	Fin tallage	Epi 1cm	1 nœud	2 nœuds	Debut epiaison	Floraison	DRP	Récolte	Post récolte				
Effet contrôle (BL0-BL1)	<i>Composantes de rdt blé</i>																		
	Nb pieds.m ⁻²			-		+			-										
	Nb épi.m ⁻²											+	+	+	+				
	Rendement blé																	+	
	<i>Biomasses</i>																		
	Biomasse aérienne blé												-	+	+	+			
	Biomasse aérienne luz												+	+	+	+	-	-	-
	Biomasse aérienne adv												-	-	-	-	-	-	-
	Biomasse racinaire													-					
	<i>Azote plante (N)</i>																		
	Azote blé													-	-	-	+		
	Azote luzerne													-	-	+	-	-	-
	<i>Architecture aérienne</i>																		
	Surface foliaire blé													-	-	-			
	Surface foliaire luz													+	+	-	-	-	-
	Hauteur plantes blé													-	-	-	+		
Hauteur plantes luz													+	+	+	+	-	-	
<i>Sol</i>																			
Stocks eau	-																		
Stocks azote sol	-																		
Fourniture sol (0N)																			

Année 2008-2009

Dates de mesures		14/10/08	19/11/08	23/12/08	17/02/09	31/03/09	15/04/09	22/04/09	30/04/09	11/05/09	04/06/09	25/06/09	15/07/09
Stades de blé		Avant semis blé	Levée	3 feuilles	Début tallage	Epi 1 cm	1 noeud	2 nœuds	2 noeuds	Gonflement	Floraison	DRP	Récolte
Effet contrôle (BL0-BL1&2)	<i>Composantes de rdt blé</i>												
	Nb pieds.m ⁻²		-		-	-							
	<i>Biomasses</i>												
	Biomasse aérienne blé										-	+	+
	Biomasse aérienne luz										-	+	+
	Biomasse aérienne adv	-			-	-	-				-	-	-
	<i>Architecture aérienne</i>												
	Surface foliaire blé											-	-
	Surface foliaire luz	-			-	-	+					-	+
	Hauteur plantes blé											-	-
Hauteur plantes luz	-					+	+	+	+	+	+	+	

4.1.2 Evolution de la biomasse aérienne du blé

Pour les deux années expérimentales, à la récolte, le blé cultivé seul (B) a développé une biomasse aérienne égale (moyenne des deux modalités de travail du sol) à 17.4 et 16.0 t ha⁻¹ respectivement en 2008 et 2009 (Figure 4.1b).

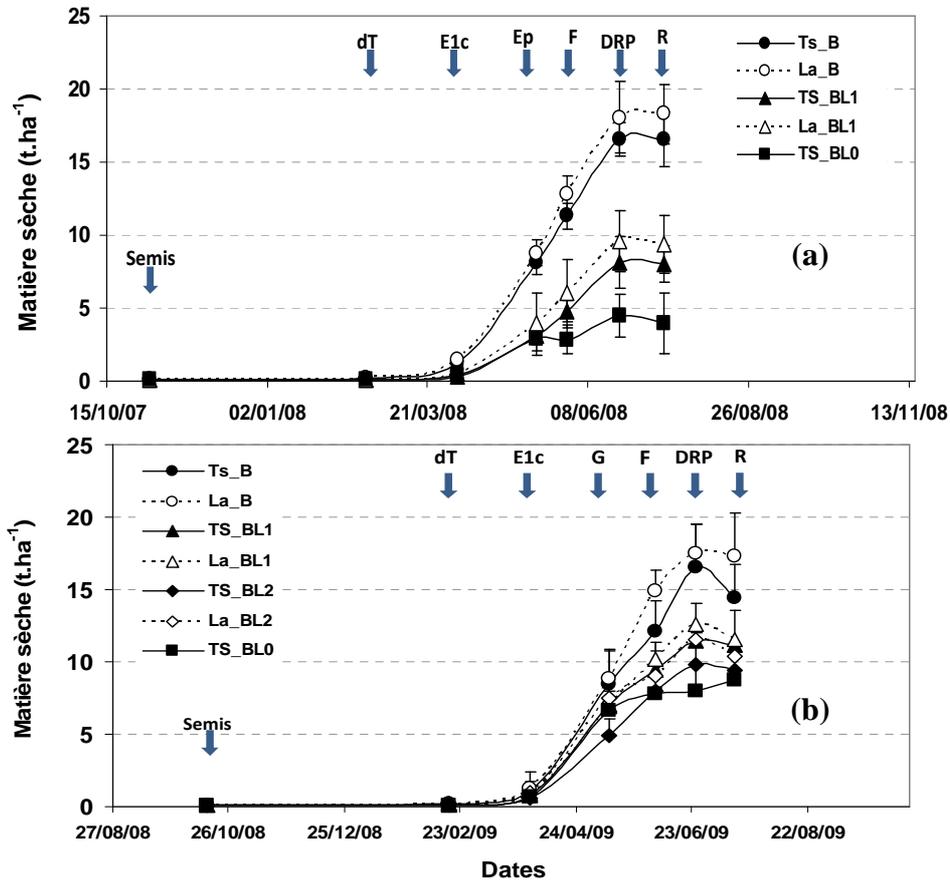


Figure 4.1b: Evolution au cours du temps de la biomasse aérienne du blé pour les associations de culture (BL0, BL1 et BL2) et les cultures pures correspondantes (L0, B) conduites en travail superficiel (Ts) et en labour (La), depuis le semis du blé jusqu'à la récolte pour les deux années expérimentales 2007-2008 (a) et 2008-2009 (b). Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

L'insertion de la luzerne en association (BL0) avec le blé a occasionné des réductions de production de biomasse de blé dont l'intensité diffère d'une année expérimentale à l'autre : la biomasse a été réduite de 76% (en 2008) et de 40% (en 2009) à la récolte, différence statistiquement significative au seuil de 5% en comparaison avec le traitement de blé pur (B).

Le contrôle chimique de la luzerne a amélioré la production de matière sèche du blé en comparaison avec le traitement sans contrôle chimique (BL0), pour les deux années expérimentales : la biomasse du blé a augmenté de 51% (2008) et de 29% (2009) pour BL1 et de 19% (2009) pour BL2 en comparaison avec le traitement BL0. Cependant, ces biomasses ont été inférieures à celles enregistrées pour le blé pur, par rapport aux quelles la biomasse du blé en association a été réduite de 50% (2008) et de 33% (2009) pour BL1, et de 42% (2009) pour BL2.

Pour les deux années, la production de biomasse de blé conduit en cultures pures ou en association a été légèrement plus élevée en labour qu'en travail superficiel. La différence de biomasse enregistrée à la récolte entre les traitements de blé pur conduits en labour et ceux conduits en travail superficiel est de 10% et de 17% respectivement en 2008 et 2009. Pour les traitements de culture associée cette différence est de 15% (2008) et de 4% (2009) pour BL1 et de 9% (2009) pour BL2. L'analyse statistique (Tableau 4.1) montre qu'il y a un effet global statistiquement significatif entre les différents traitements conduits au niveau des deux types de travail du sol au seuil de 5%, mais sans interaction entre le travail du sol et la luzerne. Le test de Tukey montre tout de même que l'effet de travail du sol n'est pas significatif si on compare les traitements deux à deux (Annexe 3).

4.1.3 Evolution de la biomasse aérienne d'adventices

La présence de la luzerne en période estivale en 2008, avant le semis du blé, a limité le développement des adventices (Figure 4.1c). Les mesures de biomasses réalisées à 21 jours avant le semis du blé montrent une réduction des adventices de 85% et de 80% respectivement en travail superficiel et en labour en comparaison avec le sol nu. En 2009, le déchaumage réalisé avant le semis de la luzerne a permis d'avoir une biomasse d'adventices beaucoup plus faible avant le semis du blé.

Pour les traitements de blé pur (Figure 4.1c, traitement B), l'application d'un traitement à base de Glyphosate juste avant le semis du blé en première année d'essai a significativement limité l'évolution de biomasse des adventices depuis le début du cycle jusqu'à la récolte du blé. En revanche, en 2009, l'application d'un anti-graminée avant le semis du blé n'a pas réduit la forte infestation en ray-grass observée sur les différentes parcelles surtout en Ts_B : au stade gonflement, la biomasse d'adventices mesurée sur ce traitement a été quatre fois et demie plus élevée par rapport à la biomasse d'adventice mesurée en La_B. À la fin du cycle, cette différence a été moins importante entre les deux traitements (égale à 0.50 t ha^{-1}) mais reste tout de même plus élevée en Ts_B. Cela montre qu'on a un effet du travail du sol sur la pression des adventices.

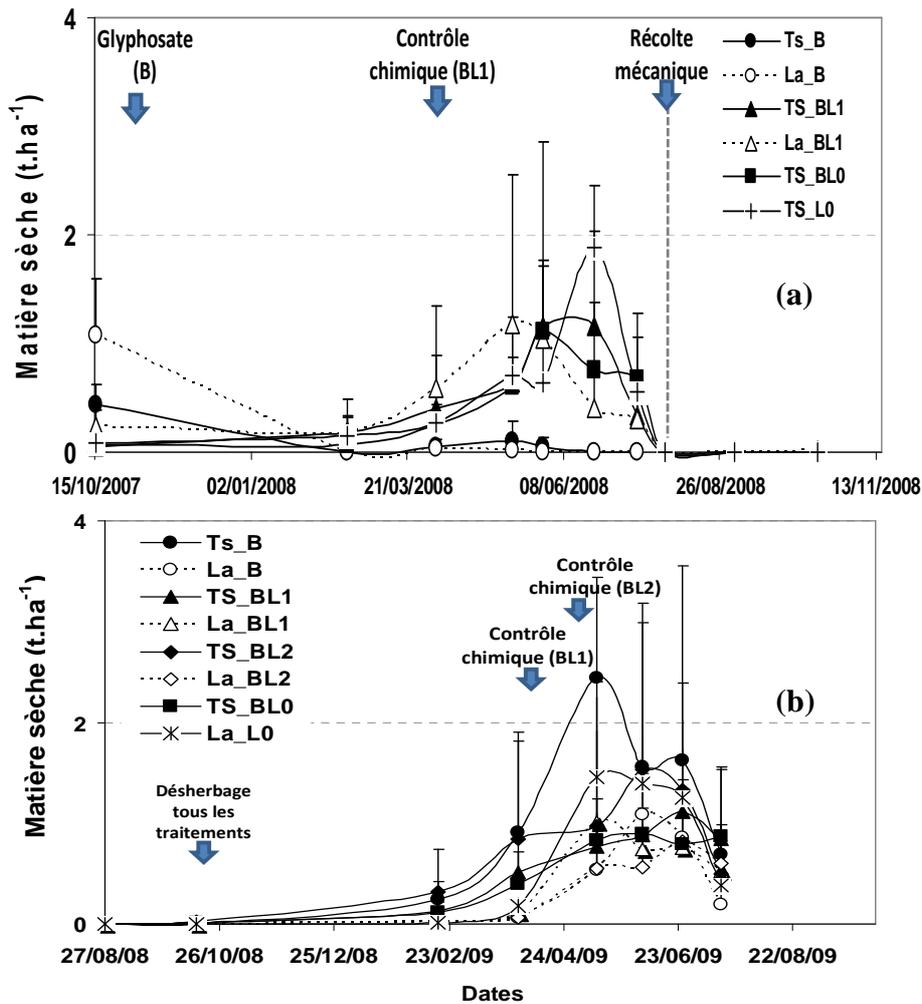


Figure 4.1c: Evolution au cours du temps de la biomasse aérienne des adventices pour les associations de culture (BL0, BL1 et BL2) et les cultures pures correspondantes (L0, B) conduites en travail superficiel (Ts) et en labour (La), depuis le semis de la luzerne jusqu'à la période d'interculture en 2007-2008 (a) et jusqu'à la récolte du blé en 2008-2009 (b). Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

Pour les deux années, en l'absence de désherbage chimique, la luzerne à elle seule (L0), a été capable de réduire la biomasse d'adventices en début du cycle mais à partir du moment où les adventices commencent à croître rapidement (stade épi 1cm du blé), la luzerne cultivée seule n'avait plus la capacité de réduire ce peuplement : pour les deux années, le maximum de production de matière sèche des adventices a été observé au niveau de ce traitement avec des quantités de biomasse égale à 1.89 t ha^{-1} et à 1.25 t ha^{-1} respectivement en 2008 et en 2009 au stade DRP. En revanche, à la fin du cycle, la biomasse des adventices a subi une chute juste avant la récolte du blé qui a été observée pour les deux années expérimentales.

En association, l'évolution de la biomasse des adventices a été comparable entre les deux années pour le traitement BL0, ne dépassant pas 1 t.ha^{-1} . De même, on remarque que les biomasses d'adventices mesurées en 2009 sur le traitement Ts_BL0 ont été deux fois plus faibles que celles mesurées sur le traitement de blé pur (Ts_B) et ceci depuis le début du cycle jusqu'au stade DRP. Cela nous permet d'avancer qu'en l'absence de contrôle chimique sur les

cultures de blé pur, la plante de couverture en association avec le blé peut être un moyen efficace de contrôle biologique pour réduire le développement des adventices.

L'application de la phytohormone pour contrôler la biomasse de la luzerne réalisée sur les traitements BL1 et BL2 a conduit à une augmentation des adventices. Cela peut être lié à un effet de protection par la luzerne en protégeant les adventices ou bien à un effet de faible dose de la phytohormone appliquée ou encore à une réduction de la compétition exercée par la luzerne sur les adventices suite à la réduction de sa biomasse.

L'effet de travail du sol sur l'évolution du peuplement d'adventice a été différent selon l'année expérimentale : en 2008, depuis la levée du blé jusqu'au stade épiaison, la biomasse des adventices observée pour le traitement BL1 a été moins importante en travail superficiel qu'en labour. A partir de ce stade, contrairement à ce qui s'est passé en début du cycle, la biomasse des adventices a été plus importante en Ts_BL1 qu'en La_BL1. Cependant, l'analyse de variance montre qu'il n'y a aucune différence significative entre les deux types de travail du sol sur l'évolution des adventices depuis le début du cycle jusqu'à la récolte, à l'exception du stade DRP (Tableau 4.1) témoignant d'un léger effet de travail du sol sur le développement des adventices à ce stade. En 2009, sur la totalité du cycle, aucune différence significative n'a été observée au seuil de 5% sur les biomasses d'adventices pour les traitements BL1 et BL2 (Tableau 4.1). En revanche, on a remarqué une légère tendance à produire plus de biomasse d'adventices en travail superficiel qu'en labour pour tous les traitements.

4.1.4 Biomasses racinaires

Les biomasses racinaires (Figure 4.2) mesurées à floraison pour le blé pur (B) et l'association (BL1) montrent que l'essentiel de la colonisation racinaire pour tous les traitements se fait principalement dans les 20 premiers cm du sol : la biomasse racinaire au niveau de cet horizon représente 71% et 78% respectivement en Ts_B et en La_B et 77% et 86% respectivement en Ts_BL1 et en La_BL1 de la biomasse racinaire totale mesurée sur l'ensemble du profil (0-40 cm).

L'insertion de la luzerne en association a réduit significativement la biomasse racinaire du blé, de 34% et de 26% respectivement en Ts_BL1 et en La_BL1 au niveau de l'horizon (0-20 cm) et de 50% au niveau de l'horizon 20-40 cm par rapport aux biomasses racinaires du blé

cultivé seul. Cette réduction est due à une production très importante de la biomasse racinaire de la luzerne dans les deux horizons : cette biomasse représente 70% (Ts_BL1) et 60% (La_BL1) de la biomasse racinaire totale de l'association. L'association de la luzerne avec le blé permet d'augmenter la biomasse totale des racines de 51% et de 54% respectivement en Ts_BL1 et La_BL1 par rapport à la biomasse totale produite par le blé lorsqu'il est cultivé seul.

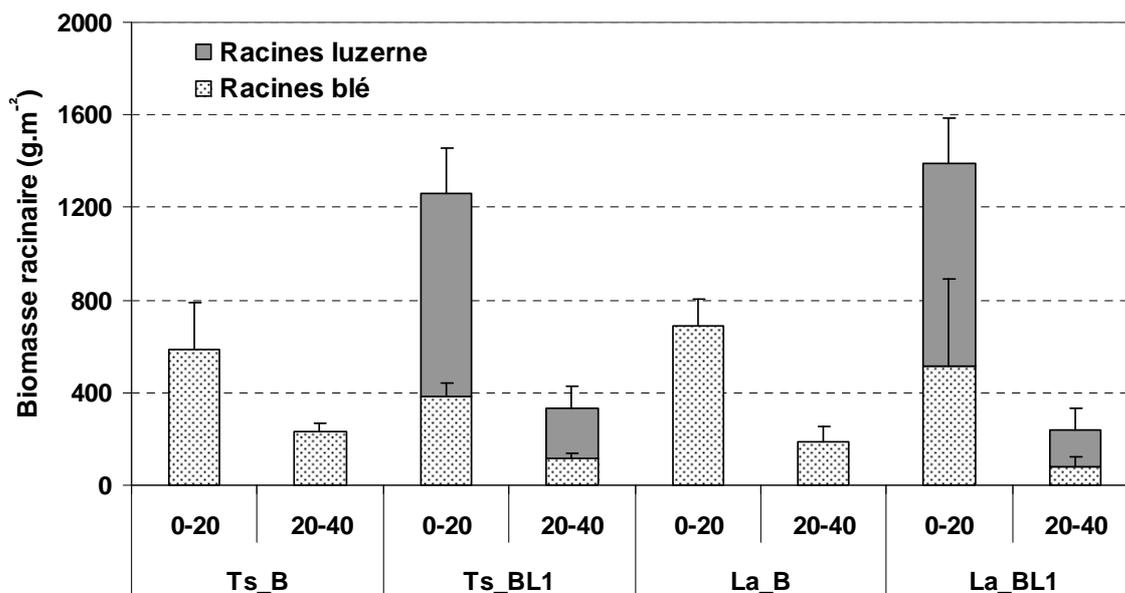


Figure 4.2 : Biomasse racinaire du blé pur (B) et de l'association (BL1) mesurée en 2008 au stade floraison du blé sur deux horizons : 0-20 cm et 20-40 cm pour les deux types de travail du sol, labour (La) et travail de sol superficiel (Ts). Les barres verticales représentent les valeurs des écarts-types.

L'effet du travail du sol sur la répartition des racines du blé cultivé seul (B) ou en association (BL1) n'est pas statistiquement significatif au seuil de 5%. Toutefois, pour tous les traitements, on observe un peu plus de racines de blé en labour qu'en travail superficiel au niveau de l'horizon superficiel (0-20 cm), alors que dans l'horizon plus profond (20-40 cm), le blé a tendance à produire plus de racines en travail superficiel qu'en labour. Pour la luzerne, la production de racine de la luzerne en BL1 a été similaire entre les deux types de travail du sol au niveau des 20 premiers cm du sol, alors qu'elle était un peu plus élevée en travail superficiel par rapport au labour au niveau de l'horizon plus profond. Toutefois, cette différence de répartition des racines en fonction du type de travail du sol ne présente aucune différence significative au seuil de 5%.

4.1.5 Analyse de la productivité de l'association

4.1.5.1 Land equivalent ratio (LER)

Pour le calcul du LER global, le calcul des LER partiels de la luzerne pour tous les traitements (BL0, BL1 et BL2) a été réalisé à partir du traitement de culture pure L0 (Ts_L0 en 2008 et La_L0 en 2009) puisqu'on a montré par ailleurs qu'il n'y a aucun effet de travail du sol sur les évolutions des biomasses aériennes de cette espèce pour les deux années expérimentales.

Pour les deux années et pour tous les traitements, le LER global (Figure 4.3a) mesuré au stade « début tallage » du blé a été supérieur à 1, ce qui indique une meilleure valorisation des ressources du milieu pour la production de la matière sèche en association par rapport aux cultures pures, en début de croissance. En revanche, au-delà de ce stade, l'évolution du LER au cours du cycle a été différente selon les traitements et selon l'année.

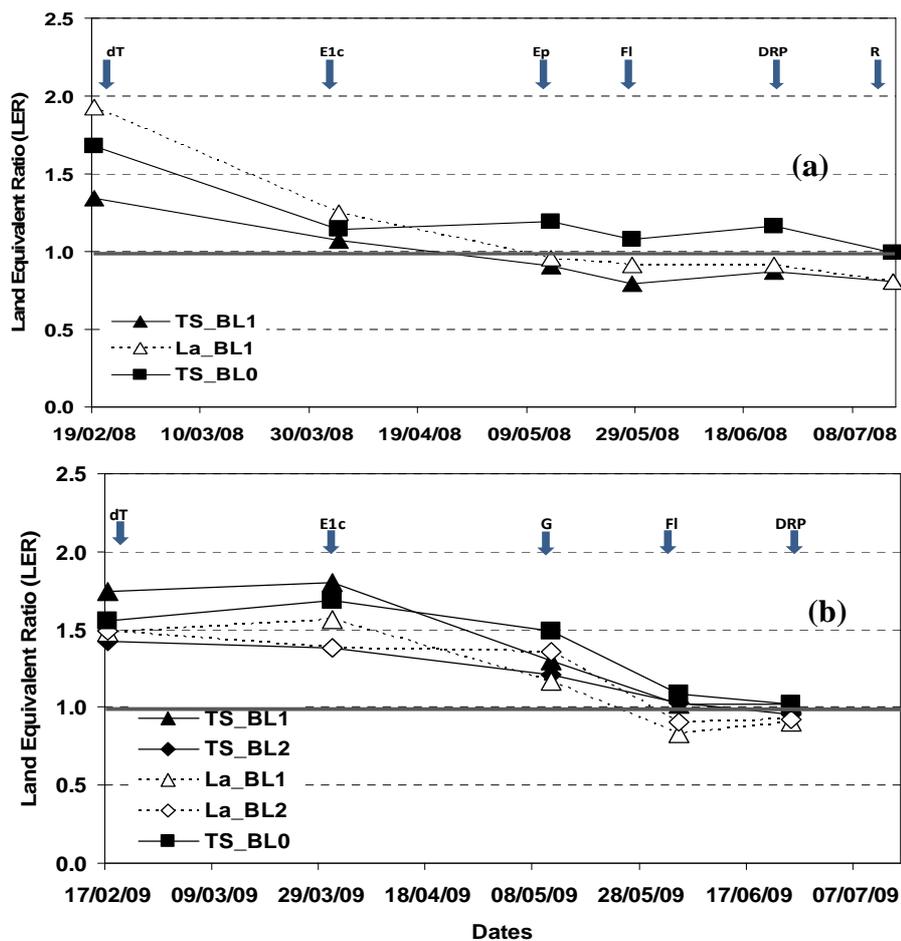


Figure 4.3a : Land Equivalent Ratio (LER) global pour les différents traitements de cultures associées (BL0, BL1 et BL2) calculé pour les deux années expérimentales 2007-2008 (a) et 2008-2009 (b).

Pour l'association BL0, le LER global calculé pour les deux années expérimentales a été supérieur à 1 tout le long du cycle cultural. L'analyse des LER partiels du blé et de la luzerne (Figure 4.3b) pour l'association BL0, montre que la valorisation des ressources du milieu a été au profit de la croissance de la luzerne en 2008 : à partir du stade « épi 1cm » du blé, les LER pour cette espèce ont été inférieurs à 0.5 par contre pour la luzerne, les valeurs ont été plus élevées, proches de 1. Par contre en 2009, pour le même traitement, cette valorisation des ressources a été au profit du blé (LER partiel blé > LER partiel luzerne > 0.5) jusqu'au stade floraison. Au stade début remplissage des grains, une réduction du LER partiel du blé a été observée contre une augmentation du LER partiel de la luzerne.

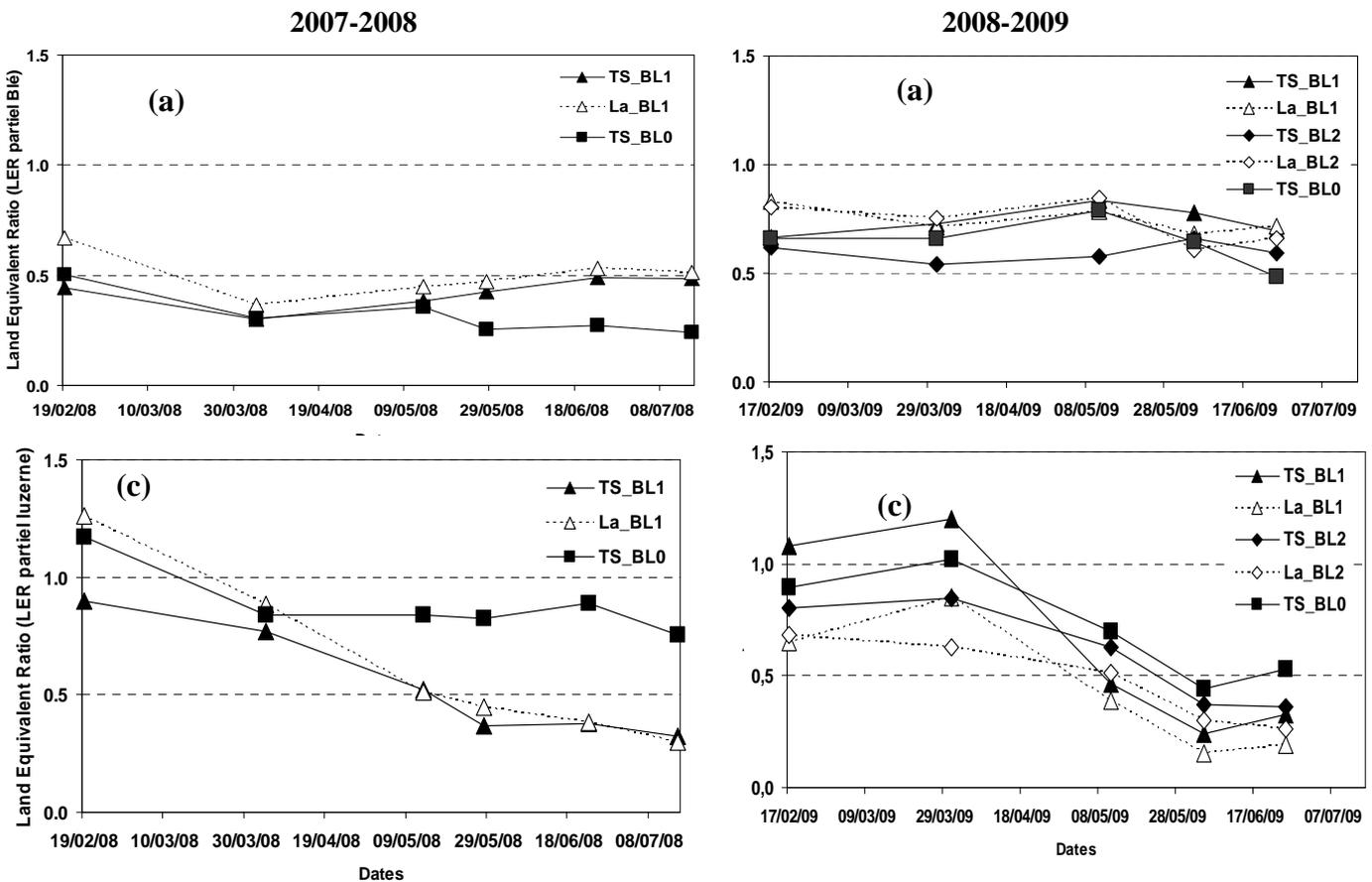


Figure 4.3b : Land Equivalent Ratio (LER) partiel du blé (a) et de la luzerne (c) pour les différents traitements de cultures associées (BL0, BL1 et BL2) calculé pour les deux années expérimentales 2008 et 2009.

Pour les associations (BL1, BL2) une diminution des LER globaux a été observée au cours du cycle, mais qui s'est faite différemment entre les deux années. En 2008, la diminution des valeurs des LER en deçà de 1 a été observée très tôt dans le cycle (stade épi 1 cm) alors qu'en 2009 on l'observe au stade floraison. Cela est dû à la compétition exercée entre les deux espèces en 2008 qui s'est traduite par une réduction très sévère de la production de matière

sèche en association avant même l'application du contrôle chimique sur la biomasse de la luzerne (réalisé au stade « 2 nœuds »). Par contre en 2009, la réduction de la performance de l'association en termes de production de biomasse n'a concerné que les associations conduites en labour et s'est faite plus tardivement dans le cycle, après le contrôle chimique de la biomasse de la luzerne.

Pour les deux années expérimentales, juste après application du contrôle chimique en BL1, les valeurs du LER partiel de la luzerne ont été significativement plus faibles que celles calculées pour la luzerne en BL0. Cela a permis, en 2008, de maintenir les LER partiels du blé à des valeurs plus élevées qu'en BL0 mais inférieures à 0.5, témoignant d'une production de biomasse plus faible que celle observée pour le blé pur. En revanche, en 2009, les valeurs du LER partiel du blé ont été supérieures à 0.5 mais égales au LER partiel calculé pour le blé en BL0 jusqu'au stade floraison du blé. A partir de ce stade, le LER partiel du blé devient supérieur en BL1 par rapport à BL0. Cela montre que le contrôle chimique a permis de réduire la compétition exercée par la luzerne ce qui s'est traduit par une meilleure valorisation des ressources au profit du blé en fin de cycle. Pour l'association BL2, le contrôle plus tardif réalisé sur la luzerne a permis une réduction du LER partiel de la luzerne qui s'est faite plus tard dans le cycle par rapport à BL1 (stade floraison). L'effet de ce contrôle sur le LER du blé n'a été observé qu'au stade DRP, avec des valeurs supérieures à BL0, mais inférieures à BL1. Cela montre que le premier contrôle chimique en BL1 a été plus efficace que celui réalisé plus tardivement en BL2.

4.2 Interception des ressources lumineuses

4.2.1 Structure aérienne des deux espèces associées

4.2.1.1 Evolution des surfaces foliaires

Les valeurs maximales de LAI du blé cultivé seul (Figure 4.4 a) s'élèvent à 6 et 5 m² de feuilles par m² de sol respectivement en 2008 et 2009. Cet écart entre années est certainement un artefact lié à la période de mesure de LAI, qui coïncide avec le maximum de surface foliaire en 2008 au stade « épiaison », mais qui correspond en 2009 au stade « Gonflement », qui se situe juste avant le stade optimal de mesure de LAI maximum.

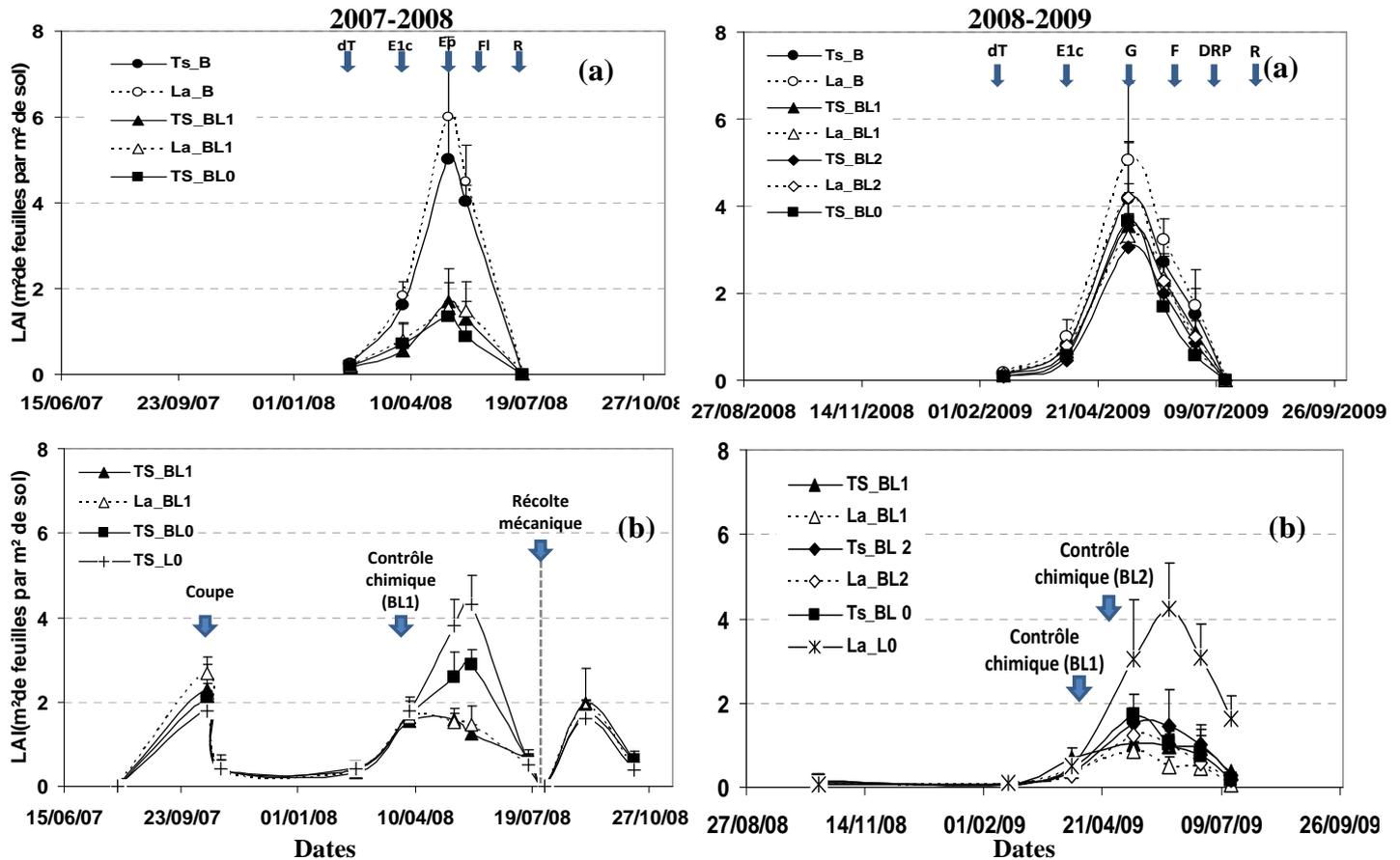


Figure.4.4 : Evolution au cours du temps de l'indice foliaire (LAI *Leaf Area Index*) du blé (a) et de la luzerne (b) pour les associations de culture (BL0, BL1 et BL2) et les cultures pures correspondantes (L0, B) conduites en travail superficiel (Ts) et en labour (La) pour les deux années expérimentales 2008 et 2009. Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

L'évolution de la surface foliaire de la luzerne cultivée seule (Figure 4.4b) a été différente entre les deux années en début du cycle. La LAI de la luzerne en début du cycle a été plus élevée en 2008 ($0.43 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) par rapport à 2009 ($0.08 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), ceci étant dû comme on l'a déjà vu par ailleurs à une différence de conduite de la luzerne entre les deux années. Cela a affecté la vitesse de redémarrage de la luzerne au printemps entre les deux années : au stade « épi 1 cm » du blé, la LAI de la luzerne en 2008 a été quatre fois plus importante qu'en 2009. Cependant, malgré cet écart en début de croissance, les valeurs de LAI maximale pour la luzerne cultivée seule ont été voisines entre les deux années, égales à $4.32 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ (2008) et à $4.20 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ (2009) au stade « floraison » du blé. Par la suite, cette surface foliaire commence à chuter jusqu'à atteindre des valeurs très faibles juste avant la récolte du blé.

L'insertion de la luzerne en association avec le blé (BL0) a réduit significativement la valeur de LAI maximale du blé, de 73% (2008) et de 12% (2009) en comparaison avec le blé pur

(B). Ce résultat montre que la compétition entre les deux espèces a été plus sévère en 2008 qu'en 2009 à cause d'un développement plus important du LAI de la luzerne en 2008.

Toutefois, pour ce même traitement, la comparaison entre les surfaces foliaires de la luzerne associée (BL0) et celles de la luzerne cultivée seule (L0) révèle une diminution de 33% et de 75% de la LAI de la luzerne en BL0 respectivement en 2008 et 2009. Cela est dû à l'effet compétitif exercé par le blé sur la luzerne, qui a été beaucoup plus important en 2009 qu'en 2008.

Le contrôle chimique de la biomasse de la luzerne présente un effet très variable entre les deux années expérimentales. En 2008, le contrôle réalisé sur les traitements BL1 a réduit la surface foliaire de la luzerne de 53% par rapport à BL0. Cependant, aucune amélioration de l'évolution de LAI du blé n'a été observée : la valeur de LAI maximal du blé a été identique à celle atteinte par le blé en BL0 et plus faible de 71% par rapport au traitement de blé pur.

En 2009, le contrôle chimique de la biomasse de la luzerne a permis une réduction du LAI de la luzerne de 43% et de 18% respectivement en BL1 et en BL2 par rapport au traitement BL0. Ce résultat montre qu'un contrôle précoce de la luzerne (BL1) est plus efficace que le contrôle réalisé à un stade plus tardif (BL2). Malgré cette réduction, aucune répercussion sur la LAI du blé n'a été observée pour les associations BL1 et Ts_BL2 : le LAI maximal du blé pour ces associations a été inférieur au LAI du blé conduit en BL0, à l'exception de l'association La_BL2 où on a enregistré une augmentation de LAI maximal du blé de 14% par rapport à BL0. Toutefois, la diminution de la LAI du blé en 2009 a été inférieure à celle observée en 2008 de 26% et de 22% pour BL1 et BL2 par rapport au blé cultivé seul.

Pour les deux années expérimentales, la LAI de la luzerne décroît en fin de cycle en période de sénescence du blé pour tous les traitements associés (BL0, BL1 et BL2). Juste après la coupe mécanique réalisée au moment de la récolte du blé, la luzerne développe une surface foliaire identique pour tous les traitements égale à $2 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, qui subit une décroissance à la fin de la période d'interculture pour atteindre des valeurs égales à $0.50 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$.

Pour les deux années, la surface foliaire du blé pur et en association ne présente aucune différence significative entre les deux types de travail du sol (Tableau 4.1). On note toutefois une tendance à produire une surface foliaire légèrement plus élevée en labour qu'en travail superficiel observée pour les deux années expérimentales. Pour la luzerne, aucune différence d'évolution du LAI n'a été observée en association (BL1) en 2008. Toutefois, en 2009, une

plus importante production de LAI a été observée en travail superficiel par rapport au labour mais ne présente aucune différence significative au seuil de 5%.

4.2.1.2 Evolution des hauteurs

Pour les deux années, les courbes d'évolution des hauteurs (Figure 4.5) montrent que pour tous les traitements, la hauteur du blé est systématiquement plus élevée à celle de la luzerne. La hauteur maximale du blé cultivé seul (Figure 4.5 a) et en association est voisine entre les deux années (85 cm), alors que celle atteinte par la luzerne pure (Figure 4.5b) est égale à 69 cm (2008) et 76 cm (2009) et qu'en association BL0, la luzerne a atteint une hauteur maximale égale à 78 cm pour les deux années expérimentales (Figure 4.5b).

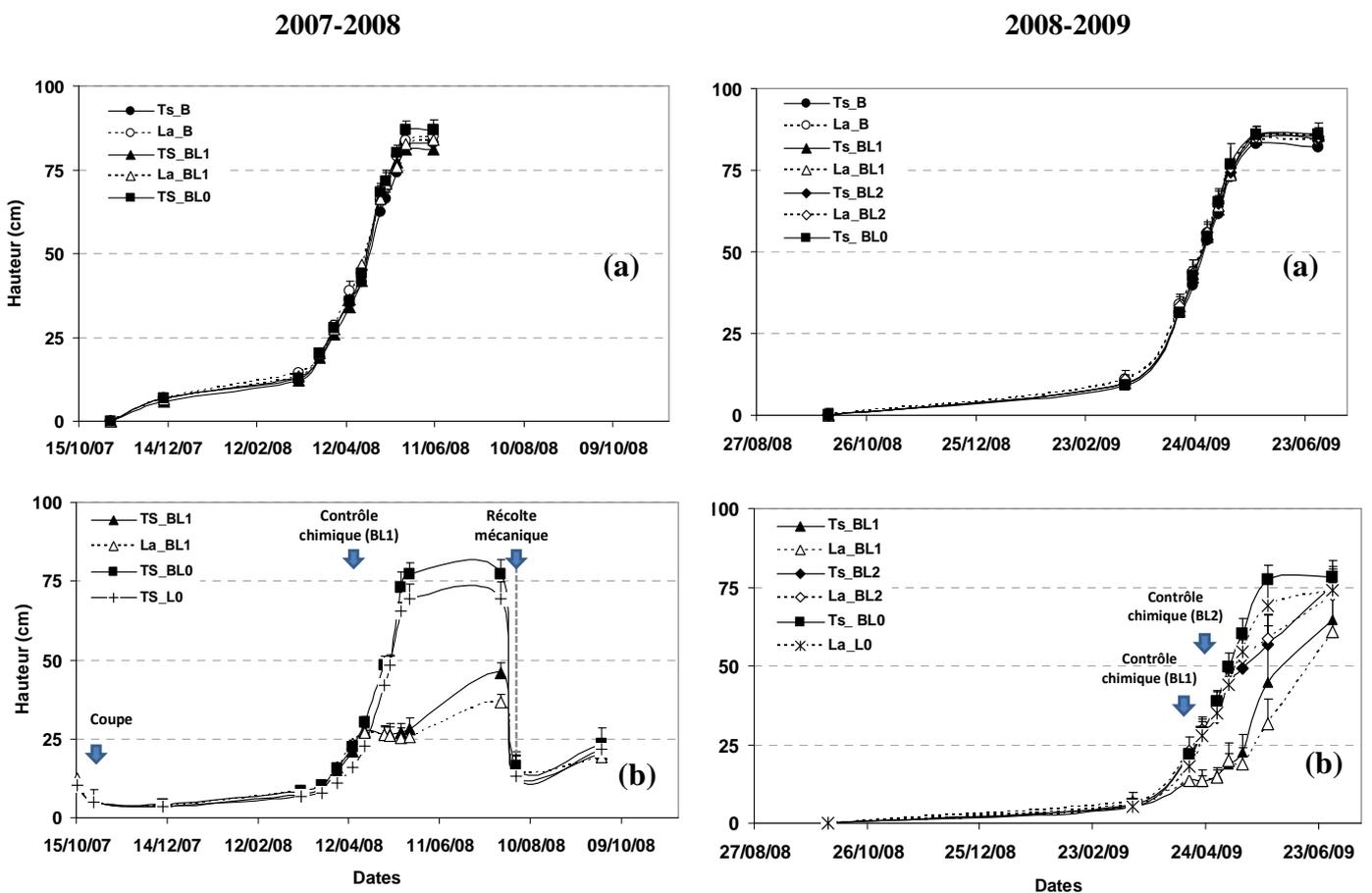


Figure 4.5 : Evolution de la hauteur du blé (a) et de la luzerne (b) pour les associations de culture (BL0, BL1 et BL2) et les cultures pures correspondantes (L0, B) conduites en travail superficiel (Ts) et en labour (La) pour les deux années expérimentales 2008 et 2009. Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

L'association du blé avec la luzerne en Ts_BL0 occasionne une augmentation de la hauteur des deux espèces. Cette augmentation est statistiquement significative au seuil de 5% pour le blé, la différence de hauteur maximale est égale à 4 cm et 3 cm respectivement en 2008 et 2009 en comparaison avec le blé pur (Ts_B). En revanche, pour la luzerne la différence de

hauteur maximale en comparaison avec Ts_L0 est statistiquement non significative, égale à 6 cm (2008) et à 4 cm (2009). Ce résultat montre que le blé a subi un étiolement sous l'effet de la compétition exercée par la luzerne pour les deux années expérimentales.

Le contrôle chimique réalisé sur les associations BL1 et BL2 a significativement réduit la croissance en hauteur de la luzerne juste après l'application. Cette réduction a été de 46% et de 38% en BL1 respectivement en 2008 et 2009, alors qu'elle était moins importante en BL2 (2009) égale à 12% en comparaison avec BL0. Cela montre que l'impact du contrôle sur la croissance en hauteur de la luzerne est variable entre les deux années. Pour les associations BL1, l'application de la phytohormone en 2008 a stabilisé la hauteur de la luzerne à 25 cm, alors que son application plus précoce en 2009 l'a stabilisée à 15 cm. En revanche, un très faible impact du contrôle sur la hauteur de la luzerne a été observé pour BL2 en 2009. Pour les deux années une reprise de la croissance en hauteur de la luzerne a été observée, qui coïncide avec le début de sénescence du blé. Toutefois, les hauteurs maximales atteintes par la luzerne pour les associations BL1 et BL2 en fin de cycle restent significativement inférieures à la hauteur de la luzerne en BL0.

En 2008, au moment de la récolte, la coupe mécanique permet une réduction de la hauteur de la luzerne pour tous les traitements à une hauteur identique et égale à 15 cm. Comme on l'a déjà conclu auparavant pour la biomasse aérienne et la LAI, la luzerne est capable de croître en hauteur jusqu'à atteindre une valeur égale à 25 cm pour tous les traitements à la fin de la période d'interculture.

Pour les deux années expérimentales, l'analyse statistique ne montre aucune différence significative pour la croissance en hauteur du blé cultivé seul et en association entre les deux types de travail du sol (Tableau 4.1). Cependant, la croissance en hauteur du blé a tendance à être plus élevée en labour qu'en travail superficiel. Pour la luzerne en association, la différence en hauteur en fonction du type de travail du sol n'a été observée qu'en période de reprise de croissance végétative (stade « épi 1 cm » du blé), pour les deux années expérimentales (Tableau 4.1). Pour la luzerne en BL1, sa hauteur a été plus élevée en labour par rapport au travail superficiel. Cette différence est statistiquement significative en 2008 (écart égal à 9 cm), mais ne présente aucune différence significative en 2009. Pour la luzerne en BL2, aucun effet de travail du sol n'est révélé : les hauteurs maximales atteintes par la luzerne ont été identiques entre les deux types de travail du sol.

4.2.2 Absorption du rayonnement par les deux espèces associées :

Les mesures en continue du PAR absorbé par le blé pur (Ts_B), la luzerne pure (Ts_L0) et l'association (Ts_BL0, Ts_BL1 et La_BL1), réalisées depuis le stade « fin tallage » jusqu'à la récolte du blé (Figure 4.6, année 2008) permettent de distinguer deux phases. La première phase « P1 » est caractérisée par une efficacité d'interception qui augmente rapidement jusqu'à atteindre un maximum d'interception de rayonnement. La seconde phase « P2 » est caractérisée par un plateau d'absorption de rayonnement, qui se stabilise autour de 93% pour tous les traitements.

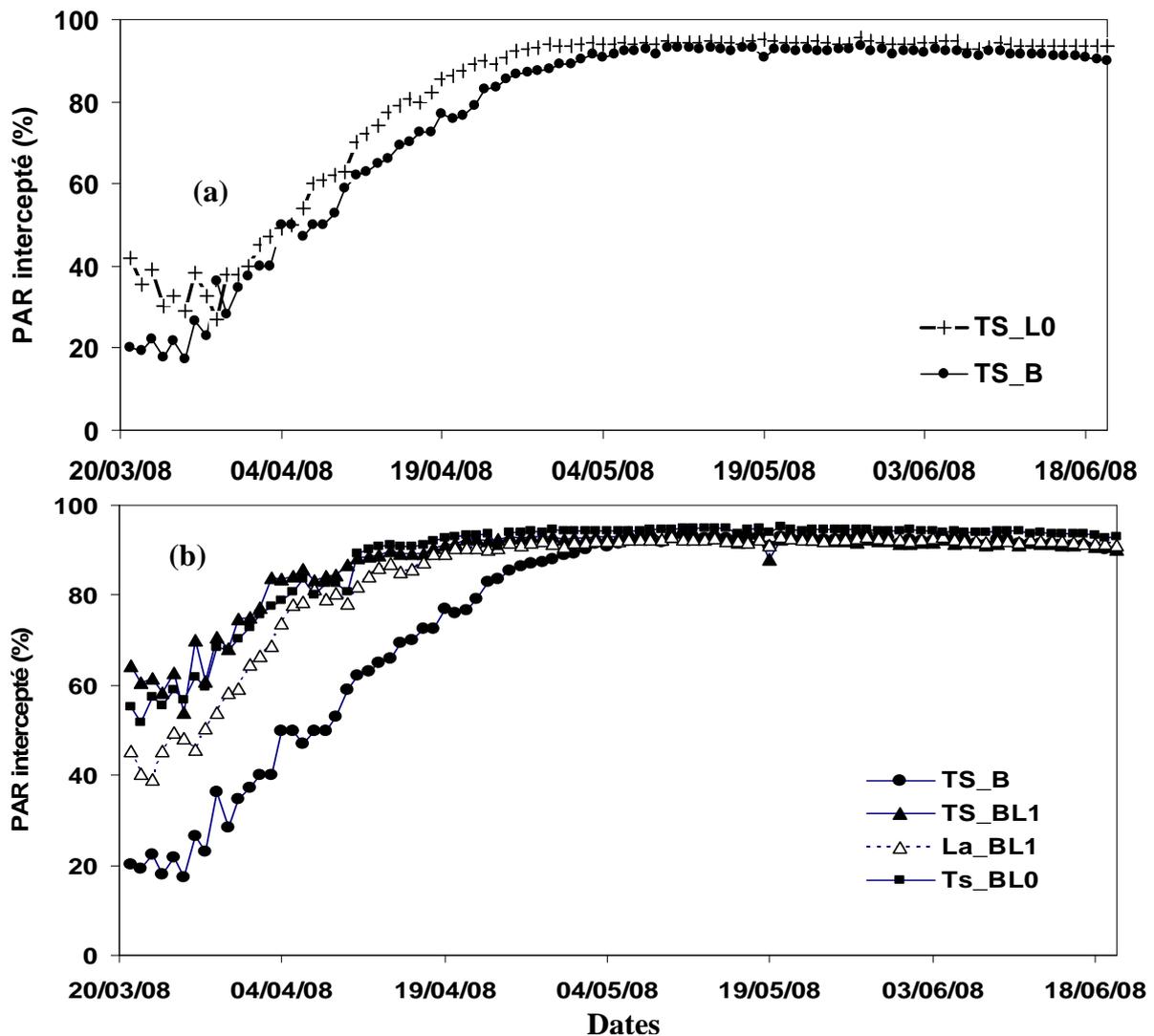


Figure 4.6 : Evolution en fonction du temps du PAR absorbé par les cultures de blé et de luzerne pure (a) conduites en travail superficiel (Ts) et des associations de culture (BL0 et BL1) (b) pour l'année expérimentale 2008.

La fraction du PAR absorbé par le blé pur au début de « P1 » est systématiquement inférieure à celle absorbée par la luzerne pure (Figure 4.6a). Cette période correspond au début du démarrage végétatif des deux cultures, ce qui met en évidence que la luzerne est plus efficace que le blé pour l'absorption du rayonnement en début de la phase végétative. Par la suite, l'écart d'absorption de rayonnement entre les deux espèces se réduit au fur et à mesure qu'on s'approche du maximum d'absorption de rayonnement « P2 », à partir duquel l'absorption de la lumière devient identique entre les deux cultures pures. Cela met donc en évidence que la compétition du blé pour la lumière est faible en début du cycle puis s'accroît progressivement pour atteindre des niveaux d'absorption de rayonnement comparables à celui de la luzerne.

L'absorption de rayonnement des deux espèces en association (Ts_BL0) a été beaucoup plus importante que celle du blé pur durant toute la première phase d'interception du rayonnement (Figure 4.6b). Cet écart est très important en début de la phase végétative, égal à 20%, qui s'estompe au cours de la croissance des cultures jusqu'à la phase d'absorption maximale du rayonnement. Le maximum d'absorption de rayonnement est atteint rapidement pour les cultures en association dès le stade « 2 noeuds », alors que pour le blé pur, le maximum du PAR est atteint plus tardivement dans le cycle, à 22 jours d'écart par rapport à l'association. A la fin de la phase « P2 », le maximum d'absorption de rayonnement présente des valeurs identiques entre l'association Ts_BL0 et le blé pur, égales à 93%. Cela montre donc que l'association permet une meilleure valorisation de l'énergie lumineuse surtout en début de croissance comparativement aux cultures pures de blé. Grâce à cette performance en association, les quantités de rayonnement qui arrivent au niveau du sol, calculées sur la totalité du cycle, sont réduites de 51% par rapport à la culture de blé pur, ce qui pourrait être à l'origine d'une réduction de la ressource en lumière nécessaire à la prolifération des adventices.

L'évolution de la fraction du PAR absorbé par les deux espèces en Ts_BL0 est identique à celle absorbé par l'association Ts_BL1 pendant toute la période de mesure. Néanmoins, on observe une plus faible absorption de rayonnement par les deux espèces en La_BL1 par rapport à Ts_BL1 pendant la phase « P1 ». Ce résultat montre donc qu'il y a un effet du travail du sol sur la capacité des deux espèces en association à intercepter l'énergie solaire, qui apparaît essentiellement en début du cycle. Toutefois, le maximum d'absorption du rayonnement est atteint au même stade pour les deux associations en BL1. L'écart observé en

début du cycle pour les associations en BL1, présente un impact direct sur la réduction de la quantité de rayonnement qui arrive au niveau du sol, calculé sur la totalité de la période de mesure, qui est plus élevé en Ts_BL1, égal à 48% contre 35% en La_BL1.

L'effet du contrôle chimique réalisé sur les associations BL1 s'avère difficile à estimer sur les graphes présentés, vu que la date d'application du traitement a été réalisée lorsque l'association a atteint le maximum d'absorption de rayonnement. La distinction de la part de rayonnement absorbé par chaque espèce dans le mélange paraît donc déterminante afin de situer i) le stade de croissance auquel la compétition entre les deux espèces associées vis-à-vis de la lumière a lieu, ii) l'impact de l'application de la phytohormone sur l'absorption de rayonnement par la luzerne, ainsi que iii) l'effet de travail du sol sur l'intensité de la compétition pour la lumière.

4.3 Evolution du statut hydrique

4.3.1 Evolution du stock hydrique

L'évolution du stock hydrique estimé par les mesures gravimétriques au niveau du profil du sol (0-90 cm) en 2008 (Figure 4.7) montre qu'en début du cycle, le stock d'eau des traitements de blé pur (B) est légèrement supérieur à celui mesuré en cultures associées (BL0 et BL1). La consommation d'eau a été donc plus importante en association, à cause d'une surface transpirante plus importante par rapport aux cultures pures. A partir du mois de mai (correspond au stade « début épiaison » du blé), une réduction du stock d'eau est observée pour tous les traitements jusqu'à la récolte du blé. Toutefois, cette réduction n'a pas affecté la consommation des plantes puisque ces dernières continuent à puiser l'eau dans la réserve utile estimée à 200mm. En période d'interculture, on observe une reconstitution du stock hydrique qui a été plus rapide pour les parcelles en sol nu par rapport à celles avec la luzerne maintenue vivante.

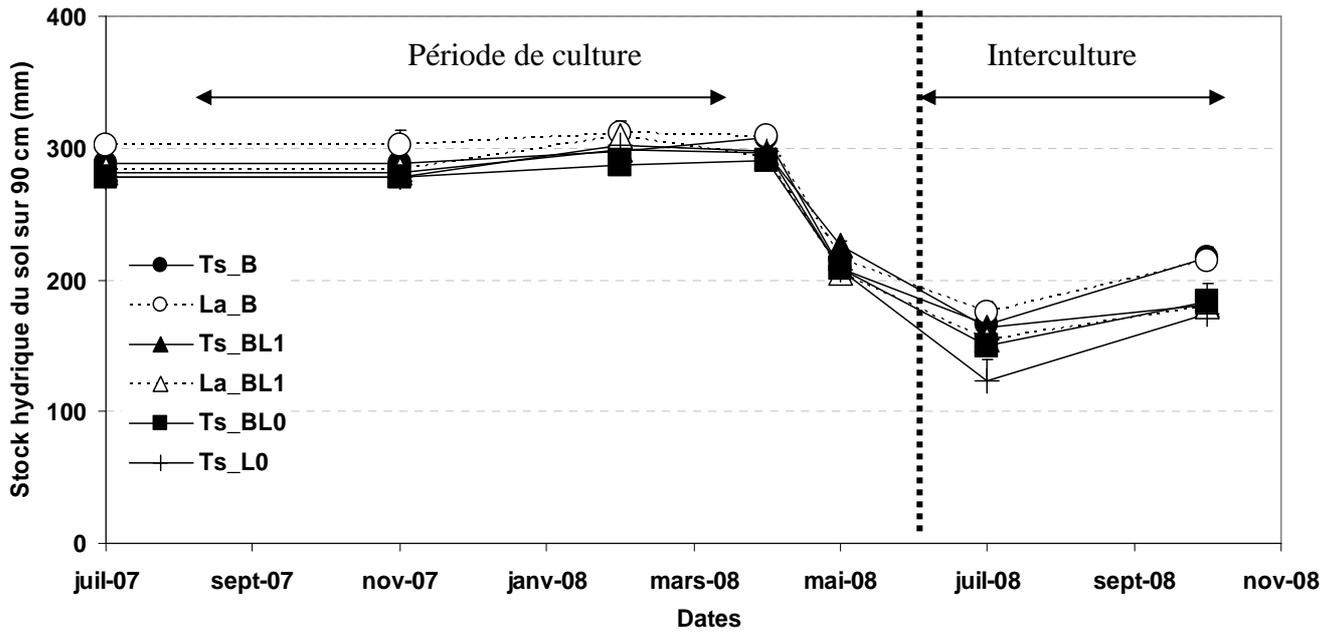


Figure 4.7 : Evolution au cours du temps du stock d'eau dans le sol à 90cm de profondeur pour les traitements de blé et de la luzerne purs (B, L0) et en association (BL0 et BL1) pour l'année expérimentale 2008.

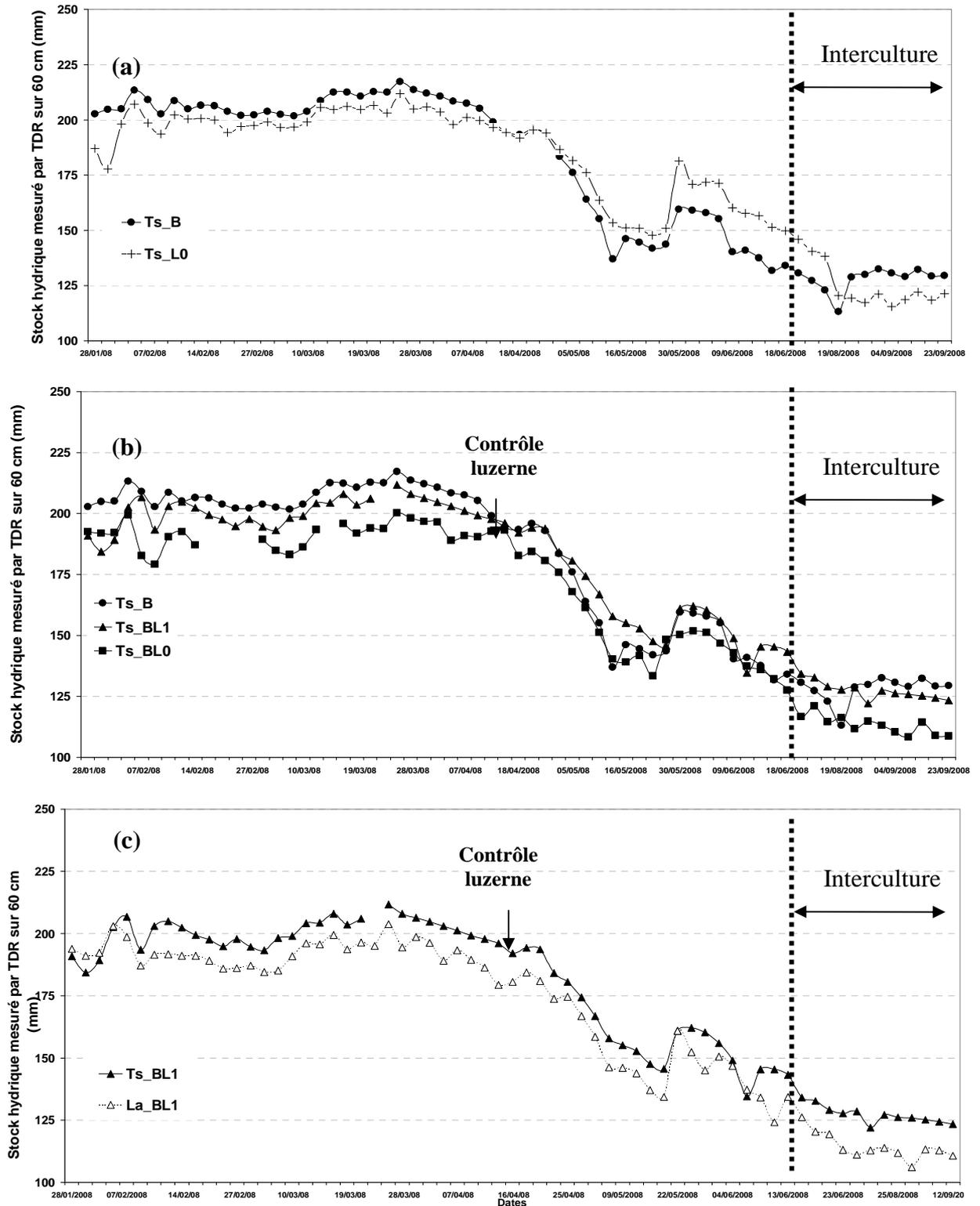


Figure 4.8 : Evolution au cours du temps du stock d'eau dans le sol à 60cm de profondeur mesuré grâce aux sondes TDR pour les traitements de blé et de luzerne pure (a), des associations conduites en travail superficiel (BL0 et BL1) (b) et de l'association (BL1) conduite en labour et en travail superficiel (c) pour l'année expérimentale 2008 sur la totalité du cycle cultural. Sur les différents graphes, les vides représentent les points de mesures aberrants qui ont été supprimés.

Les mesures d'humidité obtenues avec des sondes TDR (Figure 4.8) au niveau du profil (0-60 cm) à une fréquence de deux mesures par semaine en 2008 sur les traitements (Ts_B, Ts_L0, Ts_BL0, Ts_BL1 et La_BL1) présentent la même évolution que le stock d'eau mesuré sur le profil (0-90 cm). La comparaison entre le blé pur et la luzerne pure montre que la consommation en eau a été plus importante pour la luzerne en début du cycle (Figure 4.8a). Toutefois, lorsque la réserve hydrique commence à diminuer, le blé a tendance à puiser plus d'eau que la luzerne. Cela est cohérent avec les résultats de LAI qui montrent que la surface transpirante a été plus importante pour la luzerne en début du cycle alors qu'elle était plus élevée pour le blé en fin de cycle.

L'association du blé avec la luzerne (BL0) augmente la consommation en eau par rapport à la culture de blé pur (B). L'application du contrôle chimique sur la luzerne en (BL1) réduit la consommation d'eau des deux espèces en association en comparaison avec (BL0) (Figure 4.8b) jusqu'à la récolte du blé. Juste après la récolte du blé, la luzerne maintenue vivante a tendance à puiser plus d'eau par rapport au sol nu (auparavant conduit en blé pur). Cette consommation en eau est plus importante pour la luzerne en L0 et BL0 que lorsqu'elle a été contrôlée en BL1.

L'impact de travail du sol sur la consommation hydrique des deux espèces au niveau des associations BL1 (Figure 4.8c), montre que le stock d'eau est légèrement plus élevé en travail superficiel par rapport au labour.

4.3.2 Profils de teneur en eau du sol

Les profils de teneurs en eau du sol sont représentés pour la période qui se situe entre le début de la réduction de la réserve en eau (08/04 et 23/05 qui représente la période culturale) jusqu'à la fin de la période d'interculture (31/07 et 27/10) pour une meilleure clarté de la représentation des mesures, surtout que juste avant cette période les valeurs des teneurs en eau sont à la capacité au champ (Figure 4.9, année 2008). L'évolution des teneurs en eau dans le profil montre que les humidités pour tous les traitements diminuent jusqu'à une valeur qui se situe autour de 10% le 31/07, en accord avec l'évolution du stock d'eau sur le profil (0-90 cm). Toutefois, ces mesures révèlent que la reconstitution de la réserve en eau observée à la fin de la période d'interculture est due principalement à la saturation de l'horizon 0-30cm pendant cette phase de ré-humectation.

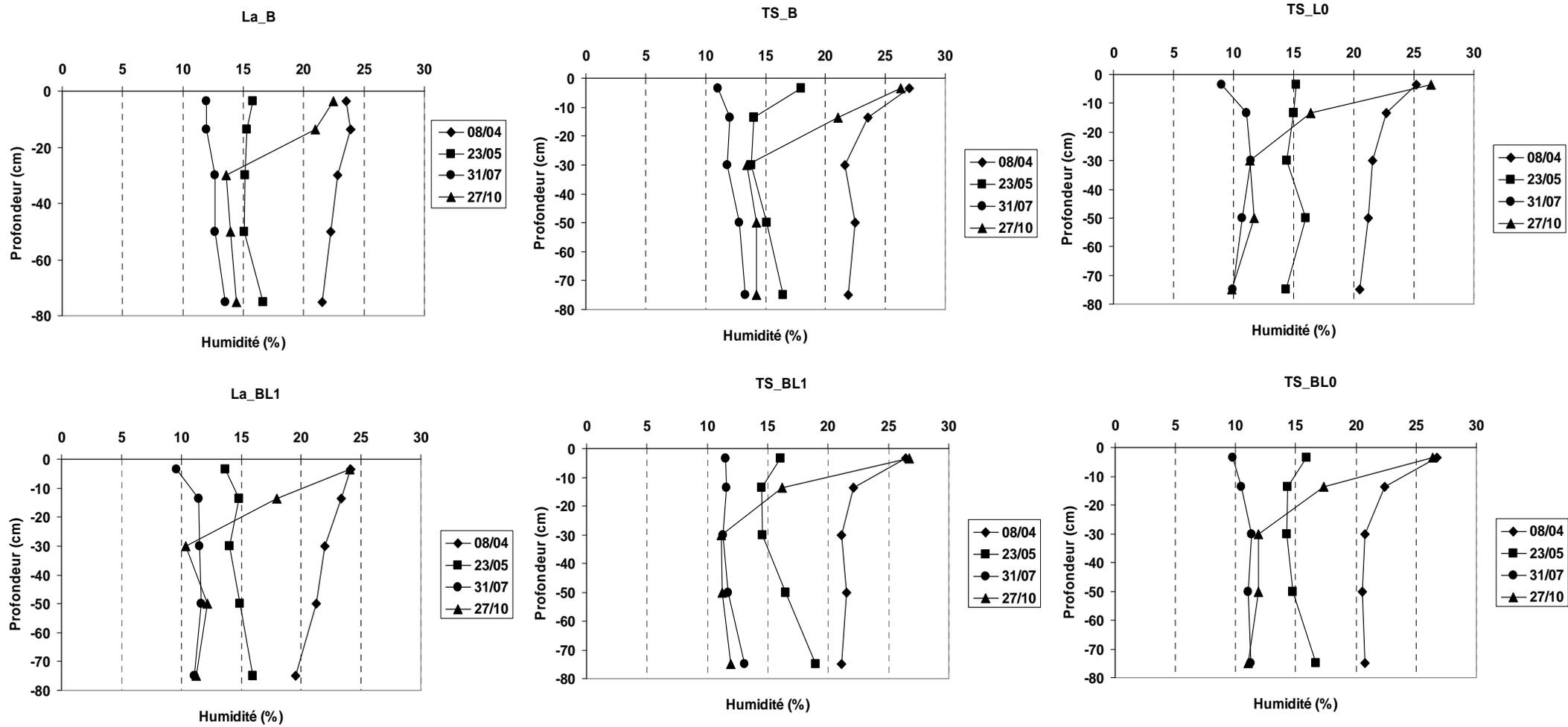


Figure 4.9 : Evolution du profil des teneurs en eau du sol (en %) à 90cm de profondeur mesuré pour les dates (08/04, 23/05, 31/07 et 27/10) pour les traitements de blé et de la luzerne purs (B, L0) et pour les associations (BL0 et BL1) pour l'année expérimentale 2008.

La comparaison entre le blé pur et la luzerne pure montre que la luzerne absorbe plus d'eau que le blé pour toutes les dates de mesure surtout au niveau des couches profondes. La réduction de la teneur en eau des différents horizons pour la luzerne a tendance à s'intensifier en fonction de la diminution dans le temps de la réserve en eau.

L'insertion de la luzerne en association avec le blé (BL0) n'a aucun effet sur les teneurs en eau des couches superficielles mais ces humidités sont légèrement réduites au niveau des couches profondes en comparaison avec les traitements de blé pur (B). Ceci confirme que la consommation d'eau par la luzerne se fait essentiellement au niveau des horizons profonds. Au moment de la reconstitution de la réserve en eau, la saturation de l'horizon superficiel (0-30 cm) a été similaire entre BL0 et B, tandis que l'humectation des couches profondes a été plus faible en BL0. Cela montre que la quantité d'eau apportée au système est directement absorbée par les deux espèces en association à la surface du sol, ce qui limite la reconstitution des couches profondes.

Le contrôle de la biomasse aérienne de la luzerne (BL1) n'a aucun effet sur l'évolution des teneurs en eau. Toutefois, on observe un moindre dessèchement du profil en BL1 par rapport à BL0, juste avant la période de reconstitution de la réserve en eau.

L'impact du travail du sol sur l'évolution des teneurs en eau pour le traitement de blé pur (B) et en association (BL1) montre que l'humidité est plus élevée à la surface du sol en travail superficiel qu'en labour pour toutes les dates de mesures.

4.4 Evolution du statut azoté

4.4.1 Disponibilité de l'azote dans le sol

4.4.1.1 Evolution du stock d'azote minéral

Les dynamiques d'évolution du stock d'azote minéral depuis le semis de la luzerne jusqu'à la fin de la période d'interculture sont représentées à la Figure 4.10 (année 2008). Avant l'installation de la luzerne, le stock d'azote post récolte (de la culture précédente) mesuré pour toutes les parcelles a été identique, égal à 32 kgN. ha⁻¹. Le semis de la luzerne 90 jours avant le semis du blé a légèrement réduit le stock d'azote minéral du sol de 8% par rapport au stock mesuré dans les parcelles non cultivées (réservées aux traitements de blé pur), mais cette

différence n'est pas statistiquement significative au seuil de 5% entre les deux parcelles. Pour les parcelles non cultivées, une diminution de la quantité d'azote du sol a été observée, due certainement à une courte phase d'organisation nette qui a lieu après l'enfouissement des résidus de récolte de la culture précédente.

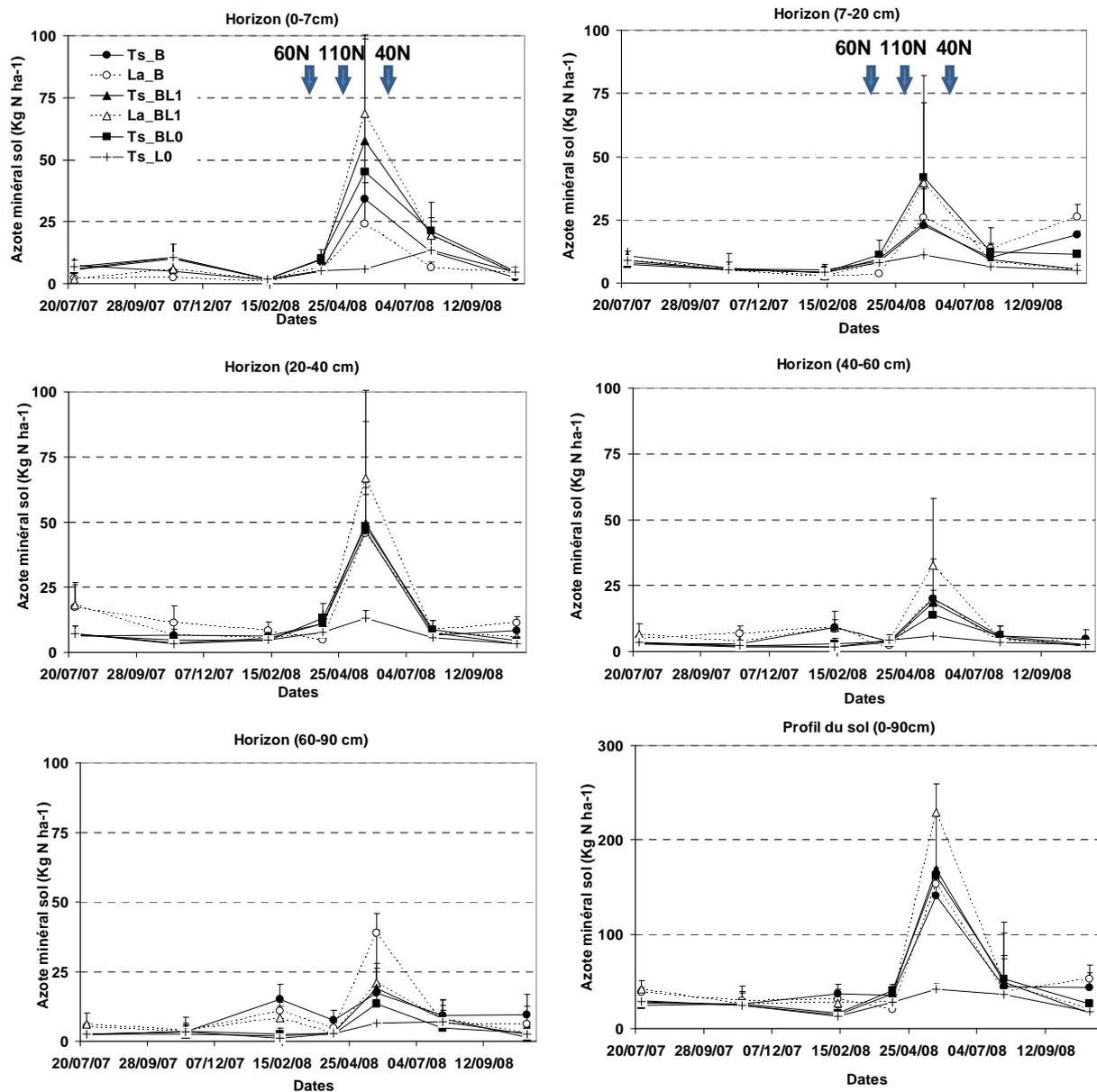


Figure 4.10 : Evolution au cours du temps de la quantité d'azote minéral du sol dans les différents horizons et de son stock à 90cm de profondeur du sol pour les traitements de blé (B) et de luzerne pure (L) et des associations de culture (BL0 et BL1) conduits en travail superficiel (Ts) et en labour (La) pour l'année expérimentale 2008.

Les stocks d'azote obtenus en début de croissance de la culture (correspond au stade « tallage » du blé), ont été deux fois plus élevés pour les traitements de blé pur que les stocks mesurés pour les traitements de cultures associées (BL0 et BL1) conduits en travail

superficiel (16 kg N. ha^{-1}), qui ont été eux-mêmes plus faibles que le stock mesuré en La_BL1 (27 kg N. ha^{-1}). L'analyse de la répartition de l'azote montre que, pour les traitements de cultures associées, les quantités d'azote au niveau des différents horizons ont été faibles et ont tendance à diminuer davantage dans les horizons profonds. Toutefois, pour le traitement La_BL1, les quantités d'azote minéral mesurées au niveau de l'horizon (60-90 cm), égales à 8.5 kg N.ha^{-1} ont été plus élevées par rapport à celles mesurées pour le traitement Ts_BL1 (1.5 kg N.ha^{-1}). Cela peut expliquer la différence de stock d'azote minéral entre ces deux traitements. Pour les traitements de blé pur, une faible quantité d'azote minéral a été mesurée au niveau de l'horizon (0-20 cm), tandis qu'en couches profondes, la quantité d'azote minéral mesuré dans les différentes couches augmente et présente des valeurs plus élevées que les traitements de cultures associées. Cette diffusion de l'azote dans les couches plus profondes lorsque le blé est cultivé seul peut être le résultat de processus de lixiviation.

Les apports d'azote réalisés sur les traitements de blé pur et en association, ont augmenté le stock d'azote dans le profil du sol, de manière identique entre les différents traitements, à l'exception de l'association La_BL1 qui présente des quantités très élevées mais statistiquement non significativement différentes par rapport aux traitements B, BL1 et BL0. La répartition de ce stock entre les différentes couches a été différente entre les traitements en termes de quantité, mais les analyses statistiques ne révèlent aucune différence significative à cause d'une forte variabilité des mesures entre blocs. Il est important de noter que pendant les périodes d'apport, les conditions climatiques étaient favorables à la mise à disposition immédiate de l'azote provenant de l'engrais azoté : les mesures d'humidité montrent que les humidités des différentes couches du sol ont été à la capacité au champ. Ceci a permis une absorption de l'azote par les différentes cultures jusqu'à la réduction du stock à une valeur proche entre les traitements, égale à environ 50 kg N.ha^{-1} .

Juste après la récolte du blé, on observe un reliquat d'azote minéral relativement élevé (50 kg N.ha^{-1}). Ceci a permis à la luzerne maintenue vivante de puiser dans cette ressource afin de reconstruire sa biomasse aérienne. A la fin de la période d'interculture, les quantités d'azote mesurées en présence de la luzerne ont été deux fois plus faibles et statistiquement significativement différentes par rapports aux quantités d'azote mesurées en sol nu (Ts_B et La_B).

Aucun apport d'azote n'a été réalisé sur le traitement en luzerne pure (Ts_L0). Cela explique la faible quantité d'azote mesurée dans les différentes couches et dans le profil du sol par rapport aux traitements de blé pur (B) et de cultures associées (BL0, BL1). Cette différence a été statistiquement significative et a été observée pendant tout le cycle cultural du blé.

Le travail du sol n'a aucun impact significatif sur le stock d'azote minéral du sol dans les conditions de notre essai pour tous les traitements. Toutefois, pour quelques dates de mesure (12/02/2008 et 23/05/2008), une faible tendance d'une meilleure disponibilité d'azote dans le sol en labour est observée par rapport aux traitements en travail superficiel, mais sans différence significative au seuil de 5% (Tableau 4.1).

4.4.1.2 Fournitures en azote du sol

La fourniture en azote du sol a été estimée à la récolte du blé par la quantité d'azote absorbé sur les bandes 0N (Figure 4.11). Les résultats montrent que ces fournitures sont environs deux fois plus importantes lorsque le blé est cultivé seul (B) que lorsqu'il est en association avec la luzerne (BL).

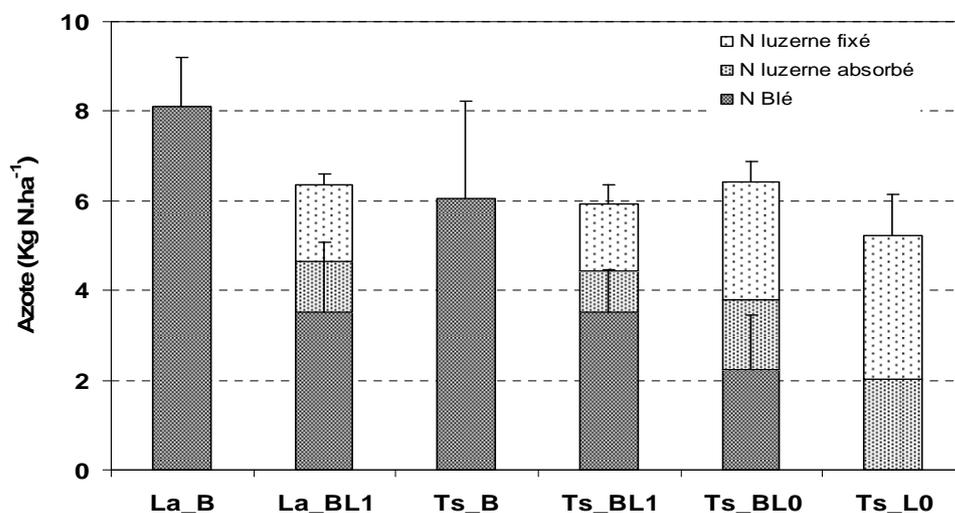


Figure 4.11 : Fourniture du sol mesurée sur les bandes sans apports d'azote (0N) à la récolte du blé pour les traitements de blé (B) et de luzerne pure (L0) et en association (BL0 et BL1) conduits en travail superficiel (Ts) et en labour (La) pour l'année expérimentale 2008.

Pour l'association BL0, la répartition de la fourniture du sol a été similaire entre le blé et la luzerne. Cela a réduit de moitié l'accessibilité du blé à cette ressource par rapport au blé cultivé seul. Toutefois, la part de la fourniture issue de la fixation azotée (de l'air) a été plus

importante que la part absorbée par la luzerne, représentant 40% de la totalité de la fourniture du sol. La comparaison des fournitures du sol et de l'air en BL0 par rapport à la luzerne pure (L0) montre qu'en présence du blé, ces fournitures sont significativement réduites pour la luzerne de 24% et de 17% en BL0 par rapport à L0.

Le contrôle de la biomasse aérienne de la luzerne réalisé sur les associations BL1 réduit significativement la part d'azote absorbée par la luzerne au bénéfice de celle absorbée par le blé (environ 36% de plus que le blé en BL0). La fourniture issue de l'air grâce à la fixation symbiotique subi aussi une diminution de 42% par rapport à la luzerne non contrôlée (BL0). Pour toutes les associations (BL0 et BL1), l'ensemble des fournitures du sol estimées pour les deux espèces (Luzerne et blé) sont systématiquement inférieures aux fournitures du sol du blé pur.

L'impact de travail du sol sur la variation de la fourniture du sol n'est pas statistiquement significatif, mais on observe sur les traitements de blé pur que ces fournitures sont plus élevées en labour qu'en travail superficiel. Tandis que, pour les cultures associées aucune tendance n'a été observée entre les deux types de travail du sol.

4.4.2 Statut azoté des espèces en association

Le statut azoté du blé cultivé seul et en association (Figure 4.12, année 2008), montre que l'INN du blé cultivé seul (B) présente des valeurs élevées au stade « début tallage » (supérieures à 1) puis redescendent autour de 0.9 pour le reste du cycle cultural jusqu'à « épiaison ». Cela traduit que pour ce traitement, le blé présente un statut azoté satisfaisant dès le début du cycle, qui a été maintenu au cours du cycle grâce aux quantités d'azote minéral apportées au système. Une légère diminution des valeurs d'INN a été observée à floraison, statistiquement non significative par rapport à la valeur d'INN observée à épiaison.

En association (BL0), au stade début tallage, l'INN du blé présente des valeurs qui se situent autour de 0.9 indiquant une absence de carence azotée en début du cycle. Une diminution des valeurs d'INN du blé en association est observée au stade « épi 1 cm » en comparaison avec les INN du blé pur, jusqu'à une valeur égale à 0.68 au stade « épiaison », ce qui traduit l'existence d'un stress azoté au cours de cette période. Au stade floraison, une amélioration du statut azoté du blé en association est observée, avec des valeurs d'INN proches de celles du blé pur et cela juste après le dernier apport d'azote (40 unités le 19/05/2008).

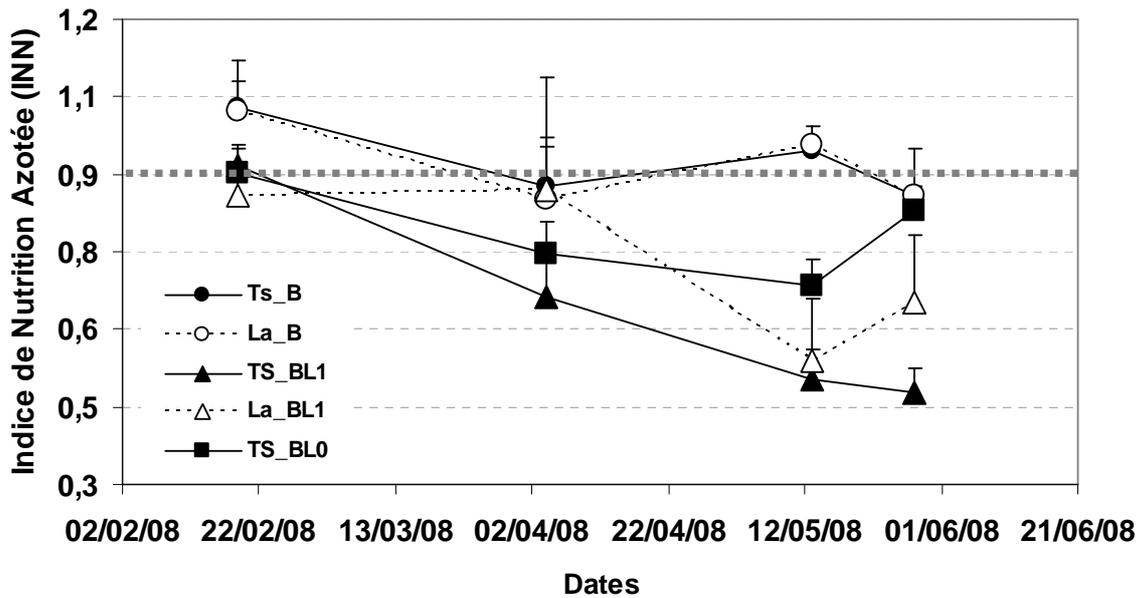


Figure 4.12 : Evolution au cours du temps de l'indice de nutrition azotée (INN) du blé pur (B) en association (BL0 et BL1) conduits en travail superficiel (Ts) et en labour (La) pour l'année expérimentale 2008. Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

Pour les associations BL1, l'évolution du statut azoté du blé a été différente durant la période de mesure d'INN : juste avant la date de contrôle chimique de la luzerne (23/04/2008), les valeurs de l'indice de nutrition azotée du blé en Ts_BL1 ont été significativement inférieures à celles du blé en La_BL1 et en Ts_BL0, égale à 0,66, témoignant d'un statut azoté très carencé. Pour la même période, l'INN du blé en La_BL1 a été très satisfaisant, présentant des valeurs plus élevées qu'en Ts_BL0, qui se situent autour de 0,9. Juste après le contrôle chimique de la biomasse de la luzerne, l'intensité du stress azoté s'est amplifiée pour l'association Ts_BL1 pour atteindre des valeurs d'INN très faibles, égales à 0,48 à floraison ; alors que pour La_BL1, la même réduction d'INN est observée au stade épiaison, avec des valeurs proches de celles du blé en Ts_BL1. Toutefois, une amélioration du statut azoté à floraison est observée juste après le dernier apport d'azote par rapport à Ts_BL1, dont les valeurs restent très faibles par rapport à l'optimum de nutrition azotée, égales à 0,65. Les valeurs d'INN du blé en BL1 sont systématiquement inférieures à celles du blé en BL0, juste après le contrôle chimique de la luzerne, qui sont elles-mêmes inférieures à celles du blé cultivé seul (B). Cela montre que la réduction de la biomasse aérienne de la luzerne associée à des apports d'azote minéral n'a pas permis de lever l'intensité du stress azoté du blé associé à la luzerne.

L'impact du travail du sol sur l'INN est non significatif au seuil de 5% pour le blé cultivé seul. Les traitements Ts_B et La_B présentent des valeurs très proches pendant toute la période de mesure. Cependant pour le blé en association (BL1), le statut azoté du blé est plus satisfaisant en labour par rapport au blé conduit en travail superficiel, si on prend en compte la totalité du cycle.

4.4.3 Fixation symbiotique de la luzerne

Le taux de fixation azotée de la luzerne cultivée seule (L0) (Figure 4.13, année 2008) présente une valeur très élevée en début du cycle (83%) puis diminue à partir du mois d'avril pour atteindre une valeur égale à 61% à la récolte du blé. Juste après la coupe, réalisée au moment de la récolte du blé, le taux de fixation azotée de la luzerne augmente pour atteindre un pourcentage équivalent à celui obtenu en début de croissance, égal à 80% à la fin de la période d'interculture.

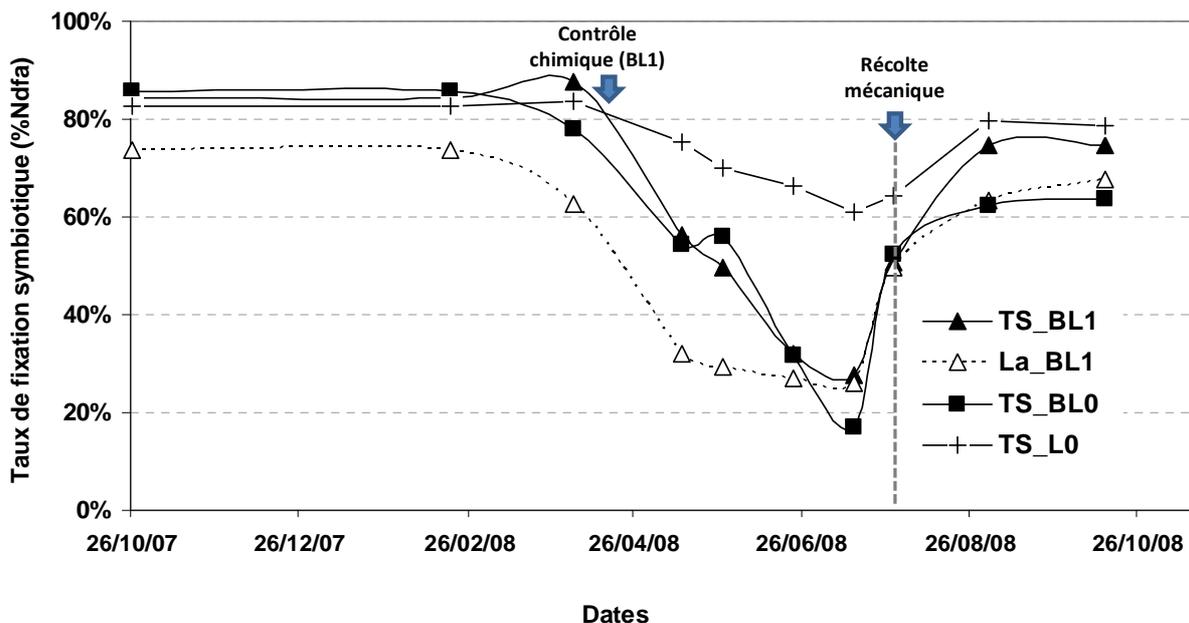


Figure 4.13 : Evolution en fonction du temps du taux de fixation symbiotique de la luzerne pure (L0) et de la luzerne en association (BL0, BL1) pour l'année expérimentale 2008.

En association avec le blé (BL0), la luzerne est capable de fixer l'azote à des taux équivalents à ceux mesurés pour la luzerne cultivée seule (L0) en début de cycle. Cette valeur diminue à partir du stade « épi 1 cm » du blé pour atteindre une valeur très faible (17%) à la récolte du blé. Cet écart du taux de fixation entre la luzerne associée et la luzerne pure peut s'expliquer par l'apport d'une quantité importante d'azote minéral dans l'association au cours du cycle.

(quantité total apportée est égale à 210 unités, fractionnée en trois apports à partir du stade épi 1 cm). Cela a forcément contribué à réduire l'activité symbiotique de la luzerne en association contrairement à la luzerne cultivée seule qui a été conduite en l'absence de tout apport azoté.

Le contrôle de la biomasse aérienne de la luzerne réalisé sur les associations BL1, ne présente aucun effet sur la capacité de la luzerne à fixer de l'azote. En effet, le taux de fixation symbiotique en Ts_BL1 présente une évolution très proche de celle observée pour la luzerne en Ts_BL0. Néanmoins, les pourcentages atteints à la récolte ont été légèrement plus élevés en Ts_BL1 (28%).

La comparaison des traitements Ts_BL1 et La_BL1, montre une meilleure fixation d'azote en travail superficiel. A la fin du cycle cultural, l'écart entre les deux associations se réduit jusqu'à atteindre des valeurs équivalentes. Juste après la récolte du blé, en période d'interculture, le taux de fixation azotée augmente pour toutes les associations. Cette augmentation est plus importante en TS_BL1 par rapport à Ts_BL0 et La_BL1. Cependant, les taux de fixation symbiotique mesurés pour la luzerne en association sont plus faibles par rapport à celle cultivée seule.

4.4.4 Dynamique d'accumulation de l'azote dans l'association

La quantité d'azote absorbé par le blé pur à la récolte en 2008 a été de 251 et 280 kg N.ha⁻¹ respectivement en Ts_B et La_B (Figure 4.14).

La luzerne cultivée seule (Ts_L0), en l'absence de fertilisation azotée, a été capable de fixer de l'azote atmosphérique tout le long du cycle cultural. Cette activité fixatrice a été élevée en début de croissance de la luzerne et a permis d'accumuler 33 kg N.ha⁻¹ avant la coupe mécanique. La réduction de la biomasse aérienne de la luzerne a été accompagnée par une diminution de moitié de la quantité d'azote fixé jusqu'à la reprise végétative (correspond au stade « épi 1 cm »), à partir de laquelle la quantité d'azote fixé a augmenté jusqu'à atteindre une valeur égale à 55 kg N.ha⁻¹ à la fin du cycle. Parallèlement à cette activité fixatrice, la luzerne a absorbé une quantité d'azote plus faible que la quantité d'azote fixée, égale à 35 kg N.ha⁻¹ à la récolte du blé. Juste après la récolte du blé, en période d'interculture, une reprise de l'activité fixatrice de la luzerne a été observée, accompagnée par une faible absorption d'azote. Toutefois, une légère diminution de cette activité a été observée à la fin de la période d'interculture, avec des valeurs d'azote fixé égales à 27 kgN ha⁻¹.

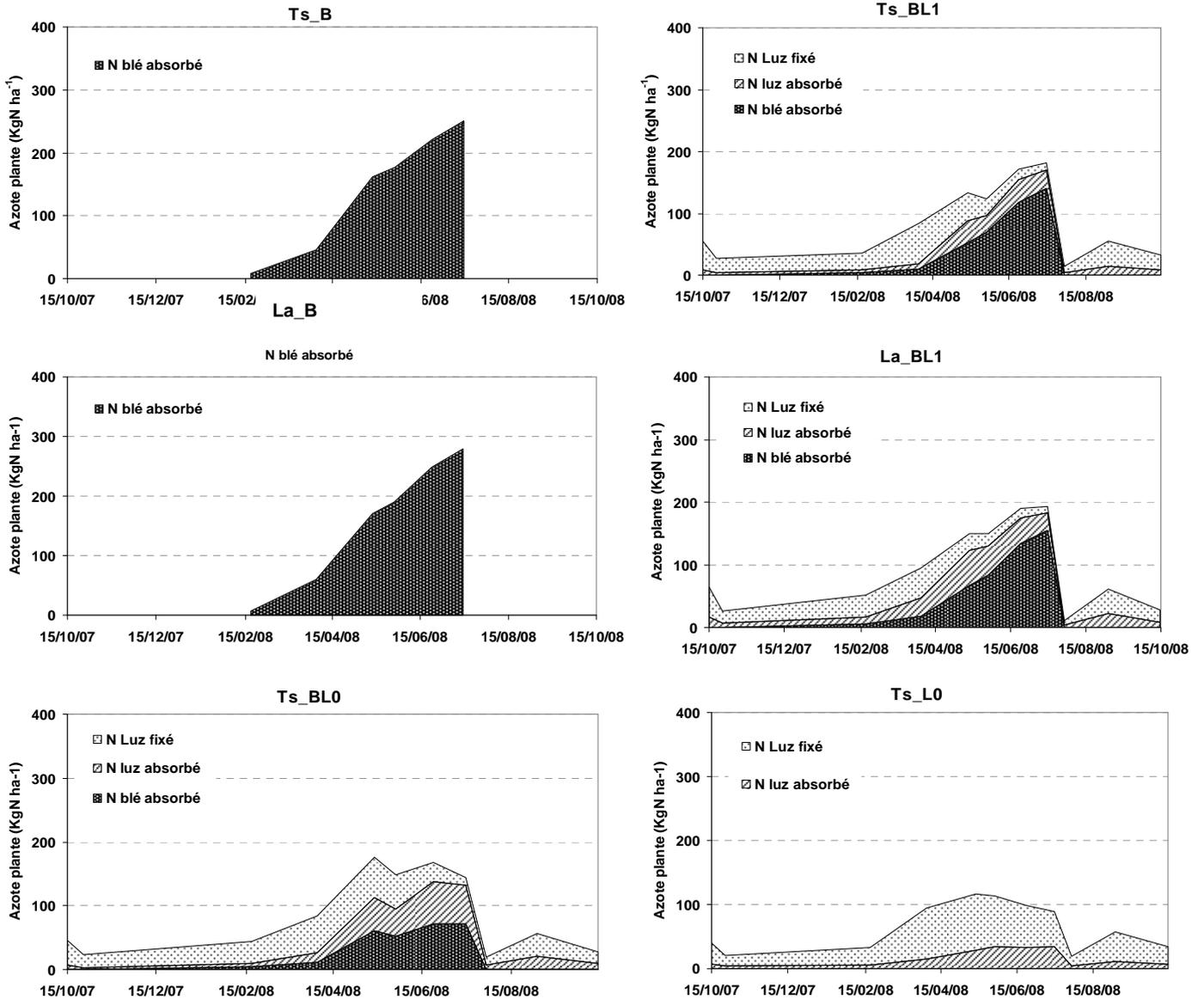


Figure 4.14 : Evolution au cours du temps de l'accumulation de l'azote absorbé par les plantes ainsi que de la part fixée par la luzerne pour les traitements de blé et de luzerne purs (B et L) et en association (BL) pour l'année expérimentale 2008.

L'insertion de la luzerne en association avec le blé (Ts_BL0) a occasionné, à la récolte, des réductions significatives des quantités d'azote absorbées par le blé, de 71% par rapport au traitement de blé pur. Cette réduction a été accompagnée par une absorption très importante de l'azote par la luzerne dont la cinétique d'accumulation a été identique à celle du blé. Les quantités d'azote absorbées par les deux espèces ont été très proches à la récolte, égales à 70 kg N.ha⁻¹ pour le blé et à 60 kg N.ha⁻¹ pour la luzerne. Pour l'association BL0, la luzerne a fixé une quantité d'azote plus élevée par rapport à la luzerne pure, de 26% en début du cycle

de croissance. Par la suite, la quantité d'azote fixé a subi une décroissance dès les premiers apports d'azote, jusqu'à atteindre à la récolte des quantités d'azote fixé plus faibles de 77%, différence statistiquement significative par rapport à la luzerne cultivée seule.

Le contrôle chimique de la biomasse de la luzerne (BL1) a amélioré de 50% la quantité d'azote absorbé par le blé en comparaison avec le traitement sans contrôle chimique (BL0), à la récolte. Cependant, pour le même stade de mesure, cette quantité a été réduite de 45% en BL1 (différence statistiquement significative) par rapport à celle absorbé par le blé cultivé seul. Cette amélioration de la capacité du blé à absorber de l'azote par rapport au traitement de blé associé avec une luzerne non contrôlée (BL0) est due à une diminution de moitié de l'absorption d'azote par la luzerne en BL1. Toutefois, cette réduction n'a pas été suffisante pour permettre au blé d'atteindre une accumulation satisfaisante d'azote équivalente au traitement de blé pur. Le contrôle chimique réalisé au stade «2 nœuds» du blé a significativement réduit la capacité de la luzerne en BL1 à fixer de l'azote juste après la date d'application en comparaison avec la luzerne en BL0, réduction estimée à 43%. Toutefois, à la récolte, la quantité d'azote fixée par la luzerne a été très proche de BL0 (la différence est de 11%, statistiquement non significative). Ceci montre qu'en fin de cycle, la luzerne est capable de remettre progressivement en activité sa capacité à fixer l'azote. Après la récolte, aucun effet du contrôle chimique n'a été observé sur l'évolution des quantités d'azote fixées et absorbées par la luzerne pour les traitements BL0 et BL1 en période d'interculture. Toutefois, la luzerne pour tous les traitements a tendance à fixer une quantité d'azote toujours plus élevée que celle absorbée.

Pour les deux années expérimentales, la quantité d'azote absorbée par le blé n'est pas statistiquement différente pour tous les traitements entre les deux types de travail du sol. On note toutefois une tendance à une accumulation d'azote légèrement plus élevée en labour qu'en travail superficiel pour les traitements de blé pur (B) et en association (BL1). En revanche, pour la luzerne en BL1, une meilleure absorption d'azote est observée en labour au cours du cycle cultural par rapport au travail superficiel, mais les quantités d'azote accumulées à la récolte pour la luzerne ne présentent aucune différence significative au seuil de 5%. Pour l'azote fixé par la luzerne, les quantités ont été identiques entre Ts_BL1 et La_BL1 à la récolte.

La comparaison des quantités d'azote accumulées par le blé pur à celles observées en association montre que l'accumulation de l'azote par les deux espèces en association (BL0 et BL1) à la récolte du blé est plus faible en comparaison avec celle accumulé par le blé cultivé seul.

4.5 Impact de l'association sur l'élaboration du rendement du blé

Les rendements du blé pur obtenus en 2008 (Figure 4.15) sont égaux à 0.82 et 0.91 t.ha⁻¹ respectivement en Ts_B et en La_B. L'association du blé avec la luzerne (BL0) réduit significativement le rendement du blé à des niveaux très faibles, estimés à 80% de moins que les rendements du blé pur.

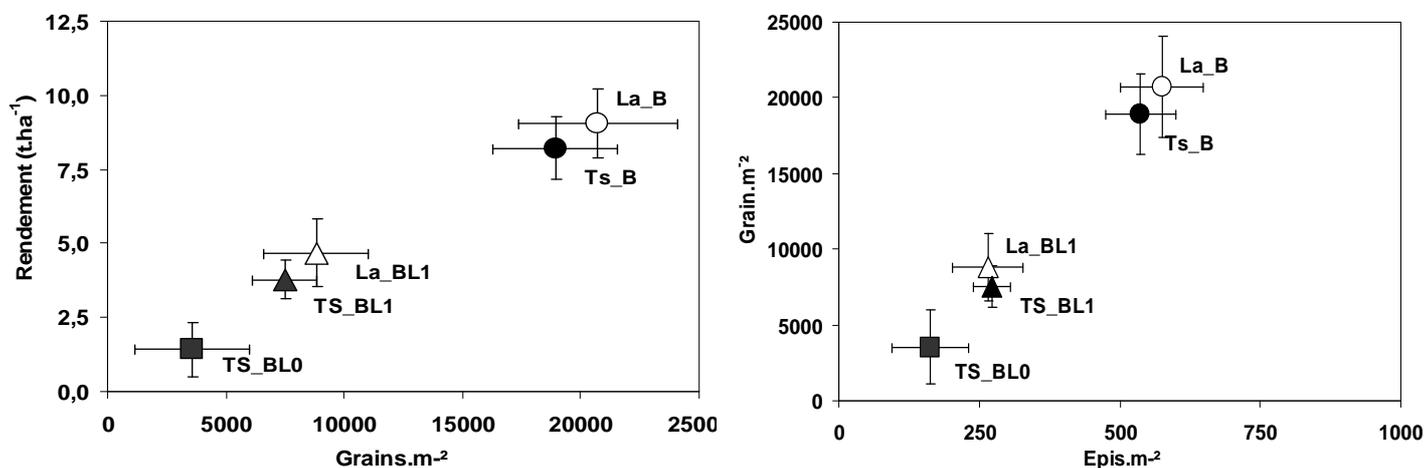


Figure 4.15 : Analyse du rendement du blé cultivé seul (B) et en association (BL0 et BL1) conduit en travail superficiel (Ts) et en labour (La) pour l'année expérimentale 2008. Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

Le contrôle chimique réalisé sur les associations BL1 améliore la production du blé par rapport à l'association BL0 (sans contrôle chimique de la luzerne). Cependant, les rendements atteints en BL1 sont plus faibles que ceux obtenus pour le blé cultivé seul : la réduction est estimée à 50% de moins que lorsque le blé est cultivé seul.

Pour les traitements de blé pur et associé, le rendement du blé a été plus élevé en labour qu'en travail superficiel. L'écart de rendement est égal à 10% lorsque le blé est cultivé seul (B), alors qu'il est plus élevé, égal à 19% lorsque le blé est associé à la luzerne (BL1). L'analyse statistique montre une légère différence statistiquement significative entre ces traitements au

seuil de 5% (Tableau 4.1), ce qui signifie que dans les conditions de notre essai on a un léger effet de travail du sol sur le rendement final du blé.

L'analyse du rendement en fonction du nombre de grains par m² (Figure 4.15(a)) montre une forte corrélation entre ces deux variables ($r^2=0.98$). Cette corrélation montre que la réduction du rendement du blé en association est due principalement à une forte réduction du nombre de grains et non pas à une réduction du poids moyen des grains. Selon les traitements, le nombre de grains par m² varie entre 35600 et 21000 grains.m² : les valeurs les plus élevées ont été observées pour les traitements de blé pur, alors qu'en association (BL0), le nombre de grains par m² a été réduit de 80% par rapport au traitement de blé pur. Pour les associations BL1 cette diminution est moins importante en comparaison avec BL0 mais la diminution est toutefois de 60% par rapport au blé pur (B). Cette réduction du nombre de grains par m² en association a occasionné une augmentation significative du poids moyen d'un grain en comparaison avec les traitements de blé pur. Cette augmentation est de 16% pour l'association Ts_BL1 et de 21% pour La_BL1. Ceci est dû à l'effet de compensation classiquement observé dans de nombreuses situations à faible nombre de grains. Ce phénomène de compensation n'a pas été observé dans l'association Ts_BL0.

Pour tous les traitements de cultures associées (BL0, BL1), la réduction du nombre de grains par m², responsable de la réduction du rendement du blé, est fortement corrélée à la réduction du nombre d'épis par m² ($r^2=0.99$) (Figure 4.15b). À la récolte, le nombre de grains par épi en BL0 a diminué de 44% par rapport au traitement de blé pur. Pour les associations (BL1), le contrôle de la biomasse de la luzerne permet une amélioration de cette composante par rapport à BL0, mais son impact sur le nombre de grains par épi du blé en comparaison avec le traitement de blé pur diffère selon le travail du sol : en travail superficiel (Ts_BL1), une diminution de 22% en comparaison avec le traitement Ts_B est observée, statistiquement significative au seuil de 5%. En labour pour l'association (La_BL1) le nombre de grains par épi présente une valeur voisine de celle observée pour le blé pur (La_B), égale à 33 grains. épi⁻¹. La diminution du nombre de grains par épi en Ts_BL1, n'est pas due à une régression des épis entre la période d'épiaison et la récolte du blé : le nombre d'épis produit à l'épiaison et celui à la récolte sont très proches. Elle est due à une compétition qui a lieu beaucoup plus précocement dans le cycle cultural, qui s'est manifestée par une réduction du nombre de talles fertiles. Le calcul de cette composante, établi grâce au rapport entre le nombre d'épis par m²

mesuré à la récolte et le nombre de plantes par m² mesuré à la sortie de l'hiver, montre que les valeurs les plus élevées de talles fertiles par plante correspondent aux traitements de blé pur (3 talles et 2 talles respectivement en La_B et en Ts_B). Pour le blé en association (BL0 et BL1), la production de talles fertiles a été réduite jusqu'à une talle par plante, indiquant une réduction significative de cette composante par rapport au blé pur. Cette réduction du nombre de talles fertiles a été encore plus accentuée pour les traitements en association à cause d'une réduction du nombre de talles par plante (Figure 4.16a), observée au stade « tallage ». Pour ces traitements, la présence de la luzerne a limité la capacité du blé à taller en comparaison avec les traitements de blé pur : la diminution du nombre de talles par plante a été de 77% pour BL0, alors qu'elle était moins importante en BL1, égale à 66% en comparaison avec les traitements de blé pur. De même, une mortalité des pieds de blé a été observée à la fin du stade herbacé (Figure 4.16b) pour le traitement Ts_BL0, égale à 18% par rapport aux traitements de blé pur (Ts_B), ce qui montre que la compétition entre les deux espèces au niveau de cette association a lieu dès les premiers stades de croissance. Toutefois, une légère réduction du nombre de pieds est observée pour les traitements (BL1) qui ne présente aucune différence significative au seuil de 5% en comparaison avec les traitements de blé pur.

La comparaison entre les deux années expérimentales 2008 et 2009 pour les composantes « nombre de plante par m² » mesurées à la levée et à la sortie d'hiver et le nombre de talles par plante, montre qu'on a un effet année très marqué sur l'élaboration de ces différentes composantes. Cette différence se situe tout d'abord au niveau du nombre de plantes par m² qui est un peu plus élevé en 2009 par rapport à 2008 : pour les traitements de blé pur et en association le nombre de plantes par m² mesuré à la levée et en sortie hiver varie entre 285 et 232 plantes par m² en 2009 contre 254 et 187 plantes par m² en 2008. De même, la présence de la luzerne en association avec le blé (BL0, BL1, BL2) en 2009, n'a occasionné aucune mortalité de pieds du blé ni à la levée, ni à la sortie de l'hiver contrairement à ce qui a été observé en 2008. Cette différence entre les deux années est due à une différence d'installation de la luzerne dans le système qui a été très précoce en 2008 mais beaucoup plus tardive en

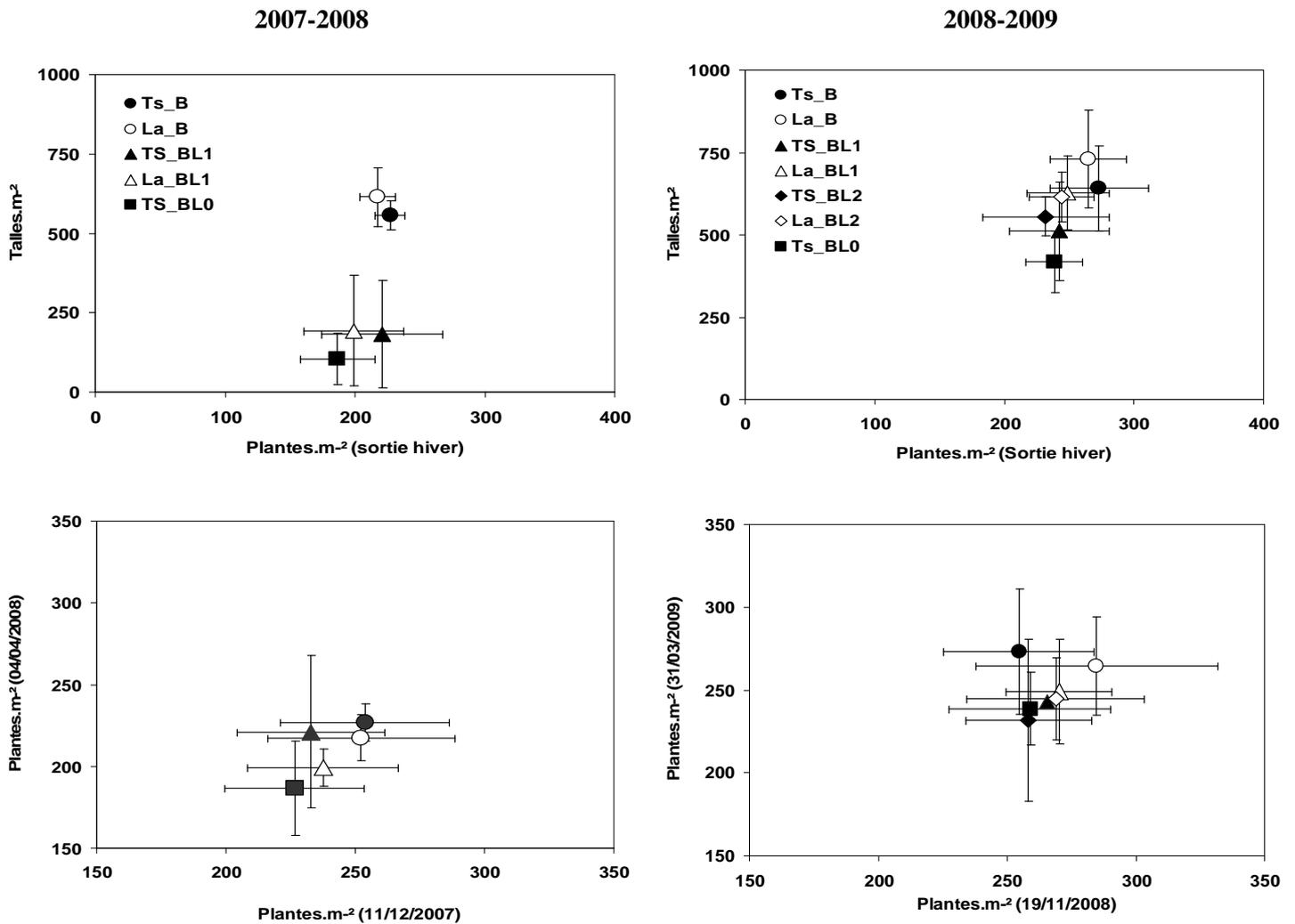


Figure 4.16 : Analyse des composantes du rendement blé pour les différents traitements de blé pur (B) et en association (BL0, BL1, BL2) pour les deux années expérimentales 2008 et 2009. Les barres verticales représentent les valeurs des écarts types.

Le nombre de talles par plantes mesuré en sortie d'hiver pour les deux années expérimentales montre que cette composante a subi une réduction de 25% pour l'association (BL0), statistiquement significative par rapport au traitement de blé pur. En revanche, une légère diminution de cette composante (entre 2 et 10% de réduction) a été observée pour les associations (BL1 et BL2), mais sans différence significative au seuil de 5% par rapport aux traitements de blé pur. Ces résultats montrent que contrairement à ce qui s'est passé en 2008, le blé associé à la luzerne a été capable de produire en 2009 un nombre de talles équivalent à celui produit par le blé cultivé seul. Cette différence de production du nombre de talles par plante entre les deux années peut être reliée à la différence de quantité de biomasse totale produite par la luzerne et les adventives, mesurée en période de tallage du blé (voir chapitre 4.1). De même, on peut attribuer cette différence de nombre de talles à la durée de la période

du tallage, qui était plus longue en 2009 par rapport à 2008 en raison d'un semis du blé plus précoce en 2009 par rapport à celui qui a été réalisé en 2008.

L'effet de travail du sol sur l'élaboration de ces composantes (nombre de grains par m², poids moyen des grains, nombre de grains par épi, nombre de talles fertiles) observée uniquement en 2008, n'est pas statistiquement significatif au seuil de 5% pour les traitements de blé pur. Cependant, pour ces mêmes traitements une tendance de production légèrement plus élevée en labour qu'en travail superficiel est observée pour ces composantes. Pour l'association BL1, cette même tendance a été observée pour les deux principales composantes du rendement, sans différence significative entre Ts_BL1 et La_BL1. En revanche, seule la composante « nombre de grains par épi » a présenté des différences statistiquement significatives au seuil de 5%, présentant des valeurs plus élevées en labour qu'en travail superficiel (la différence est égale à 17% entre les deux types de travail du sol). Pour les composantes « nombre de talles par plante » et « nombre de plantes par m² », les analyses statistiques ne montrent aucun effet de travail du sol en 2008. Cependant en 2009, un effet statistiquement significatif du travail du sol sur la variation de nombre de plantes par m² a été identifié pour les traitements de blé pur (B) et blé associé (BL1, BL2). Le nombre de talles par plante a été légèrement plus élevé en labour par rapport au travail superficiel, pour les traitements de blé pur et en association avec la luzerne, mais sans différence significative au seuil de 5%.

4.6 Discussion

L'objectif principal de notre étude était d'analyser, sur une échelle annuelle, la capacité d'une plante de couverture, en l'occurrence une luzerne, associée avec un blé à améliorer les performances agronomiques et environnementales de la culture. Pour atteindre cet objectif, nous avons adopté une démarche expérimentale afin i) de renforcer les connaissances sur le fonctionnement de ce système innovant dans le cas d'une association de « blé-luzerne » et ii) de tester d'autres modes de gestion de la plante de couverture pour limiter la compétition qui s'exerce entre les deux espèces.

4.6.1 Effet du travail du sol sur le fonctionnement de l'association

Cette approche expérimentale nous a permis d'évaluer le fonctionnement d'un système qui combine une plante de couverture associée à un blé avec les techniques de travail minimum du sol (TCS), représentées comme une alternative pour remplacer le travail du sol conventionnel (labour). La comparaison des performances agronomiques de l'association conduite en TCS avec celle conduite en labour montre que le blé en association présente un rendement légèrement plus faible en TCS par rapport au labour (résultats 2008). Samarajeewa *et al.* (2005) dans leurs travaux réalisés sur le fonctionnement d'une association de blé avec l'astragale de chine (*Astragalus sinicus L.*) conduits sur différentes modalités de travail du sol montrent que le rendement du blé en TCS est comparable à celui conduit en labour. Ce résultat a été attribué par les auteurs à l'effet compétitif exercé par la plante de couverture sur les adventices en fin de cycle, ce qui a réduit la perte de rendement en TCS. De même, des observations réalisées sur l'association de Soja avec l'éleusine (*Eleusine corocana L.*) (Samarajeewa *et al.*, 2006) montrent que grâce à cette capacité de l'éleusine à réduire les adventices, le soja en association produit des rendements en TCS équivalents à ceux observés pour la même culture en labour. Dans notre situation, l'infestation en adventices en travail superficiel a été plus importante que celle observée en labour en fin de cycle. Cela peut expliquer cette différence de production de blé entre les deux systèmes, surtout qu'aucun effet de travail du sol n'a été observé sur les autres variables plantes (biomasses aériennes et racinaires, accumulation de l'azote et architectures aériennes). Pour les variables sol, aucune différence significative de disponibilité de l'azote dans le sol n'a été détectée entre les deux types de travail du sol. Seul le stock d'eau dans le sol a été légèrement plus élevé en travail du sol superficiel par rapport au labour. Cette différence fréquemment montrée dans la littérature (de Tourdonnet *et al.*, 2006) est attribuée aux caractéristiques physiques du sol entre les deux

modes de travail du sol. En effet, la modification de l'architecture de l'espace poral en non labour peut entraîner des modifications des propriétés hydrodynamiques du sol (Carof, 2006).

Pour le blé cultivé seul, les rendements obtenus sont légèrement inférieurs en travail superficiel par rapport au labour. Ce résultat est en contradiction avec les résultats obtenus par Carof *et al.* (2007a), qui n'observent aucun effet de travail du sol sur le rendement du blé lorsqu'il est cultivé seul sur le même site d'étude. Par contre, il est en accord avec les résultats des enquêtes sur les pratiques agricoles en France (Agreste, 2008) qui montrent une légère diminution (-4%) des rendements de blé cultivé sans labour depuis plus de 5 ans par rapport à un blé semé après labour.

4.6.2 Effet de la présence de la luzerne sur l'élaboration du rendement du blé

Les résultats issus de ce travail expérimental confirment que l'insertion de la luzerne en association avec le blé modifie les dynamiques de croissances et l'élaboration du rendement du blé. En effet les résultats obtenus sur la dynamique d'accumulation de la matière sèche montrent que la biomasse du blé en association a été réduite de plus de 40%. L'intensité de cette réduction de biomasse s'est amplifiée lorsque le couvert n'a pas été maîtrisé, engendrant *in fine* une réduction du rendement du blé de plus de 50% en 2008. Cet effet dépressif d'une plante de couverture sur le rendement du blé a été également observé par Carof *et al.*, (2007a) qui a testé différentes espèces de plante de couverture en association avec un blé. Les auteurs montrent que la réduction du rendement du blé a varié de 19% à 81% pour les différentes combinaisons testées. Cette variation est expliquée par les auteurs principalement par l'intensité des compétitions s'exerçant entre le blé, la plante de couverture et les adventices. Le même résultat a été observé par Hiltbrunner *et al.* (2007c) dans le cas d'une association de blé avec une plante de couverture type légumineuse, avec des réductions du rendement qui peuvent atteindre 60% lorsque la compétition pour la ressource est intense entre ces trois peuplements. Dans notre situation, la première année d'essai a été caractérisée par une forte croissance de la luzerne qui a concurrencé le blé pour les ressources du milieu.

Pour la première année expérimentale, la réduction sévère du rendement du blé en présence de la luzerne est due à la diminution du nombre de grain par m² par rapport au blé cultivé seul. Toutefois, dans notre situation, un mécanisme de compensation a été observé grâce à l'augmentation du poids moyen d'un grain, mais qui n'était pas suffisant pour réduire les

écarts de rendement observés entre les traitements de blé pur et de blé associé contrairement à ce qui a été observé par Picard *et al.* (in press) sur un mélange « blé *fétuque ».

Cette réduction du nombre de grains par m² a été directement liée à la réduction du nombre d'épis par m². Hiltbrunner *et al.* (2007a) montrent que la réduction de cette composante est la première cause de la diminution du rendement du blé en association avec *Trifolium repens L.* De même, l'étude détaillée de la mise en place des premières composantes du rendement du blé montre que cette réduction du nombre d'épis par m² est due à la réduction du nombre de talles fertiles par plantes à cause de l'installation précoce de l'effet compétitif de la luzerne dans le cycle. Le même résultat a été obtenu par Carof *et al.* (2007a) qui montrent que la réduction du rendement du blé est étroitement liée à la réduction du nombre de talles par plante. C'est pour cette raison que dans quelques travaux (Hiltbrunner and Liedgens, 2008) les auteurs préconisent d'utiliser des variétés de blé d'hiver qui présentent une bonne capacité de tallage pour éviter la réduction du rendement du blé en présence d'une plante de couverture. La réduction du nombre de talles dans notre cas, n'est pas liée à un effet de stress azoté mais à une compétition vis-à-vis de la lumière qui a eu lieu en début du cycle. Des travaux réalisés sur l'analyse des causes de l'arrêt de tallage du blé (Casal, 1988 ; Evers *et al.*, 2006) en relation avec les conditions de lumières environnantes montrent que sous l'effet d'ombrage, le blé a tendance à stopper la production de ses talles secondaires à cause de la modification de la qualité de lumière. Ceci confirme donc qu'il est nécessaire de réduire l'effet compétitif exercé par la luzerne sur le blé avant la mise en place de la composante nombre de talles.

La comparaison entre les deux années expérimentales montre que l'intensité de compétition de la luzerne sur l'élaboration des premières composantes du rendement du blé est très sensible au décalage des cycles du blé et de la luzerne. En 2008, le semis très précoce de la luzerne avant le semis du blé a engendré une compétition qui a lieu relativement tôt dans le cycle, à partir du stade début tallage. En revanche, en 2009, le semis plus tardif de la luzerne a eu un effet moins dépressif sur la mise en place des premières composantes du rendement du blé, vu qu'aucun effet de la luzerne n'a été observé sur la mise en place de la composante nombre de talles. Ces premiers résultats sur la mise en place des composantes du rendement du blé en 2009, montrent que le blé a moins souffert de la présence de la luzerne en début du cycle à cause d'un faible développement de la luzerne, ce qui laisse à penser que la réduction du rendement sera moins importante par rapport à 2008.

4.6.3 Evaluation de l'effet compétitif et facilitatif de l'insertion de la plante de couverture en association avec le blé

Malgré cette réduction du rendement du blé considérée comme une des limites de fonctionnement de ce type d'association, une meilleure valorisation des ressources du milieu est généralement observée en association par rapport aux cultures pures. Dans la littérature sont cités une meilleure productivité en termes de rendement quand les deux cultures associées sont récoltées (Fukai and Trenbath, 1993; Jensen, 1996), ou une meilleure production de biomasse totale (Hauggaard-Nielsen *et al.* 2001a) par rapport aux cultures pures correspondantes. Dans notre cas, les résultats de LER (toujours supérieur à 1) calculés sur la base de la production de biomasse confirment que la biomasse totale produite par l'association blé-luzerne est supérieure à celle produite par le blé pur pour les deux années expérimentales. Ce résultat est en accord avec les différents travaux réalisés sur les associations de cultures (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001a; Thorsted *et al.*, 2006c). Cet accroissement de biomasse est dû essentiellement à une meilleure interception du rayonnement, les résultats de rayonnement absorbé montrant que l'association intercepte plus efficacement le rayonnement en comparaison avec la culture du blé pur. Des études réalisées sur d'autres associations de culture (Tsubo *et al.*, 2001, Tsubo and walker, 2004 ; Poggio, 2005 ; Carof *et al.*, 2007b) montrent aussi qu'on a une meilleure absorption de rayonnement en association par rapport aux cultures pures, expliquée généralement par une complémentarité de l'architecture aérienne des deux espèces en association. Dans notre cas, les mesures relatives à l'architecture aérienne des deux espèces montrent que l'important développement foliaire de la luzerne en 2008 a réduit significativement la LAI du blé, phénomène qui a été accentué par le fait que les deux espèces occupent le même espace en début de croissance. Toutefois, la hauteur maximale atteinte par le blé a été supérieure à celle de la luzerne. Ceci montre donc que cette augmentation de l'absorption de lumière n'est pas due à une complémentarité architecturale entre les deux espèces généralement observée pour les associations de culture (Tsubo *et al.*, 2001), mais à un simple effet additif. En 2009, en revanche, le développement de la surface foliaire de la luzerne a été moins important qu'en 2008 à cause d'une compétition exercée cette fois-ci par le blé sur la plante de couverture. Ceci suppose que dans ces conditions, l'augmentation de l'absorption de rayonnement en association sera en faveur du développement du blé.

Dans la majorité des cas, cette meilleure absorption de rayonnement contribue à la réduction de la prolifération des adventices. Thorsted (2006) confirme que la réduction de la biomasse des adventices dans l'association blé*trèfle est due à une meilleure efficacité de l'interception du rayonnement suite à l'augmentation de la biomasse produite par le mélange. Dans notre situation, en première année d'essai, la part de rayonnement qui arrive au niveau du sol a été réduite en présence de la luzerne mais son effet sur les adventices n'était pas évident à déceler par rapport à la culture pure, à cause du désherbage chimique réalisé en début du cycle qui a éradiqué le développement des adventices sur ces parcelles. Toutefois, cette capacité de la luzerne à réduire les adventices a été observée sur l'expérimentation de 2009, en accord avec de nombreux travaux d'association de culture avec des couverts végétaux (Ross *et al.*, 2001 ; Fisk *et al.*, 2001, Hiltbrunner *et al.*, 2007). Cette réduction de la biomasse des adventices par les couverts végétaux type légumineuse a été aussi démontrée par Liebman and Dyck (1993) dans leur revue de la bibliographie sur les associations de cultures. Cela confirme donc que les couverts peuvent être une alternative au contrôle chimique des adventices dans ces systèmes. Bien sûr, cette alternative ne sera valable que si la quantité d'herbicide nécessaire pour contrôler la luzerne est inférieure à la quantité d'herbicide nécessaire pour contrôler les adventices en absence de luzerne.

Les résultats expérimentaux montrent également que la présence de la luzerne durant tout le cycle cultural en association avec le blé peut augmenter la consommation en eau en association par rapport aux cultures pures. Ceci est expliqué en partie par une importante production de surface évaporante en association suite au développement de la luzerne qui contribue à 50% de la biomasse totale produite en association (BL0). Le même résultat a été observé par Thorsted *et al.* (2006) dans le cas d'une association de blé – trèfle blanc, dans laquelle la plante de couverture entraîne un déficit hydrique très important en association à cause d'un développement important de sa biomasse, égale à 30-40% de la biomasse totale produite en association. Toutefois, dans nos conditions, aucun déficit hydrique n'a été observé pendant la culture de blé et la réserve en eau est reconstituée en fin d'interculture. En accord avec ce résultat, Carof *et al.* (2007b) montrent que l'eau n'est pas un facteur limitant de l'association dans ce type de climat.

Les résultats expérimentaux montrent une faible accumulation de l'azote dans l'ensemble des deux espèces en association par rapport à la culture de blé pur. Ceci est dû à la réduction de cette ressource pour le blé, confirmée par les valeurs d'INN insatisfaisant à partir du stade

« épi 1 cm » par rapport au blé pur, témoignant d'un état azoté carencé du blé. Cette réduction de la ressource n'est pas due à une indisponibilité de l'azote dans le sol, mais à une compétition exercée par la luzerne en absorbant une quantité d'azote équivalente à celle absorbé par le blé qui lui est associé. White and Scott (1991) montrent que la plante de couverture type légumineuse n'améliore pas la nutrition azotée de la céréale qui lui est associée la première année de son installation, mais elle contribue à fournir de l'azote au système grâce à son activité fixatrice en deuxième année si elle est maintenue vivante. Dans notre situation, les résultats de fixation symbiotique montrent une contribution relativement faible de cette activité dans la fixation de l'azote. A cause des apports azotés apportés en association de culture, la luzerne a puisé préférentiellement l'azote minéral du sol au détriment de la fixation symbiotique, ce qui a limité *in fine* la disponibilité de cette ressource pour le blé. Par contre, pendant l'interculture, l'activité fixatrice de la luzerne reprend et peut contribuer à accroître les ressources en azote pour la culture suivante. Ce résultat est en contradiction avec les résultats obtenus dans de nombreux travaux sur les associations type céréale-légumineuse (Fujita *et al.*, 1992, Jensen 1996, Corre-Hellou, 2005), qui montrent que même en système fertilisé, il existe une complémentarité entre la fixation symbiotique et l'absorption, ce qui favorise la production de biomasse de la céréale au détriment de la légumineuse. Cela est expliqué par la forte compétitivité de la céréale vis-à-vis de l'azote du sol (Jeuffroy and Bouchard, 1999 ; Le Bail and Meynard, 2003). Corre-Hellou (2005) montre que la forte compétitivité de la céréale dans le cas de l'association orge-pois est conditionnée par la vitesse de progression du système racinaire : lors de la mise en place simultanée du profil racinaire des deux espèces, les racines de la céréale progressent beaucoup plus vite et en profondeur par rapport au système racinaire de la légumineuse. Dans notre cas, la luzerne a été semée trois mois à l'avance par rapport au blé, ceci a engendré un écart d'accès à la ressource azotée à l'origine de l'écart d'enracinement qui s'est créé entre les deux espèces. En effet, les mesures de biomasse racinaire à floraison ont montré que la biomasse de la luzerne constitue l'essentiel de la biomasse racinaire totale du mélange. Cela a permis à la luzerne d'accéder facilement à cette ressource par rapport au blé, dont la biomasse racinaire a été réduite par rapport à celle de blé pur. Cette différence d'accès à l'azote du sol peut être aussi expliqué en partie par les caractéristiques morphologiques du système racinaire de la luzerne caractérisé par un pivot qui lui a permis de coloniser efficacement le sol par rapport au système racinaire du blé. Par ailleurs, les études montrant une certaine capacité de la luzerne associée à fixer de l'azote ont été menées dans des situations de faible niveau de

fertilisation azotée (notamment en agriculture biologique). Dans notre cas, les niveaux plus élevés de fertilisation azotée, calés sur les pratiques conventionnelles, peuvent expliquer une moindre fixation d'azote par la luzerne durant la phase d'association avec le blé.

Juste après la récolte du blé en 2008, la luzerne maintenue vivante permet une couverture du sol (production de deux tonnes de biomasse) par rapport au sol nu. Cela a un effet direct sur la valorisation de la ressource en lumière en période d'interculture qui est perdue en sol nu. den Hollander *et al.* (2007) et Baumann *et al.* (2002a) montrent que les caractéristiques morphologiques des espèces comme par exemple le taux de croissance relatif de la surface foliaire et la croissance en hauteur de la plante de couverture conditionnent la réduction des adventices. Dans notre expérimentation, la luzerne a développé une surface foliaire satisfaisante, qui lui a permis d'intercepter l'énergie solaire. et de réduire systématiquement la quantité de rayonnement qui arrive au niveau du sol ce qui peut limiter la croissance des adventices. Malheureusement, dans les conditions de notre essai, aucune mesure de rayonnement n'a été réalisée à la période d'interculture pour confirmer ce résultat.

Pour l'eau, la présence de la luzerne en période d'interculture entraîne une légère réduction de la réserve en eau par rapport au sol nu. Toutefois, la quantité d'eau réduite n'est pas très importante et ne présente aucune répercussion sur la reconstitution de la réserve en eau, observée à la fin de la période d'interculture.

Pendant l'interculture, la luzerne recommence à fixer l'azote atmosphérique et continue à absorber l'azote minéral résiduel dans le sol, contribuant ainsi à réduire ce stock par rapport au sol nu. Ce résultat confirme donc que la plante de couverture maintenue vivante peut jouer donc un rôle de « plante piège à nitrate » pendant cette période afin d'absorber l'azote résiduel contrairement à certaines situations avec une culture intermédiaire implantée en période d'interculture: Justes *et al.* (2009) montrent que dans un mélange de vesce/avoine implanté en période d'interculture, la quantité d'azote minéral du sol augmente légèrement, contrairement à l'implantation d'une moutarde, du fait de la moindre absorption d'azote minéral en présence d'une légumineuse dans le mélange et d'une provenance d'une partie de l'azote du sol de la fixation symbiotique.

4.6.4 Efficacité des techniques pour piloter l'équilibre entre compétition et facilitation

Dans le cadre de notre étude, nous avons testé une stratégie de gestion de la biomasse de la luzerne au cours du cycle cultural qui repose sur l'application d'un herbicide non létal à faible dose ($\frac{1}{4}$ de dose), ceci dans le but de ralentir sa croissance sans forcément la détruire. Nous avons fait le choix de tester une seule dose de contrôle par association à certaines dates clés pour les deux années d'essai. Les résultats de l'évolution de la biomasse aérienne montrent la forte sensibilité de l'évolution des biomasses de luzerne, blé et adventices à ce contrôle. Le maintien de la croissance de la plante de couverture à des niveaux faibles s'avère nécessaire pour ne pas pénaliser la production du blé, ce qui est en accord avec différents travaux (Teasdale, 1996 ; Abdin *et al.*, 2000 ; Thorsted *et al.*, 2006 ; Carof *et al.*, 2007 a). Picard *et al.*, (in press) obtiennent ainsi des réductions de 5% seulement du rendement du blé en association avec une fétuque en comparaison avec un blé cultivé seul lorsque la biomasse produite par la plante de couverture ne dépasse pas 1 à 2 t.ha⁻¹ tout le long du cycle. White and Scott (1991), Teasdale *et al.* (2007) et Carof *et al.*, (2007a) montrent aussi qu'en l'absence du contrôle chimique de la plante de couverture, cette dernière affecte le rendement de la culture de vente. Avec ce type de stratégie, on peut donc jouer sur la dynamique de croissance de la plante de couverture pour orienter la compétition vers les adventices et la réduire pour la plante commerciale (De Tourdonnet *et al.*, 2008). La date de ce contrôle apparaît comme un élément clé de son efficacité. Au stade « 2 noeuds » (testée en 2008 et 2009), le contrôle paraît trop tardif pour limiter efficacement la compétition par rapport au contrôle réalisé au stade « épi 1 cm » du blé (testé en 2009), qui a permis une réduction très satisfaisante de la biomasse de la luzerne (inférieure à 1.5 t.ha⁻¹, à la récolte). Cela montre que pour une gestion efficace de la plante de couverture, il est nécessaire d'intervenir à des stades précoces du développement afin de réduire son effet compétitif sur le blé. Toutefois, cette biomasse doit être suffisante pour réduire la croissance des adventices. Dans les travaux réalisés par Hiltbrunner *et al.*, 2007, les auteurs préconisent d'appliquer le contrôle avant le stade « épiaison » du blé. Gall, (2009) dans son étude réalisée sur l'association de plusieurs couverts végétaux avec le blé conduite, soit sur un pas de temps annuel ou pluriannuel dans un système avec travail du sol réduit, montre qu'il existe une valeur seuil du niveau de développement du couvert permettant un étouffement des adventices et une limitation de la compétition sur le blé. D'après cette étude, la valeur seuil peut être située à une quantité de matière sèche de la plante de couverture ne dépassant pas 1.5 t.ha⁻¹ au stade « épi 1 cm » du blé. Pour notre situation, la

biomasse de la luzerne au moment de l'application de la deuxième date de contrôle a été très importante (égale à 2 t.ha⁻¹ pour les deux années), ce qui laisse supposer que la dose appliquée était probablement insuffisante pour une réduction efficace de cette biomasse. Nous estimons donc qu'il faudra adapter chaque dose d'herbicide non létal en fonction de la densité foliaire de la plante de couverture au moment de l'application afin de bien maîtriser ce couvert végétal.

Nous avons remarqué aussi que le contrôle tardif réalisé en première année d'essai a favorisé le développement des adventices. Cela peut être lié au rôle protecteur qu'à joué la luzerne au moment du contrôle. Christoffoleti *et al.*, (2007) ont mis l'accent sur le fait que les espèces en association peuvent contribuer à réduire l'efficacité des traitements herbicides en interceptant une part de ce produit par le couvert via le phénomène d'adsorption, ce qui réduirait la lutte contre les adventices. Par ailleurs, la réduction de biomasse de luzerne consécutive au contrôle entraîne une plus grande disponibilité de la lumière pour les adventices, ce qui peut favoriser leur croissance.

Pour les deux dates de contrôles testées, aucune reprise de la croissance de luzerne n'a été observée en fin de cycle pour les deux années expérimentales. Cela confirme que l'application d'une seule date de contrôle à des doses plus faibles que les doses homologuées est suffisante. Toutefois, un effet d'étiollement de la luzerne a été observé en fin de cycle qui n'a eu aucune répercussion sur le blé.

Les résultats de ce travail expérimental sur le blé d'hiver associé à la luzerne dans les conditions de climat tempéré montrent que le contrôle du développement de la plante de couverture en début de croissance du blé est nécessaire dans le but de réduire l'intensité de la compétition sur la plante commerciale. D'autres études réalisées dans différents contextes pedo-climatiques, ont testé d'autres stratégies de conduite de l'association afin d'optimiser la productivité de la plante commerciale dans ces systèmes. Parmi les stratégies évoquées, le décalage des dates de semis des deux espèces a été testé par Brainard *et al.* (2004) en évaluant différentes dates de semis de la plante de couverture (10, 20, 30 jours) après le semis de la culture de vente. Le semis plus tardif de la plante de couverture permet de s'affranchir de l'effet compétitif exercé par la plante de couverture sur les ressources du milieu. Toutefois, Picard *et al.* (in press), soulève le problème de la réussite du semis et de la germination de la

plante de couverture lorsqu'elle est installée en milieu du cycle à cause de la présence de la culture commerciale qui gêne généralement le déroulement de ces opérations.

Dans notre situation, le semis plus tardif de la luzerne en 2009 par rapport à 2008, réalisé avant le semis du blé pour les deux années, a réduit significativement l'effet compétitif de la luzerne en début du cycle. Le même résultat a été obtenu par Hiltbrunner *et al.* (2007a) qui attribuent aussi la faible réduction du rendement du blé au rythme très faible de développement de la plante de couverture en début de cycle, ce qui a favorisé la croissance du blé surtout en début du cycle.

Hiltbrunner *et al.* (2007b) ont testé aussi une large gamme de densité de semis d'un blé d'hiver associé à un White clover afin d'identifier la densité optimale pour optimiser le tallage du blé, identifié comme le facteur majeur de réduction du rendement du blé lorsqu'il est associé à une plante de couverture. Cette stratégie permet d'obtenir des rendements équivalents au système conduit avec une densité conventionnelle en l'absence de plante de couverture. Cependant, les densités de semis très élevées défavorisent la capacité du blé à taller à cause de la compétition interspécifique. Afin d'optimiser la réussite de cette stratégie, les auteurs préconisent de contrôler la plante de couverture en association avec des variétés de blé caractérisées par un potentiel élevé de tallage.

L'insertion des plantes de couverture en association avec un blé nécessite un approfondissement des connaissances pour maîtriser le fonctionnement du système en optimisant sa conduite selon les conditions du milieu pour que ses performances agronomiques et environnementales soient assurées.

Chapitre 5.

DISCUSSION GENERALE & PERSPECTIVES

Chapitre 5. Discussion générale et perspectives

Nos travaux d'évaluation des systèmes de cultures caractérisés par l'insertion d'une plante de couverture en association avec une plante commerciale, fondés sur le couplage de deux approches complémentaires (la modélisation et l'expérimentation), avaient pour objectifs d'affiner la compréhension du fonctionnement de ces systèmes de culture innovants en milieu tempéré et de tester des stratégies de conduites de la plante de couverture afin d'optimiser la conduite de ce système. Cette étude a été réalisée sur une échelle annuelle qui s'étale jusqu'à la fin de la période d'interculture.

Les résultats issus de ces travaux permettent de valider la première hypothèse qui reposait sur le fait que l'insertion de la plante de couverture modifie l'accès des plantes aux ressources du milieu et la croissance des peuplements dans le système blé - plante de couverture – adventices, ce qui détermine *in fine* le rendement du blé. Les résultats obtenus sur les composantes du rendement du blé pour l'association blé-luzerne ont permis d'identifier les périodes sensibles durant lesquelles s'exerçait la compétition entre la plante de couverture et le blé. Il a été démontré que la compétition peut avoir lieu dès les premiers stades de croissance du blé lors de la mise en place de la composante « nombre de talles » et qu'elle peut s'amplifier si les biomasses des couverts de luzerne et d'adventices ne sont pas maîtrisées, engendrant ainsi une diminution significative du rendement (cas de l'association blé-luzerne). Toutefois, si le rythme de croissance de la plante de couverture est très faible en début du cycle de croissance, cette dernière affecte peu le rendement du blé (cas de l'association blé-fétuque). Dans le contexte de forte compétition (cas blé-luzerne), la plante de couverture a eu une longueur d'avance par rapport au développement du blé à cause de son installation très précoce dans le cycle. Toutefois, le fait d'avoir une plante de couverture compétitive a été recherché afin de lutter efficacement contre les adventices. Pour ne pas pénaliser le blé, il fallait donc favoriser la compétition exercée par la luzerne à l'automne et en interculture (contre les adventices) et limiter cette compétition au printemps (contre le blé), d'où les traitements de contrôle de la luzerne. L'adoption de cette stratégie de contrôle de la plante de couverture est en accord avec les constats avancés par différents travaux (Teasdale, 1996 ; Thorshsted *et al.*, 2006 ; Carof *et al.*, 2007b). Nous avons montré donc que le contrôle

de la plante de couverture à des doses faibles non létales d'herbicide peut être un moyen efficace pour réduire la compétition au sein de l'association de culture, freinant ainsi la croissance de la plante de couverture jusqu'à la fin du cycle de croissance. Cependant, l'efficacité de ce contrôle chimique est liée à sa date d'application, à la dose choisie en fonction de la biomasse de la plante de couverture et aux conditions climatiques au moment de son application. D'après notre étude, on a pu conclure qu'il faudra intervenir aux stades précoces de développement afin de réduire la compétition pour l'interception de rayonnement entre les deux espèces, identifié comme la première cause qui affecte l'établissement des premières composantes du rendement du blé dans ce contexte.

L'étude des performances agronomiques et environnementales de ce système innovant grâce aux deux approches adoptées montre que, malgré cette réduction du rendement (qui varie selon l'intensité de la compétition avec la plante de couverture), ce système permet en période de culture d'augmenter la production de biomasse totale en association par rapport à un blé cultivé seul, d'améliorer l'absorption de rayonnement par les deux espèces, ce qui permet de réduire la part de rayonnement qui arrive au niveau du sol nécessaire à la prolifération des adventices, et ceci quelle que soit l'espèce (Poacée ou légumineuse) et la conduite technique de la plante de couverture cultivée. Ce dernier point a été démontré par différents travaux (Teasdale, 1996 ; Ross *et al.*, 2001 ; Fisk *et al.*, 2001 ; Hiltbrunner *et al.*, 2007) qui montrent que la plante de couverture est capable de réduire les densités et les biomasses des adventices. Parallèlement, en accord avec les résultats de modélisation du fonctionnement de l'association blé-fétuque, on a pu mettre en évidence le rôle de la plante de couverture dans la lutte contre les adventices en période d'interculture. Ces observations confirment l'hypothèse 2 sur le comportement de la plante de couverture en association avec le blé vis-à-vis du partage des ressources du milieu en période de culture ainsi qu'aux différents services (étouffement des adventices) qu'elle peut apporter au système essentiellement en période d'interculture.

Les résultats que nous avons obtenus sur l'azote montrent que si la compétition par l'absorption est intense et se fait en même temps entre les deux espèces (cas de l'association blé-luzerne en 2008) alors, la croissance foliaire du blé subit une réduction significative dès les premiers stades de croissance, ce qui réduit significativement son rendement, même si on contrôle la biomasse aérienne de la plante de couverture. Ce résultat est en contradiction avec celui retrouvé par Carof, (2006) qui attribue la réduction du rendement du blé en association avec différentes espèces de plante de couverture à une compétition qui se fait essentiellement

pour le partage du rayonnement solaire ; mais cet auteur travaillait dans des situations d'associations très bien alimentées en azote. Toutefois, les études réalisées par Corre-Hellou, (2005) montrent que les écarts de demande entre les espèces pour l'azote dans le cas d'une association pois-orge conditionnent la compétitivité aérienne et la croissance des deux espèces en mélange. Cela est attribué par le même auteur aux écarts de vitesse de progression racinaire et de colonisation qui sont à l'origine des écarts d'accès à la ressource en azote. En effet, les résultats de modélisation et d'expérimentation dans notre cas montrent que si la plante de couverture développe une importante biomasse racinaire par rapport à la plante commerciale (cas de l'association blé-luzerne), elle accède plus facilement à cette ressource au détriment du blé. Au contraire, une faible exploration du sol par le système racinaire de la plante de couverture (cas de l'association blé-fétuque) limite son accès à cette ressource au profit de la croissance du blé. Ceci est dû aux caractéristiques morphologiques du système racinaire en lien avec les traits fonctionnels de la plante de couverture choisie et à la vitesse avec laquelle il se développe en début du cycle en lien avec la demande de la plante et sa date d'installation dans le cycle. Il faudra donc tenir compte du développement racinaire de la plante de couverture qui est un élément déterminant pour la réussite de ce système au même degré que la stratégie de gestion de la biomasse aérienne de la plante de couverture. Toutefois, quelle que soit l'espèce de plante de couverture, son maintien vivant en période d'interculture permet de prolonger la durée de son cycle afin de remplir le rôle de « plante piège à nitrate » puisqu'elle est capable d'absorber l'azote résiduel dans le sol après la récolte du blé.

L'eau dans les conditions climatiques du bassin parisien, où nous avons réalisé nos expérimentations, ne semble pas être un facteur limitant pour le fonctionnement de l'association, malgré l'observation d'une légère augmentation de la consommation en eau en association en fin de cycle par rapport aux cultures pures. Toutefois, si on se situe dans un contexte de forte intensité évaporatoire, l'étude de la répercussion de ce système sur l'approvisionnement en eau des bassins versants est un élément déterminant pour leur adoption.

Les stratégies de conduite du système testées grâce au travail expérimental et de modélisation ont permis d'acquérir des connaissances techniques sur ces systèmes en milieu tempéré. Ces stratégies sont fondées sur le décalage du cycle de croissance de la plante de couverture en début du cycle soit en décalant sa date de semis soit en contrôlant chimiquement sa biomasse

aérienne. Toutefois, la faisabilité technique de ces conduites nécessite un approfondissement et un apprentissage afin d'assurer et de généraliser leur réussite quelle que soit l'espèce de la plante de couverture et quelles que soient les conditions pédoclimatiques. Ceci peut se faire grâce à l'approche de modélisation qui offre la possibilité de tester différentes stratégies, qui sont lourdes à réaliser par la voie expérimentale, dans différents contextes pédoclimatiques. Enfin, le choix du travail du sol testé par la voie expérimentale (labour, travail superficiel) présente un très faible impact sur le fonctionnement de l'association. Ces derniers points ont permis de valider l'hypothèse 3 de la possibilité de réduire la compétition en association de culture grâce à certaines stratégies de conduites techniques de la plante de couverture.

L'approche expérimentale couplée à la modélisation a permis d'enrichir les connaissances sur le fonctionnement d'un système innovant basé sur l'insertion d'une plante de couverture dans le but d'améliorer ces performances agronomiques et environnementales dans les conditions du milieu tempéré. Pour les deux approches, les systèmes testés ne présentent aucun point en commun du point de vue de la conduite technique de la plante de couverture (date de semis, désherbage par exemple), ce qui nous a permis d'élargir nos gammes de variation pour l'étude de ce système. L'adaptation de STICS pour la simulation de l'association de culture « blé-féтуque » a permis une simulation correcte des interactions entre les deux espèces pour les ressources. Cela met en valeur la robustesse de STICS pour reproduire le fonctionnement de ces systèmes dans nos conditions pédoclimatiques. Toutefois, des améliorations de quelques paramètres du modèle restent à prévoir, concernant principalement la période d'interculture, comme par exemple le paramètre relatif à l'absorption d'azote (chapitre 3- Article). Cet artéfact ne nous a pas permis de comparer la capacité de la plante de couverture maintenue vivante en période d'interculture et celle d'une culture intermédiaire installée juste après la récolte du blé (testés grâce au scénarios positionnement du cycle de la féтуque) sur la réduction de l'azote résiduel car le modèle surestime le prélèvement d'azote par la culture intermédiaire. Cela nous a amené à approfondir notre travail de modélisation en testant différents scénarios de fertilisation de l'association et différents scénarios de stock d'azote post récolte pour évaluer le comportement de la plante de couverture vis-à-vis de l'azote, tout en intégrant l'aspect climatique. Ces simulations ont été réalisées mais elles n'ont pas été malheureusement présentées dans la thèse vu qu'on n'a pas eu le temps d'exploiter ces données à cause du calendrier de travail très limité dans le temps. Nous avons envisagé aussi de compléter le travail de modélisation par la simulation de l'association « blé-luzerne », afin

d'évaluer l'effet du choix variétal de la plante de couverture sur les stratégies techniques testées au cours de ce travail. Ceci n'a pas été réalisé pour deux raisons : i) l'adaptation de STICS pour la luzerne par l'équipe STICS d'Avignon n'est pas tout à fait opérationnelle ii) l'utilisation du modèle aurait requis un travail de paramétrage et de validation important et coûteux en temps. Toutefois, on se pose la question de la capacité de STICS à simuler cette association. Les résultats expérimentaux montrent que la hauteur du blé en association n'est pas affectée par la présence de la luzerne alors qu'on a une réduction importante du LAI du blé en association par rapport aux cultures de blé pur. Dans STICS, les hauteurs sont simulées en fonction de l'évolution de LAI (Brisson *et al.*, 2009). Cela affectera certainement la simulation du partage de rayonnement puisque le modèle ne prendra pas en compte les modifications de l'architecture aérienne des deux espèces. Cela peut fausser la simulation des variables plantes, à moins que le formalisme de simulation de LAI ne soit revu dans son ensemble. Malézieux *et al.* (2009) mettent en avant qu'il faudra intégrer les mécanismes de plasticité architecturale appropriés pour chaque plante dans les modèles de simulation des associations afin de prendre en compte correctement le partage des ressources dans ces systèmes de cultures plurispécifiques. Par exemple, le recours aux modèles de simulation architecturale à trois dimensions déjà très développés dans la littérature (Fournier *et al.*, 2003 ; Lamanda *et al.*, 2007 ; Robert *et al.*, 2007 ; Evers *et al.*, 2008) peut être une alternative pour prendre en compte les modifications architecturales dans l'association de culture. Toutefois, il sera primordial en première étape de réaliser une étude comparée des modèles récemment développés pour simuler le fonctionnement des systèmes plurispécifiques (Malézieux *et al.*, 2009) afin de mettre en avant les points communs et de disparités pour la simulation de certains processus comme le partage de rayonnement, qui peuvent être utile pour améliorer certains modules.

Il serait également très intéressant de travailler sur la modélisation du fonctionnement du couvert associé en y intégrant les bioagresseurs de manière à optimiser les paramètres caractéristiques des cultures pour la gestion des parasites et des maladies. Stockle (1999) met en évidence le manque d'études portant sur la modélisation de l'association et des bioagresseurs. Cela ouvre la possibilité d'orienter les recherches vers ce sujet d'étude.

Les travaux expérimentaux menés pour cette thèse nous ont permis d'enrichir les connaissances scientifiques et techniques sur le fonctionnement des systèmes associées en

insérant une plante de couverture. Cette démarche nous a permis aussi de tester l'effet du travail du sol sur le fonctionnement de ce type d'association de culture. Toutefois, le dispositif expérimental n'était pas complet, à cause de la surface répartie inégalement entre les deux modalités de travail du sol, ce qui nous a conduit à limiter le nombre de traitements expérimentaux mis en place. Cela a constitué une limite pour la reproductibilité des traitements entre les deux années (cas du traitement L0) et le calcul du LER vu qu'on a pris le même traitement témoin (L0) indépendamment du type de travail du sol pour le calcul du LER partiel de la luzerne pour toutes les associations conduites en travail superficiel et en labour. Il aurait été aussi intéressant d'aller plus loin dans l'analyse et la quantification de la part de rayonnement absorbé par chaque espèce en association, ce qui aurait pu appuyer nos conclusions sur le partage de la ressource en lumière entre les deux espèces et permettre de vérifier l'impact du contrôle chimique sur la capacité de la luzerne à utiliser cette ressource.

Les premiers résultats de l'expérimentation de 2009 mettent en évidence la sensibilité du système aux changements intervenus entre les deux années d'expérimentation : climat, dates de semis des deux espèces, dates de contrôle de la luzerne. L'étude en détail des résultats obtenus en 2009 pendant la période culturale et d'interculture va constituer un atout pour compléter l'évaluation de ce système innovant tout en intégrant l'effet climatique.

On a relevé au cours de ces deux années expérimentales (2008 et 2009) un problème d'enherbement dans les associations de culture qui constitue un des critères de performance de ce système. Le suivi de l'évolution de ce peuplement (en termes de densité, de biomasse et de groupe fonctionnel par exemple (Alard *et al.*, 2009)) sur la totalité de la période d'insertion de la plante de couverture, que nous n'avons pas réalisé au cours de la thèse, devrait permettre d'étudier le rapport entre bénéfices pour les mauvaises herbes et l'azote en interculture *versus* perte de rendement.

Pour l'approche expérimentale nous avons restreint notre étude sur une échelle annuelle car les processus de compétition et facilitation que l'on voulait étudier pouvaient s'appréhender à cette échelle de temps. Il est toutefois probable que certains processus de facilitation s'expriment sur des pas de temps plus long. Par exemple, l'azote absorbé ou fixé par la plante de couverture en période d'interculture pourra être restitué à la culture suivante conduisant ainsi à réduire ses besoins en engrais azotés. De même, l'accroissement de production de biomasse grâce à la plante de couverture peut conduire à augmenter la teneur en matière

organique du sol à moyen terme, améliorant ainsi sa fertilité ; la présence de la plante de couverture peut également améliorer la porosité biologique des sols, conduisant ainsi à le protéger contre les phénomènes d'érosion. L'évaluation des conséquences de ces processus sur les performances agronomiques et environnementales nécessiterait donc des études expérimentales et de modélisation menées à plus long terme.

Un des points qu'il faudra améliorer pour l'étude de ce système est d'évaluer l'impact de l'insertion de la plante de couverture sur la réduction des bioagresseurs comme les maladies et les attaques parasitaires. Nos expérimentations ont été menées en conditions de protection maximale de la plante commerciale contre les maladies, ce qui ne nous a pas permis d'évaluer l'impact de la plante de couverture sur l'état sanitaire de l'agrosystème.

Le développement de ce système innovant dans les conditions tempérées présente donc un défi pour les chercheurs et des agriculteurs afin de pouvoir cerner toutes les pistes de recherche et techniques qui permettent de faciliter l'adoption de ces systèmes qui ont le potentiel de répondre à différentes attentes en matières de durabilité.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIE

- Abdin O. A., Zhou X. M., Cloutier D., Coulman D. C., Faris M. A., Smith D. L., 2000. Cover crops and interrow tillage for weed control in short season maize (*Zea mays*). *European Journal of Agronomy*, 12 (2), 93-102.
- Agreste., 2008. Dans le sillon du non-labour. *Agreste Primeur* n° 207, février 2008, 4 p.
- Alard C., Cocket E., Mench M., Michalet R., Touzard B., 2009. Rôle fonctionnel de la biodiversité, BIOGECO.
- Amarger N., Mariotti A., Mariotti F., Durr J. C., Bourguignon C., Lagacherie B., 1979. Estimate of symbiotically fixed nitrogen in field grown soybeans using variations in ¹⁵N natural abundance. *Plant and Soil*, 52 (2), 269-280.
- Angers D. A., Caron J., 1998. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 42, 55-72.
- Alsaadawi IS., Dayan FE., 2009. Potentials and prospects of sorghum allelopathy in agroecosystem. *Allelopathy Journal*, 24, 255-270.
- Anil L., Park, J., Phipps R.H., Miller F.A., 1998. Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK. *Grass Forage Sci*, 53, 301-317.
- Ateh C. M., Doll J. D., 1996. Spring-planted winter rye (*Secale cereale*) as a living mulch to control weeds in soybean (*Glycine max*). *Weed Technology*, 10 (2), 347-353.
- Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M., 2005. INRA, Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Institut National de la Recherche Agronomique (FRA). CEMAGREF, La Recherche pour l'Ingénierie de l'Agriculture et de l'Environnement, Paris (FRA) (FRA). 2005/12.
- Baccard R., 2007. Les associations blé-pois: Quelles variétés associées en mélange? Mémoire de Master recherché en agronomie. *AgroParisTech*. 38p
- Banik P., Midya A., Sarkar B.K., Ghose S.S., 2006. Wheat and chickpea intercropping systems in an additive series experiment: advantages and weed smothering. *Eur. J. Agron*, 24, 325-332.
- Baumann D.T., Bastiaans L., Goudriaan J., van Laar H.H., Kropff M.J., 2002a. Analysing crop yield and plant quality in an intercropping system using an eco-physiological model for interplant competition. *Agric. Syst*, 73, 173-203.

- Baumann D.T., Bastiaans L., Kropff M.J., 2002b. Intercropping system optimization for yield, quality, and weed suppression combining mechanistic and descriptive models. *Agron. J.*, 94, 734-742.
- Beaudoin N., Launay M., Sauboua E., Ponsardin G., Mary B., 2008. Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the "on farm" database of Bruyeres catchment. *Eur. J. Agron.*, 29, 46-57.
- Bedoussac L., 2006. Analyse de la dynamique de compétition pour la lumière dans les associations blé dur-pois d'hiver en fonction de la disponibilité en azote. Mémoire de Master de recherche en Agronomie. Agroparitech. 34p
- Bergkvist G., 2003. Effect of white clover and nitrogen availability on the grain yield of winter wheat in a three-season intercropping system. *Acta Agricultura Scandinavica. Section B, Soil and Plant Science*, 53 (3), 97-109.
- Berntsen J., Hauggard-Nielsen H., Olesen J.E., Petersen B.M., Jensen E.S., Thomsen A., 2004. Modelling dry matter production and resource use in intercrops of pea and barley. *Field Crops Res.*, 88, 69-83.
- Bilalis D., Konstantas A., Efthimiadou A., Papatheohari Y., Kakampouki I., Effect of two oat-legumes intercrop systems on weed flora under Mediterranean conditions. *Cultivating the future based on science. Volume 1: Organic Crop Production. Proceedings of the Second Scientific Conference of the International Society of Organic Agriculture Research (ISO FAR), held at the 16th IFOAM Organic World Conference in Cooperation with the International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM) and the Consorzio ModenaBio in Modena, Italy, 18-20 June, 2008,302-305 .*
- Blackshaw R.E., Moyer J.R., Huang H.C., 2005. Beneficial effects of cover crops on soil health and crop management. In: Pandalai, S.G. (Ed.), *Recent Research Developments in Soil Science* (1), 15-35.
- Brandsaeter L.O., Netland J., Meadow R., 1998. Yields, weeds, pests and soil nitrogen in a white cabbage living mulch system. *Biological Agric. Hortic.*, 16, 291-309.
- Brainard D. C., Bellinder R. R., Miller A. J., 2004. Cultivation and interseeding for weed control in transplanted cabbage. *Weed Technology*, 18 (3), 704-710.
- Brisson N., Bussiere F., Ozier-Lafontaine H., Tournebize R., Sinoquet H., 2004. Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parameterisation. *Agronomie* 24, 409-421.
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2009. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. *Quae, Paris*, 304 p.

- Buhler D. D., Kohler K. A., Thompson R. L., 2001. Weed seed bank dynamics during a five-year crop rotation. *Weed Technology*, 15 (1), 170-176.
- Bruno J.F., Stachowicz J.J., Bertness M.D. 2003. Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends in Ecology and Evolution* 18-3, 119-125
- Bulson H.A., Snaydon R.W., Stopes C.E., 1997. Effects of plant density on intercropped wheat and field beans in an organic farming system. *J. Agric. Sci*, 128, 59-71.
- Carof M., 2006. Fonctionnement des peuplements en semis direct associant du blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L) à différentes plantes de couverture en climat tempéré. Ph.D. Thesis, university of AgroparisTech, France
- Carof M., de Tourdonnet S., Saulas P., Le Floch D., Roger-Estrade J., 2007a. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system: yield analysis. *Agron. Sustain. Dev.* 27, 347-356.
- Carof M., de Tourdonnet S., Saulas P., Le Floch D., Roger-Estrade J., 2007b. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system: competition for light and nitrogen. *Agron. Sustain. Dev.* 27, 357-365.
- Carof M., de Tourdonnet S., Coquet Y., Hallaire V., Roger-Estrade J., 2007c. Hydraulic conductivity and porosity under conventional and no-tillage and the effect of three species of cover crop in northern France. *Soil Use and Management*. 23, 230-237.
- Casal J.J., 1988. Light quality effects on the appearance of tillers of different order in wheat (*Triticum aestivum*). *Ann. Appl. Biol.*, 112, 167-173.
- Capillon A., Séguy L., 2002. Ecosystèmes cultivés et stockage du carbone. Cas des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale. *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture Française*, 88, 63-70.
- Chapelle-Barry C., 2008. Dans le sillon du non-labour. *Agreste-primeur* 207.
- Christoffoleti P. J., Carvalho S. J. P. de, Lopez-Ovejero R. F., Nicolai M., Hidalgo E., Silva J. E. da, 2007. Conservation of natural resources in Brazilian agriculture: implications on weed biology and management. *Crop Protection*, 26 (3), 383-389.
- Corre-Hellou G., Crozat Y., 2004. Interspecific competition for soil N in pea-barley mixtures during the vegetative phase and consequences on N₂ fixation. In 5th Conference on Grain Legumes, Dijon, France. 65- 66.
- Corre-Hellou G., 2005. Acquisition de l'azote dans des associations Pois-orge en relation avec le fonctionnement du peuplement. Ph.D. Thesis, university of Angers, France.
- Corre-Hellou G., Brisson N., Launay M., Fustec J., Crozat Y., 2007. Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea-barley intercrops given different soil nitrogen supplies. *Field Crops Res.*, 103, 76-85.

- Corre-Hellou G., Faure M., Launay M., Brisson N., Crozat Y., 2009. Adaptation of the STICS intercrop model to simulate crop growth and N accumulation in pea-barley intercrops. *Field Crops Res.*, 113, 72-81.
- Csatho P., I. Sisak et al., 2007. Agriculture as a source of phosphorus causing eutrophication in Central and Eastern Europe. *Soil Use and Management*, 23, 36-56.
- De Tourdonnet S., Nozières A., Barz P., Chenu C., Düring R. A., Frielinghaus M., Kölli R., Kubat J., Magid J., Medvedev V., Michels A., Müller L., Netland J., Nielsen N. E., Nieves Mortensen C., Picard D., Quillet J. C., Saulas P., Tessier D., Thinggaard K., and Vandeputte E., 2006. "Comprehensive inventory and assessment of existing knowledge on sustainable agriculture in the European platform of KASSA." Rapport 1.1 Projet européen KASSA. [En ligne] <http://kassa.cirad.fr>
- De Tourdonnet S, Shili I., Scopel E., 2008. Utilisation des mulchs vivants pour la maîtrise des flores adventices. *Carrefour de l'innovation agronomique. Dijon.*
- den Hollander N.G., Bastiaans L., Kropff M.J., 2007. Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design: I. Characteristics of several clover species. *Eur. J. Agron.*, 26, 92-103.
- Dexter A. R., 1991. Amelioration of soil by natural processes. *Soil & Tillage Research*, 20, 87-100.
- Doring T. F., Brandt M., Hess J., Finckh M. R., Saucke H, 2005. Effects of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil, erosion in organically grown potatoes. *Field Crops Research*, 94, 2/3, 238-249.
- Dorsainvil F., 2002. Evaluation, par modélisation, de l'impact environnemental des modes de conduite des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et d'azote dans les systèmes de culture. Ph.D. Thesis, university of AgroparisTech, France.
- Evers J.B., Vos J., Andrieu B., Struik P.C., 2006. Cessation of tillering in spring wheat in relation to light interception and red : far-red ratio. *Annals of Botany*, 97 (4) : 649-658.
- Evers J.B., Vos J., Andrieu B., Chelle M., Buck-Sorlin G.H., 2008. Functional-Structural plant modelling, applied to tillering in Wheat. In ESA. Proceedings of the tenth ESA Congress, 15-19 sept, Bologne (Italy), 739.
- FAO, 2006. World Reference Base for Soil Resources. A Framework for International Classification, Correlation and Communication. Rome, Italy: FAO.[en ligne]: <http://www.fao.org/ag/agl/agll/wrb/doc/wrb2006final.pdf>.
- FAO, 2008. Agriculture de conservation. [En ligne]: <http://www.fao.org/ag/ca/fr/index.html>.
- Ferandez-Aparicio M. C., Sillero J., Rubiales D., 2006. Intercropping with cereals reduces infection by *Orobanche crenata* in legumes. *Crop protection*, 26, 1166-1172

- Fisk J.W., Hesterman O.B., Shrestha A., Kells J.J., Harwood R.R., Squire J.M., Sheaffer C.C., 2001. Weed suppression by annual legume cover crops in no-tillage corn. *Agronomy Journal*, 93, 319- 325.
- Fournier C., et al., 2003. ADEL-Wheat : a 3D architectural model of wheat development. In : Hu, B G., Jeager, M. (Eds), *International symposium on plant growth Modelling, Simulation, Visualisation, and their Application*. Tsinghua university press, Beijing, China, 54-63.
- Fortin MC., Rochette P., Pattey E., 1996. Soil Carbon Dioxid fluxes from Conventional and no-tillage small-grain cropping system. *Soil Science Society of America Journal*, 60, 1541-1547.
- Fujita K., Ofosu-Budu K., Ogata S., Biological nitrogen fixation in mixed legume-cereal cropping systems. *Plant and Soil*, 141.
- Fukai S., Trenbath B. R., 1993. Processes determining intercrop productivity and yields of component crops. *Field Crops Research*, 34, 247-271.
- Gabrielle B., Mary B., Roche R., Smith P., Gosse G., 2001. Simulation of carbon and nitrogen dynamics in arable soils: a comparison of approaches. *2nd International Symposium on Modeling Cropping Systems*. Elsevier Science, Florence, Italy, 107-120
- Gall J., 2009. En quoi l'association entre un blé et une plante de couverture permanente permet-elle d'assurer des fonctions écologiques intéressantes? Mémoire de Master de recherche en Agronomie. AgroParis Tech. 22p
- Gallien E., Le Bissonnais Y., Eimberck M., Benkhadra H., Ligneau L., Ouvry J.F., Martin P., 1995. Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé. *Cahiers d'Etudes et de Recherches Francophones Agricultures*, 4, 171-183.
- Glibert PM., Harrison J., Heil C., Seitzinger S., 2006. Escalating Worldwide use of Urea – A Global Change Contributing to Coastal Eutrophication. *Biogeochemistry* 77 (3), 441-463.
- Hartwig N.L., Ammon H.U., 2002. Cover crops and living mulches. *Weed Sci.*, 50, 688-699.
- Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S., 2001a. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crops Res.*, 70, 101-109.
- Hauggaard-Nielsen H., Jensen E.S., 2001b. Evaluating pea and barley cultivars for complementarity in intercropping at different levels of soil N availability. *Field Crops Res.*, 72, 185-196.
- Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E. S., 2003. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 65 (3), 289-300.
- Hauggaard-Nielsen H., Mundus S., Jensen E. S., 2009. Nitrogen dynamics following grain legumes and subsequent catch crops and the effects on succeeding cereal crops. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 84 (3), 281-291.

- Haymes R., Lee H.C., 1999. Competition between autumn and spring planted grain intercrops of wheat (*Triticum aestivum*) and field bean (*Vicia faba*). *Field Crops Res.*, 62, 167-176.
- Hiltbrunner J., Jeanneret N., Liedgens M., Stamp P., Streit B., 2007a. Response of weed communities to legumes living mulches in winter wheat, *J. Agronomy and Crop Science*, 193, 93-102.
- Hiltbrunner J., Streut B, Liedgens M., 2007b. Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? *Field Crops Res.*, 102, 163-171.
- Hiltbrunner J., Liedgens M., Bloch L., Stamp P., Streit B., 2007c. Legume cover crops as living mulches for winter wheat: components of biomass and the control of weeds. *Eur. J. Agron.* 26, 21-29.
- Hiltbrunner J., Liedgens M., 2008. Performance of winter wheat varieties in white clover living mulch. *Biological Agriculture & Horticulture*, 26, 85-101
- Holland J.M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agric. Ecosyst. Environ.* 103, 1-25.
- IFEN, 2007. Les pesticides dans les eaux. Données 2005. Les dossiers IFEN 9.
- Isik D., Kaya E., Ngouajio M., Mennan H., 2009. Weed suppression in organic pepper (*Capsicum annuum* L.) with winter cover crops. *Crop Prot.* 28, 356-363.
- Jensen E. S., 1996. Grain yield, symbiotic N₂ fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil*, 182, 25-38.
- Jensen E. S., 2006. Intercropping of cereals and grain legumes for increased production, weed control, improved production quality and prevention of N-losses in European organic farming systems. INTERCROP Report. [En ligne] www.intercrop.dk
- Jensen E. S., Hauggaard-Nielsen H., 2003. How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment? *Plant and Soil*, 252, 177-186.
- Jeuffroy M.H., Bouchard C., 1999. Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. *Crop Science*, 39, 1385-1393.
- Justes E., Jeuffroy M., Mary B., 1997. Wheat, Barley and Durum wheat. In *Diagnosis of the nitrogen Status in crops*, 73-91.
- Justes E., Prieur L., Bedoussac L., Hemptinne J-L, 2009. Est-il possible d'améliorer le rendement et la teneur en protéines du blé cultivé en Agriculture biologique au moyen de cultures intermédiaires ou de cultures associées ? In *Colloque Innovations agronomiques* (4), Montpellier, 165-176.
- Kamphare L.J., Hannah S.A., Coehn J.M., 1967. Automated analysis for nitrate by hydrazine reduction. *Water Research*, 11, 205-216.

- KASSA, 2006. *Knowledge Assessment and Sharing on Sustainable Agriculture*. [En ligne]. Disponible sur kassa.cirad.fr.
- Känkänen H., Eriksson C., 2007. Effects of undersown crops on soil mineral N and grain yield of spring barley. *Eur. J. Agron.* 27, 25-34.
- Kremer R.J., Ben-Hammouda M., 2009. Allelopathic Plants. 19. Barley (*Hordeum vulgare* L). *Allelopathy Journal*, 24, 225-241.
- Krom M.D., 1980. Spectrophotometric determination of ammonia: a study of a modified Berthelot reaction using salicylate and dichlorocyanurate. *Tha analyst*, 105, 305-316.
- Kruidhof H. M., 2008. Cover crop-based ecological weed management: exploration and optimization. CABI (Ed), 153 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 & Tillage Research*. 56, 153-166.
- Kwaad F. J. P. M., Zijk M. van der, Dijk P. M., 1998. Soil conservation and maize cropping systems on sloping loess soils in the Netherlands. *Soil & Tillage Research*, 46 (1-2), 13-21.
- Labreuche J., de Tourdonnet S., Germon J. C., Ouvry J. F., Le Souder C., Castillon P., Real B., Felix, I., Duval R., Galiene J., and Quere L., 2007. "Synthèse des impacts environnementaux des techniques culturales sans labour par milieu. Rapport projet ADEME 'Impacts environnementaux des TCSL'.
- Lahmar R., de Tourdonnet S., Barz P., Düring R.A., Frielinghaus M., Kolli R., Kubat J., Medvedev V., Netland J., Picard D., 2006. Prospect for conservation agriculture in northern and eastern European countries. Lessons of KASSA. In: ESA (Ed.), *Proceedings of the ninth ESA Congress*, Warsaw (Poland), pp. 77-88.
- Lal R., Regnier E., Eckert D. J., Edwards W. W. & Hammond R., 1991. Expectations of cover crops for sustainable agriculture. In Hargrove, W. L. (ed.), *Cover crops for clean water*, Soil and Water Conservation Society, Ankeny (USA), 1-11.
- Lamanda N., Dautzat J., Jourdan C., Martin P., Malézieux E., 2007. Using 3D architectural models to assess light availability and root bulkiness in coconut agroforestry systems, *Agroforest. Syst.*, DOI 10.1007/s10457-007-9068-3.
- Launay M., Brisson, N., Satger S., Hauggaard-Nielsen H., Corre-Hellou G., Kasynova E., Ruske R., Jensen E.S., Gooding M., 2009. Exploring options for managing strategies for pea-barley intercropping using a modeling approach. *Eur. J. Agron.* 31, 85-98.
- Lawson Y. D. I., Dzomeku I. K., Drisah Y. J., 2007. Time of planting *Mucuna* and *Canavalia* in an intercrop system with maize. *Journal of Agronomy*, 6, 534-540.

- Le Bail M., Meynard J M., 2003. Yield and protein concentration of spring malting barley: the effects of cropping systems in the Paris Basin (France). *Agronomie*, 23, 13-27.
- Lemerle D., Cousens R.D., Gill G.S., Peltzer S.J., Moerkerk M., Murphy C.E., Collins D., Cullis B.R., 2004. Reliability of higher seeding rates of wheat for increased competitiveness with weeds in low rainfall environments. *J. Agric. Sci.* 142, 395-409.
- Lemaire G., Gastal F., 1997. N uptake and distribution in plant canopies. In : Lemaire, G. (Ed), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Berlin (DEU), Springer-Verlag, 3-43.
- Le Roux X., Barbault R., Baudry J., Burel F., Doussan I., Garnier E., Herzog F., Lavorel S., Lifran R., Roger-Estrade J., Sarthou J.P., Trommetter M., 2008. *Agriculture et biodiversité : rapport d'expertise*. INRA, Institut National de la Recherche Agronomique (FRA). MAP, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (FRA) ; Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables (FRA), 637.
- Liebman M., Dick E., 1993. Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecologic. Applic* 3, 92-112.
- Maingi J. M., Shisanya C. A., Gitonga N. M., Hornetz B., 2001. Nitrogen fixation by common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in pure and mixed stands in semi-arid south-east Kenya. *European Journal of Agronomy*, 14 (1), 1-12.
- Makowski D., Naud C., Jeuffroy M.H., Barbottin A., Monod H., 2006. Global sensitivity analysis for calculating the contribution of genetic parameters to the variance of crop model prediction. *Reliability Engineering and System Safety*, 91 (10-11), 1142-1147.
- Malézieux Y., Croyat Y. , Dupraz C., Laurans M., makoski D., Ozier-Lafntains H., Rapidel B., de Tourdonnet S., Valantin –Morison, 2009. *Agron. Suistain. Dev.* 43-62.
- Maltas A., Corbeels M., Scopel É., Oliver R., Douzet J.M., Macena da Silva F.A., Wéry J., 2007. Long-term effects of continuous direct seeding mulch-based cropping systems on soil nitrogen supply in the Cerrado region of Brazil. *Plant and Soil*, 298 (1-2), 161-173.
- Martin R. C., Greyson P. R., & Gordon R., 1999. Competition between corn and a living mulch. *Canadian Journal of Plant Science*, 79, 579-586.
- Meynard J.M., Baudry J., 2008. Landscape heterogeneity and biodiversity : which tools for tomorrow's farming systems ?. [Communication orale]. Conférence internationale "Biodiversité et Agriculture", 2008/11/04-05, Montpellier (FRA), 42.
- Mignolet C., 2003: 30 ans d'évolution des pratiques agricoles sur le bassin de la Seine. *In Séminaire AESN-SAGEP*. 24-25 juin. Fontainebleau, 1-7.
- Millenium Ecosystem Assessment, 2005. *Millenium Ecosystem Assessment synthesis report*. [En ligne] <http://www.milleniumpassessment.org/en/Products.Synthesis.aspx>, 219p.

- Ministère de l'écologie du développement et de l'aménagement durables, 2007. Le Grenelle de l'environnement. Document récapitulatif des tables rondes tenues à l'hôtel de Roquelaure les 24,25 et 26 octobre 2007. [en ligne] <http://www.legrenelle-environnement.fr/grenelle-environnement/>.
- Morris R.A., Garrity D.P., 1993. Resource capture and utilization in intercropping: water. *Field Crops Res.* 34, 303-317.
- Muller T., Thorup-Kristensen K., 2001. N-fixation of selected green manure plants - a contribution to the N-turnover in soils under organic crop rotations. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 95, 79.
- Picard D., Ghiloufi M., Saulas P., de Tourdonnet S. Does undersowing winter wheat with a cover crop increase competition for resources and is it compatible with high yield? *Field Crops Res.*, in press, DOI 10.1016/j.fcr.2009.09.017
- Poggio S., 2005. Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 109: 48-58.
- Rabaud, V., 2004. Peu de pratiques alternatives en grandes cultures. *Agreste-primeurs* 149.
- Rémy J.C., Hébert J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *C. R. Acad. Agric. Fr.* 63, 700-710.
- Rinnofner T., Friedel J.K., Kruijff R.d., Pietsch G., Freyer B., 2008. Effect of catch crops on N dynamics and following crops in organic farming. *Agron. Sustain. Dev.* 28, 551-558.
- Robert C., *et al.*, 2007. Coupling 3D virtual plant and foliar epidemic models : a new modelling approach to investigate plant-pathogen interactions linked to architecture. In: Prusinkiewicz P., *et al.*, (Eds), 5th International Workshop on functional-Structural Plant Models. HortResearch, Napier, New Zealand, 27.
- Ross S.M., Kling J.R., César Izaurralde R., O'Donovan J.T., 2001. Weed suppression by seven clover species. *Agronomy Journal*. 93:820-827.
- Samarajeewa K. B. D. P., Horiuchi T. & Oba S., 2005. Weed population dynamics in wheat as affected by *Astragalus sinicus* L. (Chinese milk vetch) under reduced tillage. *Crop Protection* (24), 864-869.
- Samarajeewa K. B. D. P., Horiuchi T., Oba S., 2006. Finger millet (*Eleusine corocana* L. Gaertn.) as a cover crop on weed control, growth and yield of soybean under different tillage systems. *Soil & Tillage Research*, 90 (1-2), 93-99.
- Séguy L., Bouzinac S., 1998. Le semis direct du riz pluvial de haute technologie dans la zone tropicale humide du centre Nord du Mato Grosso au Brésil : les techniques actuelles, intégration dans

- les systèmes mécanisés de semis direct à base de soja et « *safrinhas* » et dans la réforme des pâturages dégradés. Document de travail CIRAD-CA, Brésil. 39p
- Scopel E., Findeling, A., Chavez Guerra E., Corbeels M., 2005. Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield. *Agron. Sustain. Dev.*25, 425-432.
- Six J., Feller C., Deneff K., Ogle S. M., de Moraes Sa J. C., & Albrecht A., 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755-775.
- Soussana J. F., Arregui M. C., 1995. Effect of mixed cropping on the nitrogen nutrition and growth of perennial ryegrass and white clover. *Agronomie*, 15 (2), 81-96.
- Sooroshian S., Gupta V.K., 1993. Model calibration. In: Singh VP. (ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publication, 1130.
- Stevenson FC., van Kessel C., 1996. A landscape-scale assessment of the nitrogen and non-nitrogen rotation benefit of pea. *Soil Sci Soc Am J*, 60, 1797–1805.
- Stockle C.O., 1999. Simulation of agricultural systems: the challenges ahead, in: *Proceedings of the International Symposium Modelling Cropping Systems*, pp. 19–24, Lleida, Catalonia, Spain.
- Szumigalski A. R., Acker R. C. van, 2008. Land equivalent ratios, light interception, and water use in annual intercrops in the presence or absence of in-crop herbicides. *Agronomy Journal*, 100 (4), 1145-1154.
- Teasdale JR, 1996. Contribution of cover crops to weed management in sustainable agricultural systems, *J. Prod. Agri.* (9), 475-479.
- Teasdale J. R., Shirley D. W., 1998. Influence of herbicide application timing on corn production in a hairy vetch cover crop. *Journal of Production Agriculture*, 11 (1), 121-125.
- Teasdale J. R. 2003. Principles and practices of using cover crops in weed management systems. In Labrada, R. (ed.), *Weed management for developing countries (Addendum 1)* (1) FAO, Roma (Italy), 169-178.
- Teasdale J.R., Coffman C.B., Mangum R.W., 2007. Potential long-term benefits of no-tillage and organic cropping systems for grain production and soil improvement. *Agron. J.*99, 1297-1305.
- Tebrügge F. & Düring R. A. 1999. Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. *Soil & Tillage Research*, 53, 15-28
- Thorsted M.D., Olesen J., Weiner J., 2006a. Mechanical control of clover improves nitrogen supply and growth of wheat in winter wheat/white clover intercropping. *Eur. J. Agron.*24, 149-155.

- Thorsted M.D., Olesen J.E., Weiner J., 2006b. Width of clover strips and wheat rows influence grain yield in winter wheat/white clover intercropping. *Field Crops Res.* 95, 280-290.
- Thorsted M.D., Weiner J., Olesen J.E., 2006c. Above- and below-ground competition between intercropped winter wheat *Triticum aestivum* and white clover *Trifolium repens*. *J. Appl. Ecol.* 43, 237-245.
- Tilman D., Cassman K. G., Matson P. A., Naylor R., Polasky S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature (London)*, 418 (6898), 671-677.
- Triomphe B., 1996. Un système de culture original et performant dans une zone de montagne du tropique humide : la rotation maïs-*Mucuna* au Nord-Honduras. In fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides, Actes de séminaire, Montpellier, France, 13-17 novembre 1995. CIRAD, collection colloque, Montpellier, 318-328.
- Triomphe B., 1999. Système de culture avec plante de couverture au Mexique et en Amérique Centrale : expériences, leçons et perspectives futures. In Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture, acte de l'atelier international, Antsirabe, Madagascar, 23-28 mars 1998. CIRAD, collection colloque, Montpellier, 75-91.
- Triomphe B, Goulet F., Dreyfus F, De Tourdonnet S., 2007. Du labour au non labour : pratiques, innovations et enjeux au Sud et au Nord, Centre d'histoire du travail ; Issu du livre Nous labourons.
- Tsubo M., Walker S., Mukhala E., 2001. Comparisons of radiation use efficiency of mono-/intercropping systems with different row orientations. *Field Crops Res.* 71, 17-29.
- Tsubo M., Walker S., 2004. Shade effects on *Phaseolus vulgaris* L. intercropped with *Zea mays* L. under well-watered conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 190 (3), 168-176.
- Tsubo M., Walker S., Ogindo H.O., 2005a . A simulation model of cereal-legume intercropping systems for semi-arid regions I. Model development. *Field Crops Res.* 93, 10-22.
- Tsubo M., Walker S., Ogindo H.O., 2005b. A simulation model of cereal-legume intercropping systems for semi-arid regions: II. Model application. *Field Crops Res.* 93, 23-33.
- Tubiana L., Jacquet P., 2007. Regards sur la Terre 2008, Science Po. Les presses, isbn : 987-2-7246-1043-7.
- Valantin-Morison M., Guichard L., Jeuffroy M-H, 2008. Comment maîtriser la flore adventice des grandes cultures à travers les éléments de l'itinéraire technique ? *Carrefour de l'innovation agronomique. Dijon.*
- Vandeleur R.K., Gill G.S., 2004. The impact of plant breeding on the grain yield and competitive ability of wheat in Australia. *Aust. J. Agr. Res.* 55, 855-861.
- Vandermeer J.H., 1989. The ecology of intercropping. Cambridge University Press, Cambridge (UK).

-
- Vos J., Van der Putten, P.E.L., 1997. Field observations on nitrogen catch crops. I. Potential and actual growth and nitrogen accumulation in relation to sowing date and crop species. *Plant Soil* 195, 299-309.
- Wallach D., Goffinet B., 1987. Mean Squared Error of Prediction in models for studying ecological and agronomic systems. *Biometrics* 43, 561-573.
- Wallach D., Makowski D., Jones J.W., 2006. Working with dynamic crop models: Evaluation, analysis, parametrization and applications. ELSEVIER, Netherlands.
- Walters S. A., Young B. G., Krausz R. F., 2008. Influence of tillage, cover crop, and preemergence herbicides on weed control and pumpkin yield. *International Journal of Vegetable Science*, 14, 148-161.
- Wander M. M., Yang XueMing, 2000. Influence of tillage on the dynamics of loose- and occluded-particulate and humified organic matter fractions. *Soil Biology & Biochemistry*, 32 (8-9), 1151-1160.
- White J.G., Scott T.W., 1991. Effects of perennial forage-legume living mulces on no-till winter wheat and rye. *Field Crops Research*. (28), 135-141.
- Whitmore A.P., Schroder J.J., 2007. Intercropping reduces nitrate leaching from under field crops without loss of yield: a modelling study. *Eur. J. Agron.* 27, 81-88.
- Willey R., 1979. Intercropping-Its importance and research needs. Part 1. Competition and yield advantages. *Field crop abstracts* 32, 1-10.
- Willey R.W., 1990. Resource use in intercropping systems. *Agric. Water Manage.* 17, 215-231.
- Zibilske L.M., Makus D.J., 2009. Black oat cover crop management effects on soil temperature and biological properties on a Mollisol in Texas, USA. *Geoderma* 149, 379-385.

ANNEXES

ANNEXES

<i>Annexe 1.</i> Récapitulatif des techniques culturales réalisées sur les deux années expérimentales (2008 et 2009)	1
<i>Annexe 2.</i> Photographies du prélèvement et de dépouillement des racines plantes.....	3
<i>Annexe 3.</i> Analyses statistiques des différentes variables plantes mesurées sur les essais des deux années expérimentales (2008 et 2009)	4
<i>Annexe 4.</i> Photographie des deux espèces en association à différentes dates d'observation.	19

Annexe 1 : Récapitulatif des techniques culturales réalisées sur les deux années expérimentales (2008 et 2009)

Année 2007-2008

Interventions	Date	Matériels	Produit	Doses (/ha)	Commentaires
Travail du sol					
Labour	27/07/2007	Charrue			Pailles de blé exportées pour les parcelles labourées et en travail superficiel
Travail superficiel	27/07/2007	Herse rotative amazone			
Molluscicide	30/07/2007		mesuroil pro	3 Kg	Sur semis de luzerne
Travail du sol animé	30/07/2007	Herse rotative amazone			Préparation lit de semence
Semis luzerne	30/07/2007	Fiona			Variété "Luzelle" avec une densité de 25 kg/ha
Roulage	30/07/2007	hercule			
Herbicide	30/08/2007		Stratos ultra	1.2 l	plus dash 1.2 repousses de blé, ray grass
Fertilisation N/P/K	16/10/2007			200 Kg	Toute la parcelle
Herbicide	26/10/2007		Roundup max 480	3 l	sur sol nu, pour culture de blé (voir plan)
Fauchage	26/10/2007	Tondeuse			Sur luzerne (residus restant en place)
Semis blé	05/11/2007	semeato			Variété Isengrain (250 grains.m ⁻²)
Herbicide	22/01/2008	Pulvé à dos	Baghera	2 l	plus 1 litre d'actirob, traitement réalisé sur ray grass (4 trains bloc 1 coté A 8)
Fertilisation	05/03/2008	src	ammonitrate 33.5%	60 unités	
	09/04/2008	src	ammonitrate 33.5%	110 unités	Sauf luzerne pure et témoin N zero
	19/05/2008	src	ammonitrate 33.5%	40 unités	
Herbicide	16/04/2008	Pulvé à dos	Aminugec 600	0.35 l	Contrôle du développement de la luzerne en associations (BL1)
Fongicide	23/04/2008		input pack	0.80 l	Réalisé sur les blés purs et associés
Récolte Machine	25/07/2008	Moissonneuse-batteuse			
Pressage	28/07/2008				pailles blé et luzerne

Année 2008-2009

Interventions	Date	Matériels	Produit	Doses (/ha)	Commentaires
Travail du sol					
Labour	27/08/2008	Charrue			Pailles de blé exportées pour les parcelles labourées et en travail superficiel
Travail superficiel	27/08/2008	Herse rotative amazone			
Semis luzerne	27/08/2008	Fiona			Variété "Luzelle" avec une densité de 25 kg/ha
Molluscicide	28/08/2008		mesuroil pro	4 Kg	Sur semis de luzerne
Roulage	28/08/2008	Crosskillettes			
Fertilisation N/P/K	18/09/2008			200 Kg	Toute la parcelle
Herbicide	10/10/2008		Baghera	1.25 l	plus actirob b 1 l/ha sur tout l'essai
Semis blé	15/10/2008	semeato			Variété Isengrain (250 grains.m ⁻²)
Herbicide	13/03/2009	Pulvé à dos	celio	2 l	plus 1 litre d'actirob, traitement réalisé sur ray grass (toute la parcelle)
Fertilisation	03/03/2009	src	ammonitrate 33.5%	70 unités	Sauf luzerne pure et témoin N zero
	10/04/2009	src	ammonitrate 33.5%	95 unités	
	23/04/2009	src	ammonitrate 33.5%	40 unités	
Herbicide	02/04/2009	Pulvé à dos	Aminugec 600	0.35 l	Contrôle du développement de la luzerne en associations (BL1)
Herbicide	23/04/2009	Pulvé à dos	Aminugec 600	0.35 l	Contrôle du développement de la luzerne en associations (BL2)
Fongicide	05/05/2009		input pack	0.60 l	Réalisé sur les blés purs et associés

Annexe 2 : Photographies du prélèvement et de dépouillement des racines plantes

Etape de prélèvement :

Photo1 : association (0-20 cm)



Photo 2 : blé pur (0-20 cm)



Photo3 : horizon (20-40 cm)



1) Etape de lavage et dépouillement :

Photo 4 : Trempage (24h)
des racines



Photo 5 : Passage à l'eau



Photo 6 : Récupération



Photo 7 : Récupération de la terre



Photo 8 : Lavage au « Root Washer »



Annexe 3 : Analyses statistiques des différentes variables plantes mesurées sur les essais des deux années expérimentales (2008 et 2009)

A- Année expérimentale 2008-2009 :

1) Composantes de rendement du blé :

composantes	Pieds.m ⁻²				Talles.m ⁻²		Epis.m ⁻²			Grains.m ⁻²	P1G	Rendement	nbre grain/epis
	11/12/2007	22/01/2008	19/02/2008	04/04/2008	19/02/2008	28/05/2008	23/06/2008	15/07/2008	15/07/2008	15/07/2008	15/07/2008	15/07/2008	
Dates	levée	3 feuilles	Debut tallage	Epi 1cm	Debut tallage	Floraison	DRP	Recolte	Recolte	Recolte	Recolte	Recolte	
Stades													
ANOVA	Bloc	0,33	0,36	0,99	0,30	0,071	0,094	0,406	0,1515	0,168	0,971	0,12632	0,02 *
	Wsol	0,89	0,43	0,69	0,78	0,000 ***	0,481	0,704	4,1E-01	0,07	0,02 *	0,02 *	1,86E-03 ***
	Luzerne	0,0487 *	0,34	0,01 *	0,05	0,000 ***	0,000 ***	0,000 ***	1,31E-13 ***	0,000 ***	0,000 ***	1,12E-10 ***	2,90E-06 ***
	Wsol x Luzerne	0,75	0,95	0,26	0,63	0,729	0,456	0,751	0,232	0,769	0,142	0,863	0,007 **
Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
	La_B/Ts_B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Luzerne	Ts_B/Ts_BL0	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+
	Ts_BL1/Ts_BL0	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Luzerne + Contrôle	La_BL1/La_B	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-
	Ts_BL1/Ts_B	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+

2) Biomasse aérienne

		Matière sèche blé (t.ha ⁻¹)						
		Dates	19/02/2008	04/04/2008	13/05/2008	28/05/2008	23/06/2008	15/07/2008
		Stades	Debut tallage	Epi 1cm	debut epiaison	Floraison	DRP	Recolte
ANOVA	Bloc		0,6378	0,2590	0,4123	0,0714	0,6975	0,5424
	Wsol		0,2636	4.949e-05***	0.0010**	2.360e-07***	6.855e-06***	2.608e-08***
	Luzerne		1.432e-07***	2.568e-10***	7.543e-09***	2.515e-12***	1.423e-10***	2.436e-13***
	Wsol x Luzerne		0.01952*	0,7020	0,8729	0,7526	0,9655	0,6788
Test de Turkey à α=0.05	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	-	-	-	-
		La_B/ Ts_B	-	-	-	-	-	-
	Luzerne	Ts_B/ Ts_BL0	+	+	+	+	+	+
		Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	+	+	+
	Luzerne+ contrôle	La_BL1/ La_B	+	+	+	+	+	+
		Ts_BL1/ Ts_B	+	+	+	+	+	+

		Matière sèche Luzerne (t.ha ⁻¹)											
		Dates	15/10/2007	26/10/2007	19/02/2008	04/04/2008	13/05/2008	28/05/2008	23/06/2008	15/07/2008	29/07/2008	02/09/2008	14/10/2008
		Stades	Av S blé	Coupe Luz	Debut tallage	Epi 1cm	debut epiaison	Floraison	DRP	Recolte	Post recolte	Post recolte	Post recolte
ANOVA	Bloc		0,428	0,297	0,294	0.015*	0,319	2,386	0,777	0.017*	0,441	0,133	0,260
	Wsol		0.002**	0,328	0,082	0,670	0.00024***	2.43e-05***	0.00017***	4.30e-06***	0.0007***	0,262	0,320
	Luzerne		0,074	0.045*	0,191	0.0025**	4.36e-05***	1.25e-07***	1.99e-05***	4.11e-07***	0.031*	0,342	0,936
	Wsol x Luzerne		0,368	0,306	0.026*	0.017*	0,488	0,438	0,511	0,891	0.035*	0.004**	0,247
Test de Turkey à α = 0.05	Luzerne	Ts_L0/ Ts_BL0	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-
	Luzerne+ contrôle	Ts_BL1/ Ts_L0	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-
		Ts_BL1/ La_BL1	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-

Matière sèche adventices (t.ha⁻¹)

Dates		15/10/2007	19/02/2008	04/04/2008	13/05/2008	28/05/2008	23/06/2008	15/07/2008	29/07/2008	02/09/2008	14/10/2008
Stades		Av S blé	Debut tallage	Epi 1cm	debut epiaison	Floraison	DRP	Recolte	Post recolte	Post recolte	Post recolte
ANOVA	Bloc	0.0003328 ***	0,103	0,407	0,758	0,10827	0,727	0,85302	0,904	0,504	0,304
	Wsol	1.712e-10***	0,947	0,566	0,695	0,41167	0.0001952 ***	0,22275	0,952	0,202	0,452
	Luzerne	4.96e-10***	0.008276 **	0.013519 *	0.01323 *	0.01302 *	1.163e-05 ***	0.02337 *	0,458	0,176	0,876
	Wsol x Luzerne	8.08 e-05***	0,855	0,4621	0,204	0,88682	0.0619322 .	0,81642	0,198	0,438	0,298
Test de Turkey à a =0.05	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		La_B/ Ts_B	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	Luzerne	Ts_L0/ Ts_B	+	-	-	-	-	+	-	-	-
		Ts_L0/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	+	-	-	-
	Contrôle	Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_L0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Luzerne+ contrôle	Ts_BL0/ Ts_B	+	-	-	-	-	-	-	-	-
		La_BL1/ La_B	+	-	-	+	-	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_B	+	-	-	-	-	+	-	-	-

3) Architecture aérienne :

		LAI blé (m ² .m ²)										
		Dates Stades	19/02/2008 Debut tallage	04/04/2008 Epi 1cm	13/05/2008 debut epiaison	28/05/2008 Floraison	23/06/2008 DRP					
ANOVA	Bloc		0,956	0,246	0,197	0,205	9.744e-05 ***					
	Wsol		0,12356	0,00548 **	0,00684 **	0,0002261 ***	1,604e-05 ***					
	Luzerne		0,01860 *	2,979e-07 ***	1,976e-08 ***	1,656e-10 ***	7,261e-07 ***					
	Wsol x Luzerne		0,400	0,924	0,153	0,548	0,016033 *					
Test de Turkey à α=0,05	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	-	-	-					
		La_B/ Ts_B	-	-	-	-	+					
	Luzerne Contrôle	Ts_B/ Ts_BL0	-	+	+	+	+					
		Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	-					
	Luzerne+ contrôle	La_BL1/ La_B	-	+	+	+	+					
		Ts_BL1/ Ts_B	-	+	+	+	-					
		LAI Luzerne(m ² .m ²)										
		Dates Stades	15/10/2007 Av S blé	26/10/2007 Coupe Luz	19/02/2008 Debut tallage	04/04/2008 Epi 1cm	13/05/2008 debut epiaison	28/05/2008 Floraison	23/06/2008 DRP	29/07/2008 Post recolte	02/09/2008 Post recolte	14/10/2008 Post recolte
ANOVA	Bloc		0,668	0,636	0,906	0,139	0,80961	0,02238 *	0,692	0,207	0,232	0,130
	Wsol		0,009686 **	0,376	0,840	0,716	1,422e-05 ***	5,256e-06 ***	0,070	0,454	0,463	0,02972 *
	Luzerne		0,193	0,180	0,100	0,03457 *	4,804e-07 ***	2,954e-08 ***	0,03998 *	0,472	0,227	0,00395 **
	Wsol x Luzerne		0,496	0,488	0,03789 *	0,04926 *	0,01157 *	0,2605	0,734	0,548	0,006296 **	0,05933 .
Test de Turkey à α = 0,05	Wsol	Ts_BL1/ La_BL1	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-
		Ts_L0/ Ts_BL0	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
	Luzerne Contrôle	Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_L0	-	-	-	-	+	+	-	-	-	+

Hauteur blé (m)

		Dates	11/12/2007	11/03/2008	25/03/2008	04/04/2008	14/04/2008	22/04/2008	05/05/2008	09/05/2008	16/05/2008	22/05/2008	
ANOVA	Bloc		0,16	0,14	0,02 *	0,16	0,48	0,01 **	0,25	0,00002 ***	0,00 ***	0,00 **	
	Wsol		0,10	0,001 ***	0,6914	0,1832	0,00 ***	8,89E-04 ***	0,75	0,1870	6,63E-01	0,72	
	Luzerne		0,00 **	0,024 *	8,88E-02 .	8,06E-02 .	0,00 **	2,12E-02 *	2,09E-03 **	9,17E-05 ***	1,36E-03 **	4,58E-04 ***	
	Wsol x Luzerne		0,04 *	0,96	0,21	0,51	0,76	0,22	0,05 .	0,03 *	0,00 **	0,84	
Test de Turkey à $\alpha = 0,05$	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	
		La_B/ Ts_B	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	
	Luzerne	Ts_B/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	
		Ts_BL1/ Ts_BL0	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	
	Luzerne+ contrôle	La_BL1/ La_B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_B	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-

Hauteur Luzerne (m)

		Dates	11/12/2007	11/03/2008	25/03/2008	04/04/2008	14/04/2008	22/04/2008	05/05/2008	09/05/2008	16/05/2008	22/05/2008	31/07/2008	26/09/2008
ANOVA	Bloc		0,03 *	0,00 ***	0,91	0,43	0,75	0,45	0,12	0,9659	0,97	0,14	0,135	0,000 ***
	Wsol		0,321	0,00 **	0,03 *	0,0002 ***	7,26E-08 ***	0,810	3,88E-15 ***	1,36E-01	<2e-16 ***	<2e-16 ***	0,352	0,9
	Wsol*Luzerne		0,03 *	0,00 ***	0,00 ***	0,0000 ***	1,93E-11 ***	1,67E-08 ***	2,20E-16 ***	5,81E-05 ***	<2e-16 ***	<2e-16 ***	0,010 **	0,154
Test de Turkey à $\alpha = 0,05$	Luzerne	Ts_L0/ Ts_BL0	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-
		Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-
	Luzerne+ contrôle	Ts_BL1/ Ts_L0	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-
		Ts_BL1/ La_BL1	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-

4) Azote

		Azote total blé (Kg N.ha ⁻¹)						
		Dates	19/02/2008	04/04/2008	13/05/2008	28/05/2008	23/06/2008	15/07/2008
		Stades	Debut tallage	Epi 1cm	debut epiaison	Floraison	DRP	Recolte
ANOVA	Bloc		0,82	0,35	0,40	0,21	0,64	0,79
	Wsol		0,08 .	0,00012 ***	0,0031 **	0,0006 ***	2,07E-05 ***	6,35E-06 ***
	Luzerne		0,00 ***	0,00000 ***	7,09E-11 ***	1,50E-10 ***	1,13E-10 ***	2,29E-11 ***
	Wsol x Luzerne		0,11	0,56	0,74	0,91	0,62	0,54
Test de Turkey à α=0.05	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	-	-	-	-
		La_B/ Ts_B	-	-	-	-	-	-
	Luzerne	Ts_B/ Ts_BL0	+	+	+	+	+	+
		Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	+
	Luzerne+ contrôle	La_BL1/ La_B	+	+	+	+	+	+
		Ts_BL1/ Ts_B	+	+	+	+	+	+

		Azote total luzerne (Kg N.ha ⁻¹)											
		Dates	15/10/2007	26/10/2007	19/02/2008	04/04/2008	13/05/2008	28/05/2008	23/06/2008	15/07/2008	29/07/2008	02/09/2008	14/10/2008
		Stades	Av S blé	Coupe Luz	Debut tallage	Epi 1cm	debut epiaison	Floraison	DRP	Recolte	Post recolte	Post recolte	Post recolte
ANOVA	Bloc		0,31	0,51	0,78	0,50	0,24	0,07 .	0,99	0,01579 *	0,23	0,42	0,000 ***
	Wsol		0,001 **	0,50	0,08 .	0,67	0,02 *	0,003 **	0,006 **	1,84E-05 ***	0,0081 **	0,37	0,000 ***
	Luzerne		0,06 .	0,03 *	0,60	0,15	0,005 **	2,25E-06 ***	0,0008 ***	0,0000 ***	0,22	0,965	1,59E-05 ***
	Wsol*Luzerne		0,06 .	0,09 .	0,60	0,15	0,00 **	0,00 ***	0,00 ***	0,00 ***	0,22	0,97	0,000 ***
Test de Turkey à α = 0.05	Luzerne	Ts_L0/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+
		Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
	Luzerne+ contrôle	Ts_BL1/ Ts_L0	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-
		Ts_BL1/ La_BL1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

5) Indicateurs

LER

		Dates	19/02/2008	04/04/2008	13/05/2008	28/05/2008	23/06/2008	15/07/2008
		Stades	Debut tallage	Epi 1cm	debut epiaison	Floraison	DRP	recolte
ANOVA	Bloc		0,08	0,02 *	0,20	0,20	0,057	0,001 ***
	Wsol		0,06	0,29	0,97	0,89	0,1492	0,97
	Luzerne		0,41	0,96	0,27	0,29	1,40E-03	0,41
	Wsol x Luzerne		0,95	0,62	0,88	0,68	0,130	0,34
Test de Turkey à $\alpha = 0,05$	Wsol	La_BL1/Ts_BL'	-	-	-	-	-	-
		La_B/ Ts_B	-	-	-	-	-	-
	Luzerne	Ts_B/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-
		Contrôle	Ts_BL1/ Ts_BL	-	-	-	-	-
	Luzerne+ contrôle	La_BL1/ La_B	-	-	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_B	-	-	-	-	-	-

B- Année expérimentale 2008-2009

1) Composantes de rendement

	Composantes	plantes par m ²			Talles par m ²	
		Dates Stades	19/11/2008 levée	17/02/2009 3 feuilles	31/03/2009 Epi 1cm	19/02/2009 tallage
ANOVA	Bloc	0,30	0,76	0,05	0,339	
	Wsol	0,00 **	0,02 *	0,19	0.01005 *	
	Luzerne	0,80	0,05 ,	0,02	0.02528 *	
	Wsol x Luzerne	0,12	0,05 *	0,16	0.55621	
Test de Turkey à a =0,05	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	-	-
		La_BL2/Ts_BL2				-
		La_B/ Ts_B	+	+	-	-
	Luzerne	Ts_B/ Ts_BL0	-	-	-	-
	Contrôle	Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-
		Ts_BL2/ Ts_BL0	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_BL2	-	-	-	-
		La_BL1/ La_BL2	-	-	-	-
	Luzerne+ contrôle	La_BL1/ La_B	-	-	-	-
La_BL2/ La_B		-	-	-	-	
Ts_BL1/ Ts_B		-	-	-	-	
Ts_BL2/ Ts_B		-	-	-	-	

2) Biomasse aérienne

Matière sèche blé (t.ha⁻¹)

		17/02/2009	31/03/2009	11/05/2009	04/06/2009	25/06/2009	15/07/2009
Dates		17/02/2009	31/03/2009	11/05/2009	04/06/2009	25/06/2009	15/07/2009
Stades		debut tallage	Epi 1cm	Gonflement	Floraison	DRP	Recolte
ANOVA	Bloc	0,334	0,892	0,996	0,147	0,129	0,287
	Wsol	0,0001 ***	0,001 **	0,05 *	0,0004 ***	0,034 *	1,980
	Luzerne	0,0008 ***	0,003 **	0,01 **	7,61E-08 ***	1,25E-05 ***	2,24E-06 ***
	Wsol x Luzerne	0,478	0,487	0,109	0,279	0,606	0,761
Test de Turkey à a =0,05	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	-	-	-
		La_BL2/Ts_BL2	-	-	-	-	-
		La_B/ Ts_B	-	-	-	-	-
	Luzerne	Ts_B/ Ts_BL0	+	-	-	+	+
		Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	+
	Contrôle	Ts_BL2/ Ts_BL0	-	-	-	-	+
		Ts_BL1/ Ts_BL2	-	-	-	-	+
		La_BL1/ La_BL2	-	-	-	-	+
	Luzerne+ contrôle	La_BL1/ La_B	-	-	-	+	+
		La_BL2/ La_B	-	-	-	+	+
		Ts_BL1/ Ts_B	+	-	-	-	+
		Ts_BL2/ Ts_B	+	-	+	+	+

		Matière sèche Luzerne (t.ha⁻¹)								
		Dates	14/10/2008	17/02/2009	31/03/2009	11/05/2009	04/06/2009	25/06/2009	15/07/2009	
		Stades	Av S blé	debut tallage	Epi 1cm	Gonflement	Floraison	DRP	Recolte	
ANOVA	Bloc		0,020 *	0,007 **	0,000 ***	0,1633	0,0173364 *	0,2329	0,290	
	Wsol		0,004 **	0,045 *	0,003 **	0,023 *	0,0008697 ***	0,034 *	2,980	
	Luzerne		0,333	0,795	0,010 *	2,36E-02 *	5,35E-06 ***	3,35E-06 ***	3,35E-06 ***	
	Wsol*Luzerne		0,333	0,281	0,108	0,86793	0,9056752	0,6056752	0,761	
Test de Turkey à a =0,05	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	+	-	-	-	-	
		Luzerne	Ts_L0/ Ts_BL0	-	-	-	-	+	+	+
	Contrôle		Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	+	+
			Ts_BL2/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	+	+
			Ts_BL1/ Ts_BL2	-	-	+	-	-	-	+
	Luzerne+ contrôle	La_BL1/ La_BL2	-	-	-	-	-	-	+	
		Ts_BL1/ Ts_L0	-	-	-	+	+	+	+	
			Ts_BL2/ Ts_L0	-	-	-	-	+	+	+

Matière sèche adventices (t.ha⁻¹)

Dates		14/10/2008	17/02/2009	31/03/2009	11/05/2009	04/06/2009	25/06/2009	15/07/2009
Stades		Av S blé	debut tallage	Epi 1 cm	Gonflement	Floraison	DRP	Recolte
ANOVA	Bloc	0,008 **	0,008 **	0,029 *	0,076	0,235	0,145	0,455
	Wsol	0,050 .	0,006 **	0,002 **	0,043 *	0,122	0,222	0,622
	Luzerne	0,022 *	0,041 *	0,110	2,46E-01 *	0,602	0,342	0,402
	Wsol x Luzerne	0,194	0,360	0,4882	0,027 *	0,574	0,874	0,738
Test de Turkey à $\alpha = 0,05$	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	-	-	-	-
		La_BL2/Ts_BL2	-	-	-	-	-	-
		La_B/ Ts_B	-	-	-	+	-	-
	Luzerne	Ts_L0/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-
		Ts_B/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-
	Contrôle	Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-
		Ts_BL2/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_BL2	-	-	-	-	-	-
		La_BL1/ La_BL2	-	-	-	-	-	-
	Luzerne+ contrôle	La_BL1/ La_B	-	-	-	-	-	-
		La_BL2/ La_B	-	-	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_B	-	-	-	-	-	-
		Ts_BL2/ Ts_B	+	-	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_L0	-	-	-	-	-	-
Ts_BL2/ Ts_L0		+	+	-	-	-	-	

3) Architecture aérienne:

LAI blé (m².m⁻²)

		Dates	17/02/2009	31/03/2009	11/05/2009	04/06/2009	25/06/2009
		Stades	debut tallage	Epi 1cm	Gonflement	Floraison	DRP
ANOVA	Bloc		0,5901	0,867	0,811	0,416	0,342
	Wsol		0,0001 ***	0,004 **	0,13	0,0039 **	0,0644 **
	Luzerne		0,0043 **	0,031 *	0,09	8,48E-04 ***	9,78E-04 ***
	Wsol x Luzerne		0,687	0,428	0,331	0,187	0,167
Test de Turkey à a=0,05	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	-	-	-
		La_BL2/Ts_BL2	-	-	-	-	-
		La_B/ Ts_B	-	-	-	-	-
	Luzerne	Ts_B/ Ts_BL0	-	-	-	-	+
	Contrôle	Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	-
		Ts_BL2/ Ts_BL0	-	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_BL2	-	-	-	-	-
		La_BL1/ La_BL2	-	-	-	-	-
	Luzerne+ contrôle	La_BL1/ La_B	-	-	-	+	-
		La_BL2/ La_B	-	-	-	+	-
		Ts_BL1/ Ts_B	-	-	-	-	-
		Ts_BL2/ Ts_B	+	-	-	-	-

LAI luzerne (m².m⁻²)

		Dates	14/10/2008	17/02/2009	31/03/2009	11/05/2009	04/06/2009	25/06/2009	15/07/2009
		Stades	Av S blé	debut tallage	Epi 1cm	Gonflement	Floraison	DRP	Recolte
ANOVA	Bloc		0,04 *	0,28	0,0003 ***	0,0260 *	0,1244	0,28	0,28
	Wsol		0,03 *	0,29	0,01 **	0,001 **	4,40E-06 ***	0,29	0,29
	Luzerne		0,06	0,29	0,01 *	3,76E-05 ***	1,21E-10 ***	1,21E-10 ***	1,21E-10 ***
	Wsol*Luzerne		0,22	0,64	0,07 .	0,877851	0,9641	0,9641	0,9641
Test de Turkey à a =0,05	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	+	-	-	-	-
	Luzerne	Ts_L0/ Ts_BL0	-	-	-	+	+	+	+
	Contrôle	Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-	-
		Ts_BL2/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_BL2	-	-	+	-	-	-	-
		La_BL1/ La_BL2	-	-	-	-	-	-	-
	Luzerne+ contrôle	Ts_BL1/ Ts_L0	-	-	-	+	+	+	+
		Ts_BL2/ Ts_L0	-	-	-	+	+	+	+

		Hauteur blé (m)						
		Dates	05/10/2008	16/03/2009	15/04/2009	22/04/2009	30/04/2009	30/04/2009
ANOVA	Bloc		0,0022 **	0,000 ***	0,00 ***	0,00 ***	< 2.2e-16	< 2.2e-16 ***
	Wsol		0,0001 ***	0,000 ***	0,00 **	0,0032 **	0,03785	0,16
	Luzerne		0,1417	0,886	0,05 *	8,53E-01	3,62E-05	0,003 **
	Wsol x Luzerne		0,95	0,583	0,01 **	0,39	0,22078	0,043 *
Test de Turkey à a =0,05	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	-	-	-	-	-	-
		La_BL2/Ts_BL2	-	-	-	-	-	-
		La_B/ Ts_B	-	+	+	-	+	+
	Luzerne	Ts_B/ Ts_BL0	-	-	+	-	+	+
		Ts_BL1/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-
	Contrôle	Ts_BL2/ Ts_BL0	-	-	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_BL2	-	-	-	-	-	-
		La_BL1/ La_BL2	-	-	-	-	-	-
	Luzerne+ contrôle	La_BL1/ La_B	-	-	-	-	-	-
		La_BL2/ La_B	-	-	-	-	-	-
		Ts_BL1/ Ts_B	-	-	-	-	-	-
		Ts_BL2/ Ts_B	-	-	+	-	+	-

Hauteur luzerne (m)

Dates		05/10/2008	16/03/2009	15/04/2009	22/04/2009	30/04/2009	30/04/2009	
ANOVA	Bloc	0,01 **	0,00 ***	0,0000 ***	0,0000 ***	0,01183 *	0,0001454 ***	
	Wsol	0,00001 ***	0,13	0,00 ***	0,000 ***	6,42E-10 ***	2,26E-15 ***	
	Luzerne	0,08 .	< 2.2e-16 ***					
	Wsol*Luzerne	0,49	0,08	0,61	0,17	0,96	0,0083586 **	
Test de Turkey à $\alpha = 0,05$	Wsol	La_BL1/Ts_BL1	+	-	-	-	-	
		La_BL2/Ts_BL2	+	-	-	-	-	
	Luzerne	Ts_L0/ Ts_BL0	-	+	-	+	+	-
		Ts_BL1/ Ts_BL0	-	+	+	+	+	+
	Contrôle	Ts_BL2/ Ts_BL0	-	-	-	+	+	+
		Ts_BL1/ Ts_BL2	-	+	+	-	+	+
		La_BL1/ La_BL2	-	+	+	+	+	+
	Luzerne+ contrôle	Ts_BL1/ Ts_L0	-	+	+	+	+	+
		Ts_BL2/ Ts_L0	-	+	-	-	-	-

Annexe 4 : Photographie des deux espèces en association à différentes dates d'observation

Luzerne avant semis blé (2008)



Luzerne avant semis blé (2009)



État du blé en association avec la luzerne à épiaison et au stade DRP



Avec contrôle luzerne(BL1)



Sans contrôle luzerne(BL0)



Post récolte 2008



Post récolte 2009



An analysis of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) intercropped with a cover crop, on an annual scale, through modelling and experimental approaches

Abstract. The introduction of a living cover crop during a cash crop growth cycle (relay intercropping) and its maintenance after the cash crop harvest may help to preserve biodiversity, increase soil organic matter content and carbon sequestration and provide other ecosystem services, such as increasing useful biotic interactions within the agroecosystem. We studied the impact of various approaches to managing a cover crop (red-fescue (*Festuca rubra* L.) or Lucerne (*Medicago sativa* L.)) intercropped with a winter wheat crop (*Triticum aestivum* L.) during an annual scale in terms of light, water and nitrogen competition, using both modeling and experimental approaches.

For the modeling approach we used an intercropping extension of the sole crop model STICS. This model was first evaluated on two years of experimental data for wheat/ Red-fescue intercropping. It gave satisfactory statistical results for the prediction of dry matter, leaf area index and nitrogen accumulation in the two species, and for nitrogen and water dynamics in the soil. By providing access to unmeasured variables, such as transpiration, the results of simulations with this model improved our understanding of the performance of the intercrop. For example, we showed that the intercropping system was more efficient than the wheat crop grown as sole crop in terms of nitrogen accumulation and decreasing soil nitrogen levels before the leaching period. However, it also resulted in lower wheat yields. We then used STICS to compare four intercropping management scenarios differing in terms of the date of red fescue emergence, over 35 climatic years. We found that, in most climatic scenarios, the emergence of the fescue crop during the late tillering phase of the wheat crop gave the best results.

For the experimental approach, the study was based on field experiments carried out over two experimental years in Grignon (48°50'N, 1°56'E), France. Treatments involved winter wheat and lucerne grown alone and winter wheat intercropped with lucerne. To assess the effect of tillage on functioning of the intercrop, two management scenarios were tested: conventional tillage and reduced tillage. Moreover, two patterns of cover crop management with herbicidal control were tested, aiming to reduce the competition between the two intercropped species. This study showed that a cover crop generally reduced wheat yield in comparison with wheat sole crop, mainly due to its competitive effect to intercept light radiation and to absorb soil mineral nitrogen. The intensity of this competition depended on the growth rate of the cover crop at the beginning of the cultural period and its access to large nitrogen resources in the soil by developing high root biomass in comparison with the wheat in the intercropping system. The reduction of aboveground cover crop biomass by chemical control may therefore be an option to reduce interspecific competition in the aim to enhance wheat yield. This work also showed that tillering phase of the wheat crop represents the major sensitive period in concordance with modelling results.

Introducing a leguminous as a cover crop in a wheat intercropping system can therefore improve environmental performances by favoring certain biotic processes such as the production of primary biomass, the interception of radiation, which might otherwise reach weeds, and nitrate leaching at the end of growth cycle. These positive effects were observed during intercropping period and especially after the harvest of wheat, when the cover crop is maintained alive. Whatever the experiment, soil tillage had a very little effect on these processes.

Keywords: Competition; Facilitation; Relay intercropping; Yield; Biomass; Light; Water; Nitrogen

Analyse du fonctionnement d'une association de blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) et d'une plante de couverture sur une échelle annuelle par modélisation et expérimentation

Résumé. Les systèmes de cultures sous couvert végétal permanent associé à une culture commerciale ont la réputation d'être susceptibles d'assurer certains services écologiques et agronomiques : étouffement des adventices, mais aussi protection du sol, augmentation de la biodiversité, de l'activité biologique et du taux de matière organique des sols, diminution de l'érosion. Si ces systèmes se sont bien développés en climat tropical, ils restent toutefois presque inexistantes en climat tempéré. L'objectif de cette étude est d'évaluer, par modélisation et expérimentation, les différentes interactions qui existent entre une culture de blé et une plante de couverture (fétuque rouge (*Festuca rubra* L.) ou luzerne (*Medicago sativa* L.)) cultivées simultanément pour les différentes ressources du milieu (lumière, eau et azote) dans les conditions de climat tempéré. La période considérée comprend la période culturale (association) et la période d'interculture (couvert maintenu vivant après la récolte du blé).

Pour la modélisation, le choix s'est porté sur le modèle STICS-cultures associées. Le modèle a été évalué sur les traitements de cultures associées (blé-fétuque) d'une expérimentation menée durant deux années expérimentales 1999-2000 et 2000-2001 à Grignon (48°50'N, 1°56'E). Les résultats de simulation montrent que le modèle est capable de reproduire l'évolution de la matière sèche, de la surface foliaire et de l'accumulation de l'azote dans la matière sèche aérienne pour les deux espèces, ainsi que la dynamique des stocks d'eau et d'azote dans le sol. L'étude du fonctionnement de l'association a été ensuite réalisée *via* différents indicateurs issus des variables simulées. Les résultats montrent que l'association permet une meilleure absorption de l'azote du sol qu'en culture de blé pur. Toutefois, la plante de couverture peut occasionner des réductions du rendement du blé en raison de la compétition qu'elle exerce sur les ressources du milieu. Différents scénarios de décalage des cycles de croissance des deux espèces ont été testés en réalisant des simulations sur une série de 35 années climatiques. Quelle que soit l'année climatique, l'émergence de la plante de couverture juste après la période de tallage du blé donne les meilleurs résultats en terme de rendement.

Pour l'expérimentation, deux essais menés en plein champ à Grignon ont été mis en place en 2007-08 et 2008-09. Les traitements concernés sont le blé et la luzerne cultivés seuls et le blé cultivé en association avec la luzerne. Deux modalités de travail du sol ont été testées, ainsi que différentes modalités de gestion de la biomasse aérienne de la plante de couverture, afin d'évaluer l'impact de certaines techniques ou états du milieu sur les interactions interspécifiques. Les résultats montrent que la luzerne réduit systématiquement le rendement du blé en raison de l'effet compétitif qu'elle exerce sur l'interception du rayonnement solaire et sur l'absorption de l'azote du sol. L'intensité de cette compétition est conditionnée par le rythme de croissance des espèces en début de cycle et par l'accès à la ressource azotée. La gestion de la biomasse aérienne de la luzerne par l'application d'un contrôle chimique est un moyen efficace pour réduire la compétition entre les deux espèces pour les ressources du milieu, ce qui permet d'améliorer le rendement de la plante commerciale. Globalement, les résultats montrent que la phase de tallage du blé est la phase la plus sensible dans la réduction du rendement du blé, en accord avec les résultats de modélisation. L'impact du travail du sol sur ces processus est très faible dans nos conditions.

L'introduction d'une plante de couverture en association avec un blé et son maintien en vie en période d'interculture peuvent donc améliorer les performances environnementales du système en favorisant certains processus biotiques comme par exemple la production de biomasse primaire, l'interception de rayonnement (qui agit indirectement sur le développement des adventices en réduisant la ressource en lumière arrivant au niveau du sol), et la réduction du stock d'azote susceptible d'être lessivé. Ces effets positifs sont observés en partie en période culturale mais surtout en période d'interculture.

Mots clés: Compétition; Facilitation ; Association de culture ; Rendement ; Lumière ; Eau ; Azote.