

CENTRE INTERNATIONAL D'ETUDES SUPERIEURES EN SCIENCES
AGRONOMIQUES MONTPELLIER
Ecole Doctorale Systèmes intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences,
Hydrosciences, Environnement



THESE

Pour l'obtention du grade de : Docteur de SUPAGRO Montpellier

Formation Doctorale : Ecosystèmes

Discipline : Agronomie

Présentée et soutenue publiquement par

Alpha Bocar BALDE

Le 13 Mai 2011

Analyse intégrée du partage des ressources (eau, azote et
rayonnement) et des performances dans les systèmes de culture en
relais sous semis direct en zone tropicale subhumide

Directeur de thèse

Jacques WERY

Co-encadrant

Eric SCOPEL

Devant le Jury :

Harry OZIER-LAFONTAINE

Directeur de recherche **INRA Antilles-Guyane**

Rapporteur

Philippe DEBAEKE

Directeur de recherche **INRA Toulouse**

Rapporteur

Alain CAPILLON

Professeur **SUPAGRO Montpellier**

Examineur

Jacques WERY

Professeur **SUPAGRO Montpellier**

Directeur de thèse

Christophe DAVID

Enseignant-Chercheur **ISARA Lyon**

Examineur

François AFFHOLDER

Chercheur **URSCA-CIRAD Montpellier**

Examineur

Fernando Antonio MACENA DA SILVA

Chercheur **EMBRAPA-Cerrados Brésil**

Invité



CENTRE INTERNATIONAL D'ETUDES SUPERIEURES EN SCIENCES

AGRONOMIQUES MONTPELLIER

Ecole Doctorale Systèmes intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences,

Hydrosiences, Environnement



THESE

Pour l'obtention du grade de : Docteur de SUPAGRO Montpellier

Formation Doctorale : Ecosystèmes

Discipline : Agronomie

Présentée et soutenue publiquement par

Alpha Bocar BALDE

Le 13 Mai 2011

Analyse intégrée du partage des ressources (eau, azote et rayonnement) et des performances dans les systèmes de culture en relais sous semis direct en zone tropicale subhumide

Directeur de thèse

Jacques WERY

Co-encadrant

Eric SCOPEL

Devant le Jury :

Harry OZIER-LAFONTAINE

Philippe DEBAEKE

Alain CAPILLON

Jacques WERY

Christophe DAVID

François AFFHOLDER

Fernando Antonio MACENA DA SILVA

Directeur de recherche **INRA Antilles-Guyane**

Directeur de recherche **INRA Toulouse**

Professeur **SUPAGRO Montpellier**

Professeur **SUPAGRO Montpellier**

Enseignant-Chercheur **ISARA Lyon**

Chercheur **URSCA-CIRAD Montpellier**

Chercheur **EMBRAPA-Cerrados Brésil**

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Directeur de thèse

Examineur

Examineur

Invité



A mon père

Remerciements

Je remercie le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) pour avoir financé les 3 années de cette thèse et pour avoir crû en la pertinence et l'intérêt de ce sujet. Je remercie aussi l'Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) pour son accueil et son soutien humain et matériel pour la réalisation des expérimentations durant les deux années aussi bien en station qu'en réseau de parcelles de producteurs.

Je tiens à remercier mes encadrants, Jacques Wery, Eric Scopel et François Affholder, d'avoir cru en moi tout au long de ces années, du Master à la Thèse. Je les remercie également pour l'attention qu'ils m'ont accordée, 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. Eric et François, je ne vous remercierai jamais assez. J'ai beaucoup aimé travailler avec vous durant ces années, aussi bien pour vos qualités scientifiques qu'humaines. Merci aussi à Marc Corbeels pour son aide précieux dans la rédaction des articles de cette thèse.

Je reviens exprimer une nouvelle fois mes chaleureux remerciements à Monsieur Jacques Wery, pour avoir accepté la direction de cette thèse et pour m'avoir accueilli au sein de l'UMR System les deux premières années de la thèse. Merci également pour avoir relu et corrigé avec attention les différents chapitres de cette thèse. Un grand merci du fond du cœur, grace à toi j'ai consolidé davantage mon goût pour la recherche.

Par la même occasion je remercie Florent Maraux, Directeur de l'UR SCA et l'ensemble du personnel de l'UR SCA, où j'ai passé la dernière année de la thèse, pour leur accueil et leur soutien.

Monsieur Harry Ozier-lafontaine et Monsieur Philippe Debaecke ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse; Monsieur Alain Capillon, Monsieur Christophe David, Monsieur François Affholder et Monsieur Fernando Antonio Macena Da Silva, m'ont fait l'honneur d'être membre du jury de cette thèse. J'en suis très honoré et je les remercie pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture du présent document et pour l'intérêt qu'ils y ont porté.

Je remercie aussi chaleureusement les membres de mon comité de thèse, Monsieur Jean Jacques Drevon, Monsieur Eric Juste et Monsieur Stéphane De Tourdonnet pour leur disponibilité, leurs conseils et critiques constructifs pour le bon déroulement de la thèse.

Je remercie Monsieur Dominique Nicolas, Madame Sandrine Renoir pour leur disponibilité, leur aide sur le plan administratif et leur soutien moral au cours de ces années. Merci aussi à Natacha Motisi pour son soutien, que je n'oublierai jamais, tu as été toujours là pour moi.

Je remercie Monsieur Yves Benestan pour son dévouement à la cause des chercheurs étrangers accueillis au Cirad, dans le cadre de leur renouvellement de titre de séjour et pour son humanité. Merci Yves pour tout ce que tu fais pour les chercheurs et étudiants étrangers.

Merci à tout le personnel de l'UMR System et de SupAgro Montpellier pour leurs encouragements et leurs amitiés, Marie-Ange NGOBIENG, Sylvestre Delmotte, Nathalie Lamanda, Lydie Dufour, Christian Dupraz, Christian Gary, Aurélie Metay, Natalie Smits,

Eric Casellas, Hatem Belhouchette, Celine Berthier, Rémi Godin, Ivan Buisson et ceux que j'aurais oubliés. Je remercie aussi les collègues avec qui j'ai partagé les joies et les difficultés du thésard dans le même bureau: Fagaye Sissoko, Grégoire Talbot, Aude Ripoche, Faisal Mohamood, Luu Ngoc Quyen, et Hélène Marrou.

Merci à mes amis de la résidence Adjaratou A. Mbodji Seydi, Mouhammadou Watt, Delphin Léon Emile Pascal Diatta, Daniel Manga, Madické Seck, Fama Diao, Cuong Nguyen, Chérif Dioum et Mamadou Badji pour leur soutien et les moments passés ensemble.

Merci à ma toute ma famille, pour leur amour et leur soutien. Je remercie mes parents, Feu Samoudou et Rougui Baldé; mes oncles et tantes Lamine Baldé, Cissé Baldé, Khadidiatou Baldé et Aissatou Baldé ; qui n'ont ménagé aucun effort pour ma réussite scolaire. Mon oncle El Hadji Bambo Guirassy et ma tante Irène Attolodé pour leur soutien. Je remercie chaleureusement mon grand frère Jupiter Baldé, pour son soutien sans faille. Mes petits frères et petites sœurs, mes cousins et cousines et le reste de ma famille, que tous trouvent ici l'expression de ma gratitude. Un grand merci, tout particulièrement à ma tante Fatoumata Baldé, mon oncle Siradio Baldé et mon cousin El Hadji Mady Koita pour leur soutien et pour avoir bien voulu se déplacer pour assister à ma soutenance.

Agradeço Davi Souares e José Carlos pelo apoio na experimentação e pela poeira que comemos juntos na coureria escutando sertanaja e forró.

Aos pesquisadores Fernando Antônio Macena da Silva, Marcello Nascimento, José Humberto, Artur Gustavo Muller e aos colegas do laboratório de física e química de solos da Embrapa Cerrados, obrigado pela ajuda e amizade. Da mesma maneira, agradeço aos professores e estudantes da Escola Agrícola Juvencio Martins Ferreira de Unaí et da FACTU.

Agradeço aos agricultores dos assentamentos de Santa Clara, Boa Uniao, Jiboia et Paraiso, por me disponibilizarem um pouco de seus tempos e de suas terras.

Aos meus amigões de Unaí: Thalmu, Juliana, Alexandra, Euler, Bérénice, Kaka, Drica, Eliana, Philipi, Marcia. As famílias Ferreira e Soares, obrigado pelo tudo.

Résumé

Analyse intégrée du partage des ressources (eau, azote et rayonnement) et des performances dans les systèmes de culture en relais sous semis direct en zone tropicale subhumide

Cette thèse visait à caractériser et à modéliser la dynamique des trois ressources principales que sont l'eau, l'azote et le rayonnement dans une association en relais maïs-plante de couverture en semis direct en région tropicale subhumide et ses conséquences sur la productivité de la culture principale et de l'ensemble du système et sur les flux d'eau et d'azote dans le sol.

Le travail repose sur un dispositif expérimental mis en place dans les Cerrados, à Unai (Minas Gêras, Brésil) en 2007 pour deux années agricoles, d'une part en station expérimentale permettant un effort de mesure intense et précis, et d'autre part dans un réseau de parcelles d'agriculteurs offrant une large gamme de situations pédoclimatiques et de modalités de mise en œuvre des systèmes de culture étudiés. Dans ces dispositifs, la culture principale était du maïs, et la plante de couverture associée en relais était une culture fourragère tropicale, soit la légumineuse, *Cajanus cajan* soit la graminée, *Brachiaria ruziziensis*. Deux dates de semis, précoce et tardive étaient considérées pour le semis de la plante de couverture au sein du maïs, dans le cas de l'essai en station. Ce travail montre que rendement du maïs n'a pas été significativement affecté par la présence de la plante de couverture semée précocement au sein du maïs, en comparaison avec le rendement du maïs en culture pure. En revanche, la production en biomasse de la plante de couverture a été significativement réduite dans l'association. Le semis précoce de la plante de couverture au sein du maïs permet une production en biomasse significativement plus importante qu'un semis tardif (20 jours après floraison du maïs), et une production totale en biomasse de l'ensemble de l'association significativement plus importante par rapport aux cultures pures. Cette production totale a été de plus du double comparée à celle de la culture pure de maïs dans le cas de l'association maïs-Cajanus. Les valeurs du « Land Equivalent Ratio » (LER) du rendement en grain de maïs et de la production de biomasse ont été supérieures à 1, atteignant jusqu'à 2.03 témoignant d'une meilleure valorisation des ressources par les espèces associées et l'avantage de tels systèmes pour produire à la fois du grain et du fourrage.

La thèse montre aussi la forte variabilité du potentiel de production de ces systèmes en parcelles de producteurs et suggère que lorsque les ressources en eau et en azote sont moins importantes que dans l'essai en station, des compétitions entre maïs et plantes de couverture peuvent réduire les performances agronomiques du maïs et/ou de la plante de couverture comparativement à la culture pure équivalente. La biomasse totale produite reste cependant supérieure à celle de la culture pure de maïs, sauf pour de rares exceptions où de plus faibles disponibilités en ressources, parfois accentué par des difficultés de gestion technique, le maïs semble souffrir de compétition plus forte et/ou la plante de couverture ne produit que très peu de biomasse. La thèse évalue la capacité d'un modèle de simulation de culture associées, STICS-CA, à fournir une analyse plus fine de la dynamique du partage des ressources dans ces systèmes et à en estimer les performances agronomiques et certains impacts environnementaux en fonction de conditions techniques et édapho-climatiques différentes de celles de notre dispositif. Des modifications mineures et le calage du modèle ont conduit à une simulation satisfaisante des cultures pures de maïs et *Brachiaria* et de l'association maïs-*Brachiaria* en semis direct sur mulch pailleux. En revanche il n'a pas été possible d'obtenir une simulation satisfaisante du maïs en semis conventionnel sur sol labouré, ni du *Cajanus* en culture pure et de l'association maïs-*Cajanus* en semis direct. La thèse fournit des informations sur les imperfections du modèle et propose des améliorations aussi bien en termes de formalismes pour la prise en compte de la minéralisation du mulch, qu'en termes de dispositif expérimental.

Mots clés : compétition ; facilitation ; intensification écologique ; plantes de couverture ; rendement ; biomasse ; eau ; azote ; rayonnement ; LER ; semis direct ; cultures associées en relais ; modélisation

Abstract

Quantification of resource sharing (water, nitrogen and radiation) and performance of no-tillage relay intercropping systems under sub-humid tropical zone

This thesis aimed to characterize and to model the dynamics of the three main resources, water, nitrogen and radiation in no-tillage relay intercropping with maize under sub-humid tropical climate, with their effects on the productivity of the main crop and cover crop, and on nitrogen and water flows in the soil.

The study used field experiments that were carried out in Unaí (Minas Gêras, Brazil), in the Cerrado region, during two crop growing seasons starting in 2007: 1) an on-station experiment allowing an intensive and precise monitoring of crop and soil processes; 2) on-farm trials offering a wide range of soil/climate and crop management conditions. In these experiments, the main crop was maize, and the intercropped cover crop was a tropical fodder crop, either leguminous, *Cajanus cajan* or a grass *Brachiaria ruziziensis*. In the case of the on-station experiment, two dates, early (8 to 10 days after maize sowing) and late (20 days after maize flowering), were considered for the sowing of the cover crop in established maize. The results showed that maize grain yield was not significantly affected by the presence of the relay cover crops in comparison with maize as a sole crop, even when the cover crop was sown soon after maize emergence. In contrast, the production of total above-ground biomass by the cover crop was significantly lower when grown with maize than when grown as a sole crop. When sown early in the intercropped systems the cover crop produced higher total aboveground biomass than when sown late, and total aboveground biomass production of maize intercropped with a cover crop was much higher than that of any of the crops sown alone. The total biomass produced by maize and pigeon pea was more than double that of maize grown alone. The Land Equivalent Ratio (LER) values of both maize grain yield and biomass production was higher than 1 whatever the intercrop system was, with maximal value of 2.03. These results suggest the more efficient use of available resources by the intercropped crops and the potential of such systems to produce both maize grains and forage.

The thesis also showed the high variability in crop biomass production of these systems in farmer's fields. It is suggested that when water and nitrogen resources are less available (compared to the experimental station), competition between maize and cover crops can reduce the agronomic performances of maize and/or the cover crop compared to the pure sole crop. In our study, total aboveground biomass produced by intercropping was however higher than that of the maize sole crop, except on poor fields with poor management. Under these conditions, maize suffered from strong competition with the cover crop and/or the cover crop produced very little biomass.

The thesis evaluated the capacity of the STICS intercrop model, STICS-CA, to provide a better quantitative analysis of the resource sharing in relay intercropping with maize and to estimate their agronomic performances according to technical practices and soil and climate conditions that were different from those of our experimental station. On one hand, minor modifications and model calibration led to satisfactory simulations of the sole maize and *Brachiaria* crops and the intercropped maize-*Brachiaria* system under no-tillage with mulch. On the other hand, it was not possible to obtain satisfactory simulations of sole maize under conventional tillage, nor of sole pigeon pea or intercropped corn-*Cajanus* under no-tillage with mulch. The thesis provided information on the model imperfections and proposed a way forward (experiments and model formalism) for taking into account the mineralization of the mulch of crop residues.

Key words: competition; facilitation; ecological intensification, cover crop; yield; biomass; water; nitrogen; radiation; LER; no-tillage ; relay intercropping, modelling.

Tables des matières

Remerciements	1
Résumé.....	3
Abstract	4
Introduction générale.....	9
Chapitre 1 : Etude bibliographique et Problématique	13
1. Contexte	13
1.1. Agriculture familiale, Réforme agraire et Projet Unaí dans les Cerrados	13
1.2. Systèmes de semis direct sous couverture végétale (SCV)	17
1.3. Associer en relais culture principale et plante de couverture en semis direct : les SAMBAs	19
1.4. Modélisation des cultures associées	25
2. Objectif et démarche de l'étude	28
2.1. Objectif de l'étude.....	28
2.2. Questions scientifiques	28
2.3. Démarche de recherche	29
Chapitre 2. Agronomic performance of no-tillage relay intercropping with maize under smallholder conditions in Central Brazil.....	35
Abstract	36
1. Introduction.....	37
2. Materials and methods	38
2.1. Experimental site.....	38
2.2. Experimental design	39
2.3. Crop management.....	39
2.4. Field measurements	40
2.5. Statistical Analysis	44
3. Results	44
3.1. Rainfall.....	44
3.2. LAI and radiation intercepted.....	45
3.3. Soil water content	48
3.4. Soil mineral nitrogen dynamics	50
3.5. Crop nitrogen uptake	52
3.6. Biomass and maize grain yield	53
3.7. Land Equivalent Ratio.....	56

4. Discussion	59
4.1. Maize biomass and grain yield	59
4.2. Performance of the cover crops.....	60
4.3. Performance of no-tillage relay intercropped systems.....	61
5. Conclusion	63
Acknowledgements.....	63
Chapitre 3: Modélisation des associations maïs-plante de couverture en relais en semis direct dans les conditions pluviales des Cerrados Brésiliens: adaptation et évaluation du modèle STICS-CA.....	65
1. Introduction.....	65
2. Matériels et méthodes	67
2.1. Présentation du modèle STICS-CA.....	67
2.2. Principaux modules du modèle STICS-CA.....	68
2.3. Adaptations préliminaires	71
2.4. Données expérimentales utilisées pour le travail avec le modèle.....	73
2.5. Paramétrage du modèle.....	76
2.6. Evaluation du modèle.....	78
3. Résultats	79
3.1. Calage du modèle sur les cultures pures.....	79
3.2. Evaluation du modèle sur les associations.....	87
4. Discussion.....	89
4.1. Capacité du modèle à simuler les cultures pures.....	90
4.2. Capacités du modèle à simuler les associations de cultures.....	93
4.3. Pistes d'amélioration.....	95
5. Conclusion	96
Chapitre 4 : Application des SAMBAs en parcelles de petits producteurs dans les Cerrados.	97
1. Introduction.....	97
2. Matériels et méthodes	100
2.1 Site	100
2.2. Dispositif expérimental	102
2.3. Pratiques culturelles.....	103
2.4 Mesures et observations.....	105
2.5. Analyses statistiques	105
3. Résultats	106
3.1 Pluviométrie	106

3.2 Analyse de la production	108
3.3 Comportement du couvert végétal	117
4. Discussion	122
4.1 Variabilité des résultats et poids des conditions pédo-climatiques.....	122
4.2. Rendement en grains du maïs	122
4.3. Production des plantes de couverture et biomasse totale	123
4.4 SAMBA et système de gestion du sol	125
4.5 Place des SAMBAs chez les petits producteurs	126
5. Conclusion	128
Chapitre 5 : Discussion générale et perspectives.....	129
1. Partage des ressources et performance des SAMBAs.....	131
2. A propos de la démarche et des dispositifs.....	135
2.1. Complémentarité station expérimentale et réseaux de parcelles chez les producteurs	135
2.2. Combinaison expérimentation-modélisation :.....	136
3. Quelle utilisation potentielle de ces résultats pour les petits producteurs des Cerrados.	139
4. Pistes de recherche	142
Références bibliographiques.....	145
ANNEXES.....	157

Introduction générale

Le vingtième siècle a connu une intensification importante de l'agriculture pour satisfaire les besoins alimentaires de la population mondiale en constante progression (Tilman et al., 2002). Cette intensification des systèmes de production, très inégale entre les régions du monde, s'est traduite par une utilisation de plus en plus massive d'intrants tels que les engrais et les produits phytosanitaires, ainsi que des machines agricoles. Cependant, cette intensification des modes de production a entraîné plusieurs effets néfastes sur l'environnement et les ressources naturelles (pollutions, dégradation des sols avec érosion et pertes de fertilité, perte de biodiversité...). Face aux enjeux planétaires actuels, la société remet de plus en plus en cause cette manière agressive de produire en agriculture. Il faut donc changer de comportement, innover en proposant une autre façon de produire, de nouveaux systèmes de culture fondés plus sur les processus naturels, pour répondre à la fois au besoin de sécurité alimentaire et une gestion plus équilibrée des ressources naturelles. Dans cette optique, des systèmes de culture tels que les systèmes sous couvert végétal (SCV) ont été mis au point. Les SCV sont efficaces contre l'érosion (Lal et al., 2007; Scopel et al., 2005a) et permettraient une production agricole durable en milieu tropical. En effet, ce type de région se caractérise par des sols généralement pauvres, de fortes intensités pluviométriques, et donc des processus de dégradation naturelle de la fertilité des sols particulièrement prégnants en conditions agricoles.

Toutefois, dans les conditions tropicales humides et subhumides, si les SCV sont efficaces pour réduire le ruissellement (Lal et al., 2007; Scopel et al., 2005a), ils augmentent aussi l'eau infiltrée pouvant entraîner ainsi l'augmentation du drainage (Maltas, 2007; Scopel et al., 2004) au-dessous de la zone racinaire et par conséquent entraîner la lixiviation des nitrates. Des SCV particuliers, dits « SAMBAs » (systèmes agroécologiques multi-espèces à base d'annuelles en semis direct), dans lesquels la culture commerciale est partiellement associée en relais avec une plante de couverture, peuvent être techniquement intéressants pour réduire ces pertes en éléments minéraux. Les plantes de couverture peuvent piéger l'azote hors de portée de la culture principale (soit dans l'espace en profondeur, soit dans le temps en dehors des phases de consommation principale) et contribuer ainsi à corriger ce désavantage des SCV en réduisant les pertes d'éléments minéraux tels que les nitrates. De même, l'anticipation du semis de la plante de couverture dans la culture principale permet de mieux

valoriser la période entre les deux cultures tout en s'adaptant à une saison des pluies souvent trop courte pour supporter deux cultures en succession (Gliessman, 1997).

Avec les SAMBAs, on cherche à optimiser la production de grains et de biomasse dans des cultures recevant peu d'intrants minéraux et non irrigués, par une meilleure valorisation de l'ensemble des ressources disponibles. Ainsi une partie de cette biomasse produite pourra être valorisée économiquement (que ce soit au travers de grains ou au travers de fourrages) et permettre de garder une quantité suffisante de paille pour couvrir les sols et réduire leur érosion. L'attractivité économique et la faisabilité technique sont en effet des éléments vitaux pour la bonne acceptation par les petits producteurs de systèmes alternatifs complexes comme les SAMBAs (Triomphe, 1999).

Dans plusieurs régions du monde, l'intégration de l'agriculture et de l'élevage permet plus de diversification des sources de revenus et moins de risques de pertes de production (Kohun and Waramboi, 2001; Mpairwe et al., 2002). Dans les Cerrados Brésiliens les petits agriculteurs s'orientent de plus en plus dans l'intensification de la production laitière (Gastal et al., 2003), en marge des gros producteurs de grains des plateaux environnants. Ainsi, l'alimentation du bétail et la production fourragère sont des questions d'une grande importance dans la durabilité des systèmes dans la zone. Le maïs est l'une des cultures les plus importantes : principalement utilisé pour l'alimentation des porcs et de la volaille destinés à la consommation des ménages, il contribue aussi à l'alimentation humaine directe et à la ration énergétique du troupeau laitier (Gastal et al., 2003; Oliveira et al., 2009). Les plantes de couverture, si elles sont également choisies pour leur valeur fourragère, peuvent aussi améliorer l'autonomie des exploitations agricoles pour l'alimentation des vaches laitières. L'introduction de systèmes en relais chez les petits producteurs permettrait donc d'intensifier l'utilisation des terres tout en étant peu dépendants en intrants extérieurs en valorisant au mieux les ressources naturelles disponibles sur l'exploitation (Pinchinat et al., 1976).

Les SAMBAs ainsi conçus sont des systèmes où les espèces sont associées et cohabitent pendant une partie de leur cycle, pour une meilleure optimisation de l'utilisation des principales ressources (eau, azote et rayonnement) pendant la saison agricole. Par contre les relations entre espèces dans l'association partielle peuvent donner lieu à des interactions positives ou négatives qu'il convient de caractériser afin de mieux les gérer en fonction des objectifs principaux des producteurs.

Ce travail de thèse porte sur la culture du maïs en semis direct comme culture principale, associé en relais avec deux types de plantes de couverture, *Cajanus cajan* (légumineuse) et *Brachiaria ruziziensis* (graminée), semées à différentes dates au sein du maïs. Ces deux

espèces ont été choisies pour leur potentiel fourrager, leur bonne adaptation à la région et leur éventuelle complémentarité en termes d'exigences en ressources.

Dans la suite du document on appellera SAMBA un système en semis direct sous mulch avec culture en relais d'un maïs et d'une plante fourragère.

L'objectif de la thèse est de caractériser et de modéliser le partage simultané de trois ressources déterminantes de la production de biomasse (eau, azote et rayonnement) dans les systèmes de semis direct en relais et leurs conséquences sur la productivité globale (de la culture principale et de l'ensemble du système) et sur les flux d'eau et d'azote dans le sol.

Le document se compose de cinq chapitres. Le premier présente une analyse de l'état des connaissances utiles à la compréhension des systèmes de culture sous couverture végétale et des associations de cultures en général. On se focalise en particulier sur les associations en relais sous semis direct, débouchant ainsi sur la problématique de la thèse, les questions posées et les hypothèses testées. Au second chapitre, nous exposons les résultats expérimentaux sur les performances des SAMBAs, maïs-plante de couverture (*Cajanus cajan* et *Brachiaria ruziziensis*). Certains de ces résultats expérimentaux servent ensuite au travail de calage et d'évaluation du modèle STICS-CA, exposé dans le chapitre 3. Le chapitre 4 présente les résultats de l'application des SAMBAs étudiés en parcelles de producteurs, dans une diversité de conditions pédoclimatiques et de gestion. Enfin, le cinquième synthétise et discute les résultats obtenus et analyse les limites et les perspectives de ce travail.

Chapitre 1 : Etude bibliographique et Problématique

1. Contexte

Les Cerrados, avec leurs paysages naturels de savanes tropicales, représentent le second écosystème du Brésil en termes de superficie, après celui de la forêt Amazonienne (www.ibge.gov.br). Ils sont situés sur le plateau Central au Centre-Ouest du pays et occupent plus de 200 millions d'hectares soit 24 % du territoire national (www.ibge.gov.br). Le climat est de type sub-tropical humide. Il se caractérise par une saison humide chaude s'échelonnant d'Octobre à Avril, suivie par une saison sèche bien marquée, qui ne reçoit que 15% du total annuel des précipitations. Les précipitations moyennes annuelles sont d'environ 1300 mm, avec des pluies de forte intensité pendant la saison humide, qui peuvent atteindre 100mm.h⁻¹. La température moyenne annuelle est de 21°C.

Les immenses plateaux de cette région présentent des sols aux propriétés physiques très favorables à l'agriculture mécanisée mais qui sont naturellement peu fertiles et très acides. Cependant, les techniques de correction de l'acidité et de la déficience naturelle en calcium et phosphore des sols grâce au chaulage et aux amendements chimiques ont permis de faire de la région une zone à haut potentiel agricole. C'est particulièrement net dans les domaines de l'élevage bovin et de la production de grains (soja, maïs...) grâce à une très forte mécanisation et une importante utilisation d'engrais. Cette intensification est surtout le fait d'exploitations entrepreneuriales, hautement capitalisées et couvrant généralement plusieurs milliers d'hectares.

1.1. Agriculture familiale, Réforme agraire et Projet Unai dans les Cerrados

La répartition et l'accès à la terre sont assez inégaux dans le secteur agricole du Brésil, et ont toujours soulevé des problèmes et engendré de nombreux conflits à travers l'histoire du pays. D'après les données de l'IGBE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas), en 1985, 53% des exploitations ayant moins de 10 hectares chacune, se partageaient seulement 3% des terres alors qu'un peu plus de 1% des exploitations supérieures à 100 hectares disposaient à elles seules de 44% des terres. Ces inégalités n'ont cessé de s'accroître avec la conquête de nouvelles terres en Amazonie et dans les Cerrados. Aujourd'hui les « grands » producteurs, avec seulement 12 % des exploitations (soit 550 000 sur un total de 4 900 000 dans l'ensemble du le pays), occupent 68% de la surface cultivée et produisent 61% de la valeur

nationale de la production agricole (Caron et Sabourin, 2003 cité par Schaller, 2007). A l'inverse, les 4 150 000 exploitations d'agriculteurs familiaux (soit plus de 84% de l'ensemble des exploitations) n'occupent que 30 % des surfaces cultivées (INCRA/FAO, 2000 ; IGBE, 1996, cités par Schaller, 2007). Ces derniers ne reçoivent que 11 % du crédit rural total, et contribuent à 38 % de la production nationale totale. L'agriculture familiale, avec moins de crédit et peu de surface, est ainsi plus efficiente que la grande agriculture en terme d'usage de la terre et du capital (Guanziroli, 1998; Souza Martins, 2000).

Les spéculations sur le foncier commencèrent au Brésil dès 1850, avec la « loi des terres ». Cette loi consistait à vendre la terre par des enchères publiques. Cette politique de distribution des terres a favorisé essentiellement les « grands » exploitants, les plus fortunés et les personnes les plus influentes politiquement. A partir de la seconde moitié du vingtième siècle, le gouvernement stimula financièrement la modernisation de l'agriculture en introduisant la mécanisation et l'expansion des grands domaines pour un élevage extensif ou de la monoculture. Cette politique favorisa alors les grandes entreprises agricoles tournées vers l'exportation, qui s'approprièrent la majorité des terres, entraînant parfois « l'évacuation forcée » des populations de la campagne (Gonçalves, 2004). Les conséquences de ces mouvements migratoires furent l'apparition des revendications paysannes débouchant au début des années soixante sur une crise agraire devenant de plus en plus grave (Théry, 2000). L'arrivée au pouvoir de la dictature militaire en 1964, soutenue par les grands propriétaires terriens, a accentué les inégalités jusqu'en 1985. Ce contexte a entraîné des mécontentements de plus en plus soutenus et la création de mouvements sociaux pour l'accès à la terre, dont le plus important a été le MST (Mouvement des travailleurs ruraux Sans Terre). Il s'agit d'un regroupement de tous les petits agriculteurs, des travailleurs agricoles ainsi que de tous les autres ruraux qui se sentaient lésés par cette « distribution » inégale des terres. La violence fut un des moyens souvent utilisés par les « sans terre » pour dénoncer cette inégalité et faire basculer le rapport de force. C'est ainsi que l'INCRA a été créé en 1970, et marqua le début de la redistribution officielle des terres agricoles ou réforme agraire. Les bénéficiaires de cette réforme font partie des principaux acteurs de l'agriculture familiale, l'autre partie étant les producteurs dits « historiques », installés depuis longtemps sur leurs terres, avec une tradition agricole importante.

Les exploitations d'agriculteurs familiaux accèdent difficilement aux crédits et emploient cependant plus de 80% de la population rurale (Caron et Sabourin, 2003; INCRA/FAO, 2000 cités par Shaller, 2007). C'est pourquoi, il apparaît aujourd'hui crucial d'assurer la viabilité socioéconomique de ce type d'agriculture afin de freiner les mouvements massifs de

population rurale pauvre et peu qualifiée vers les grands centres urbains. Les années 1980 et 1990 ont en effet été marquées par une réorientation des politiques agricoles vers la prise en compte des petites et moyennes exploitations. En 1993, s'inspirant de résultats encourageants de projets de recherche développement menés par l'EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) avec le CIRAD (Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement), notamment le projet Silvânia conduit dans les Cerrados (Bainville et al., 2005), le gouvernement met en place un programme de soutien à l'agriculture familiale, le PRONAF (Programme fédéral de fortification de l'agriculture familiale). Ce programme organise le crédit, permettant notamment, dans le cas des agriculteurs issus de la réforme agraire, la mise en place des infrastructures de base (construction de la maison et initiation de la production et le lancement des premières cultures). L'accompagnement reste encore faible, cependant les petits producteurs sont installés dans les assentamentos¹ après avoir bénéficié de la redistribution (encore en cours) des terres où ils s'organisent souvent en associations d'assentados² facilitant ainsi les rapports avec les autorités et les institutions publiques.

C'est dans ce contexte politique de prise en compte croissante des petits producteurs dans le développement agricole que l'Embrapa développe son programme de recherche consacré à l'agriculture familiale et s'intéresse davantage aux agriculteurs issus de la réforme agraire. Depuis 2002, le « projet Unai » articule à la fois les thématiques d'organisation de l'agriculture familiale et de mise en place des innovations techniques, et notamment à partir de 2004 avec le CIRAD, sur l'adaptation des systèmes SCV à l'agriculture familiale au travers notamment des SAMBAs. Le projet développe une démarche participative, avec l'organisation de réunions collectives (agriculteurs et chercheurs) afin d'identifier les problèmes et les solutions potentielles. Il comporte une forte composante « Gestion de la durabilité des ressources naturelles et de la fertilité des sols ». En effet, dans les Cerrados brésiliens les sols sont généralement pauvres (sols ferrallitiques dessaturés), drainant et friables malgré leur richesse en argile (15 à 80%) et peuvent être soumis à d'important phénomènes d'érosion (Reatto, 1998). Dans les assentamentos de la région on rencontre des productions agricoles sur trois types de sol très différenciés au niveau physico-chimique : les « *Latossolos Arenoso* », sols ferrallitiques sableux très peu fertiles et à texture sableuse ; les

¹ *Assentamento* : occupation de terre légalisée et reconnue par l'Etat, dans le cadre de la réforme agraire.

² *Assentado* : terme désignant les agriculteurs installés dans l'assentamento.

« *latossolos* » classiques, sols ferrallitiques très argileux, avec une acidité marquée et une minéralisation réduite ; et les « *terras de cultura* », sols alluviaux colluviaux restructurés de bonne fertilité et teneur en matière organique (Schaller, 2007). Le climat est pluvieux et chaud dans cette partie des Cerrados, et entraîne donc des processus de dégradation naturelle de la fertilité particulièrement importants en conditions agricoles (érosion + minéralisation rapide de la matière organique).

Maïs, canne à sucre et riz sont les espèces les plus importantes dans les systèmes de cultures de l'agriculture familiale des assentamentos. Cependant, la productivité reste faible, 2.3 et 1.1 tonnes/ha respectivement pour le maïs et le riz. Le maïs est la culture la plus importante en termes de surface (44%), et 70% des agriculteurs cultivent le maïs dans leur exploitation. Aussi, 67% des producteurs de la réforme agraire interrogés lors d'un questionnaire considèrent la culture du maïs comme la plus importante dans le système de production (Gastal et al., 2003). L'essentiel de la production (78%) est destinée au petit élevage (poules et porcs) de consommation ménagère (Gastal et al., 2003). Ce contexte justifie l'importance du maintien de sa production dans l'exploitation, d'autant plus qu'il occupe aussi les terres les plus fertiles. Par ailleurs, les systèmes conventionnels de culture du maïs rencontrent plusieurs limites reconnues par les producteurs, dont les plus importants sont : l'accès limité aux équipements de travail du sol et de préparation de lit de semence, des dates de semis tardives, le contrôle des mauvaises herbes, les problèmes de fertilité des sols et l'accès aux intrants et au crédit (Oliveira et al. 2009; Schaller, 2007; Scopel et al., 2005b; Silva et al. 2009). Ces problèmes compromettent le développement économique et social des familles, la durabilité de la production et rendent légitime la recherche d'alternatives tels que les systèmes de types SAMBAs qui visent à réduire la dépendance du travail du sol et des phénomènes de dégradation de la fertilité qui lui sont liés.

Le développement des semoirs à semis direct et du rouleau couteau à traction animale, et des pulvérisateurs manuels portés ou tractés, a permis entre autres le développement de SCV pour les petits producteurs (le rouleau couteau par exemple permet un contrôle mécanique des adventices et de mieux gérer les plantes de couvertures). Une diffusion encadrée par les structures de recherche-développement a donné lieu à une diffusion chez les petits agriculteurs du sud du pays.

Pour l'agriculture familiale, la production de biomasse est très importante et est vivement souhaitée, pour à la fois assurer une couverture du sol, un affouragement durant les périodes de soudure et réduire ainsi la dépendance extérieure des agriculteurs pour l'alimentation animale. En effet, grâce au développement de la filière lait dans la région, les petits

agriculteurs de la région se tournent de plus en plus vers des systèmes orientés vers une intensification laitière, qui nécessitent aussi une intensification fourragère. D'où la pertinence des systèmes de type SAMBAs, où, en plus d'une réduction des processus de dégradation de la fertilité, la culture principale est partiellement associée en relais avec une plante de couverture, ayant une valeur fourragère non négligeable. La plante de couverture permet ainsi à la fois une couverture permanente du sol le long de l'année et notamment de la période pluvieuse, une meilleure utilisation des ressources du milieu et une amélioration de la fertilité. Elle peut contribuer aussi à réduire la dépendance externe des agriculteurs en matière d'intrants en fertilisants, en pesticides et en affouragement. On peut attendre de tels systèmes qu'ils améliorent l'efficacité de l'utilisation des ressources disponibles et la durabilité de la production du maïs dans les systèmes de productions de l'agriculture familiale.

1.2. Systèmes de semis direct sous couverture végétale (SCV)

1.2.1. Historique, définition

En agriculture conventionnelle, la préparation du sol est mécanisée et les résidus de cultures sont enfouis ou exportés. Le sol est donc fragilisé et sans protection, pouvant entraîner ainsi des problèmes d'érosion, de perte de matière organique, de compaction, etc. En zones tropicales, cette pratique est peu accessible aux petits producteurs, qui n'ont pas un accès direct à des tracteurs et n'est généralement pas durable de par la forte dégradation de la fertilité du sol et la consommation d'intrants qu'elle entraîne. La suppression du travail du sol est donc une solution intéressante pour réduire l'érosion et la dépendance aux machines. Le semis direct sous couverture végétal est un système de culture dans lequel la plante principale est semée directement dans un sol non travaillé et couvert de façon permanente par des végétaux, résidus morts ou plantes vivantes. La réussite des SCV est donc en partie liée à la quantité de résidus de la culture précédente. Le semis est réalisé à l'aide d'outils spéciaux capables de découper ces résidus et d'ouvrir un sillon pour y placer la semence.

Au Brésil, l'intensification de l'agriculture au XXème siècle a été accompagnée par d'importants phénomènes d'érosion et de pertes d'éléments minéraux. Les nouvelles techniques de semis direct sont donc massivement adoptées pour limiter les problèmes d'érosion vers les années 1970. Dans les Cerrados Brésiliens son adoption commence vers les années 1980. S'ajoute à la limitation des problèmes d'érosion, la diminution des coûts de production consécutive à la suppression du labour (diminution du temps de travail et de la consommation d'énergie) comme élément décisif pour l'adoption de ces systèmes chez les

gros producteurs de grains (Landers, 2001). Cependant la température et l'hygrométrie étant élevées dans cette région tropicale humide, la décomposition des résidus de culture y est très rapide. La protection du sol en surface par les seuls résidus de la culture principale est trop éphémère pour être efficace et la maîtrise de l'érosion reste partielle (Séguy et al., 1998). De nouveaux systèmes de semis direct adaptés à cet écosystème voient alors le jour. Ils sont basés sur l'intégration d'une seconde culture (fourragère ou commerciale) en succession pendant l'intersaison dont le but est la production d'une importante quantité de biomasse. Cette biomasse s'ajoute à la biomasse des résidus de la culture principale pour maintenir une couverture permanente du sol sur l'ensemble de l'année. Aujourd'hui, le Brésil compte plus 25,5 millions d'hectares cultivés en semis direct (Derpsch and Friedrich, 2009), dont 8 millions dans les Cerrados Brésiliens. Le système de semis direct est devenu la norme dans les grandes exploitations de grains de par son efficacité à réduire l'érosion et les coûts de production mais également de par la disponibilité de références technique efficace pour sa mise en place. Cependant, chez les petits agriculteurs de l'agriculture familiale de cette même région ces systèmes restent rarement pratiqués et ceci malgré les récentes adaptations techniques (semoir direct en traction animale, pulvérisateur propulsé, rouleau-couteau) mises au point dans le Sud du pays.

1.2.2. Les différents types de SCV et leurs avantages et inconvénients

Globalement on peut distinguer deux grands types de SCV selon la nature du couvert végétal et des espèces impliquées : systèmes à couverture morte de résidus de culture, et systèmes à couverture vivante soit permanente soit partielle (Séguy et Bouzinac, 1996).

Les systèmes à couverture morte:

La couverture du sol est assurée par un paillis de résidus issus soit de la culture principale précédente, soit d'une culture d'intersaison détruite par un herbicide avant le semis de la culture principale, soit de l'importation d'autres parcelles ou espaces environnants.

Les systèmes à couverture vivante permanente ou partielle:

La culture principale est semée sur la couverture vivante, qui est présente en permanence sur la parcelle. Elle est traitée à l'herbicide avant le semis de la culture principale pour réduire la compétition qu'elle pourrait exercer sur cette dernière. Après récolte de la plante principale, la plante de couverture est maintenue et sa croissance reprend pendant la période d'intersaison.

Les avantages agronomiques des SCV concernent principalement l'amélioration des conditions pédoclimatiques, qui peuvent entraîner d'importantes améliorations des rendements des cultures. Scopel et al (2005a) ont montré des augmentations importantes de rendement sous SCV, ceci tous les ans grâce à l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des ressources en eau et en éléments minéraux. Les SCV augmentent par exemple la fourniture d'azote à la culture commerciale sur le long terme (dizaine d'années) grâce à la minéralisation des résidus et à l'augmentation du pool d'azote organique (Balesdent et al., 2000; Maltas et al. 2009). Ce délai d'attente peut être source de réticence à leur adoption chez les petits producteurs. Il faut donc des systèmes efficaces à court terme. De plus, en l'absence de plante de couverture les SCV accentuent le drainage et la lixiviation des éléments minéraux (Maltas, 2007; Scopel et al., 2004; Scopel et al., 2005a) particulièrement en zones tropicales subhumides à humides. Scopel et al. (2004) montrent que sous SCV à couverture morte le drainage est augmenté en moyenne de 30 % par rapport aux systèmes conventionnels dans les Cerrados.

1.3. Associer en relais culture principale et plante de couverture en semis direct : les SAMBAs

En s'inspirant des écosystèmes naturels, pour concevoir des systèmes de culture innovants, le courant de l'agriculture mimétique (Lefroy et al., 1999) recherche une agriculture qui concilie productivité, stabilité et durabilité particulièrement chez les petits producteurs dépourvus de ressources. Les SAMBAs s'inspirent ainsi des principes écologiques d'association d'espèces pour favoriser les complémentarités et/ou les facilitations, tout en minimisant les compétitions entre espèces. Ils proposent des modifications par rapport aux systèmes de culture conventionnels, permettant de diminuer les facteurs de dégradation de la fertilité des sols, l'envahissement des mauvaises herbes, l'augmentation de la biodiversité et de l'activité biologique. Et mettant à profit les interactions entre espèces, les SAMBAs permettent de produire plus durablement et d'augmenter l'efficacité d'utilisation des ressources naturelles pour une agriculture plus respectueuse de l'environnement (Triomphe et al., 2007; De Tourdonnet et al., 2008).

Le semis de la plante de couverture peut être fait tout d'abord entre les lignes de la culture principale, une dizaine de jours après son semis et après qu'elle ait bien germé et bien levé (ou plus généralement qu'elle soit bien établie). La parcelle est donc assez dégagée et accessible pour un semis à traction animale ou manuel. Ce semis de la plante de couverture

peut se faire également dans l'inter-rang lors la réalisation d'une autre opération culturale par exemple lors du premier désherbage. La plante de couverture peut ainsi occuper l'espace laissé vide par la culture principale et contribuer à la réduction de la pression des mauvaises herbes par ombrage et/ou allélopathie (Alsaadawi and Dayan, 2009).

1.3.1. Rappels sur les différents types d'interactions entre plantes en communauté

Dans leur synthèse sur les interactions entre plantes en communauté, Callaway & Walker (1997) rapportent une synthèse de la littérature sur l'équilibre entre facilitation et compétition entre plantes en communauté. Ils résument que cet équilibre varie avec le stade de développement, la physiologie des espèces en interaction, les interactions indirectes avec les autres espèces voisines et l'intensité des stress abiotiques.

De façon plus générale, on parle de compétition lorsque que la présence de l'une des espèces a un effet négatif sur les performances de l'espèce voisine, que cet effet soit réciproque (compétition stricte) ou non (amensalisme) et on parle de facilitation lorsque cette présence a un effet positif sur l'espèce voisine, qu'il soit réciproque (mutualisme) ou non (commensalisme). Par exemple, Espigares et al. (2004) rapportent qu'au stade de régénération de *Retama sphaerocarpa* une légumineuse méditerranéenne arbustive, l'interaction entre la végétation herbacée et l'arbuste est négative pour l'arbuste en début d'automne du fait d'une demande en eau importante des herbacées. L'interaction est par contre positive pour les herbacées grâce à la mise à disposition de l'azote fixé par la légumineuse. D'autres auteurs suggèrent que les interactions biotiques passent d'un bilan négatif dans les milieux peu contraints à un bilan positif dans les milieux plus sévères ou le long de gradients de perturbation (Bertness and Callaway, 1994; Brooker and Callaghan, 1998; Saccone, 2007). Ce transfert de la compétition vers la facilitation se fait au travers de l'importance relative des interactions positives et négatives entre les plantes. En effet, les interactions observées entre les plantes sont en réalité le bilan net (ou la somme) des interactions positives et négatives entre les plantes (Callaway and Walker, 1997).

Ces interactions positives et négatives présentes entre des espèces en communauté, se retrouvent aussi dans les milieux cultivés en association entre espèces, de même que les effets de l'association sur l'environnement. Vandermeer (1989) définit deux situations pouvant conduire à des gains de productivité d'une association de culture: soit l'espèce A modifie positivement le milieu pour l'espèce B et du fait de cette modification, le rendement de l'espèce B dans l'association est plus élevé que dans le cas où elle est cultivée seule (productivité facilitée) ; soit l'espèce A modifie négativement le milieu pour l'espèce B, et du

fait de cette modification le rendement de l'espèce B est réduit dans l'association (productivité compétitive) mais globalement le rendement de l'association augmente car les espèces associées se complètent et utilisent plus efficacement les ressources du milieu (complémentarité).

1.3.2. Rappels sur les plantes de couverture et les principes des associations culturales dans les systèmes cultivés

L'introduction d'une plante de couverture a plusieurs effets sur le système et son environnement. La plante de couverture assure une couverture permanente du sol, en prolongeant le temps pendant lequel le sol est couvert par une végétation vivante. Ainsi elle permet de réduire les processus de dégradation et d'érosion mais aussi d'augmenter la teneur en matière organique du sol grâce à la restitution des résidus au sol (Bernoux et al., 2006; Erenstein, 2002; Lal et al., 2007; Scopel et al., 2004; Scopel et al., 2005a). Dans les systèmes associés, la plante de couverture peut aussi prélever l'eau et les éléments qui auraient échappés à la culture principale. Pour l'azote par exemple, la plante de couverture peut jouer un rôle de plante « piège à nitrates », en prélevant l'azote lixivié sous le front racinaire de la plante principale durant leur coexistence et le restituer ensuite au système pendant le cycle suivant, contribuant ainsi à réduire les pertes de nitrates par lessivage (Hauggaard-Nielsen et al., 2003; Stroock et al., 2004; Tonitto et al., 2006).

L'insertion d'une plante de couverture peut également permettre de réduire la croissance et le développement des mauvaises herbes dans le système (Teasdale, 1996), en exerçant sur elles une compétition pour les principales ressources (den Hollander et al., 2007; De Tourdonnet et al., 2008) par exemple en réduisant la ressource en azote disponible dans le sol (Corre-Hellou, 2004), en occupant l'espace et en réduisant la rayonnement limitant la germination et la croissance des mauvaises herbes. Ainsi dans les milieux productifs, la présence d'une plante de couverture réduit la compétition entre la mauvaise herbe et la culture principale et facilite indirectement la plante principale (Brooker et al., 2008).

D'autres effets positifs peuvent être aussi cités, par exemple l'orge en association avec le pois exploite plus de couches de sol comparé à l'orge en culture pure (Hauggaard-Nielsen et al., 2001a). Cette propriété peut par exemple permettre, en conditions limitantes en eau, une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau aussi bien dans le temps que dans l'espace (Baker & Norman (1975) cité par Anil et al., 1998).

Des effets liés au transfert de l'azote fixé par la légumineuse vers la non légumineuse sont également possibles (Viera-Vargas et al., 1995; Xiao et al., 2004). Les sécrétions d'enzymes

extra cellulaires facilitant la disponibilité de certains éléments, ou encore l'effet acidifiant de certaines légumineuses fixatrices peuvent aussi être bénéfique pour les espèces associées en solubilisant les éléments P, K, Ca (Akinnifesi et al., 2007; Hauggaard-Nielsen and Jensen, 2005). Zhang and Li (2003), rapportent des interactions facilitatrices où la nutrition en fer du maïs est améliorée dans une association avec l'arachide, et où la fève augmente les prélèvements en azote et en phosphore du maïs associé.

Dans ces systèmes les risques de compétition limitant la croissance et la production de la culture principale, sont importants. Plusieurs études ont souligné des réductions de rendements de la culture principale en association avec une plante de couverture (Carof et al., 2007; den Hollander et al., 2007). Inversement une compétition trop forte de la culture principale en début de cycle de la plante de couverture peut affecter sa production de biomasse ou de grains de cette dernière. La nature des interactions entre composantes du système et la productivité de l'association dépendent de la morphologie, de la physiologie, de la densité et l'arrangement spatial des espèces associées, en relation avec les conditions environnementales et les techniques culturales (Anil et al., 1998; Connolly et al., 2001).

1.3.3. Avantages et inconvénients des SAMBAs

Les SAMBAs impliquent l'association en semis direct d'une culture principale et d'une plante de couverture sur au moins une partie de leur cycle. Les deux espèces sont semées à des dates différentes de façon à ce que la plante de couverture (souvent une pluriannuelle), prenne le relais de la culture principale lorsqu'elle arrive en fin de cycle. Les SAMBAs, permettent donc de couvrir l'ensemble de la saison pluvieuse. La plante de couverture continue son cycle après la récolte de la culture principale pour valoriser le reste de la période pluvieuse. Ces systèmes semblent donc encore plus efficaces que les SCV seuls pour la gestion et la valorisation des ressources à court terme, et plus avantageux pour des petits producteurs très démunis. Ils apparaissent ainsi comme une solution technique prometteuse pour une production durable en milieu tropical, présentant des intérêts multiples pour les agrosystèmes cultivés. En effet de tels systèmes combinent à la fois les avantages des systèmes en semis direct avec couverture végétale en termes de préservation des ressources naturelles mobilisables et ceux des systèmes en cultures associées en termes de valorisation de ces ressources par le couvert cultivé.

Cependant, le semis décalé de la plante de couverture au sein du maïs peut constituer une demande de travail en plus dans l'exploitation où la main d'œuvre est souvent rare (Xavier et al., 2009), même s'il peut être réalisé en même temps qu'une autre pratique culturale comme

lors d'un désherbage par exemple. La plante de couverture peut aussi constituer un obstacle lors de la récolte de la plante principale en l'occurrence le maïs, toujours manuel, cet obstacle est souvent pris en considération par les agriculteurs comme critère d'évaluation importante de ces types de systèmes de culture (Xavier et al., 2009).

1.3.4. Productivité des associations de culture en relais

Les raisons avancées pour la pratique des associations de culture résident le plus souvent dans le gain de rendement global, mais aussi la stabilité de la production, la réduction des risques par rapport aux cultures pures (Hauggaard-Nielsen et al., 2001b; Jensen, 1996; Li et al., 1999; Tsubo et al., 2005). Ceci est en particulier vrai pour les associations céréales-légumineuses et pour les systèmes à bas niveaux d'intrants azotés. Aussi plusieurs études du fonctionnement des systèmes associés montrent qu'il y a une meilleure valorisation des ressources du milieu par rapport aux cultures pures, entraînant une productivité supérieure de l'association par unité de surface cultivée (Hauggaard-Nielsen et al., 2003; Hauggaard-Nielsen et al., 2009; Jensen 1996).

Ces avantages peuvent s'expliquer par le fait que les espèces associées ont des niches différentes ou n'utilisent pas les mêmes sources d'azote par exemple, et par conséquent utilisent de façon complémentaire les ressources (Li et al., 1999; Hauggaard-Nielsen et al., 2001a). Les céréales semblent plus compétitives pour l'azote minéral du sol que les légumineuses à graines comme le pois (Jensen, 1996; Corre-Hellou et al., 2006), conduisant la légumineuse dans l'association à augmenter la part de son azote provenant de la fixation symbiotique (Li et al., 2009). En outre, par exemple une meilleure efficacité d'interception du rayonnement par l'association en comparaison avec les cultures pures peut expliquer leur productivité globale plus élevée. En effet, des complémentarités de port architectural (Tsubo et al., 2001; Tsubo and Walker, 2004) ou racinaire (Corre-Hellou and Crozat, 2005) entre les deux espèces peuvent exister, permettant ainsi une occupation de l'espace plus dense et une meilleure exploitation des ressources du milieu.

La plupart des études sur les performances des associations d'espèces en agronomie se sont intéressées aux mesures de rendement des espèces ou du système et ont donné lieu à plusieurs indicateurs (Anil et al., 1998). Ainsi, l'indicateur de la production des mélanges d'espèces le plus souvent utilisé, est le LER (Land Equivalent Ratio). Pour calculer le LER, il faut faire la somme des fractions des rendements de chaque espèce dans l'association divisée par les rendements des cultures pures correspondantes :

$$LER = \sum_i \left(\frac{\text{Rendement association}_i}{\text{Rendement pure}_i} \right) = \sum_i (\text{Rendement relatif}_i)$$

où i est la culture concernée.

Le LER compare la production des cultures associées et celle de leur équivalent en culture pure, à surface totale égale (Mead and Willey, 1980), et correspond à la surface nécessaire pour obtenir à partir des deux cultures pures, la même production qu'en association. Une valeur de LER supérieure à 1 indique un avantage du mélange d'espèces par rapport à une conduite de chaque espèce séparément en culture monospécifique, avec une meilleure utilisation des ressources dans l'association. Pour prendre en considération la durée du cycle (du semis à la récolte) dans le cas où les espèces associées ont des durées de cycles très différentes, une variante du LER, appelée ATER (Area Time Equivalent Ratio) peut être appliquée (Hielsch and McCollum, 1987). L'ATER prend en compte la durée du cycle de chaque espèce :

$$ATER = \sum_i i(\text{rendement relatif}_i * (\frac{T_{p_i}}{T_a}))$$

avec T_{p_i} =Durée de la culture pure i et T_a = Durée de l'association.

Une valeur d'ATER supérieure à 1 indique une meilleure efficacité d'utilisation de l'espace et du temps de l'association comparé aux cultures pures.

D'autres indicateurs, tels que « Aggressivity » (Willey and Roa, 1980 cités par Li et al., 2001) qui mesure la compétition interspécifique dans une association par rapport à la modification de rendement des de chacune des espèces, le « Nutrimet competitive ratio » (Li et al., 2001; Morris and Garrity, 1993), qui mesure la capacité de prélèvement des éléments minéraux (N, P et K) d'une espèce par rapport à une autre dans une association. Ces deux indicateurs peuvent aussi aider à comprendre les interactions, facilitation et compétition. Li et al., (2001), mettent en évidence une facilitation interspécifique sur le prélèvement d'éléments N et K dans des associations blé-maïs et blé-soja au cours de leur cycle de développement, en comparant les prélèvements de l'ensemble de l'association à ceux de la moyennes pondéré des prélèvements par les cultures pures (la moyenne pondérée tient compte du prélèvement de chaque culture pure et de la proportion de surface qu'elle occupe dans l'association).

1.3.5. Besoins de modéliser les SAMBAs

La figure 1.1 décrit le schéma général retenu pour étudier le fonctionnement des associations maïs-plante de couverture. Le schéma prend en compte à la fois le partage de l'eau, l'azote et

du rayonnement ainsi que les interactions entre ces trois processus sont pris en compte. Ces interactions entre espèces associées sont des phénomènes complexes et dynamiques, qui comprennent à la fois des mécanismes de compétition pour les ressources (rayonnement, eau, nutriments), mais aussi des mécanismes de facilitation lorsqu'une espèce modifie l'environnement de façon positive pour l'espèce voisine. Elles interagissent à la fois au niveau aérien pour l'interception du rayonnement et au niveau souterrain pour le prélèvement de l'eau et des éléments minéraux. Ces interactions dépendent des espèces associées et influencent fortement les performances de l'association en rendement grain et en biomasse totale, mais aussi les conséquences sur l'environnement, en termes de flux d'eau et d'azote dans le sol. Le choix des espèces de couverture est donc crucial ainsi que leur gestion. La compréhension et la quantification de ces interactions et leurs conséquences sur la productivité de chaque espèce est toutefois complexe et leur évolution dans le temps les rendent difficiles à appréhender complètement par seules mesures directes par voie expérimentale, le recours à la modélisation est souvent nécessaire (Caldwell, 1995; Malézieux et al., 2009) en complément à l'expérimentation.

Les modèles de cultures permettent donc sous certaines conditions une meilleure prise en compte de l'évolution des interactions au cours du temps, et une quantification moins coûteuse en temps et en argent de la dynamique des flux de ressources et de leur répartition plusieurs espèces associées. Et peuvent servir ainsi à partir d'expérimentations virtuelles à extrapoler des résultats expérimentaux obtenus dans un nombre limités d'environnements, à d'autres conditions de milieu ou de gestion (Launay et al., 2009; Tsubo et al., 2005a).

1.4. Modélisation des cultures associées

1.4.1. Généralités sur les modèles de cultures associées

Plusieurs modèles de simulation des associations de cultures existent dans la littérature. Des modèles empiriques utilisent des relations mathématiques simples avec peu de paramètres permettant de calculer le rendement d'associations d'espèces cultivées (Vandermer, 1986). Ces modèles ont peu de détails sur les processus écophysologiques, et ne permettent pas de décrire une diversité des situations pédoclimatiques, car ils ne caractérisent pas les effets du milieu. L'utilisation de ces modèles dans des situations différentes de celles où ils ont été mis au point est par conséquent difficile. Les modèles mécanistes se distinguent des modèles empiriques par la prise en compte plus détaillée des processus écophysologiques dans les systèmes simulés. Ils permettent de simuler de façon dynamique la compétition pour les

ressources entre espèces en relation avec les états du milieu. Et nécessitent donc plus de paramètres et de variables d'entrée. S'ils sont correctement paramétrés ces modèles mécanistes sont plus précis en termes de prédiction des performances des associations dans une large gamme de situations (Tsubo et al., 2005a; Baumann et al., 2002a; Jensen, 2006; Whitmore and Schröder, 2007).

Les modèles des associations d'espèces cultivées (Tableau 1.1) incluent des associations adventices/cultures, herbes-trèfles, céréales-légumineuses et arbres/cultures (Brisson et al., 2004; Kpnoff et al., 1993; Tsubo et al., 2005a). Ils simulent les processus de développement et de compétition pour la lumière, l'eau, et les nutriments, donc des interactions abiotiques et du partage des ressources entre espèces associées (Berntsen et al., 2004; Tsubo et al., 2005a; Corre-Hellou et al., 2007), ainsi que la performance des associations (Baumann et al., 2002b; Jensen, 2006; Whitmore and Schröder, 2007). D'autres modèles plus écologiques intègrent en plus les relations de facilitation en communautés d'espèces (Brooker et al., 2008).

Dans sa synthèse des modèles de simulation des cultures associées, Caldwell (1995) liste 19 modèles de simulations des systèmes associant plusieurs espèces à des pas de temps journalier ou inférieur. Certains modèles comme GROWIT (Lowenberg-DeBoer et al., 1991) sont des modèles plante modifiés pour simuler une association. GROWIT ne simule que la compétition pour la lumière et l'eau et contient peu de détails sur les processus écophysologiques qui sont pris en compte. Les autres modèles simulent tous les compétitions pour l'eau, l'azote et la lumière (Tableau 1.1). Les modèles ALMANAC (Kiniry et al., 1992) et Ecosys (Grant, 1992) simulent en plus la compétition pour le phosphore. Le modèle EPIC (Williams, 1995 cité par Gaiser et al., 2010) incorpore le modèle Century pour la simulation de la dynamique de la matière organique.

La majorité des modèles de simulation des associations de cultures fonctionnent au pas de temps journalier. INTERCOM (Kropff and Laar, 1993) et Ecosys (Grant, 1992) ont un pas de temps plus court.

STICS-CA (Brisson et al., 2004) est une version améliorée de STICS (Brisson et al., 1998) pour la simulation des cultures associées, dans lequel une adaptation d'un certain nombre de module spécifiques permet de prendre en compte l'utilisation des ressources (rayonnement, eau, et azote) par le système. Le pas de temps est journalier.

Tableau 1.1 : Description de quelques modèles de simulation des espèces associées (adapté de Caldwell, 1995).

Modèle	Référence	Nbres d'espèces	Compétitions pour les ressources			Pas de temps	n couches de sol	n strates de couvert
			Eau	N	Lumière			
GROWIT	Lowenberg-DeBoer et al., 1991	2	x		x	jour		
ALMANAC	Kiniry et al., 1992	n	x	x	x	jour		
CROPSYS	Caldwell and Hansen, 1993	2	x	x	x	jour	x	
STICS-CA	Brisson et al., 2004	2	x	x	x	jour	x	
INTERCOM	Kropff and Laar, 1993	n	x	x		Jour/ou moins		x
Ecosys	Grant, 1992	n	x	x	x	Heure/ou moins	x	x
EPIC	Williams, 1995	n	x	x	x	jour	x	

1.4.2. Le choix du modèle STICS

Le choix de l'outil de modélisation est une étape importante pour la modélisation des SAMBAs. Le modèle STICS est utilisé pour une large gamme de cultures pures (Brisson et al., 1998) et aussi adapté pour simuler le fonctionnement des cultures associées (Brisson et al., 2004). Il permet de simuler la compétition pour la lumière, l'eau et l'azote entre espèces avec un pas de temps journalier. Par son caractère générique, STICS peut être adapté à un grand nombre de cultures en faisant des choix de formalismes adéquats.

D'autre part, le modèle STICS a fait l'objet de plusieurs travaux pendant ces dernières années sur son paramétrage et son adaptation dans le contexte des Cerrados (Affholder et al., 2003; Macena da Silva, 2004; Maltas, 2007; Motisi et al., 2010; Scopel et al., 2004).

STICS 6, est une version améliorée de la version culture associée à partir de ces travaux. Cette version intègre les effets du paillis sur les bilans hydrique, azoté et thermique sur la base des travaux de Scopel et al. (1998) et Scopel et al. (2004) notamment et ces modifications ont été validées dans le contexte des Cerrados (Macena da Silva, 2004). Le module bilan d'énergie et microclimat du modèle est probablement le plus complet et le plus complexe comparé aux autres modèles. Il s'appuie sur les travaux de Shuttleworth and Wallace (1985, cités par Brisson et al., 2004), pour calculer la demande en eau de chaque espèce associée.

2. Objectif et démarche de l'étude

2.1. Objectif de l'étude

L'analyse précédente suggère que les SAMBA à base de maïs et de plantes fourragères en relais pourraient accroître la production de grains et de fourrage tout en préservant les ressources en sol chez les petits producteurs des Cerrados. Toutefois, le partage des ressources et la production des systèmes de culture de maïs associée en relais avec une plante de couverture fourragère telle que *Cajanus cajan* ou *Brachiaria ruziziensis* sont très peu connus dans ce contexte. D'un côté, la productivité par unité de surface peut augmenter dans une association de cultures, si on compare aux cultures pures (Willey, 1979). Mais d'un autre côté, les compétitions pour les principales ressources eau, azote et lumière peuvent être très importantes et peuvent réduire le rendement de la culture principale, mais aussi la production de biomasse de la plante de couverture.

Dans le cas de notre étude, il s'agit de prendre en considération le comportement global du système associé, modifié par les différentes interactions, et de voir les conséquences en conditions de faible utilisation d'intrants sur la performance du maïs d'une part, en termes de rendement grains, et de l'association dans son ensemble d'autre part, en termes de biomasse totale. Une meilleure compréhension du fonctionnement complexe de ces systèmes permettrait de mieux définir leurs intérêts potentiels pour l'agriculture familiale afin de mieux valoriser les ressources disponibles, et de définir des stratégies de gestion plus efficaces de ce type d'associations en semis direct.

L'objectif de ce travail est de mieux caractériser et de modéliser la dynamique de l'offre et de la demande des trois ressources principales (eau, azote et rayonnement) dans ces systèmes en relais et leurs conséquences sur la productivité (de la culture principale et de l'ensemble du système) et sur les flux d'eau et d'azote dans le sol.

2.2. Questions scientifiques

Nous en déduisons les questions suivantes qui seront abordées dans cette thèse (Figure 1.1) :

1. Est-ce que la dynamique de l'offre en eau et en azote est la même dans les SAMBA que dans les SCV sans culture relais ? Existe-t-il des facilitations et/ou des complémentarités

dans la disponibilité en eau et en azote à l'échelle du cycle de culture ou sur les cycles suivants (selon la nature et la quantité des biomasses restituées) ?

Hypothèse 1: *l'insertion d'une plante de couverture en relais augmente les performances du système grâce à un accroissement de la valorisation des ressources (eau, azote et rayonnement) disponibles pour le système.*

2. Comment se fait la répartition des ressources entre les espèces du système ? Les plantes de couverture exercent-elles une pression compétitive sur la culture principale à l'installation, ou à l'inverse supportent-elles sa domination durant le cycle de production ?

Hypothèse 2: *L'amélioration de la performance du système vient d'une meilleure valorisation du rayonnement à la fois par augmentation du coefficient d'interception global du couvert associé et par allongement de la période où il est intercepté par des plantes productives.*

Hypothèse 3: *L'amélioration de la performance du système vient également d'une meilleure valorisation de l'azote (effet précédent, allongement du cycle, effet recyclage des nitrates, fixation) et de l'eau (exploration du profil plus en profondeur). Cette modification dépend du type de plante de couverture.*

2.3. Démarche de recherche

Pour répondre à ces questions, la démarche générale adoptée (Figure 1.2) combine des expérimentations en station expérimentale pour tester les hypothèses ci-dessus et caler le modèle de culture, des expérimentations en parcelles paysannes pour élargir les conditions de test des hypothèses et d'évaluation du modèle puis des expérimentations virtuelles.

Ainsi le travail repose sur deux années expérimentales en plein champ 2007/08 et 2008/09, aussi bien en station expérimentale que dans un réseau de parcelles de petits producteurs sur trois localités distinctes. Pour chaque essai en station les associations sont comparées aux cultures pures correspondantes. Les expérimentations ont été menées en saison des pluies.

Dans un premier temps, les performances des associations en relais ont été étudiées en relation avec la compétition pour les ressources (eau, azote et rayonnement). Les résultats permettent de caractériser les performances de ces systèmes sur l'ensemble des expérimentations et de mettre en évidence le comportement des associations comparativement aux cultures pures.

Dans un second temps, la démarche consiste à caler et valider le modèle à partir des données issues du dispositif expérimental en station, pour deux systèmes particuliers (deux plantes de couverture sont semées au sein du maïs à différentes dates en semis direct), où les conditions de fertilisation, contrôle des mauvaises herbes, dates de semis, type de sol sont parfaitement contrôlées. Pour le calage du modèle, les observations sont réalisées sur certaines variables clef à différents moments durant le cycle de la culture.

Ce couplage expérimentation et modélisation est indispensable pour une représentation satisfaisante du système par le modèle et pour une quantification de certains flux non directement accessible à la mesure. Le modèle devrait ainsi aider à définir des stratégies d'organisation et de conduite de l'agrosystème afin de maintenir la production en grain du maïs par une minimisation des compétitions entre plante principale et plante de couverture. Et par ailleurs permettre d'augmenter la production de biomasse totale par une meilleure valorisation de l'ensemble des ressources, voire par l'accroissement des relations de facilitation sur l'azote (recyclage de la plante de couverture, fixation symbiotique de l'azote, restitution au système).

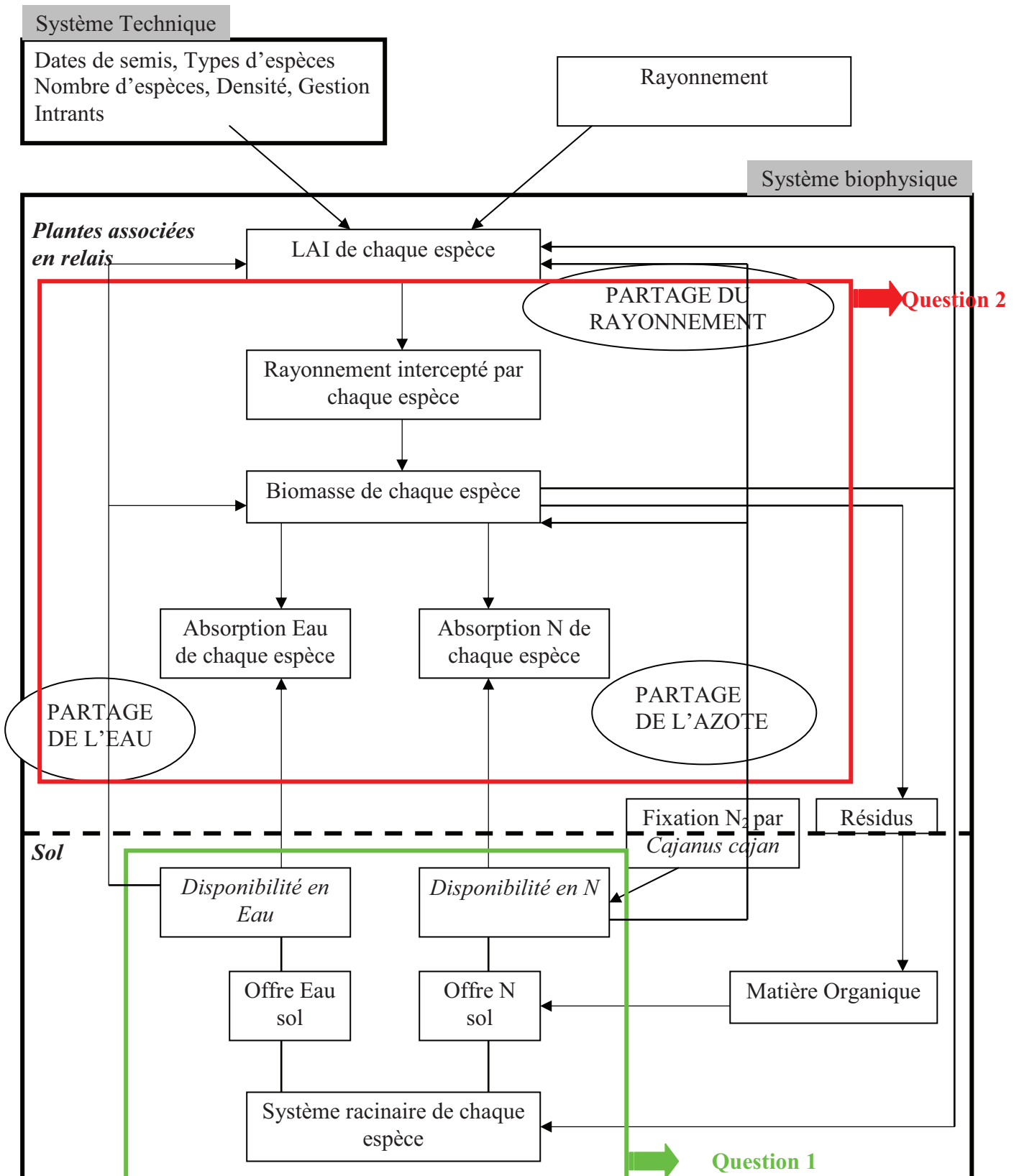


Figure 1.1 : Schéma conceptuel schématisant les principales questions de recherche.

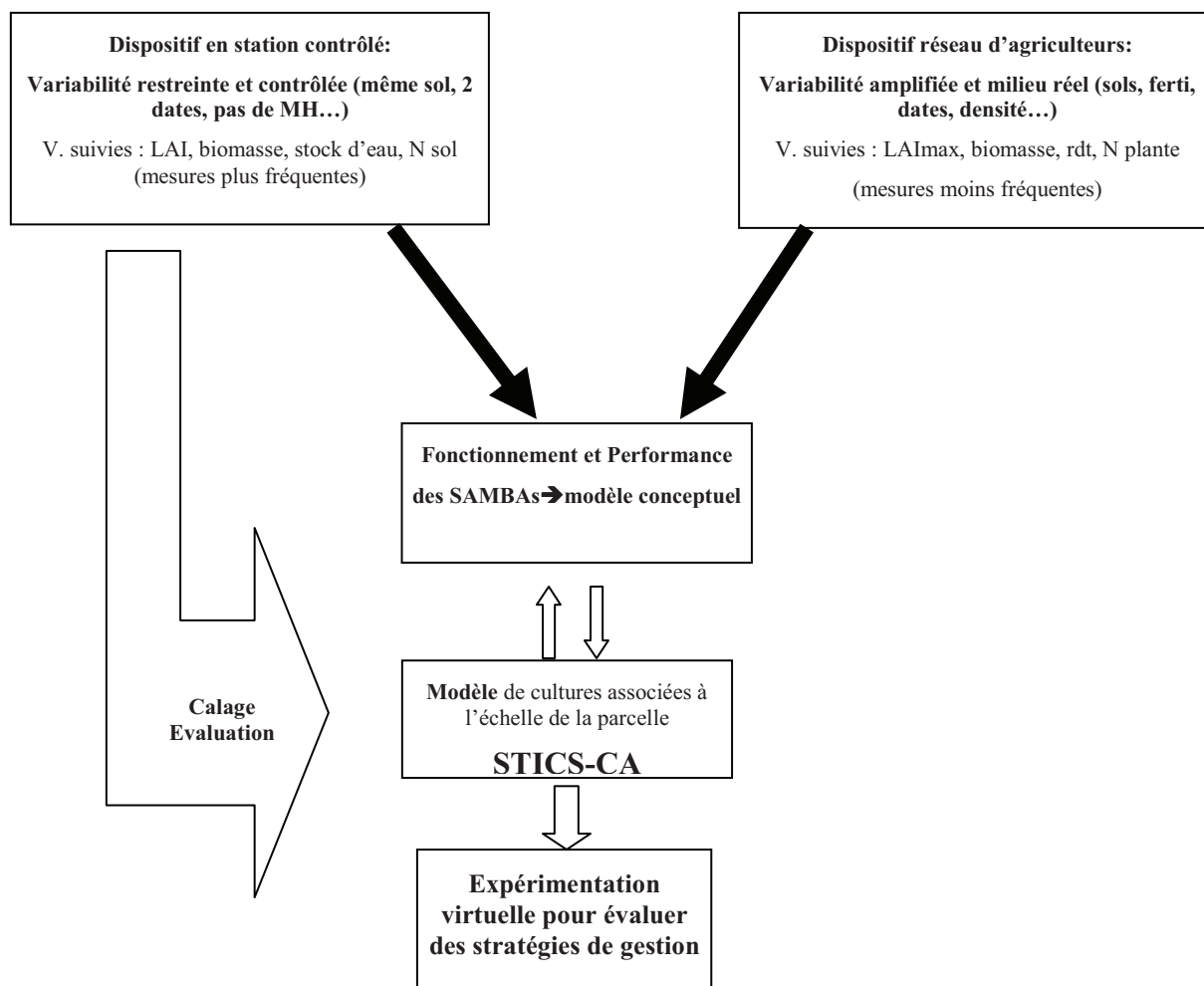


Figure 1.2: Méthodologie et démarche générale adoptées.

Le but final est de pouvoir définir des stratégies de gestion, pour cela, nous partons d'un modèle de culture qui représente bien le modèle conceptuel du fonctionnement des SAMBAs. Il s'agit de le caler et de le valider sur un dispositif expérimental contrôlé avec des mesures fines et fréquentes sur les variables LAI, biomasse, stocks d'eau, N sol.

Le Tableau 1.2 résume les différents critères utilisés pour tester chacune des 3 hypothèses posées ainsi que la contribution de chacun des 3 dispositifs pour tester ces hypothèses à l'aide de ces critères.

Le dispositif en station expérimentale permettra de répondre aux trois hypothèses à l'aide du critère de LER, cette partie sera traitée par le chapitre 2. Les résultats serviront en partie au calage et l'évaluation du modèle pour les SAMBAs.

Ensuite, le modèle caler et valider permettra de répondre aussi aux trois hypothèses à l'aide d'autres critères difficilement mesurable (les efficacités de conversion des ressources, le

LER, l'interception du rayonnement par espèce, les Flux d'azote entre compartiments du système, etc) et sera traité par le chapitre 3.

Enfin, le dispositif en parcelles producteurs permettra aussi de répondre à l'hypothèse 1 et 3, et sera traité par chapitre 4, et, pourra servir d'évaluation du modèle en parcelles producteurs. Ce dernier pourrait ensuite être utilisé dans des expérimentations virtuelles pour évaluer et définir des stratégies de gestions des SAMBAs.

Tableau 1.2 : Identification des critères utilisés pour tester chaque hypothèse de la thèse, et contributions de chacun des 3 dispositifs (Expérimentation contrôlée, Expérimentation parcelles paysannes, et modélisation) pour tester ces hypothèses à l'aide de ces critères.

	Expérimentation contrôlée	Expérimentation en Parcelles producteurs	Modélisation
H1 :	LER		Efficiences de conversion des ressources ; LER
H2 :	Interception totale		Interception par espèce
H3 :	Fixation, Restitutions (quantité et types des résidus), Stocks hydriques	Restitutions (quantité et types des résidus)	Flux entre compartiments ; Minéralisation

Chapitre 2. Agronomic performance of no-tillage relay intercropping with maize under smallholder conditions in Central Brazil

Article accepté à Field Crops Research

Alpha Bocar Baldé^{1*}, Eric Scopel¹, François Affholder¹, Marc Corbeels^{1,2}, Fernando Antonio Macena Da Silva², José Humberto Valadares Xavier², Jacques Wery³.

¹. CIRAD, UR 102 SCA, TA-B-102/02, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier, France.

². Embrapa Cerrados, P.O. Box 8223, Planaltina, DF, 73301-970, Brazil.

³. CIRAD-INRA-Sup Agro, UMR SYSTEM, Bat 27, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France.

*** Corresponding author: alpha-bocar.balde@cirad.fr**

Abstract

In the context of conservation agriculture on small scale farms of the Brazilian *Cerrado*, we hypothesized that planting a cover crop in relay with a commercial crop would improve the efficiency of use of available natural resources, increasing biomass for use as fodder without reducing the grain yield of the main crop. The objective of this study was to measure the performance in terms of total above-ground biomass production and maize (*Zea mays*) grain yield of two intercropped systems: pigeon pea (*Cajanus cajan*) and Brachiaria (*Brachiaria ruziziensis*) sown as cover crops in established maize under a no-tillage management. The cover crops were sown at two different dates and a comparison was made with the three crops sown as a sole crop at the early sowing date. The experiment was conducted during the 2007-2008 and 2008-2009 growing seasons. Maize yield was not reduced by the presence of the relay cover crops in comparison with maize as the sole crop, even when the cover crop was sown soon after maize emergence. In contrast, the production of above-ground biomass by the cover crop was significantly lower when grown with maize than it was when grown as a sole crop. In the intercropped systems, when sown early, the cover crop produced higher total biomass than when sown late. Total above-ground biomass production of maize intercropped with a cover crop was much higher than that of any of the crops sown alone: the total biomass (average of the two growing seasons) produced by maize and pigeon pea was more than double that of maize grown alone. The land equivalent ratio (LER) of maize grain yield and biomass production was higher than one whatever the intercrop system used. It was particularly high when maize was intercropped with early sown pigeon pea; grain yield LER and biomass LER reaching, respectively, 1.72 and 1.73 in 2007-2008 and 2.02 and 2.03 in 2008-2009. These high LER values provide evidence for the complementary and the high efficiency of use of available resources by the intercropped plants and thus the advantage of such systems to produce both maize grain and cover crop forage under the conditions of our study.

Keywords: competition, maize intercrop, cover crops, total biomass production, land equivalent ratio, relay cropping.

1. Introduction

Conservation agriculture (CA) is widely acknowledged to effectively reduce soil erosion, especially in tropical environments (Alberts and Neibling, 1994; Lal et al., 2007; Scopel et al., 2005). Typically, this is achieved through the use of a mulch of crop residues that protects the soil and acts as a barrier to water runoff (Findeling et al., 2003; Rao et al., 1998). However, under sub-humid tropical climate, the resulting increase in the amount of water that infiltrates into the soil often increases water drainage below the rooting zone (Scopel et al., 2004). As this is likely to lead to significant losses of nutrients, most CA specialists (e.g. Séguy et al., 1996) recommend that a cover crop is sown immediately after the commercial crop as a way of recycling nutrients from the lower part of the rooting zone up to the topsoil. This recommendation has proven to have merit for the intensive soybean (*Glycine max*) and maize (*Zea mays*) based cropping systems practiced by large scale farmers in the Cerrado region of Brazil (Bolliger et al., 2006; Neto et al., 2010). However in large parts of the tropical sub-humid zones, the rainy season is too short for such a crop succession. One alternative is to sow the cover crop before the commercial crop is harvested in a relay intercropped system.

Intercropped systems are expected to produce more plant biomass than a single crop because of the more efficient use of available resources (Anil et al., 1998; Jeranyama, 2000; Willey, 1979). This is especially attractive in the context of CA for smallholder farms because relatively more biomass could be produced for use as mulch without any additional inputs. The higher resource use efficiency of intercropped systems is mainly the result of differences in competitive ability between the intercropped plants (Anil et al., 1998; Li et al., 2001; Willey, 1979). They occur when the intercropped species only partially compete for the same resources and occupy different ecological niches because of differences in their canopy morphology (Keating and Carberry, 1993), root system (Hauggaard-Nielsen et al., 2001b) or phenology (Fukai and Trenbath, 1993). Intercropping may invoke other positive effects during or after the growing cycle of the crops (Li et al., 2001). For example, the presence of the companion crop can stimulate root growth of the main crop (Hauggaard-Nielsen and Jensen, 2005), or can enhance nutrient availability (Hinsinger, 2001) through more efficient recycling of nutrients (Burle et al., 1999; Tonitto et al., 2006) or through direct transfer of nitrogen from e.g. a legume to a cereal crop (Xiao et al. 2004). On the other hand, intercropping may also lead to interspecific competition

and may have a negative impact on the main commercial crop if negative interactions between the plants are not managed adequately. For example, this is the case when cover crops are sown too early in low-standing cereals resulting in strong initial competition for solar radiation, as e.g. mentioned for wheat (*Triticum aestivum* L.) by Carof et al. (2007) or for rice (*Oryza sativa*) by Akanvou et al. (2002).

In an effort to acquire a more stable income, small scale farmers in the Cerrado region are increasingly directing their farming activities towards intensive milk production (Gastal et al., 2003; Oliveira et al., 2009), which requires high and stable maize yields and increased fodder production. To date, the agronomic performance of intercropping a fodder crop with a cereal has not been evaluated in the context of CA. Such cropping systems may be attractive as they could reconcile the environmental objectives that are searched with CA with the economic objectives of small scale farmers in the Cerrados.

The objective of this study was to evaluate the performance of double purpose (fodder and cover crop) relay intercropping under CA for small scale dairy producers in the Brazilian Cerrados. We studied the effects of two fodder crops, *Brachiaria ruziziensis*- referred to hereafter as Brachiaria- and pigeon pea (*Cajanus cajan*) sown as a relay cover crop with maize (*Zea mays*) as the main crop i) on the availability and use efficiency of crop production resources (solar radiation, water and nitrogen), and ii) on short-term crop productivity (maize grain yield and total above-ground biomass).

2. Materials and methods

2.1. Experimental site

The experiment was conducted at the experimental station of the Juvencio Martins Ferreira Agricultural School in Unaí (16°23'S, 46°53'W) (Minas Gerais, Brazil). It was repeated during two consecutive seasons (2007-2008 and 2008-2009) on the same field, i.e. in 2008-2009 on exactly the same plots as in the previous season. The field had been cultivated with maize under conventional tillage for more than 10 years before no-tillage was introduced the year prior to our study.

The local climate is tropical sub-humid, with a mean annual temperature of 21°C and annual rainfall of 1300 mm falling between October and April. The soil is classified as Typic Acrustox (USDA Soil Taxonomy) or Latosolos Vermelhos according to the Brazilian classification (Embrapa, 2006; Reatto et al., 2007). The soil texture is heavy with

more than 70% of clay, and the soil profile is deep and well drained as a result of the strong aggregation processes (Reatto et al., 2007).

2.2. Experimental design

The experiment contained seven treatments (Table 2.1) arranged in three completely randomized blocks. The aim was to compare the agronomic performance of maize intercropped with fodder crops with that of maize and cover crops sown as a sole crop. Individual experimental plots measured 75 m² (15 by 5 m), with the exception of the plots with the sole cover crops (PS1 and BS1, Table 1), which were half the size (37.5 m²).

Table 2.1: Experimental treatments during the 2007-2008 and 2008-2009 growing seasons, at the experimental station of the Juvencio Martins Ferreira Agricultural School in Unaí, Brazil

Treatments	Cropping system	Crops	Cover crop sowing date (DAMS)	
			2007-2008	2008-2009
MP1	Intercropping	Maize-Pigeon pea	8	10
MP2	Intercropping	Maize-Pigeon pea	92	86
MB1	Intercropping	Maize- Brachiaria	8	10
MB2	Intercropping	Maize- Brachiaria	92	86
MS	Sole cropping	Maize	0	
PS1	Sole cropping	Pigeon pea	8	10
BS1	Sole cropping	Brachiaria	8	10

DAMS: days after maize sowing.

All treatments were managed under no-tillage.

2.3. Crop management

All treatments were no-tillage systems with a mulch of crop residues. Three days before maize was sown, all plots were sprayed with glyphosate and 2,4-D, at 2 and 0.6 l ha⁻¹, respectively, to desiccate all standing plants (cover crops from the previous season and weeds that had germinated at the start of the rainy season). Maize (cultivar BR206) was sown at a density of 7 plants m⁻² using an animal-drawn direct seeder. The cover crops were sown manually at a density of 15 and 31 plants m⁻² for pigeon pea in 2007-2008 and 2008-2009, respectively, and around 100 plants m⁻² for Brachiaria in both seasons. Maize was sown on November 27th in 2007 and on November 25th in 2008. In 2008, the plots

with the MB1 treatment (Table 2.1) had to be partially re-sown on December 12th. Intercropped cover crops were sown in the established maize at two different dates (early and late), represented by “1” and “2” suffixes in the treatment acronyms, respectively (Table 2.1). The early sowing was designed to be as early as possible after maize had fully emerged with a minimum risk of competition between crops at their installation stage. Late sowing corresponds to the next similar window of opportunity in the maize cycle, at the start of senescence of the maize leaves. With the late sowing date, the competition for solar radiation between crops was expected to be close to the minimum throughout their cycles. The main purpose of the late sowing treatment was to check if the length of the rainy season actually limited the growth of the cover crop. Treatments with *Brachiaria* and pigeon pea as sole crops included one sowing date only, the early one, and are hereafter abbreviated as BS1 and PS1 (Table 2.1). In all treatment the crop residues were left on the field. When maize was sown, N, P and K fertilizers were applied at, respectively, 24, 84, and 48 kg N, P, and K ha⁻¹ in both years. Urea was top-dressed in the maize rows at 45 kg N ha⁻¹, 42 and 44 days after maize was sown in 2007-2008 and 2008-2009, respectively. No fertilizer was applied in the treatments BS1 and PS1.

Weeds were controlled in 2007-2008 by applying a mixture of atrazine (Atramax) at 1 l ha⁻¹, nicosulfuron (Samsom) at 0.6 l ha⁻¹ and 2,4-D (DMA) at 0.8 l ha⁻¹ on December 26th in all treatments except the treatments with pigeon pea where weeds were removed manually on the same day. During the 2008-2009 growing season weed control was performed on December 23th. To control pests, especially *Spodoptera sp.*, methomyl (Lannate) was sprayed twice in the 2007-2008 season at 0.3 l ha⁻¹ (December 18th and 26th) and three times in the 2008-2009 season (December 1st, 4th and 23th).

2.4. Field measurements

On the treatments with the late sowing date only the final biomass production and maize grain yields were measured, since the main purpose was to check if the growth of the cover crop was limited by the extent of the rainy season. All the other treatments (BS1, PS1, MB1, MP1, and MS, hereafter referred to as the “intensively monitored treatments”) were subject to more intensive measurements throughout the growing season in order to assess the causes of variation in productivity between treatments.

2.4.1. LAI and radiation interception

LAI was measured using a Licor-LAI2000 (Licor, INC.) with two replications at each date of measurement on each plot in the treatments with maize as a sole crop and intercropped with a cover crop, at two dates during the 2007-2008 growing season and at four (maize sole) and six (maize intercropped and cover crop sole) dates, during the 2008-2009 growing season. Intercepted PAR was measured using an Accupar LP-80 (Decagon Devices, INC.) with two replications at each date of measurement in each plot, at three dates in 2007-2008 and four dates in 2008-2009. In the intercropped treatments, LAI and intercepted PAR were measured considering the total leaf area of the whole canopy, i.e. both crops (maize and the cover crop).

2.4.2. Soil water content

Volumetric soil water content was measured with a TDR probe placed in a fixed vertical access tube (Eijkelkamp TRIME FM3®) which was inserted to a depth of 150 cm. These measurements are very sensitive to the quality of the contact between the access tube and the soil (Basinger et al., 2003). We applied the tube placement procedure recommended by the probe manufacturer that aims to eliminate any gaps at the soil-tube interface. Yet, we suspected that small air pockets remained. In order to detect such pockets, two measurements were made at each soil depth with the orientation of the sensor being perpendicular to each other (parallel and perpendicular to the plant rows). In the first year of the experiment, the perpendicular measurements of soil water showed a high variation at several soil depths and in several tubes, suggesting faulty contact between the soil and the access tubes. In the second year, the access tubes were reinstalled one month before the maize was sown and more care was taken through filling the soil-tube interface with mud. This resulted in better quality measurements as indicated by the low variability in the perpendicular measurements. For all measurements, only those with less than 15% variation between perpendicular measurements were considered, and only the higher of the two values was kept for the calculation of volumetric soil water contents.

Two access tubes were installed on one plot of each of the five intensively monitored treatments. In 2008-2009, we added one access tube in one other plot of each of these treatments, resulting in three tubes per treatment. Soil water content was measured at 10 cm intervals to a depth of 150 cm. In 2007-2008, measurements were taken monthly from

the maize sowing date until March, and then every 15 days until harvest; in 2008-2009 measurements were taken weekly from the maize sowing date until harvest.

Gravimetric soil water content was measured six times during the 2008-2009 growing season for the calibration of the TDR probe. On each plot, two sets of soil samples were collected from two holes made nearby each access tube and bulked for each depth. Soil samples were taken every 20 cm between the soil surface and a depth of 140 cm. The wet weight of each soil sample was immediately measured, and the samples were then brought to the laboratory, dried for two to three days at 105 °C before dry weight was measured. Two replicates of undisturbed soil samples were taken in each plot at intervals of 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80, 80-100 and 100-120 cm to measure soil bulk density, and volumetric soil water contents at field capacity (-6 kPa) and wilting point (-1500 kPa).

As an indicator of water stress, the percentage of transpirable soil water at day *i* ($FTSW_i$) was calculated, as follows (Sinclair and Ludlow, 1986)

$$FTSW_i = (ASW_i / TTSW) * 100,$$

where ASW_i (mm) is the available soil water at day *i* and $TTSW$ (mm) the total transpirable soil water.

ASW_i and $TTSW$ were calculated for the whole 0-150 cm soil profile monitored by the probe. During the early stages of crop development, the way we calculated $FTSW$ may have wrongly suggested relatively low water stress if the root zone was dry but with the lower part of the profile wet. In order to account for this possible bias, we calculated the rate of exploration of $TTSW$ by maize roots assuming the roots penetrate the soil at a constant rate of 2.5 cm day⁻¹ from emergence to flowering and at a zero rate after flowering.

Finally, water use efficiency (WUE) was calculated for the 2008-2009 growing season based on rainfall and the difference of available soil water between sowing and harvest, as follows:

$$WUE \text{ (kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}\text{)} = \text{Total above-ground biomass (kg ha}^{-1}\text{)} / [\sum_{\text{sowing to harvest}} (\text{Rainfall}) + (ASW_{\text{sowing}} - ASW_{\text{harvest}})]$$

2.4.3. Nitrogen availability and plant N uptake

Soil samples were taken from the five intensively monitored treatments (BS1, PS1, MB1, MP1, and MS) for determination of N availability. In the first year, the soil was sampled at

268 days after maize was sown. In the second year, soil was sampled at 23, 59, 100, 155, 210 and 252 days after maize sowing. Soil samples were taken using half cylindrical augers at intervals of 0-10, 10-20, 20-30, 30-60, 60-90 and 90-120 cm soil depth. In each plot, the soil samples (2 replicates) from each soil layer were bulked. All soil samples were brought to the laboratory in plastic bags and stored at 4 °C prior to extraction of mineral N using KCl (colorometry).

Subsamples of plant leaves, stems and grains were taken at harvest in all treatments for the determination of total N using the Kjeldahl method (Bremner and Mulvaney, 1982). Leaves, grains and stems were analyzed separately.

2.4.4. Total biomass and maize grain yield

Plant above-ground biomass and grain yield were measured at harvest, one month after physiological maturity of the maize grain in all (7) experimental treatments. A 7 m² subplot was randomly selected within each plot; maize plants, cobs, and cover crop plants were counted; grain yield and final above-ground biomass were determined after correcting for moisture by drying a subsample for three days at 65 °C.

In the second season (2008-2009), we also measured in all treatments above-ground biomass of maize and cover crops during the growing cycle, at 21, 45 and 70 days after maize was sown (1 row of one meter per plot) correcting for moisture by drying a subsample for three days at 65 °C.

2.4.5. Land equivalent ratio (LER) calculations

Following the definition of Willey (1979) we used the land equivalent ratio (LER_x) concept as the relative land area required to obtain, using mono crops, the same amount of a product x as obtained by intercropping the same species. We calculated LER_B , LER_N , and LER_Y , corresponding respectively to the following products: overall above-ground biomass of both maize and the cover crop, N taken up by both maize and the cover crop, and the sum of maize grain yield and cover crop biomass. LER_Y accounts for the dual purpose nature of the intercropped systems (forage + grain production) considered in our study.

LER_x can be written as $\sum pLER_x(sp_i)$ where $pLER_x(sp_i)$ is “partial LER_x ” of species “ sp_i ” of the intercropped system (De Wit and Van Den Bergh, 1965). Hence,

if $pLER_B(\text{maize}) = \text{biomass of maize in the intercrop system} / \text{biomass of maize as the sole crop}$, and $pLER_B(\text{cover crop}) = \text{biomass of the cover crop in the intercrop system} / \text{biomass of the cover crop as the sole crop}$,

then: $LER_B = pLER_B(\text{maize}) + pLER_B(\text{cover crop})$;

if $pLER_N(\text{maize}) = \text{maize N uptake in the intercrop system} / \text{N uptake by maize as the sole crop}$, and $pLER_N(\text{cover crop}) = \text{N uptake by the cover crop in the intercrop system} / \text{N uptake by the cover crop as the sole crop}$,

then: $LER_N = pLER_N(\text{maize}) + pLER_N(\text{cover crop})$;

if $pLER_Y(\text{maize}) = \text{maize grain yield in the intercrop system} / \text{grain yield of maize as the sole crop}$, and $pLER_B(\text{cover crop}) = \text{biomass of the cover crop in the intercrop system} / \text{biomass of the cover crop as the sole crop}$,

then: $LER_Y = pLER_Y(\text{maize}) + pLER_B(\text{cover crop})$.

Values of LER_x greater than one indicate productivity gains while those less than one indicate productivity losses of intercropping compared to the cultivation of the sole crop. Given that all species were sown at the same densities in all treatments in our experiment, partial $pLER_x$ is also an indicator of the productivity gains (values greater than one) or losses (values less than one) of each crop considered in the intercropped compared to its equivalent in a sole crop.

2.5. Statistical Analysis

Statistical analyses were performed using STATGRAPHICS CENTURION V.15.2.06. Differences between treatments and years were analyzed using ANOVA, followed by a LSD test to compare treatment means.

3. Results

3.1. Rainfall

Cumulative rainfall was 1023 mm in 2007-2008 and 1278 mm in 2008-2009 (Figure 2.1). The 2007-2008 growing season was characterized by a more irregular rainfall distribution than 2008-2009: lower rainfall in November at the beginning of the growing cycle, a dry period in January 2008 and a relatively good rainy period at the end of cycle (with rains in April, almost two months after physiological maturity of maize). Rainfall was more evenly distributed in 2008-2009 with some irregularity at the beginning of the season and a slightly drier period at the end of the season (mainly after mid-April).

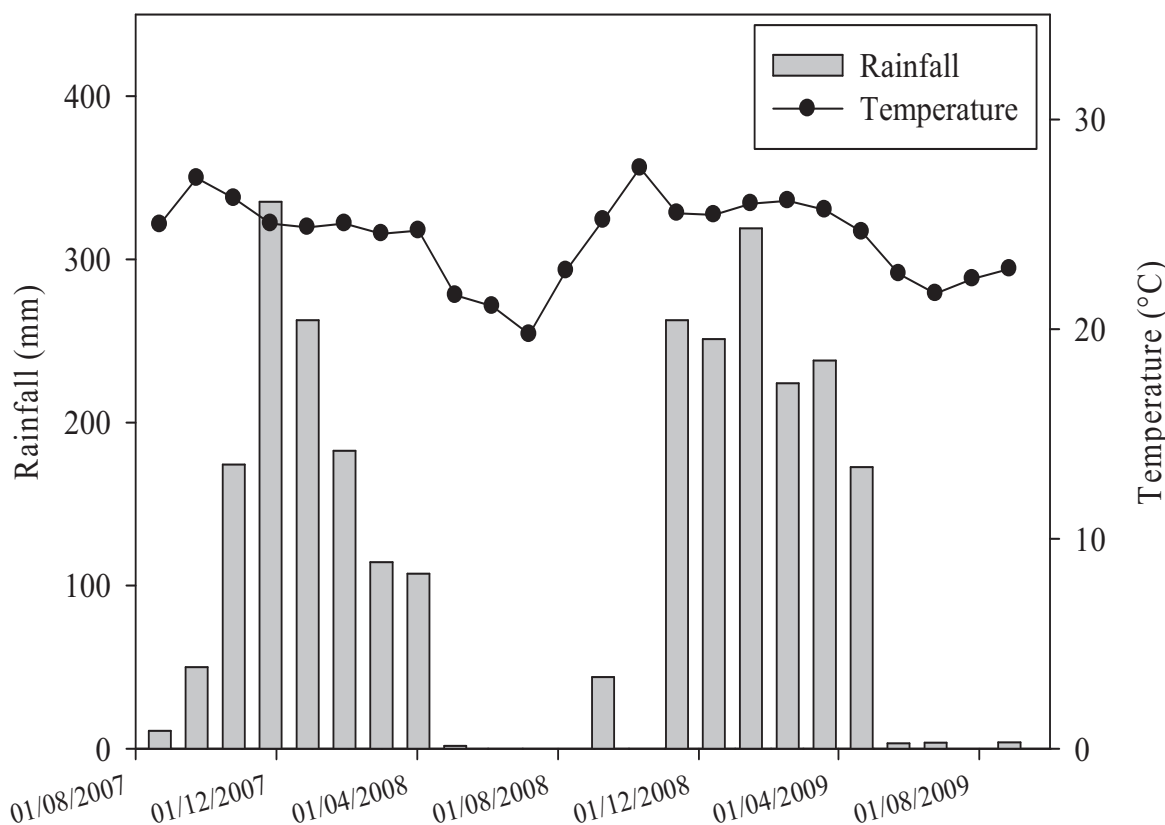


Figure 2.1: Monthly rainfall (mm) and temperature (°C) during the 2007-2008 to 2008-2009 growing seasons at the experimental station of the Juvencio Martins Ferreira Agricultural School in Unaí, Brazil.

3.2. LAI and radiation intercepted

As expected, systems with maize intercropped with a cover crop (MB1 and MP1) had higher LAI than systems with maize as a sole crop, even at the beginning of the maize cycle when cover crops were in the lag phase of their growth (Figure 2.2a and Figure 2.2b). At maize flowering (approximately 70 days after sowing), the difference in LAI was significant in 2007-2008, but not in 2008-2009 ($P < 0.05$). After maize flowering, when the leaves started to senesce, the LAI of the intercropped systems was significantly ($P < 0.05$) higher than that of maize sown as a sole crop in both years. The reduction in total LAI in the intercropped systems was delayed compared to that of the maize canopy when maize was the sole crop.

At the beginning of the season, systems with maize as a sole crop intercepted more solar radiation than systems with the cover crop as a sole crop (Figure 2.2d). On the other hand, after maize flowering, intercropped systems intercepted significantly ($P < 0.05$) more radiation than when maize was the sole crop (Figure 2.2c and Figure 2.2d). A reduction in radiation intercepted by maize as a sole crop was observed as soon as it entered the senescence phase in February, while in the intercropped and sole cover crop systems more than 90% of total incident radiation was intercepted up to the end of the rainy season (Figure 2.2c and Figure 2.2d). At the end of the rainy season, cover crops in intercropped systems intercepted less radiation than cover crops as sole crop due to the fact that they were less developed, providing evidence for the effect of the early competition with maize (Figure 2.2c and Figure 2.2d).

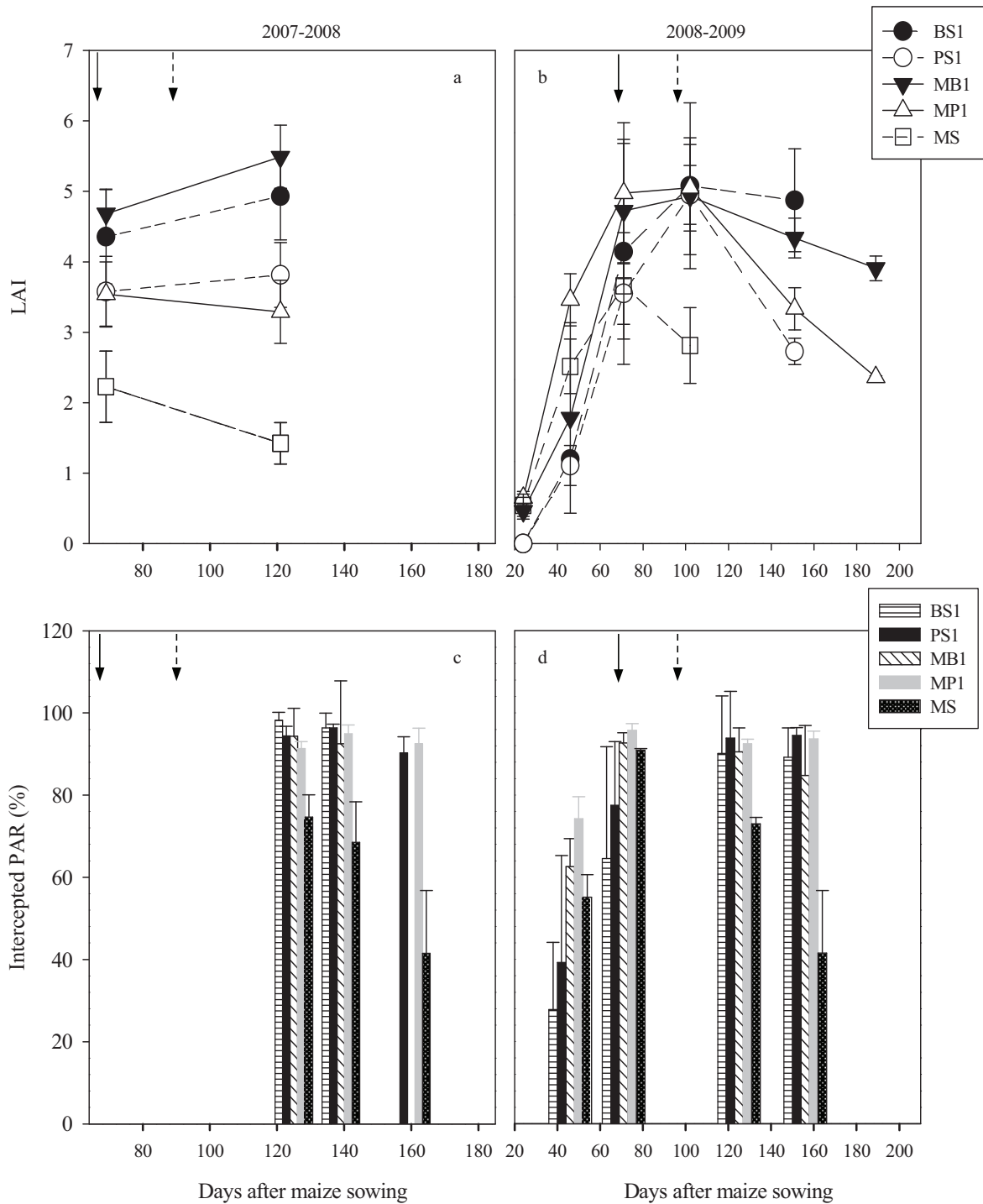


Figure 2.2: Leaf area index (LAI) and fraction of intercepted photosynthetically active radiation (PAR) of the different experimental treatments (a) LAI in 2007-2008, (b) LAI in 2008-2009, (c) PAR in 2007-2008, (d) PAR in 2008-2009. The solid arrow shows the dates of maize flowering, the dotted arrow shows the dates of the start of maize senescence. BS1= early sown Brachiaria as sole crop; PS1= early sown pigeon pea as sole crop; MB1= maize intercropped with early sown Brachiaria; MP1= maize intercropped with early sown pigeon pea; MS= maize as sole crop.

3.3. Soil water content

Figure 2.3 shows the dynamics of the fraction of transpirable soil water in the BS1, PS1, MB1, MP1 and MS treatments. The interval between maize flowering and maturity, during which the fraction of transpirable soil water was low, was longer in 2007-2008 than in 2008-2009. At the end of the rainy season, towards the end of April, the fraction of transpirable soil water was lower in all treatments in 2007-2008 than in 2008-2009. In combination with the lower total rainfall in 2007-2008, this result suggests that all the crops were subject to higher water stress in 2007-2008 than in 2008-2009. Furthermore, in 2007-2008 soil water content dropped soon after maize flowering, which is a highly sensitivity stage for maize with respect to effects of water stress. In the 2008-2009 season, the fraction of transpirable soil water was high in all treatments before maize flowering (Figure 2.3b). After flowering, soil water was exhausted by the high canopy transpiration with maximum light interception (Figure 2.2d) and reduced rainfall (Figure 2.1). With the rainfall in March and April, soil water content increased, followed by a decline towards the end of the rainy season. At the end of the maize cycle, the fraction of transpirable soil water was higher when maize was the sole crop than in the intercropped systems, suggesting that the intercropped systems used soil moisture and rainfall more efficiently. The decrease in the fraction of transpirable soil water was greater in the systems with pigeon pea than those with *Brachiaria*, especially in the second year of the experiment. The fact that the LAI of the systems with pigeon pea were lower than or equal to the LAI of the systems with *Brachiaria* at the beginning of the soil drying period (Figure 2. 2b), suggests a higher water demand per unit leaf area, possibly due to the greater stomatal conductance and the deeper root penetration by pigeon pea plants.

Water use efficiency based on rainfall and stored soil water was higher in intercropped systems than when either maize or cover crop was the sole crop (15, 9, 8, 7 and 6 kg above ground dry matter $\text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ respectively for MP1, MB1, MS, PS1 and BS1 in 2008-2009 growing season). Maize intercropped with pigeon pea was the most efficient system as far as use of the water resource is concerned.

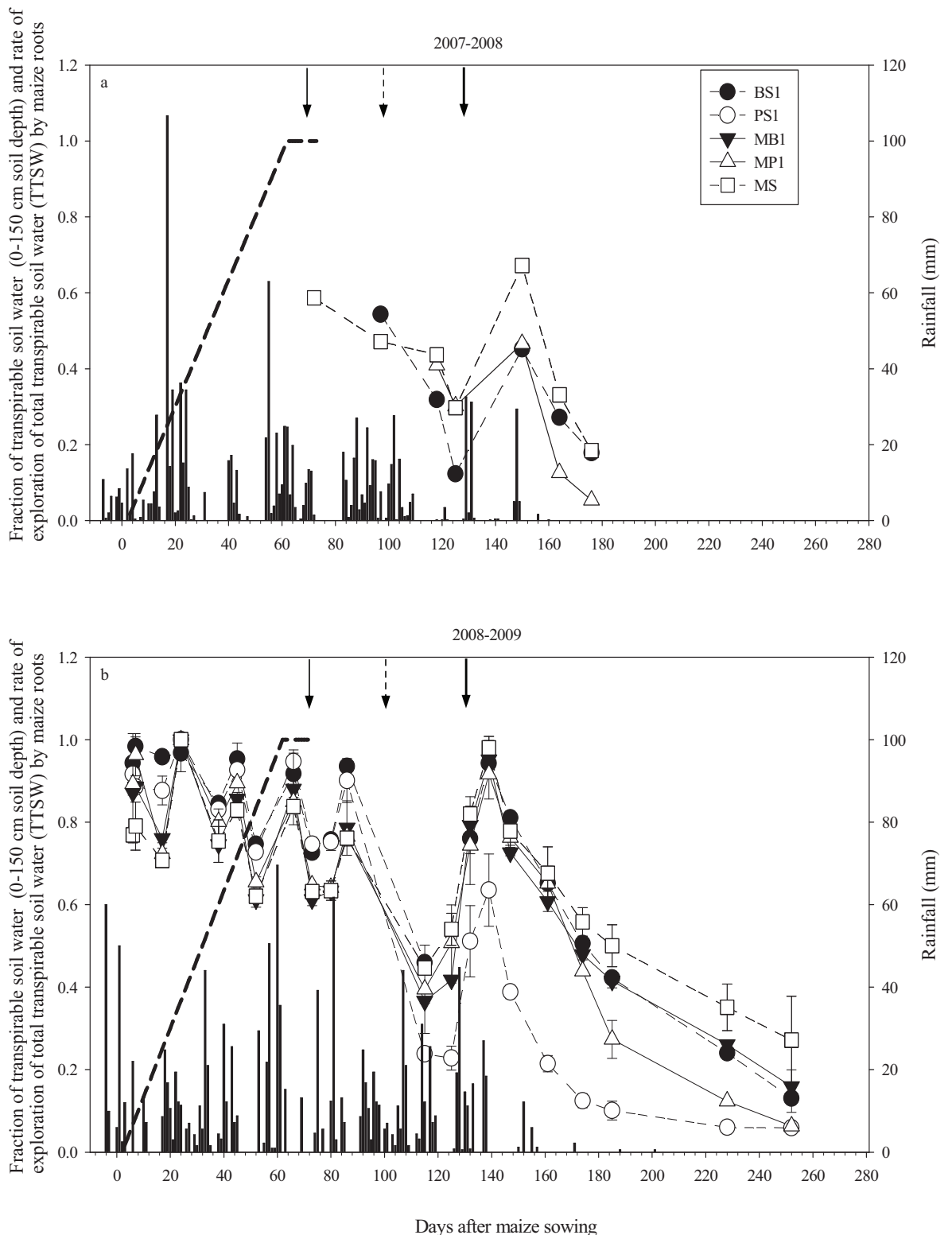


Figure 2.3: Fraction of transpirable soil water (FTSW) (0-150 cm soil depth) as affected by the experimental treatments in (a) 2007-2008 and (b) 2008-2009, rainfall (black bars) and estimated rate of exploration of total transpirable soil water (TTSW) by maize roots (black dotted line). The solid arrow shows the date of maize flowering, the dotted arrow shows the dates of the start of maize senescence, the bold arrow shows the date of maize maturity. BS1= early sown Brachiaria as sole crop; PS1= early sown pigeon pea as sole crop; MB1= maize intercropped with early sown Brachiaria; MP1= maize intercropped with early sown pigeonC pea; MS= maize as sole crop.

3.4. Soil mineral nitrogen dynamics

The MP1 and MS treatments showed in general the highest mineral N contents in the soil profile over the growing cycle (Figure 2.4). As a general trend over the growing season, soil mineral N remained higher when maize was the sole crop and when maize was intercropped with pigeon pea than when maize was intercropped with Brachiaria, or when pigeon pea or Brachiaria were the sole crop (Figure 2.4a). Soil mineral N (0-120 cm) (Figure 2.4b) was 440 and 400 kg N ha⁻¹ in December 2008 and 430 and 250 kg N ha⁻¹ in April 2009 after maize maturity, respectively in the MP1 and MS treatments whereas soil mineral N was 176, 290 and 270 kg N ha⁻¹ in December 2008 and 81, 104 and 117 kg N ha⁻¹ in April 2009 respectively in the BS1, PS1 and MB1 treatments. At the beginning of the growing season, soil mineral N was relatively high for all the treatments. At the end of the maize cycle, soil mineral N was noticeably lower in systems with cover crops than in systems with a single crop. Soil mineral N remaining at the end of the cycle was high in the MS treatment in the 2 seasons (237 and 240 kg N ha⁻¹ respectively) and the MP1 treatments in the first season (240 kg N ha⁻¹). Residual soil mineral N was lower in the intercropped systems: 174 kg N ha⁻¹ in the MP1 treatment in the second year, 152 and 78 kg N ha⁻¹ in the MB1 treatment, respectively, in 2007-2008 and 2008-2009 (Figure 2.4b).

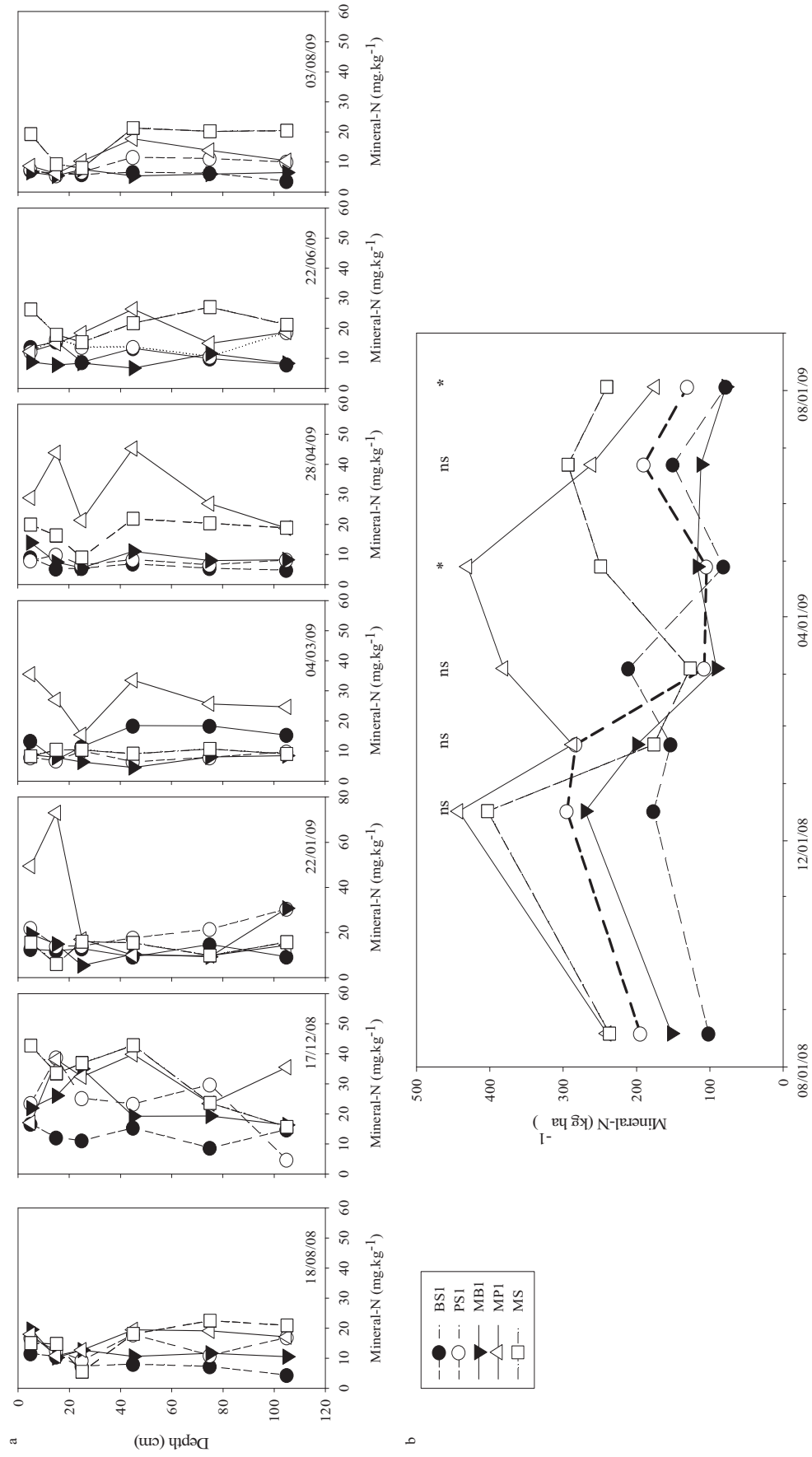


Figure 2.4: Mineral N concentrations (mg N kg⁻¹) in the different soil layers (a) and dynamics of mineral N content (kg N ha⁻¹) in the soil profile (0-120 cm depth) (b) as affected by the experimental treatments in the 2008-2009 growing season. * indicates a significant difference between treatments at P<0.05. ns means non-significant differences. BS1= early sown Brachiaria as sole crop; PS1= early sown pigeon pea as sole crop; MB1= maize intercropped with early sown Brachiaria; MP1= maize intercropped with early sown pigeon pea; MS= maize as sole crop.

3.5. Crop nitrogen uptake

Table 2.2 shows total N uptake by the different crops in each treatment. Maize N uptake did not differ significantly ($P>0.05$) between intercropped maize (MB1, MP1) and maize as a sole crop (MS) in the 2007-2008 growing season, while in 2008-2009 maize N uptake was significantly lower ($P<0.05$) in the MB1 treatment than in MP1 and MS treatments. Total N uptake did not differ significantly ($P>0.05$) between Brachiaria as intercrop or Brachiaria as a sole crop in each of the two years of experimentation. Nevertheless, total N uptake of the Brachiaria was higher in 2007-2008 than in 2008-2009 both as sole crop (85 vs. 31 kg N ha⁻¹) and intercrop (56 vs. 33 kg N ha⁻¹). Nitrogen concentrations in Brachiaria were similar in intercropped and sole crop treatments in 2007-2008, while they were higher in the sole crop treatment in 2008-2009 (data not shown). The limited capacity of Brachiaria to capture N during the second season was most pronounced in the intercropped system.

On the other hand, N uptake by pigeon pea was always very high (>160 kg N ha⁻¹). Nitrogen concentrations in pigeon pea as intercrop and as sole crop were respectively 18.5 and 20.4 g N g⁻¹ dry matter in 2007-2008 and respectively 18.2 and 21.4 kg N ha⁻¹ in 2008-2009. In 2007-2008 N uptake by pigeon pea was significantly lower in the intercropped system (165 kg N ha⁻¹) than in the sole crop system (213 kg N ha⁻¹), but similar in the 2008-2009 season (200 vs. 206 kg N ha⁻¹), when climatic conditions were more favorable. As a legume, pigeon pea was more efficient in capturing large quantities of N than Brachiaria and was even more efficient as an intercrop than as a sole crop, mainly during the second year of the experiment. Over the two years, total N uptake was significantly higher in maize intercropped with a cover crop than in maize as a sole crop, with exception of the MB1 treatment in 2008-2009 (Table 2.2). The additional N uptake in intercropped systems compared to the system with maize as a sole crop was 165 and 66 kg N ha⁻¹ in the MC1 and MB1 treatments respectively in 2007-2008, and 211 and 6 kg N ha⁻¹ in 2008-2009.

Table 2.2: Nitrogen uptake (kg N ha⁻¹) of maize, cover crop and total uptake as affected by the cropping system during the 2007-2008 and 2008-2009 growing seasons.

Season	Type	BS1	PS1	MB1	MP1	MS	MP2	MB2
2007-2008	Maize			75a	67a	70a		
	Cover crop	85c	213e	56bc	167d		18ab	12a
	Total N	85bc	213e	131d	234e	70b	18a	12a
2008-2009	Maize			45a	81bc	72bc	90c	67b
	Cover crop	31a	206b	33a	201b		35a	13a
	Total N	31a	206c	78ab	282d	72ab	125b	80ab

BS1= early sown Brachiaria as sole crop; PS1= early sown pigeon pea as sole crop; MB1= maize intercropped with early sown Brachiaria; MP1= maize intercropped with early sown pigeon pea; MS= maize as sole crop MP2= maize intercropped with late sown pigeon pea; MB2= maize intercropped with late sown Brachiaria. All treatments were managed under no-tillage. Different letters within each line indicate significant differences at P<0.05.

3.6. Biomass and maize grain yield

During the growing cycle (21, 45 and 70 days after maize sowing) there was no difference (P<0.05) in maize above-ground biomass between treatments in 2008-2009 (Table 2.3).

Grain and biomass yields of maize averaged over all treatments were respectively 26 and 47% higher in 2008-2009 than in 2007-2008, the differences being significant at P<0.05.

Over the two years, when we compared intercropped systems with maize as a sole crop, there was no significant difference (P<0.05) in the total above-ground biomass produced by maize (Figure 2.5a). Even in the intercropped systems with an early sown cover crop the presence of the latter did not significantly affect maize biomass production compared to maize as a sole crop. In contrast, the presence of maize had a significant negative effect (P<0.05) on the biomass of cover crops in the intercropped systems compared to the sole cover crop systems in 2007-2008 (Figure 2.5b). In 2008-2009, this was also true for Brachiaria but not for pigeon pea. The reduction in cover crop above-ground biomass in the intercropped compared to the sole crop systems was 30 and 14% for pigeon pea, and 30 and 46% for Brachiaria, respectively in 2007-2008 and 2008-2009. However, systems with an early sown cover crop produced significantly (P<0.05) more total above-ground biomass (maize and cover crop) than those with a late sown cover crop or with a sole crop.

Compared to maize as a sole crop (MS), total above-ground biomass in the MB1 and MP1 treatments was respectively 108 and 116% higher in the first year, and 18 and 106% in the second year. Early sown cover crops produced less biomass in 2008-2009 in spite of the favorable weather conditions, with the exception of the pigeon pea as an intercrop. The 2008-2009 growing season was characterized by a high variability in the amounts of biomass produced by the cover crop. Systems including late sown cover crops (MB2 and MP2) produced very small quantities of additional biomass (on average +8% in 2007-2008 and +7% in 2008-2009 compared to maize (MS)).

There was no difference ($P>0.05$) in maize grain yields between intercropped maize and maize as a sole crop in the two years, with exception of the lower maize yields in treatment MB1 in 2008-2009 (Figure 2.6).

Table 2.3: Aboveground biomass (kg ha^{-1}) produced by each treatment during the 2008-2009 growing season

DAMS	Type	BS1	PS1	MB1	MP1	MS
21	Maize biomass				630	510
	Cover crop biomass					
	Total biomass				630	510
45	Maize biomass			2490	3130	3780
	Cover crop biomass	3320bc	3770c	2990ab	2430a	
	Total biomass	3320a	3770a	5480ab	5560b	3780ab
70	Maize biomass			12680	16700	12680
	Cover crop biomass	4400ab	5210b	3720a	4110ab	
	Total biomass	4400a	5210a	16400bc	20810c	12680b

DAMS: days after maize sowing

BS1= early sown *Brachiaria* as sole crop; PS1= early sown pigeon pea as sole crop; MB1= maize intercropped with early sown *Brachiaria*; MP1= maize intercropped with early sown pigeon pea; MS= maize as sole crop. All treatments were managed under no-tillage.

Different letters within each line indicate significant differences at $P<0.05$.

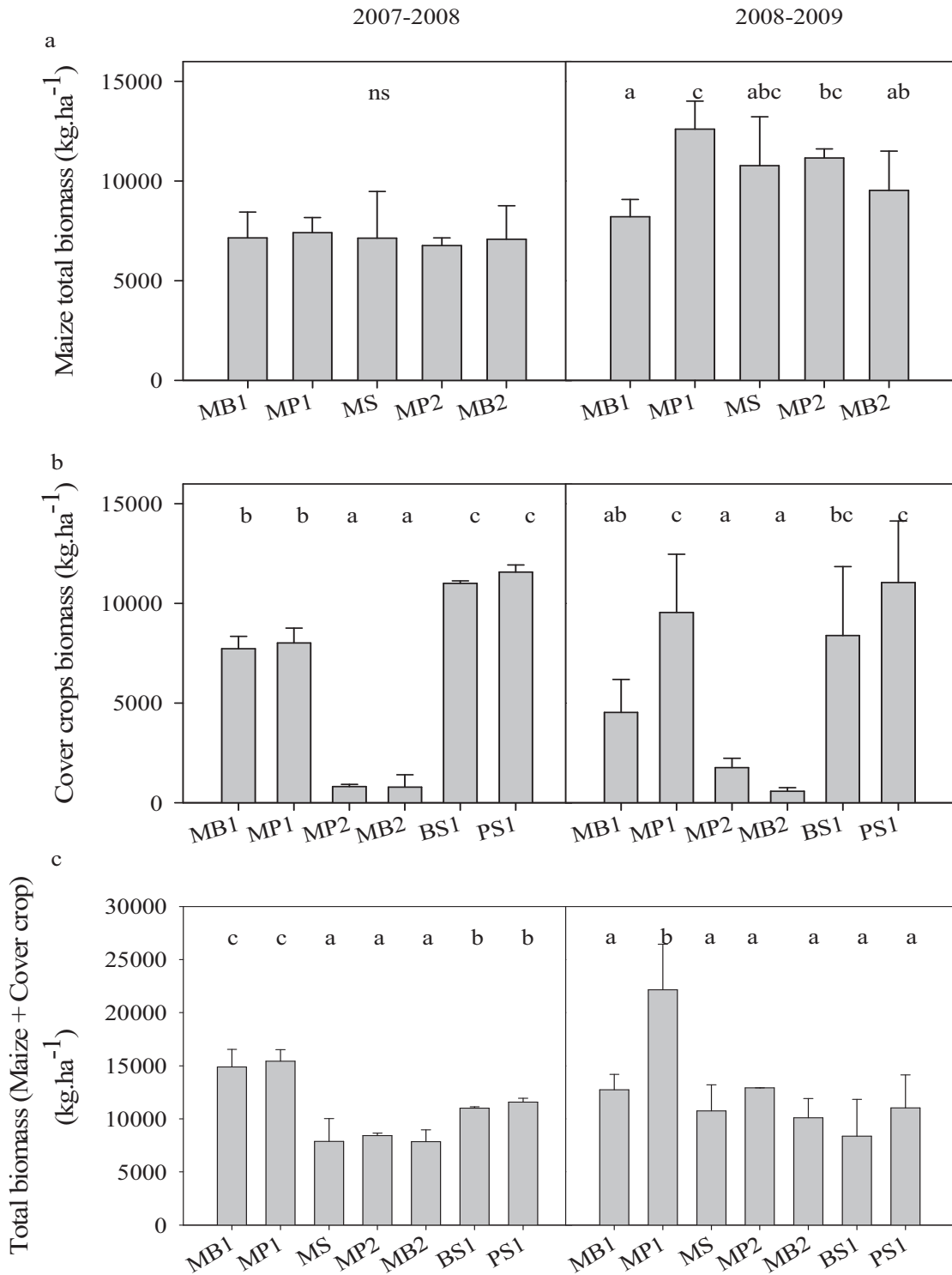


Figure 2.5: Above-ground biomass at harvest as affected by the experimental treatments in 2007-2008 and 2008-2009, (a) maize biomass (b) cover crop biomass (c) total biomass. ns: non-significant. Treatments with the same letter were not significantly different (LSD, $P < 0.05$). MB1= maize intercropped with early sown Brachiaria; MP1= maize intercropped with early sown pigeon pea; MS= maize as sole crop, MP2= maize intercropped with late sown pigeon pea; MB2= maize intercropped with late sown Brachiaria; BS1= early sown Brachiaria as sole crop; PS1= early sown pigeon pea as sole crop.

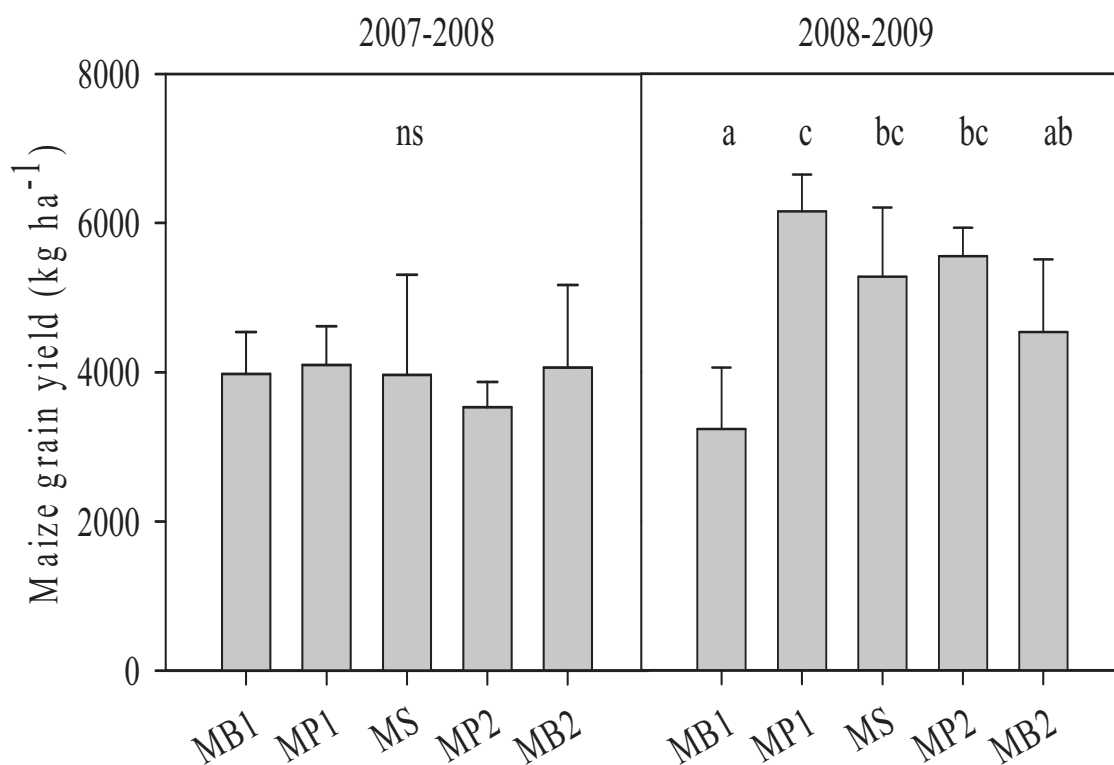


Figure 2.6: Maize grain yield as affected by the experimental treatments in 2007-2008 and 2008-2009. Treatments with same letter were not significantly different (LSD, $P < 0.05$). ns: non-significant. MB1= maize intercropped with early sown Brachiaria; MP1= maize intercropped with early sown pigeon pea; MS=maize as sole crop. MP2= maize intercropped with late sown pigeon pea; MB2= maize intercropped with late sown Brachiaria.

3.7. Land Equivalent Ratio

LER values were calculated for the maize-cover crop intercropped systems, when the cover crop was sown at the early date. In all cases, total LER values for above-ground biomass at 45 and 70 days after maize sowing (flowering stage) in 2008-2009 were higher than one, as well as the total LER values at harvest for both maize yield and above-ground biomass in both seasons (Table 2.4).

At maize flowering, partial LER values for maize biomass were close to or even higher than one whereas those for cover crops were less than one. Finally, at harvest, partial LER values for both maize yield and biomass showed that i) maize was not affected by the presence of a cover crop (partial LER ≥ 1 , except in 2008-09 in maize intercropped with Brachiaria), ii) cover crops suffered from competition with maize (partial LER < 1); and

iii) in the maize-pigeon pea intercropped system, the maize benefited from positive interactions with pigeon pea and partial LER values were slightly (2007-2008) or substantially (2008-2009) higher than one.

LER values calculated for plant N uptake (LER_N) were always higher than one, indicating the advantage of intercropping over monocropping with respect to N uptake. LER_N was lower in the MB1 treatment than in the MP1 treatment, mainly in the second year of experiment.

Table 2.4: Partial and total land equivalency ratios (LER) for maize-cover intercrops with respect to total aboveground biomass, grain yield and N uptake during the 2007-2008 and 2008-2009 growing seasons.

	Partial LER			Total LER	
	2007-2008	2008-2009	2007-2008	2008-2009	2008-2009
Total Biomass at 45 DAMS					
Maize		0.83(0.41)			1.47(0.39)
Pigeon pea		0.64(0.03)			
Maize		0.66(0.25)			1.56(0.37)
Brachiaria		0.90(0.17)			
Total Biomass at 70 DAMS					
Maize		1.32(0.74)			2.11(0.80)
Pigeon pea		0.79(0.06)			
Maize		1.00(0.95)			1.85(0.98)
Brachiaria		0.85(0.16)			
Total Biomass at harvest					
Maize	1.04(0.33)	1.17(0.21)	1.73(0.27)		2.03(0.20)
Pigeon pea	0.69(0.06)	0.86(0.02)			
Maize	1.00(0.53)	0.76(0.14)	1.70(0.52)		1.30(0.37)
Brachiaria	0.70(0.06)	0.54(0.3)			
Grain yield (Maize) and Total biomass at harvest (cover crop)					
Maize	1.03(0.26)	1.16(0.13)	1.72(0.19)		2.02(0.11)
Pigeon pea	0.69(0.06)	0.86(0.02)			
Maize	1.00(0.47)	0.61(0.06)	1.70(0.46)		1.15(0.34)
Brachiaria	0.70(0.06)	0.54(0.30)			
Total N uptake at the harvest					
Maize	0.96(0.29)	1.13(0.18)	1.74(0.07)		2.11(0.39)
Pigeon pea	0.78(0.23)	0.98(0.22)			
Maize	1.07(0.54)	0.62(0.07)	1.73(0.62)		1.68(0.65)
Brachiaria	0.66(0.28)	1.06(0.59)			

Standard deviation values are in parenthesis
DAMS: days after maize sowing.

4. Discussion

4.1. Maize biomass and grain yield

Our results showed that maize grain and above-ground biomass yields were generally not significantly affected by the presence of the intercropped cover crops, *Brachiaria* or pigeon pea, even when they were sown very early in the growing season just after maize was fully established. Jeranyama et al. (2000) also reported that maize grain yield on a loamy sand in Zimbabwe was not reduced when legumes were intercropped with maize fertilized at 0 to 60 kg N ha⁻¹. This result was observed in our study in two consecutive seasons with contrasting rainfall distribution. Only maize intercropped with *Brachiaria* (MB1 and MB2) produced lower yields than maize as a sole crop in the 2008-2009 growing season, in spite of more favorable climatic conditions in 2008-2009 compared to 2007-2008. This was partly due to early attacks by *Spodoptera sp.* which developed on the crop residues left over from the previous year and which could not be completely controlled during the following cycle. However, this incident might not be exceptional, since several other studies reported that the presence of a mulch of crop residues may provide a favorable habitat for soil arthropods, usually detritivores, which may become pests when their food sources are depleted (Stinner and House, 1990). For example, in Madagascar black beetle larvae (*Heteronychus spp.*) were reported to have caused serious damage to rice at the beginning of a growing season when rice was seeded in a mulch of crop residues (Ratnadass et al., 2006).

The partial LER values (for grain yield and above-ground biomass) of maize intercropped with pigeon pea were higher than one in both years (Table 2.4), suggesting positive interactions between maize and pigeon pea in the use of available resources under the conditions of our study. The fact that the gain in productivity in the maize-pigeon pea intercrop system was more pronounced in the second year suggests that residual effects of pigeon pea from the previous year may also have played an important role. These partial LER are particularly high but in agreement with the results of Jeranyama et al. (2000), who reported that maize yields increased by 8 to 27% in the year following a maize-legume intercrop, compared with maize following a sole maize crop. Our analysis of N uptake revealed that in 2008-2009, maize intercropped with pigeon pea captured an average of 10 kg N ha⁻¹ more than maize alone, suggesting that maize had access to higher amounts of available N when intercropped with pigeon pea. The fact that pigeon pea can fix atmospheric N results in an improved N balance in the intercropped systems (Gathumbi et al., 2002;

Jeranyama et al., 2000). Legumes intercropped with cereals can increase N uptake by the cereals as reported in other studies (Corre-Hellou and Crozat, 2005; Hauggaard-Nielsen et al., 2003). Jensen (2006) suggested that the advantage of legume-cereal intercropping is mainly the complementary use of soil mineral and atmospheric N, resulting in reduced competition for soil mineral N. Pigeon pea has also been recognized for other attributes, i.e. large leaf fall during the growing cycle and the resulting contribution to N mineralization (Rego and Nageswara Rao, 2000). In this way, N derived from pigeon pea becomes directly available for the maize crop during the same growing cycle. In a wheat-faba bean intercrop, Xiao et al. (2004) reported a beneficial effect due to direct N transfer from faba bean to the companion wheat crop.

4.2. Performance of the cover crops

The growth of cover crops sown early in established maize was negatively affected by competition with maize, especially in 2007-2008. Several authors (Akanvou et al., 2002; Harris et al., 2007; Jeranyama et al., 2000) reported a reduction in the productivity of the companion cover crop in intercropping. The interval between the sowing of maize and the cover crop, and the difference in early growth rates gave an advantage to the maize crop which dominated the cover crop during most of its cycle. In our study, these differences in early growth rates between cover crop and maize were confirmed by lower measured LAI and intercepted PAR of cover crops as a sole crop at the beginning (up until 45 days after maize was sown) of the cycle compared to values of maize as a sole crop (Figure 2.2b).

The biomass production of cover crops sown at the beginning of maize senescence (treatments with late cover crop sowing) was remarkably low in our experiment. This confirmed that the local rainy season is too short to allow late relay intercropping of maize with cover crops. This result is in agreement with the results of Akanvou et al. (2002) in a legume-rice relay intercropped system in the savannah zone of West Africa, who reported that sowing the legume crop beyond 56 days after rice sowing provided low amounts of legume biomass.

Brachiaria biomass production in both the intercropped (MB1) and the sole crop system (BS1) was lower in the second year than in the first year, even though the climatic conditions were better in the second year. This drop in productivity may be explained by the relatively lower soil mineral N contents in the second year at the beginning of the season (Figure 2.4b) combined with low N returns from the crop residues of the previous year. Grasses have a higher C:N ratio than legumes (Thorup-Kristensen, 1994), which may cause N

immobilization in the soil during the decomposition of straw and roots. Kelley and Sweeney (2005) reported that large amounts of residues from a preceding cereal crop can reduce wheat yields as a result of increased N immobilization. This explanation was further corroborated by the fact that in 2008-2009 both maize and Brachiaria in the MB1 treatment, captured significantly less N and had lower N concentrations than the crops in the other cropping systems of the experiment.

It is important to note that in spite of the high soil mineral N contents repeatedly observed in the Cerrado soils under no-tillage, mulch-based systems (D'Andrea et al., 2004; Maltas et al., 2009), nitrate is apparently not always well absorbed by crops. Nitrate is to a certain extent retained in these soils due to the high level of aluminium and iron oxides that possess net positive charges (Oliveira et al., 2000). Therefore, it seems that not all nitrate extracted from the soil by KCL is available to the plants.

4.3. Performance of no-tillage relay intercropped systems

It has been reported that intercropping usually increases crop productivity compared to monocropping (Hauggaard-Nielsen et al., 2001a; Jensen, 1996). In our study, relay intercropping systems produced respectively 111% and 63% more total biomass during the two growing seasons (in the MP1 and in MB1 treatments respectively) than the systems with maize as a sole crop. Differences between the two cropping systems became especially larger from the flowering stage onwards as indicated by the comparison of biomass production at different dates throughout the growing cycle (Table 2.3). Relay intercropping intercepted higher amounts of radiation than maize alone, particularly when the cover crops were sown at the early sowing date (Figure 2.2c and Figure 2.2d). In our study, the most important increase in total biomass was observed in the two experimental years during a relatively short period before maize flowering, when water stress was least (Figure 2.3b).

After maize flowering, cropping systems with pigeon pea extracted more available soil water than the other systems. Pigeon pea was able to continue producing biomass well into the dry season and was more efficient than Brachiaria in water use at the end of the rainy season. It is generally accepted that because of their deep taproots, legumes like pigeon pea have the capacity to efficiently use soil water even under less favorable conditions (Snapp and Silim, 2002). Indeed, the systems with pigeon pea as sole crop and with maize intercropped with pigeon pea showed higher water use efficiency compared with Brachiaria alone and maize intercropped with Brachiaria. In the system with maize intercropped with pigeon pea, water

use efficiency was almost double that in the system with maize as a sole crop in the 2008-2009 growing season.

Over the two years of the experiment, the presence of a cover crop did not significantly affect maize N uptake, except for maize intercropped with *Brachiaria* in 2008-2009. However, total N uptake was considerably higher in the relay intercrop systems than in systems with maize as the sole crop (Table 2.2) demonstrating the efficient use of N in the intercropped systems. Part of the N not taken up by the maize crop is recovered by the cover crop and thus excluded from potential leaching beyond the root zone (Maltas et al., 2009). Our results are in agreement with the results by Hauggaard-Nielsen et al., (2006) on barley intercropped with pea. Other authors, however, reported that intercropping had only a slight effect on N use efficiency (Andersen et al., 2004; Jensen, 1996).

Relay intercropped maize-legume systems appeared to be more efficient than maize-grass systems in the use of N in low-input systems. Pigeon pea is also known to efficiently capture soil mineral N due to its well developed root system which penetrates deep into the soil (Snapp and Silim, 2002).

Under the conditions of our study, available resources were used more efficiently in relay intercropped systems than in monocropped systems as shown by the higher LER values in intercropped systems. Several authors (Dahmardeh et al., 2009; Hauggaard-Nielsen et al., 2006; Willey, 1979) reported similar results with LER values higher than one for intercropped systems, with some studies that were repeated over several years at the same location (e.g. Jensen, 1996).

LER values higher than two such as those we found in the maize-pigeon pea system are much less common in the literature. Dahmardeh et al. (2009) reported a LER value of 2.26 for maize intercropped with cow pea. Such a large productivity gain with intercropping is only possible when the morphological characteristics of the two crops are highly complementary and different ecological niches are used, resulting in more efficient use of resources (Willey, 1979). In our case, this complementarity existed both in space (morphological differences in root systems) and in time (cover crop sown after maize emergence). The more efficient use of natural resources was also facilitated by the spatial arrangements we chose. In fact, sowing the cover crop between the rows of maize and not in the same row results in a better distribution of the plants in space and probably reduces competition between the two crops. The interval from eight to ten days between the sowing dates also gave maize a sufficient growth advance over the cover crop, which allowed maize to be dominant over the cover crop throughout its growth cycle.

5. Conclusion

Our study revealed the potential of relay intercropping of cover crops with maize to produce large quantities of fodder biomass without significantly reducing maize grain yields under the conditions of the small scale farmers in the Cerrado region of Brazil. Sowing the cover crop eight to ten days after the maize crop appears to be optimal when the cover crop is sown between the rows of maize. Early sowing of the cover crop resulted in a higher use efficiency of available natural resources than late sowing.

Intercropping with pigeon pea has the potential to produce enough plant biomass for purposes of both mulching and producing a substantial protein-rich fodder, which is of particular interest for farmers who are steering their activities towards intensified milk production. Brachiaria as a cover crop is also an attractive option for fodder production but maintaining long-term productivity would probably require external N inputs, especially if part of the biomass is exported for grazing. On the other hand, the use Brachiaria as intercrop gives farmers the opportunity to subsequently convert the field into permanent pasture. . Both intercropping systems are thus attractive options for smallholder farmers in the Cerrado depending on their objectives and their access to external inputs such as chemical fertilizers.

Acknowledgements

This work was supported by funds from the *Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement* (CIRAD) and the *Agence Nationale de la Recherche* Systerra Program: ANR-08-STRA-10 (project Pepites). We also thank Davi Soares for technical support.

Chapitre 3: Modélisation des associations maïs-plante de couverture en relais en semis direct dans les conditions pluviales des Cerrados Brésiliens: adaptation et évaluation du modèle STICS-CA

1. Introduction

L'introduction de plantes de couverture en association dans les systèmes de culture en semis direct sous mulch peut entraîner des effets agronomiques et environnementaux très bénéfiques dans les zones tropicales subhumides, pour divers raisons (voir Anil et al., 1998; Kremer and Ben-Hammouda, 2009; Maltas et al., 2007; Samarajeewa et al., 2005; Willey, 1979). Le plus souvent, les plantes de couverture ont été utilisées dans des successions avec une culture principale. Cependant, dans la plupart des régions en zones tropicales subhumides, la période pluvieuse n'est pas assez longue pour permettre une production de biomasse satisfaisante d'une plante de couverture en succession avec une culture principale. Une option serait alors l'introduction de la plante de couverture avant la récolte de la culture commerciale, en association, soit totalement soit partiellement en relais, et son maintien après la récolte de cette dernière, tels que les SAMBAs. Néanmoins, plusieurs interactions dans les associations de cultures vont conditionner le partage entre espèces des ressources principales (eau, azote et lumière) (Willey, 1979). Ces interactions sont complexes, variables dans le temps et vont dépendre des caractéristiques propres de chaque espèce et de la façon dont elles seront gérées. Ces interactions entre les espèces associées peuvent être de l'ordre de la compétition, de la complémentarité et de la facilitation. Mais surtout, ces différents types d'interaction peuvent se succéder au cours de la saison, en fonction des développements relatifs des espèces associées et de l'évolution des ressources auxquelles elles accèdent (Anil et al., 1998; Corre-Hellou, 2005).

Peu d'études ont jusqu'à présent traité ce type de systèmes dans les zones subtropicales subhumides. Appréhender et quantifier ces interactions et leurs conséquences sur la productivité finale de chaque espèce suppose une prise en compte de la dimension temporelle que des mesures ponctuelles et une approche purement expérimentale ne permettent pas toujours de manière suffisante comme on l'a vu dans le chapitre précédent de cette thèse. En revanche les modèles de cultures permettent, sous certaines conditions, de compléter l'approche expérimentale par une meilleure prise en compte de l'évolution des interactions au cours du temps, autorisant une quantification dynamique des flux de ressources et de leur

répartition (Caldwell, 1995). Ils permettent notamment d'interpoler certaines variables entre deux dates de mesures consécutives. A condition de respecter leur domaine de validité, leur emploi pour des expérimentations virtuelles permettent d'extrapoler des résultats expérimentaux obtenus dans un nombre limités d'environnements, à d'autres conditions de milieu ou de gestion (Launay et al., 2009; Shili-Touzi et al., 2010; Tsubo et al., 2005a).

Plusieurs modèles de simulations des associations de cultures existent dans la littérature, le plus souvent par extension de modèles simulant le fonctionnement de cultures pures. On trouve ainsi des modèles associant des cultures annuelles (Brisson et al., 2004), des cultures et des mauvaises herbes (Kropff and Van Laar, 1993), des arbres et des cultures (Van Noordwijk and Lusiana, 1998). Ces modèles de cultures associées traitent en général des interactions abiotiques et du partage des ressources entre espèces associées (Berntsen et al., 2004; Corre-Hellou et al., 2007; Tsubo et al., 2005b), permettant de quantifier les relations de compétitions et certaines relations de facilitation. Certains simulent en outre des indicateurs de performances agronomiques et environnementales des associations tels que rendements, ou flux hydriques et azotés vers l'extérieur du champ cultivé (Baumann et al., 2002b; Jensen, 2006; Tsubo et al., 2005a; Whitmore and Schröder, 2007). La modélisation permet aussi d'accéder à des variables intermédiaires qui sont importantes pour l'évaluation des systèmes mais difficilement mesurables, comme les flux d'azote et d'eau entre différents compartiments du système.

Il n'existe pas à notre connaissance de travail de modélisation ayant abouti à la possibilité de simuler des cultures associées de maïs-*Brachiaria* et maïs-*Cajanus* dans les conditions tropicales avec mulch pailleux. Nous avons donc entrepris un travail de ce type, en partant du modèle STICS culture associée (STICS-CA, version du modèle STICS pour la simulation des cultures associées) qui semblait compatible avec nos objectifs tout en ayant déjà été paramétré dans sa version culture pure pour le maïs dans le contexte des Cerrados (Affholder et al. 2003; Macena da Silva, 2004; Maltas, 2007; Motisi et al., 2010; Scopel et al., 2004).

L'objectif de ce chapitre est ainsi d'adapter, caler et évaluer le modèle STICS-CA aux SAMBAs dans le contexte des Cerrados Brésiliens en vue de disposer d'un modèle utilisable pour analyser et quantifier la compétition pour les ressources (eau, azote et lumière) entre espèces et la productivité finale de chacune de ces espèces dans les Cerrados Brésiliens.

2. Matériels et méthodes

2.1. Présentation du modèle STICS-CA

Le modèle STICS-CA (STICS-Cultures Associées) (Brisson et al., 2004) est une extension du modèle STICS-culture pure, qui considère le système non pas composé d'une seule espèce mais de deux espèces cultivées en même temps. STICS-CA est donc un modèle générique qui décrit, à pas de temps journalier, la croissance et le développement d'une association de deux espèces végétales en fonction du rayonnement, de la température, et des contraintes hydriques et azotées. Les variables d'entrées du modèle sont le climat, le sol et les techniques de culture appliquées à l'association. Le système simulé est défini par un peuplement de plantes (espèce et variété) et un sol sous l'influence d'un climat et d'un itinéraire technique. Les variables de sorties du modèle sont à la fois des variables décrivant la production (rendement et qualité) et certains flux (eau et azote) dans le système et avec son environnement. 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).

Ce modèle a été choisi pour les raisons suivantes :

- STICS-CA est dérivé d'un modèle, STICS (Brisson et al., 1998) prenant déjà en compte les effets du mulch sur le bilan hydrique et, en principe, la température du sol en condition de culture pure. Son caractère générique peut par ailleurs permettre son adaptation à un grand nombre de cultures en faisant des choix de paramètres voire de formalismes adéquats.

- STICS-CA a été développé de manière à simuler le fonctionnement des cultures associées (Brisson et al., 2004), avec une prise en compte des compétitions pour la lumière, l'eau et l'azote entre espèces associées au pas de temps journalier. Il correspondait donc bien aux ressources pour lesquelles nous souhaitons évaluer les relations entre espèces dans nos associations

- Des travaux de calage et de validation de STICS culture pure avec et sans mulch ont déjà été conduits dans les Cerrados (Affholder et al., 2003; Macena da Silva, 2004; Maltas, 2007; Motisi et al., 2010; Scopel et al., 2004).

- On pouvait disposer d'un appui de la part des auteurs du modèle (Brisson et al., 2004) qui appartiennent à des équipes collaborant déjà avec l'équipe conduisant cette recherche.

- On pouvait bénéficier de l'accès aux codes-source du modèle, garantissant la possibilité de mieux comprendre les calculs réalisés et éventuellement de pouvoir introduire nos propres formalismes au cas où ceux présents dans le modèle ne donneraient pas satisfaction pour les aspects les plus novateurs de cette modélisation (plantes associées avec mulch).

2.2. Principaux modules du modèle STICS-CA

2.2.1. Développement

Le développement de la plante prend en compte plusieurs stades d'évolution de l'indice foliaire et des stades phénologiques (Tableau 3.1). Les unités de développement entre les stades sont exprimées en cumul de temps thermique, la durée entre stades étant propre à l'espèce et à la variété. Le développement est piloté par la température de l'air (variable d'entrée du modèle) ou de la culture (variable simulée) selon l'option choisie. La germination et la levée sont contrôlées par la température et l'humidité du sol. Plusieurs modes de calcul de la température du sol et de la culture sont possibles dans STICS, mais l'emploi de la version « cultures associées » impose de retenir la méthode de calcul la plus sophistiquée, fondée sur un bilan d'énergie. Dans cette méthode, un algorithme permet d'approcher par itérations la température de culture de manière à faire converger, en partant de la température de l'air, la température utilisée dans le calcul du rayonnement de grande longueur d'onde émis par le système sol atmosphère au niveau du sol, avec la température de culture déduite du bilan d'énergie dans lequel intervient le rayonnement de grande longueur d'onde. Cette procédure augmente notablement le temps de calcul d'une simulation par comparaison à d'autres procédures proposées dans STICS en version « culture pure ». La température de culture ainsi calculée sert de valeur limite pour la température du sol, c'est-à-dire pour la température du centimètre supérieur du sol, à l'interface de l'atmosphère.

Tableau 3.1: Description des stades pris en compte dans le modèle

stades végétatifs (indice foliaire)	stades reproducteurs
PLT : semis	
LEV : levée	
AMF : accélération maximale de croissance foliaire, fin de phase juvénile	FLO : floraison
LAX : indice foliaire maxi, fin de croissance foliaire	DRP : début remplissage des organes récoltés
SEN : début sénescence nette	
LAN : indice foliaire nul	MAT : maturité physiologique
REC : récolte	

2.2.2. Interception du rayonnement

L'interception du rayonnement dans la version STICS-cultures associées est calculée par le formalisme "Transfert radiatif", qui permet au modèle de simuler une association de culture en rang avec une prédiction du rayonnement intercepté, en tenant compte de la géométrie du couvert (espacement et orientation des rangs) et de la forme du profil de densité foliaire sur la hauteur du couvert. L'ensemble constitue le volume du couvert de chaque espèce (Brisson et al. 2004). Ce volume est défini (i) par le choix de la forme de base parmi «triangle pointe vers le bas, triangle pointe vers le haut, rectangle », (ii) par un rapport entre hauteur et largeur de la forme, et (iii) par la hauteur de base de la forme (absence de feuilles entre la cote zéro et la hauteur de base). La forme, et la hauteur de base sont supposées constantes tout au long du cycle. La hauteur varie au cours de la croissance, à l'aide d'une fonction reliant la hauteur au LAI, la hauteur étant bornée à une valeur maximale (paramètre hauteur max) qui constitue un paramètre du modèle pour chaque espèce. La largeur varie en fonction de la hauteur, de la distance entre rangs de plantes, du LAI, de paramètres de distribution de la densité foliaire en fonction de la hauteur, et d'un paramètre RAPFORME contrôlant le rapport entre hauteur et largeur de la forme de base. La hauteur détermine la dominance d'une espèce sur l'autre en termes d'interception de la lumière. Le modèle est ainsi capable de simuler d'éventuelles inversions de rapport de hauteur (dominance) entre les deux espèces au cours du cycle. Le modèle estime le rayonnement reçu chaque jour pour 20 points distribués de manière uniforme le long de l'inter-rang, en tenant compte de ses composantes directes et diffuses, et des fractions interceptées par le feuillages et transmises. Le rayonnement intercepté par chaque espèce est calculé en appliquant la loi de Beer avec un coefficient d'extinction unique pour les deux composantes (directe et diffuse) qui constitue un paramètre lié à chaque espèce.

2.2.3. Croissance aérienne

Pour chaque espèce de l'association le LAI journalier est calculé en fonction de la température de culture, du stade phénologique, de la densité de peuplement de l'espèce, et des stress hydriques et azotés. La phase de croissance du LAI suit une courbe logistique en fonction du temps thermique. La croissance journalière de la biomasse aérienne est obtenue en calculant l'interception du rayonnement par le couvert puis sa conversion en biomasse. La conversion dépend de l'efficacité de conversion potentielle de l'espèce pour le stade phénologique considéré, de la température et des stress hydrique et azoté.

2.2.4. Croissance racinaire

La croissance racinaire est découplée de la croissance aérienne. Le module de croissance racinaire calcule la croissance du front racinaire et la densité racinaire en fonction de la température et de l'humidité du sol, et de la densité apparente. Les racines permettent uniquement l'absorption d'eau et d'azote minéral et ne font l'objet d'aucune allocation d'assimilat. Le modèle simule tout d'abord la profondeur du front racinaire qui progresse à une vitesse qui est proportionnelle à la température du sol avec un coefficient qui est spécifique à chaque espèce. La croissance racinaire peut être ralentie ou stoppée en fonction de la sensibilité des espèces à l'état hydrique du sol. Des teneurs en eau du sol inférieures au point de flétrissement ou supérieures à la capacité au champ peuvent réduire ou stopper cette croissance du front racinaire. D'autre part, le modèle simule la densité de racines et leur répartition verticale dans le profil. La croissance en longueur est calculée par une fonction logistique analogue à celle de la croissance foliaire. Les racines sont distribuées dans le profil en fonction de la quantité de racines déjà présentes (force de puits) et en fonction des contraintes du sol (sécheresse, anoxie, pénétrabilité).

2.2.5. 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 pour 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 journalière en azote est le produit de la vitesse de croissance par la dérivée de la courbe de dilution maximale. La fourniture du sol est calculée par couche élémentaire de 1 cm jusqu'à une profondeur maximale du système racinaire.

2.2.6. L'eau

Les besoins en eau des deux espèces sont estimés à partir du partage du rayonnement couplé à un schéma résistif décrit dans Brisson et al. (2004), et appliqué à un pas de temps journalier. Ce mode de calcul est imposé dans la version « culture associée » de STICS, de telle sorte que le calage des paramètres de la transpiration potentielle de la version « culture pure » réalisé pour le contexte des Cerrados dans le passé (Affholder et al., 2003; Macena da Silva, 2004) n'est pas applicable dans cette version. L'offre du sol est déterminée par le bilan entre les apports (dont de possibles remontées capillaires) et les pertes (évaporation, ruissellement et drainage). Les effets du mulch étant intégrés dans le calcul du bilan.

2.3. Adaptations préliminaires

Pour pouvoir utiliser le modèle pour la simulation des SAMBAs mulch, qui font l'objet de cette étude, il a été nécessaire d'apporter quelques adaptations au modèle STICS-CA (version 6.2) utilisé pour ce travail :

- Correction d'erreurs du logiciel révélées par son application à nos conditions de culture ; les conditions de culture du maïs dans les Cerrados étant assez différentes de celles pour lesquelles STICS-CA avait été initialement testé, certaines erreurs de dimensionnement de tableaux et de test de cohérence des paramètres de simulation rendaient impossible la simulation de nos parcelles expérimentales. Par exemple, un inter-rang égal à 0.7m provoquait l'arrêt du programme sans que le formalisme du modèle mathématique proprement dit ne soit en cause. Un travail de correction de ces erreurs a donc été nécessaire.

- Prise en compte du mulch en culture associée ; les auteurs de STICS n'ayant pas eu l'occasion de vérifier le bon fonctionnement du modèle pour une association de culture en semis direct avec mulch, ils avaient introduit un test informatique interdisant le paramétrage du modèle pour ces conditions. Avant de désactiver ce test, il a été nécessaire de vérifier, par une lecture attentive du code source, la compatibilité des formalismes liés à la simulation du mulch et empruntés à la version « culture pure » de STICS, avec les formalismes introduits dans cette dernière pour la prise en compte des cultures associées. On a ensuite procédé à des simulations de parcelles hypothétiques pour la simple vérification des calculs. Cette vérification a conduit à repérer une erreur dans la fonction simulant l'impact du mulch sur le

ruissellement, qui n'était pas conforme à celle proposée par Scopel et al., (2004) pour les conditions des Cerrados. La correction nécessaire a été introduite, selon la formule suivante :

$$Ruis = \text{Min}(penterui * (qmulchrui0(\text{typemulch}) - qmulch), ruisolnu) ;$$

Avec $\text{Min}(x,y) = x$ si $x < y$, $\text{Min}(x,y) = y$ dans le cas contraire,

Penterui = pente (*penterui* = 0.01),

qmulchrui0(typemulch) = quantité de mulch à partir de laquelle le ruissellement est nul (t/ha) (*qmulchrui0* = 24 t/ha),

qmulch = quantité de mulch le jour de l'apport (t/ha),

Et *ruisolnu* = proportion d'eau ruisselée en sol nu (%)

- Une autre erreur a été repérée concernant le calcul de la température du sol en présence de mulch. Le modèle tient compte de l'influence du mulch et de la réduction de l'évaporation qu'il provoque sur le bilan radiatif. Ceci a pour effet de simuler une température de la culture en général plus élevée en présence qu'en absence de mulch, conformément aux attentes. Par contre le modèle néglige la conduction de la chaleur dans le mulch, de telle sorte que la température à la surface du sol est égale à la température de culture, quelle que soit la quantité de mulch pailleux présente. Il en résulte une température du sol en présence de mulch en général plus élevée qu'en absence de mulch alors que la littérature indique plutôt le contraire sous climat tropical (Bristow, 1988; Findeling, 2001). Cette erreur était déjà présente dans la version « culture pure » de STICS, et l'on peut supposer que le calage de la simulation des flux d'azote réalisé par Maltas (2007) en condition de culture avec mulch a conduit à estimer des paramètres, pour la cinétique de minéralisation sous dépendance de la température du sol, compensant cette erreur. Une telle situation interdit l'extrapolation de ce paramétrage à d'autres situations afin de comparer des situations avec et sans mulch. Pour autoriser de telles comparaisons il aurait été nécessaire d'introduire une modélisation du flux de chaleur à travers le mulch. Mais cela aurait aussi impliqué de reprendre entièrement le calage des fonctions simulant les flux d'azote. De tels travaux n'entraient pas dans le cadre de notre travail de recherche et les expérimentations n'avaient pas été conçues pour cela.

Dans ce qui suit, nous avons donc choisi de renoncer aux comparaisons entre systèmes de culture avec et sans mulch, et d'assumer l'hypothèse que le calage réalisé par Maltas (2007) pour les cinétiques de minéralisation de l'azote compensait les erreurs de simulation de la température du sol pour le cas où est présent sur le sol un mulch pailleux ayant des propriétés thermiques similaires à celles du mulch de notre expérimentation.

2.4. Données expérimentales utilisées pour le travail avec le modèle

Les données expérimentales utilisées pour le paramétrage du modèle ont été obtenues lors de l'année expérimentale 2008-2009 à la station expérimentale de l'école agricole Juvencio Martins Ferreira du municípe d'Unaí (16°23'S, 46°53'W) (Minas Gerais, Brazil), dans un essai utilisé par ailleurs pour une analyse expérimentale de systèmes de culture (chapitre 2). Le maïs comme culture principale a été associé en relais en semis direct avec une plante de couverture. Les associations du maïs avec *Cajanus* (*Cajanus cajan*) ou *Brachiaria* (*Brachiaria ruziziensis*), ont été comparées avec des cultures pures de maïs et de plantes de couverture en semis direct. Les plantes de couverture ont été semées au sein du maïs bien établi, 10 jours après le semis de ce dernier. Un traitement de maïs en culture pure en semis conventionnel a été ajouté en parallèle à ces traitements, pour le comparer au semis direct, et éventuellement pouvoir utiliser le modèle pour tester le comportement des associations en relais en conventionnel.

Le maïs a été semé le 25 Novembre 2008 à une densité de semis de 7 plantes/m² et la plante de couverture le 4 Décembre 2008 avec des densités de semis de 31 et de 100 plantes/m² respectivement pour le *Cajanus* et le *Brachiaria*. Les mêmes dates et doses de semis ont été appliquées aussi bien en association qu'en culture pure.

Deux doses d'engrais ont été apportées pour le maïs (de façon localisée dans les associations notamment, sur la ligne de maïs) au semis 24-84-48 kg/ha de NPK et à 44 jasm (jasm = jours après le semis du maïs) 45 kg/ha de N, les cultures pures de plantes de couverture n'ayant pas reçu de fertilisation.

L'essai avait été implanté au début de la saison agricole 2007-2008 avec un plan fixe et pluriannuel de sorte que les résidus de culture incorporés au sol par labour dans le cas du traitement « semis conventionnel » ou constituant les mulchs pailleux des traitements « semis direct », étaient pour chaque parcelle les résidus produits l'année antérieure pour le même traitement. Le dispositif expérimental de la station expérimentale était un dispositif en 3 blocs complets randomisés.

Pour ce travail d'évaluation du modèle, on a privilégié la fréquence des mesures au cours du cycle et le nombre de variables mesurées, par rapport à la distribution spatiale des points de mesure. Ainsi seules 2 répétitions ont été considérées pour les traitements concernés (Tableau 3.2). Pour chaque traitement, 3 sous placettes de 1 m² chacune (2 et 1 sous placettes respectivement dans la première et dans la deuxième répétition) ont été considérées pour le calage et l'évaluation du modèle. A chaque sous placette correspond un tube d'accès d'une sonde TDR (Trime) (situé à moins d'un mètre de la sous placette) utilisée pour la mesure du

de l'humidité du sol (tous les 10 cm jusqu'à la profondeur de 150 cm), avec un pas de temps de l'ordre d'une semaine. Sur chaque sous placette, étaient également réalisés, à intervalles de l'ordre d'un mois, des prélèvements de sol pour détermination des teneurs en azote minéral par dosage au laboratoire par extraction au KCl, le long du cycle. Les prélèvements de sol ont été faits sur les horizons 0-10, 10-20, 20-30, 30-60, 60-90 et 90-120 cm de profondeur. Chacune de ces sous placettes constituait l'unité d'observation et de mesure, et l'unité de simulation élémentaire, correspondant à une « situation culturale » assumée comme spatialement homogène du point de vue des paramètres du modèle et de ses variables de sortie. Les 2 sous placettes, proches l'une de l'autre (5 m de distance) dans chaque parcelle de la première répétition permettaient d'évaluer la part de l'erreur expérimentale imputable aux erreurs de mesure, en assumant l'hypothèse d'une variabilité très faible des conditions du milieu et du peuplement entre ces deux sous placettes. Les variations entre chacune de ces deux sous placettes et la troisième sous placette située dans la deuxième répétition, étaient quant à elles imputables à la fois aux erreurs de mesure et à la variabilité spatiale entre répétitions. Ainsi donc, chaque variable mesurée comporte un indice T1 et T2 pour les 2 sous placettes dans la première répétition et T0 pour la sous placette dans la deuxième répétition.

En première approximation, un « sol moyen de l'essai » a été retenu pour les paramètres du sol dans toutes les simulations. Pour chaque traitement les valeurs initiales des profils hydriques ont été paramétrées en considérant la moyenne, pour chaque tranche de sol considérée, des mesures réalisées dans chaque tube du traitement. L'état initial du profil d'azote était obtenu selon le même principe, en utilisant les premières mesures de la saison (2 semaines après le semis du maïs). Le laboratoire des sols de l'Embrapa ne disposant pas de presse à membrane en état de marche, les teneurs en eau au point de flétrissement et à la capacité au champ ont été déduites des mesures de la sonde trime, en prenant pour chaque cote les valeurs minimales et maximales, respectivement, observées sur l'ensemble de l'expérimentation qui couvrait toute la saison de pluies et la saison sèche. Dans le cas de l'estimation de l'humidité à la capacité au champ, ont été exclues les mesures réalisées à une date où était enregistré un évènement pluvieux, qui risquaient de correspondre à un état saturé du sol sur une partie du profil. Dans le cas de l'estimation de la teneur en eau du sol au point de flétrissement, ont été exclues les dernières mesures réalisées à l'extrême fin de la saison sèche, bien après flétrissement de toute la végétation présente sur les parcelles, faisant l'hypothèse qu'après une longue période où le sol est soumis à l'évaporation, sa teneur en eau peut atteindre des valeurs nettement inférieures à l'humidité au point de flétrissement.

Une valeur de 0,20 a été retenue pour l'albédo du sol nu sec pour les sols argilo-limoneux (Brisson et al, 2009).

La teneur en azote organique, le pH, la teneur en argile du sol sur l'horizon 0-20 cm, proviennent des analyses du laboratoire de l'Embrapa. Les densités apparentes des différentes couches ont été aussi déterminées au laboratoire à partir de prélèvements non remaniés avec des cylindres de volume connu.

Les quantités de mulch ont été mesurées en début de cycle à 18 jours avant les semis (Tableau 3.2), puis à l'aide de la formule calculant la décomposition du paillis en fonction du temps dans STICS, nous avons estimé les quantités présentes à la date de début de simulation, pour initialiser le modèle à cette date. Les différents paramètres du mulch (albédo du mulch, paramètres de vitesse de décomposition, q_{mulch0}) sont tirés des travaux précédents sur le modèle dans la région (Macena et al., 2004; Maltas, 2007).

Les mesures réalisées sur les plantes concernent, pour les deux espèces, les variables suivantes : stades de développement du maïs, biomasse aérienne à ces différents stades et teneur en azote total des parties aériennes à la récolte déterminée au laboratoire par la méthode Kjeldal (Bremner and Mulvaney, 1982). Ces mesures ont été réalisées une seule fois pour chaque répétition de traitement. L'indice foliaire (LAI), à l'aide du Licor-LAI2000 (Licor, INC.), et le rayonnement intercepté, à l'aide de l'Accupar LP-80 (Decagon Devices, INC.), ont été mesurés sur chaque sous placette (Annexe 3).

Le profil racinaire a été caractérisé pour chacun des traitements sur 0-140 cm sur la première répétition où les 2 sous placettes étaient présentes, avec la méthode de cartographie racinaire décrite par François et Hubert (1986). Il a été réalisé une seule fois pour l'ensemble des traitements entre 20 et 25 jours après la floraison du maïs. Pour chaque traitement un fossé (1.5 m de large, 1.7 m de profondeur) a été creusé perpendiculairement aux lignes de semis. Une grille carrée (avec une maille carrée de 0.02*0.02m), fixée sur le plan d'observation, permettait de noter l'absence de racine (notée 0) ou la présence de racine(s) (notée 1, pour 1 ou plusieurs racines) (le nombre de racines et la distinction entre les racines des deux espèces n'ont pas été pris en compte).

Sur chaque carte racinaire, le nombre de mailles avec au moins un impact racinaire a été cumulé tous les 0.1 m de profondeur, puis le pourcentage de maille avec impact sur l'ensemble des mailles a été calculé. Ce nombre a été utilisé pour présenter la distribution des racines tous les 0.1 m de couche de sol et a été considéré comme indicateur de densité racinaire.

Les données climatiques utilisées sont issues de deux stations climatiques, l'une installée dans la station expérimentale (station automatique Campbell) et l'autre située à proximité appartenant à l'institut national de météorologie Brésilienne (INMET) et utilisée pour valider et/ou compléter la première. Les variables climatiques concernées sont : le rayonnement global, la température minimale et maximale journalière, la vitesse du vent et l'humidité de l'air. La pluviométrie journalière a été mesurée à l'aide d'un pluviomètre manuel. L'évapotranspiration potentielle journalière (ETP) a été calculée par le modèle en utilisant la formule de Penman-Monteith.

Un dispositif annexe a été conduit afin de caler certains paramètres plantes du maïs (adens, bdens et dlaimax), qui interviennent dans la prise en compte de l'effet de la densité de peuplement sur la simulation du LAI. Il s'agit d'un essai conduit sous semis direct avec des densités de maïs variables. Cinq densités de maïs (3, 4, 5, 7 et 9 plantes/m²) ont été considérées, et des mesures de LAI ont été faites plusieurs fois tout au long du cycle.

Tableau 3.2: Traitements expérimentaux et quantité de résidus (t/ha) durant 2008-2009 à la station expérimentale

Traitements	Système de culture	Cultures	Date de semis plante de couverture (jasm)	Quantité de résidus à la surface du sol (t/ha)	
				Rép.1	Rép.2
MP1	association culture	Maïs-Cajanus	10	1.8	2.9
MB1	association culture	Maïs - Brachiaria	10	4.8	6.1
MSD	Culture pure	Maïs		3.2	3.3
PS1	Culture pure	Cajanus	10	4.3	4.4
BS1	Culture pure	Brachiaria	10	4.9	5.1
MSC*	Culture pure	Maïs			

jasm : jours après semis du maïs

* : traitement de maïs pur en conventionnel

2.5. Paramétrage du modèle

Le paramétrage du modèle pour le maïs et les plantes de couverture dans nos conditions expérimentales a concerné uniquement les paramètres spécifiques au sol et aux espèces végétales utilisées, considérant que le modèle était correctement calé pour les paramètres

génériques. Certains paramètres du modèle ont été directement déduits des mesures réalisées dans l'expérimentation, d'autres proviennent de la littérature et d'autres enfin (difficilement mesurables) ont été obtenus par ajustement (Tableau 3.3). Cette dernière procédure a été conduite à l'aide d'un logiciel annexe à STICS, *opti60var.exe*, qui offre la possibilité d'estimer les valeurs de 1 à 5 paramètres simultanément en minimisant un critère d'écart entre modèle et observations pour une variable « à expliquer » qui dépend de la fonction à caler (Tableau 3.3). Le calcul se fait grâce à l'algorithme du simplexe (Sorooshian and Gupta, 1993) qui teste une gamme de valeurs possibles pour chaque paramètre à optimiser, la valeur retenue est celle qui correspond à la valeur la plus faible du critère des moindres carrés pondérés (Makowski et al., 2006).

Cette procédure a notamment été utilisée pour l'estimation des paramètres de calcul des transferts radiatifs, aussi bien pour le maïs que pour les plantes de couverture. Le paramétrage du modèle a été réalisé d'abord en utilisant uniquement les données expérimentales obtenues sur les cultures pures de maïs en semis direct et de plantes de couverture (*Cajanus* et *Brachiaria*). Ensuite, l'évaluation du modèle a été réalisée en utilisant les données expérimentales obtenues sur les cultures associées maïs-*Cajanus* et maïs-*Brachiaria* ; il s'agissait de vérifier la capacité du modèle à simuler correctement le fonctionnement des cultures associées.

Le modèle STICS n'avait jamais fait l'objet de paramétrage pour le *Brachiaria* et pour le *Cajanus*. La structure du modèle permet cependant une adaptation rapide à différentes espèces. Nous sommes partis de fichier plantes d'espèces les plus proches botaniquement qui ont auparavant été paramétrées pour le modèle mais dans des contextes différents du nôtre (fichier plante de la prairie : *prairie.plt* pour *Brachiaria* et le fichier plante du *Canavalia sp* : *canavalia.plt* pour le *Cajanus*).

Le paramétrage du modèle pour chaque espèce a été réalisé en plusieurs étapes :

- Calage des constantes thermiques/stade de développement :

Cette étape a consisté à forcer le modèle à passer par les dates observées des stades phénologiques du maïs et des plantes de couverture, en repositionnant les stades phénologiques à partir des mesures de l'évolution de la variable LAI, pour en déduire les sommes de température correspondant à chaque intervalle entre stades de développement.

- Calage des paramètres *adens*, *bdens* et *dlaimax* du maïs :

Ces paramètres ont été obtenus par optimisation sur la variable LAI qu'ils servent à calculer. Les mesures de la variable LAI se sont faites le long du cycle du maïs sur l'essai annexe à densités de plantes de maïs variables. Les autres paramètres généraux du maïs ont été

conservés. En effet, ils ont été tirés des travaux antérieurs qui ont été conduits dans les zones tropicales (Affholder, 2001; Scopel et al. 2004; Maltas, 2007, Motisi et al., 2010). Il s'agissait de paramètres spécifiques aux variétés tropicales de maïs.

- Calage de certains paramètres généraux et variétaux des plantes de couverture :

Les valeurs des paramètres qui déterminent la croissance des espèces ont été optimisées à partir des données mesurées de la variable indice foliaire (LAI). Le LAI représente une variable d'état centrale dans le modèle, nous avons donc fait le choix d'ajuster en premier ces paramètres. Les paramètres qui ont été ajustés concernent le module de croissance racinaire (croirac) calé à partir de la profondeur maximale d'enracinement observée, les paramètres du module de croissance aérienne (adens, bdens et dlaimax) ont été optimisés à partir de la variable LAI.

Les paramètres de la courbe de dilution de l'azote (adilmax, bdilmax) des plantes de couverture ont été optimisés en première approximation à partir de la biomasse et de la quantité d'azote total de la plante à la récolte.

Nous avons optimisé les paramètres du module de transfert radiatif pour le maïs et les plantes de couverture (ktrou, rapforme) à partir des mesures de rayonnement intercepté pour chaque espèce en culture pure.

Pour le Cajanus la valeur du paramètre (slamax) a été modifiée à partir des travaux de Robertson et al., (2001), dans lesquels il attribue à ce paramètre la valeur (slamax= 400). Aussi, les paramètres de photopériodisme du Cajanus ont été modifiés, avec comme valeurs des paramètres (phobase=11.7 et phosat= 13) (Robertson et al., 2001).

Enfin pour le Cajanus, le paramètre lié à l'extraction d'eau par la plante (rsmin= résistance stomatique minimale) a été optimisé sur les mesures de stocks hydriques du sol, et les paramètres racinaires (draclong et lvfront) ont été modifiés à partir des observations en station expérimentale réalisées sur les fronts racinaires maximaux.

Les paramètres physiques des résidus de cultures qui interviennent dans les bilans hydriques, thermiques et azotés ont été ceux définis à partir des travaux de Macena da Silva (2004) et Scopel et al, (2004).

2.6. Evaluation du modèle

Pour l'évaluation du modèle, les variables clés simulées (LAI, biomasse, rendement, quantité de N dans les plantes à la récolte, quantité de N et d'eau dans le sol), ont été comparées à leurs variables mesurées correspondantes en utilisant deux critères :

- la différence moyenne entre variable simulée \hat{y}_i et variable mesurée y_i

$MD = 1/n \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)$, où n est le nombre de situations avec mesure,

- l'écart quadratique moyen (RMSE) :

$$RMSE = (1/n \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2)^{1/2},$$

MD et RMSE donnent une estimation de l'erreur du modèle dans la même unité que celle de la variable observée. L'écart moyen indique si le modèle surestime ($MD < 0$) ou sous-estime ($MD > 0$) la variable étudiée. Cependant, on remarque que dans le calcul de ce critère des erreurs de signe différent se compensent d'où l'intérêt d'une seconde estimation de l'erreur moyenne avec la RMSE.

3. Résultats

3.1. Calage du modèle sur les cultures pures

3.1.1. Calage sur les paramètres plantes (LAI, biomasse)

Pour le maïs en culture pure en semis direct sur mulch, le calage des paramètres plantes adens, bdens et dlaimax à partir de l'essai annexe avec des densités variables de maïs (Tableau 3.3) a permis une meilleure simulation de l'évolution du LAI. Les résultats simulés de l'évolution du LAI du maïs en culture pure de l'essai principal (Figure 3.1a et Figure 3.1b) ont été assez satisfaisants (RMSE=0.32 et 0.07, respectivement pour MSC et MSD). Les valeurs de LAI simulées par le modèle sont proches des valeurs observées et le modèle reproduit très bien l'évolution du LAI du maïs en culture pure en semis direct (RMSE=0.07, MD=0.04). En revanche dans le traitement « conventionnel » le modèle sous-estime le LAI du maïs pur (Figure 3.1a) à la floraison et la simulation est moins bonne (RMSE=0.32, MD=0.13) par rapport au maïs en semis direct. Les résultats expérimentaux d'un plus faible LAI du maïs en semis direct par rapport au conventionnel ne sont donc pas reproduits par le modèle. La simulation de la biomasse est assez satisfaisante en début de cycle du maïs en culture pure, par contre elle est sous estimée à la floraison et surestimée à la récolte sur les deux traitements (MSD ou MSC). Le rendement à la récolte du maïs a été aussi surestimé par le modèle sur les deux traitements de maïs en culture pure.

Tableau 3.3 : Résultats du calage du modèle STICS-CA des paramètres des cultures (Maïs, Cajanus et Brachiaria) dans notre contexte spécifique, basé sur les données mesurés en conditions expérimentales sur cultures pures.

Signification des paramètres		Déterminations des paramètres		Maïs		Cajanus		Brachiaria	
Paramètres plante		Unités							
stlevamf	cumul d'unités de développement entre les stades LEV et AMF	Expérimentation	degrés.jours	230	250	250	250	250	250
stamflax	cumul d'unités de développement entre les stades AMF et LAX	Expérimentation	degrés.jours	600	1200	1200	1200	2000	2000
Stlevdrp	cumul d'unités de développement entre les stades LEV et DRP	Expérimentation	degrés.jours	1290	1400	1400	1400	2500	2500
Stlaxsen	cumul d'unités de développement entre les stades LAX et SEN	Expérimentation	degrés.jours	400	400	400	400	900	900
Stisenlan	cumul d'unités de développement entre les stades SEN et LAN	Expérimentation	degrés.jours	-	-	-	-	-	-
stdrpmat	cumul d'unités de développement entre les stades DRP et MAT	Expérimentation	degrés.jours	870	-	-	-	-	-
croirac	vitesse de croissance du front racinaire	Optimisation sur LAI.	cm degré.jour ⁻¹	0.19	0.12	0.12	0.12	0.06	0.06
Adens	paramètre de compensation entre le nombre de tiges et la densité de plantes	Optimisation sur LAI.	SD	-0.36	-1.1	-1.1	-1.1	-0.59	-0.59
Bdens	densité minimale à partir de laquelle il y a compétition entre plantes pour la croissance foliaire	Optimisation sur LAI.	plantes m ⁻²	3.4	-	-	-	-	-
Rsmmin	résistance stomatique minimale	Optimisation sur stock hydrique.	s m ⁻¹	-	50	50	50	-	-
Draclong	vitesse maximale de production de longueur racinaire	Expérimentation	cm racine plante ⁻¹ degré.jour ⁻¹	-	1000	1000	1000	-	-
Lvfront	densité racinaire au niveau du front d'enracinement	Expérimentation	cm racine.cm ⁻³ sol	-	9E-2	9E-2	9E-2	-	-
Dlaimax	vitesse maximale de production de surface foliaire nette	Optimisation sur LAI.	m ² feuille plante ⁻¹ degré.j ⁻¹	1.35E-3	25E-3	25E-3	25E-3	6.7E-5	6.7E-5
adilmax	paramètre de la courbe de dilution maximale [Nplante]=adilmax MS^(-bdilmax)	Optimisation sur azote plante	N% MS	-	4.5	4.5	4.5	3.8	3.8
bdilmax	paramètre de la courbe de dilution maximale [Nplante]=adilmax MS^(-bdilmax)	Optimisation sur azote plante		-	0.44	0.44	0.44	0.52	0.52
efcroijuv	efficience de croissance maximale pendant la phase juvénile (LEV-AMF)	Optimisation sur biomasse	g MJ ⁻¹	-	-	-	-	2	2
efcroiveg	efficience de croissance maximale pendant la phase de remplissage des grains (DRP-MAT)	Optimisation sur biomasse	g MJ ⁻¹	-	-	-	-	2.5	2.5
efcroirepro	efficience de croissance maximale pendant la phase végétative (AMF-DRP)	Optimisation sur biomasse	g MJ ⁻¹	-	2.5	2.5	2.5	2.2	2.2
hautmax	hauteur maximale du végétal	Experimentation	m	-2.0	2.3	2.3	2.3	1.3	1.3
ktrou	coefficient d'extinction du PAR à travers le végétal (transferts radiatifs)	Optimisation sur rayonnement intercepté		1.07	0.93	0.93	0.93	0.22	0.22
Rapforme	rapport épaisseur/largeur de la forme du végétal (négatif quand base de la forme < sommet)	Optimisation sur rayonnement intercepté	SD	4.54	1	1	1	1.33	1.33
Slamax	surface spécifique	Littérature	Cm ² .g ⁻¹	-	400	400	400	-	-
phobase	photopériode de base	Littérature	heures	-	11.7	11.7	11.7	-	-
phosat	photopériode saturante	Littérature	heures	-	13	13	13	-	-

Pour le *Brachiaria*, les résultats simulés de l'évolution du LAI et de la biomasse (Figure 3.2a et 2c) sont satisfaisants pour le LAI (RMSE=0.65 et MD=-0.96) mais le sont moins pour la biomasse (RMSE=3.4 t.ha⁻¹ et MD=0.08). Le modèle a bien pu reproduire l'évolution de la croissance du LAI du *Brachiaria* en début de cycle, puis une légère sous estimation du LAI ensuite. Par contre pour la biomasse, l'écart entre valeurs observées et simulées est important. Le modèle sous-estime la biomasse du *Brachiaria* en début de cycle et la surestime à la récolte.

La simulation de l'évolution du LAI du *Cajanus* par le modèle est également assez satisfaisante (RMSE=-0.43 et MD=1.32) (Figure 3.2b). La biomasse du *Cajanus* est assez bien simulée en début de cycle, mais est surestimée par le modèle à la fin de la saison des pluies (RMSE=5.12 t.ha⁻¹ et MD=-1.37 t.ha⁻¹).

Généralement, le modèle simule assez bien la variable LAI des cultures pures en semis direct sur mulch. La biomasse est néanmoins moins bien simulée surtout dans le cas du maïs à la floraison. Le rendement du maïs et les biomasses à la récolte sont surestimés par le modèle pour l'ensemble des cultures (Tableau 3.3). Cependant, les biomasses observées à la récolte sont pour tous les traitements inférieures aux biomasses observées à floraison, ce qui suggère que la biomasse mesurée à la récolte sous estime la biomasse construite au cours de la croissance, probablement à cause de pertes de feuilles au cours de la sénescence ou d'erreurs systématiques d'échantillonnage. Les mesures à la récolte ont été réalisées un mois après la maturité du maïs comme cela se fait le plus souvent chez les petits agriculteurs de la zone d'étude qui ont l'habitude de laisser sécher sur pied leur maïs plusieurs jours après maturité avant de le récolter. Les pertes de feuilles ne sont pas prises en compte par le modèle. On retiendra donc une simulation correcte de la biomasse au cours de la croissance végétative avec néanmoins une légère sous-estimation par le modèle de la biomasse à floraison.

Tableau 3.4: Résumé des résultats de simulations/observations des variables rendement (t/ha), biomasse (t/ha) et N plante (kg/ha) à la récolte.

Traitements	Rendement_Sim	Rendement_Obs	Biomasse aérienne récolte_Sim	Biomasse aérienne récolte_Obs	Azote plante récolte_Sim	Azote plante récolte_Obs
MSD	10	6	21	13	331	72
PS1	-	-	20	12	238	206
BS	-	-	11	6	120	31

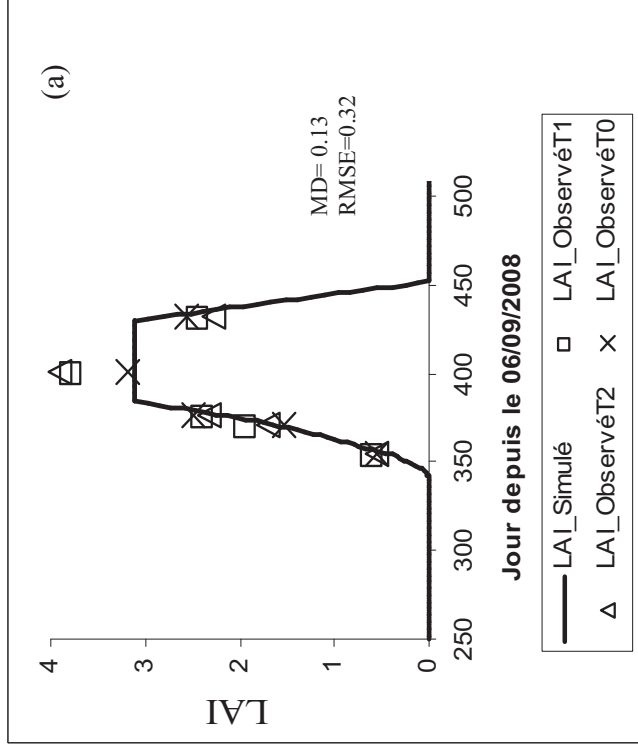
3.1.2. Calage du modèle sur les paramètres sol (N sol, stock eau du sol)

Les dynamiques d'évolution du stock d'eau mesuré et simulé (Figure 3.1e et 1f ; Figure 3.2e et 2f) au niveau du profil du sol (0-150 cm) ont montré une très bonne simulation par le modèle du stock pour les traitements maïs en culture pure (RMSE=43.2 mm, MD=27.48 ; et RMSE=29.75 mm, MD=-20.3 respectivement pour MSC et MSD) et *Brachiaria* en culture pure (RMSE=39.2 mm, MD=5.1mm). Pour le traitement *Cajanus* en culture pure, l'évolution des stocks en début de cycle est assez bien représentée par le modèle. En revanche à partir de la fin de la période de croissance, correspondant à une période où les pluies sont rares et inférieures à la demande de la culture, le modèle surestime le stock d'eau (RMSE=-42 mm, MD=61.5 mm) (Figure 3.2f). Le modèle sous-estime donc l'assèchement du sol par la culture de *Cajanus*, dont l'extraction de l'eau apparaît au champ beaucoup plus forte que celle des autres espèces de notre dispositif. L'estimation du paramètre r_{min} par régression non linéaire sur la variable stock d'eau au cours du cycle n'a pas permis pour autant de parvenir à une simulation satisfaisante du stock d'eau, si l'on considère une valeur limite inférieure $r_{min}= 50 \text{ s.m}^{-1}$. Le modèle reste insensible aux variations de la valeur de r_{min} en dessous de 50 s.m^{-1} .

Les résultats de simulation sur l'évolution du stock d'azote (Figure 3.1g et Figure 3.1h ; Figure 3.2g et Figure 3.2h) ont montré que globalement le modèle a pu simuler la dynamique de l'évolution du stock d'azote minéral du sol sur le profil (0-120 cm) en début de cycle sous l'ensemble des cultures pures. Toutefois pour le traitement maïs pur en semis direct, le modèle sous-estime fortement l'azote du sol à partir de la maturité du maïs, d'où une mauvaise simulation de l'azote du sol (RMSE=154 $\text{kg.ha}^{-1} \text{ N}$, MD= 191 $\text{kg.ha}^{-1} \text{ N}$). Contrairement au cas du maïs en culture pure en conventionnel (RMSE=147 $\text{kg.ha}^{-1} \text{ N}$, MD= 70 $\text{kg.ha}^{-1} \text{ N}$).

Cette même tendance est valable pour le *Cajanus* en semis direct, le modèle n'étant pas parvenu à simuler correctement les stocks d'azote en fin de cycle (RMSE=113 $\text{kg.ha}^{-1} \text{ N}$, MD= -50 $\text{kg.ha}^{-1} \text{ N}$). De même la dynamique d'extraction de l'eau par le *Cajanus* est sous-estimée par le modèle, induisant une surestimation des stocks d'eau et d'azote en fin de cycle. Par contre pour le *Brachiaria* en culture pure en semis direct, le modèle simule assez bien l'évolution du stock azote tout au long du cycle (RMSE=63.5 $\text{kg.ha}^{-1} \text{ N}$, MD= 5.6 $\text{kg.ha}^{-1} \text{ N}$). Cependant, et ce point sera discuté plus loin, on n'observe pratiquement pas d'augmentation du stock d'azote mesuré en fin de cycle en station expérimentale pour ce traitement, qui se distingue sur cet aspect de tous les traitements en semis direct de notre essai.

Maïs pur en conventionnel



Maïs pur en semis direct

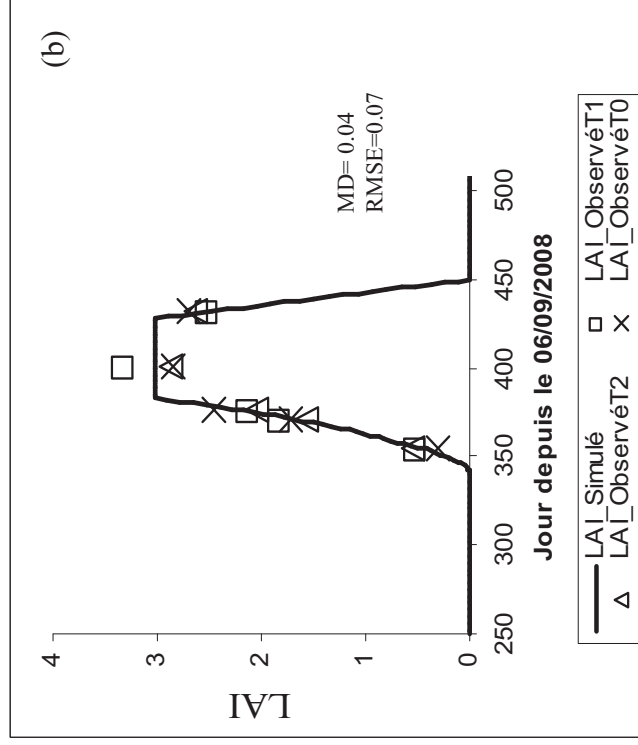
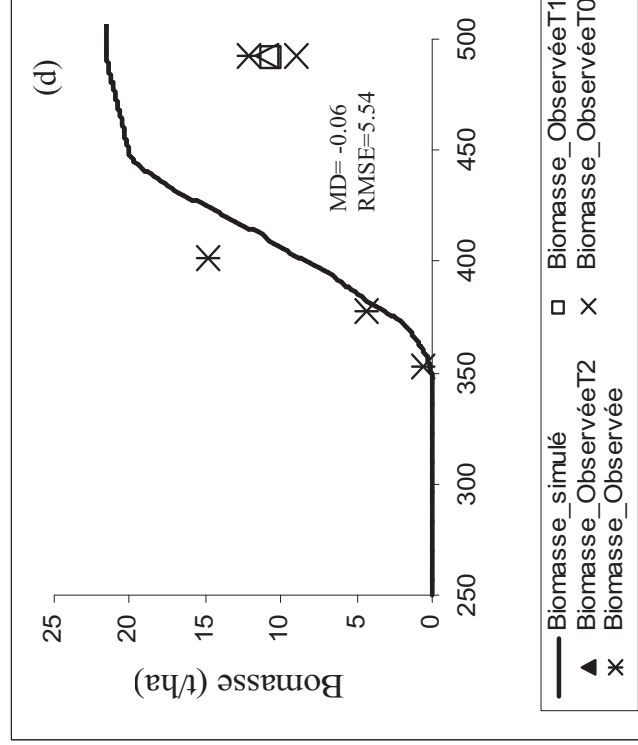
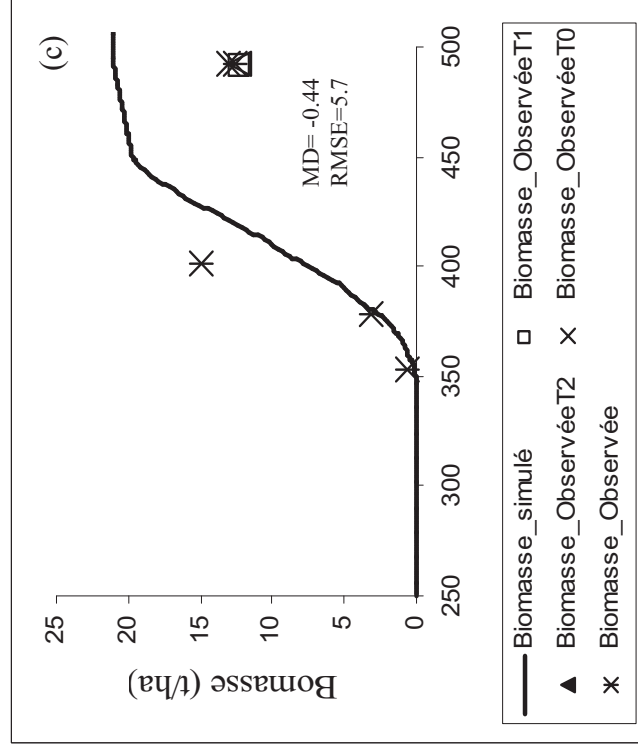
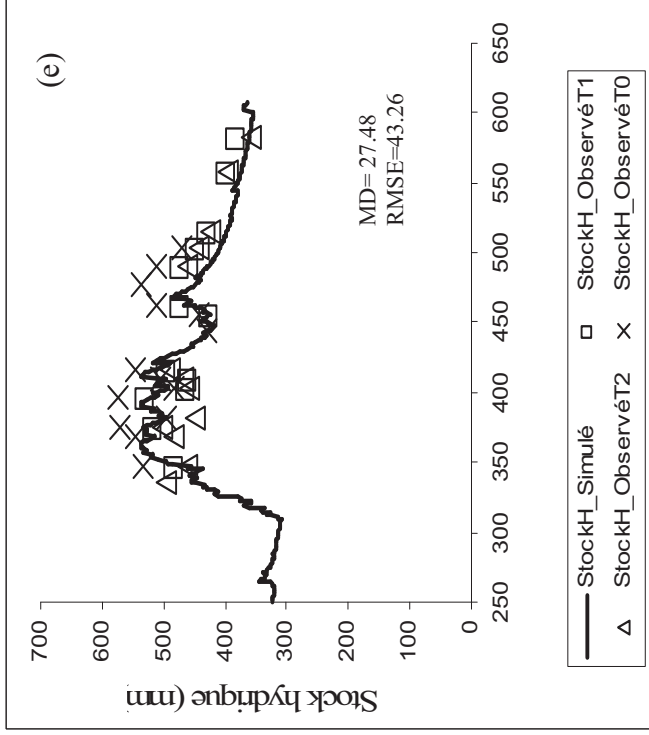


Figure 3.1 : calage des paramètres plante et sol des cultures pures en 2008/09 maïs en culture pure: maïs en conventionnel : LAI (a), biomasse (c), stock eau (e) et stock azote (g), maïs en semis direct : LAI (b), biomasse (d), stock eau (f) et stock azote (h).



Maïs pur en conventionnel



Maïs pur en semis direct

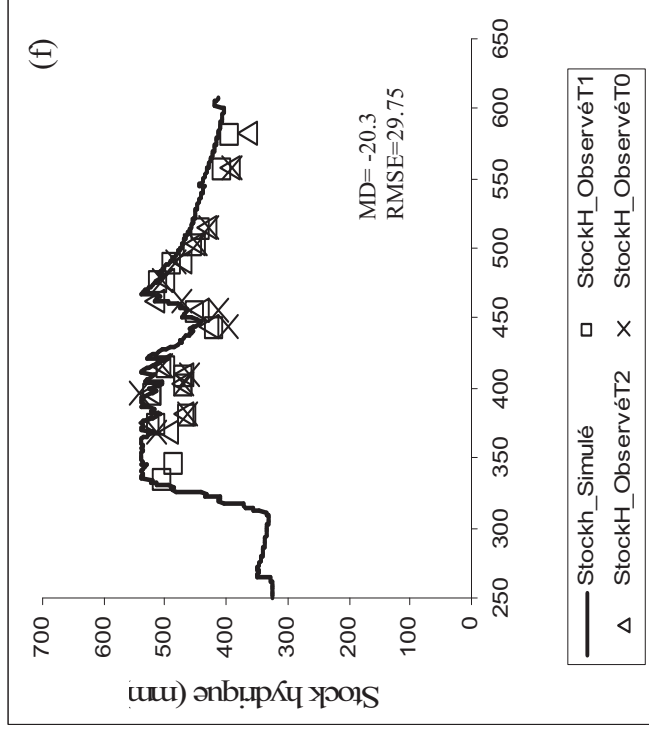
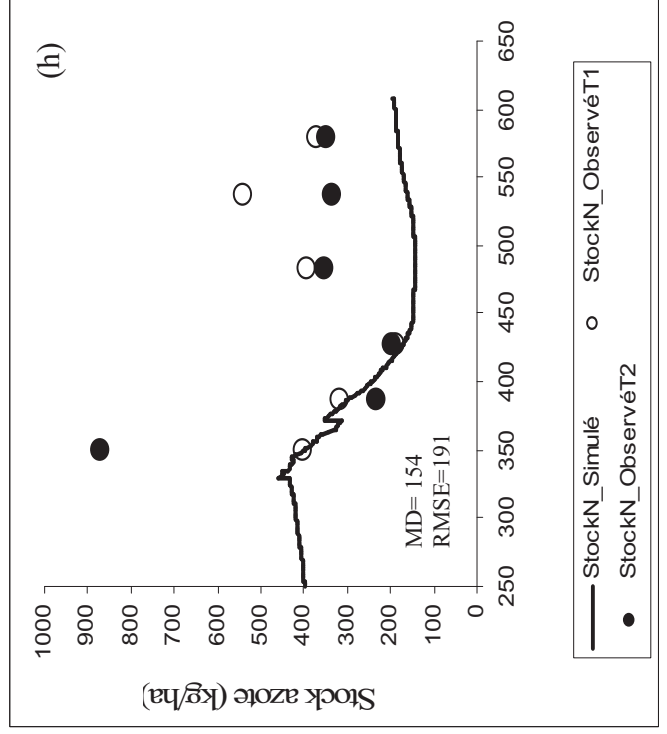
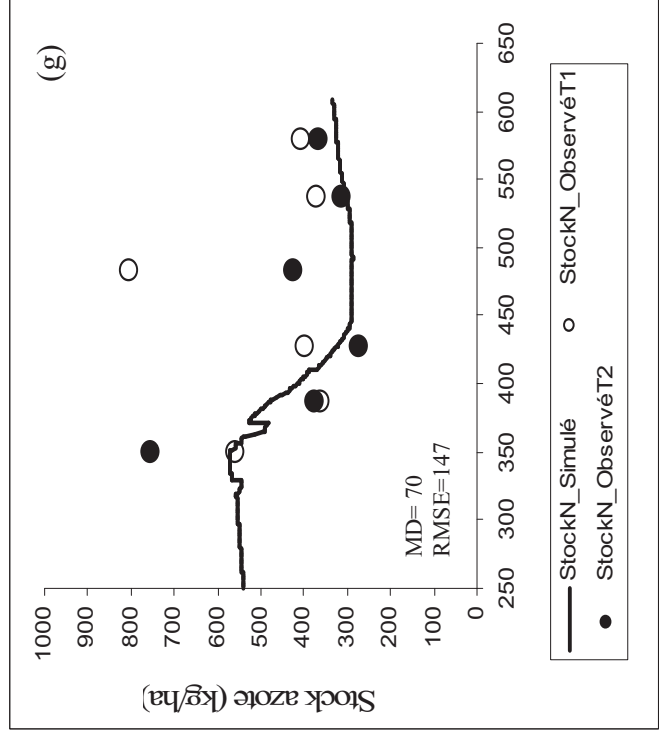
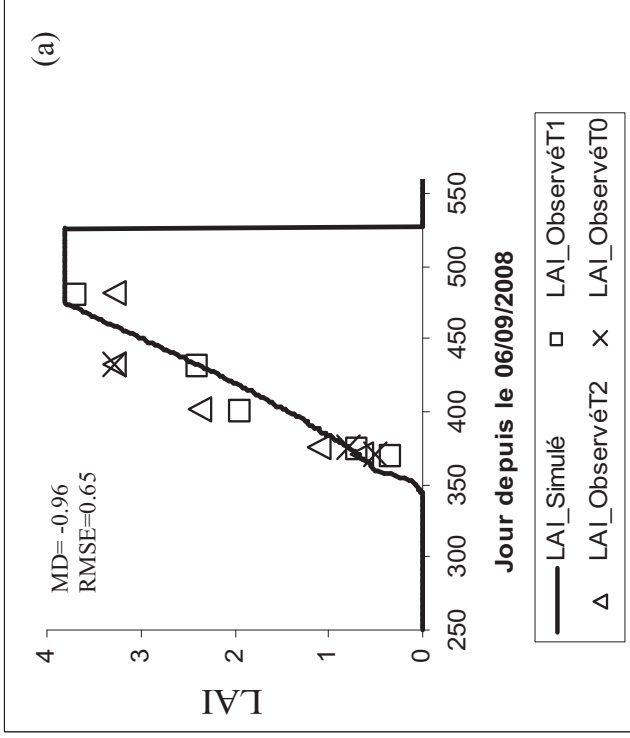


Figure 3.1 (suite) :
calage des paramètres
plante et sol des cultures
pures en 2008/09 maïs
en culture pure: maïs en
conventionnel : LAI (a),
biomasse (c), stock eau
(e) et stock azote (g),
maïs en semis direct :
LAI (b), biomasse (d),
stock eau (f) et stock
azote (h).



Brachiaria pur en semis direct



Cajanus pur en semis direct

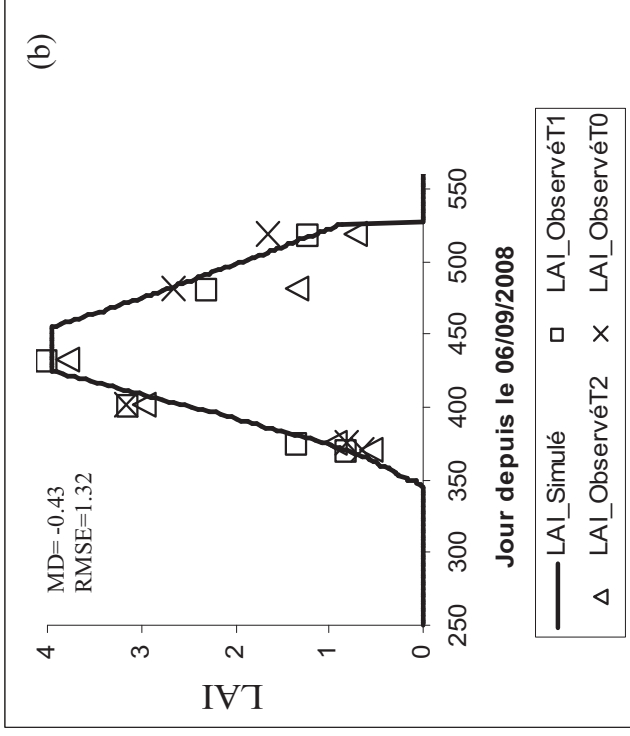
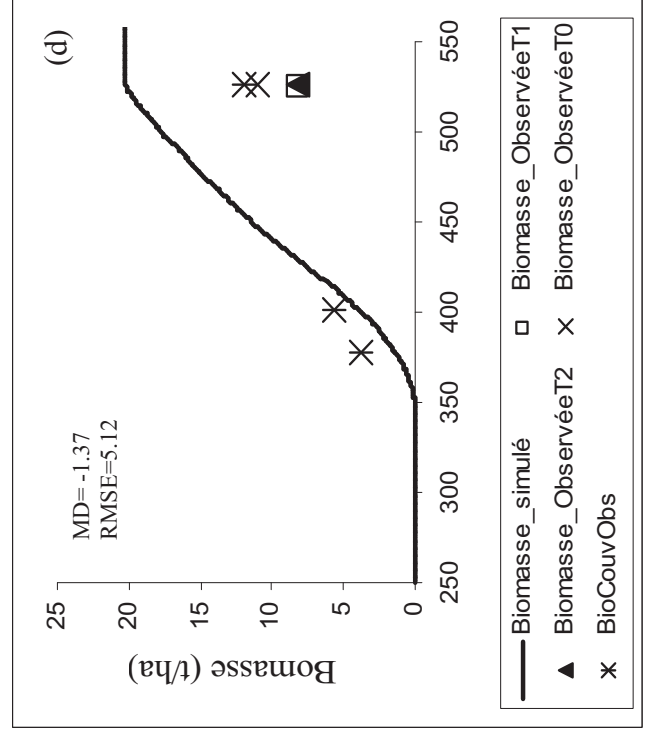
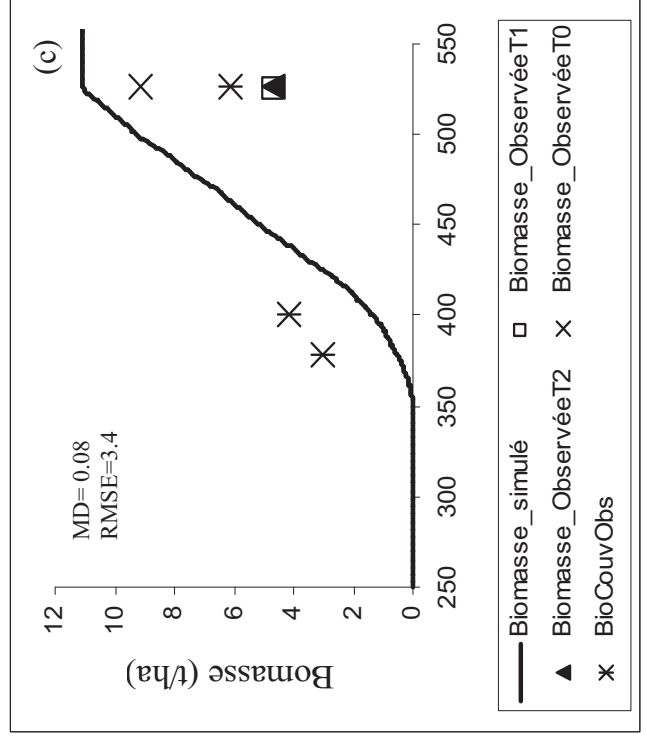
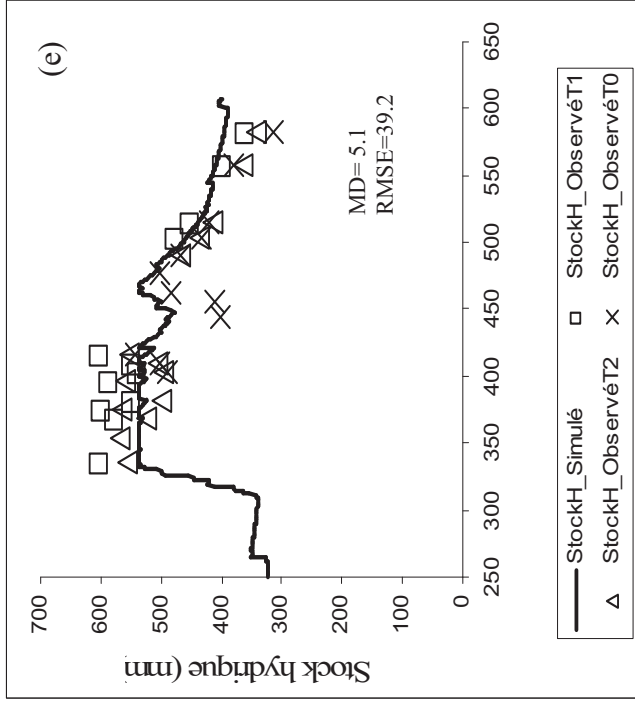


Figure 3.2 : calage des paramètres plante et sol des plantes de couverture en culture pure en 2008/09: Brachiaria en semis direct : LAI (a), biomasse (c), stock eau (e) et stock azote (g), Cajanus en semis direct : LAI (b), biomasse (d), stock eau (f) et stock azote (h).



Brachiaria pur en semis direct



Cajanus pur en semis direct

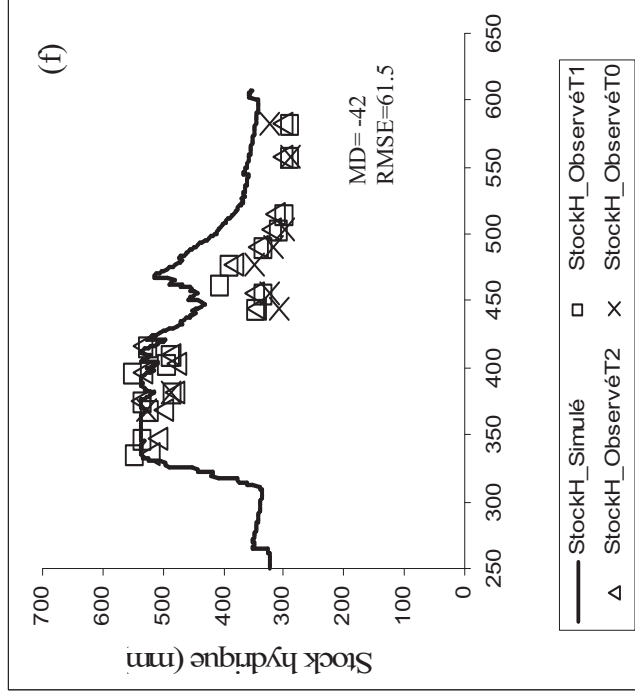
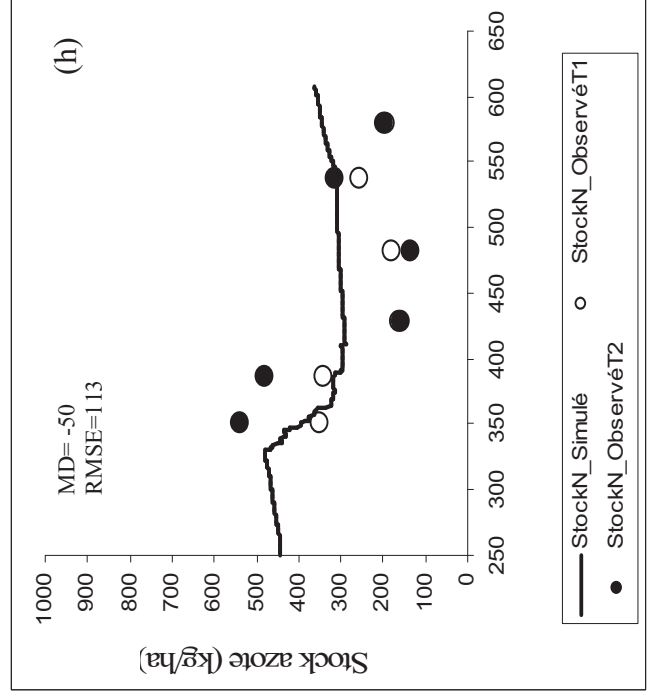
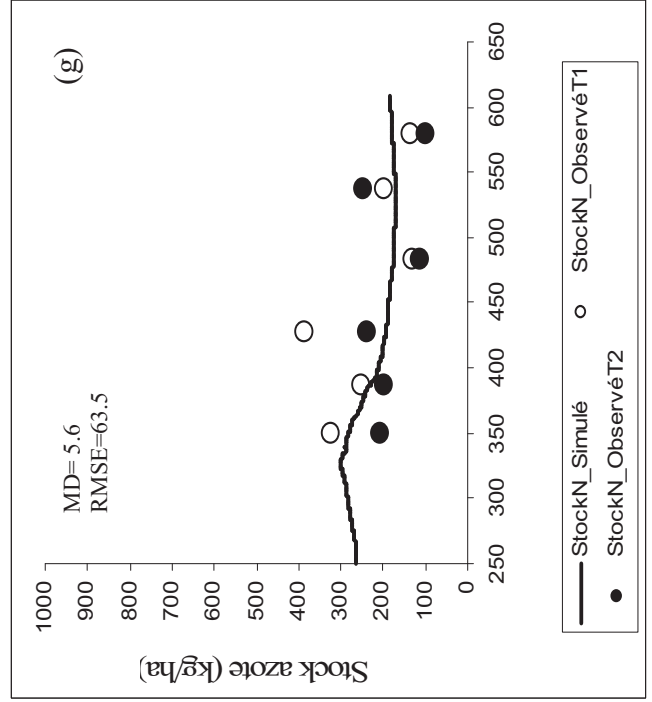


Figure 3.2 (suite) : calage des paramètres plante et sol des plantes de couverture en culture pure en 2008/09: Brachiaria en semis direct : LAI (a), biomasse (c), stock eau (e) et stock azote (g), Cajanus en semis direct : LAI (b), biomasse (d), stock eau (f) et stock azote (h).



3.2. Evaluation du modèle sur les associations

3.2.1. Variables plante

Les résultats des simulations des associations maïs-plantes de couverture montrent des qualités de simulation différentes selon le type d'association. Pour l'association maïs-Brachiaria (Figure 3.3a), le modèle simule assez bien le LAI de l'ensemble avec une légère sous-estimation sur l'ensemble du cycle (RMSE=0.4, MD=0.04), par contre pour l'association maïs-Cajanus le modèle surestime largement le LAI de l'ensemble (RMSE=1.6, MD=-1.1) à cause d'une surestimation du LAI du Cajanus pris séparément, si on le compare avec la simulation du LAI de Cajanus en culture pure. Cette surestimation est particulièrement élevée à cause de la simulation d'une inversion de hauteur relative des deux plantes (dominance) très tôt dans le cycle entre maïs et Cajanus. Ceci ne correspond pas à la réalité, où le Cajanus reste dominé par le maïs pendant l'essentiel du cycle de ce dernier (Annexe 4 a et b).

3.2.2. Variables du sol

L'évolution des stocks d'eau a été assez bien simulée dans les deux associations : maïs-Brachiaria (RMSE=35.8mm, MD=12.7mm) et maïs-Cajanus (RMSE=33.6mm, MD=-3.8mm), avec une légère surestimation en fin de cycle dans l'association maïs-Cajanus, déjà observée pour le Cajanus en culture pure.

L'évolution du stock d'azote du sol dans l'association maïs-Brachiaria (Figure 3.3d) a été globalement sous-estimée avec une légère accentuation après la récolte du maïs (RMSE=74 MD=58). Les simulations de la première moitié du cycle sont cependant correctes. Par contre dans l'association maïs-Cajanus (Figure 3.3c) l'azote du sol a été sous-estimé par le modèle tout au long du cycle des deux cultures (RMSE=220 MD=-164).

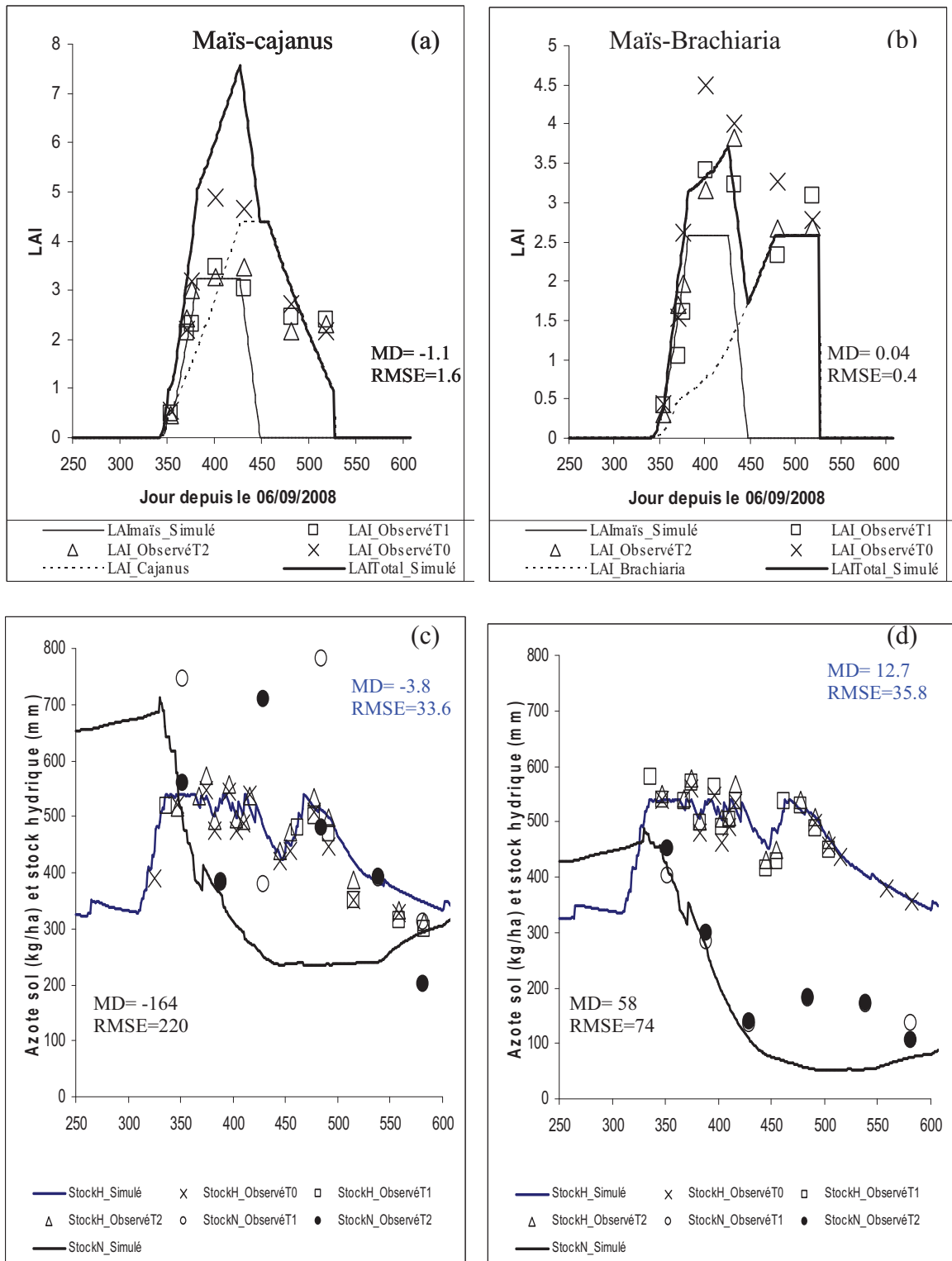


Figure 3.3 : Résultats de simulation du modèle en cultures associées: (a, c et e) maïs-Cajanus, et (b, d et f) maïs-Brachiaria.

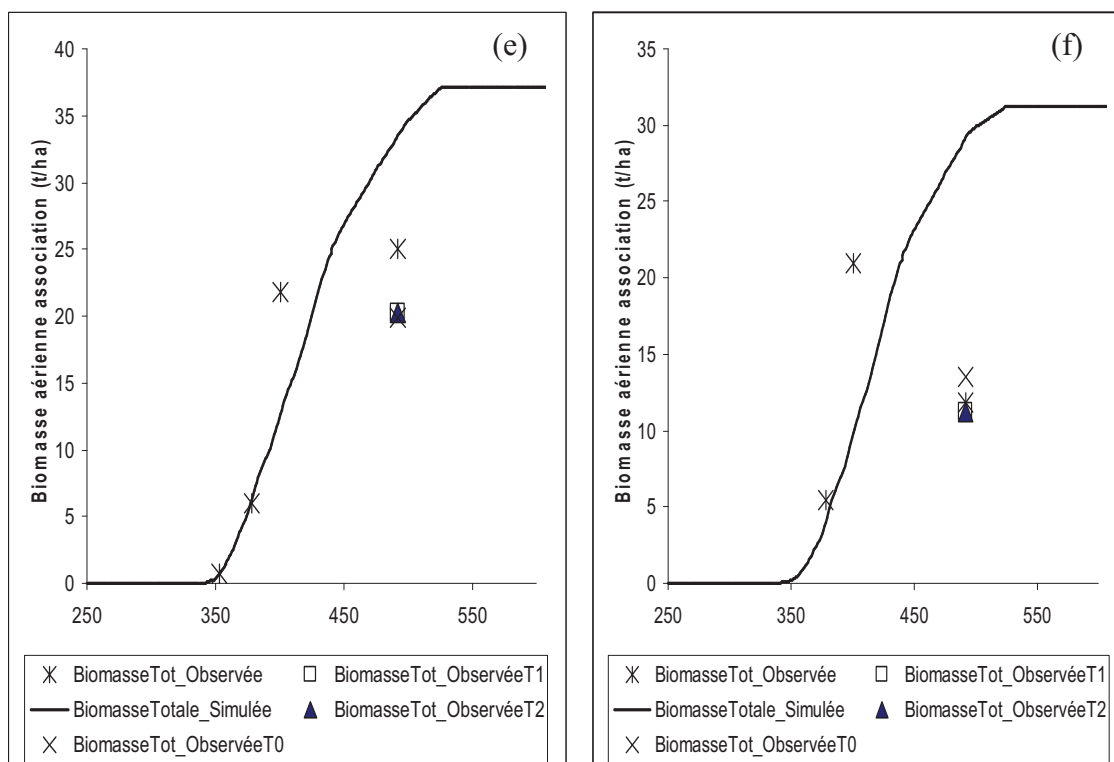


Figure 3.3 (suite) : Résultats de simulation du modèle en cultures associées: (a, c et e) maïs-Cajanus, et (b, d et f) maïs-Brachiaria.

4. Discussion

La méthodologie qui consiste à caler un modèle sur des mesures en cultures pures puis à l'évaluer sur des mesures en cultures associées est couramment utilisée dans les études de modélisations des cultures associées (Baumann et al., 2002b; Corre-Hellou, 2005; Shili-Touzi et al., 2010). Cependant cette procédure n'a pas permis d'aboutir à une qualité de simulation suffisante pour autoriser l'application du modèle à la quantification des flux et partage des ressources eau, azote et rayonnement pour les associations de culture en relais maïs-Cajanus, maïs-Brachiaria en semis direct avec mulch.

Nous discutons dans cette partie des raisons diverses (formalismes, expérimentation et mesures) de cette mauvaise qualité des simulations et les voies d'améliorations possibles en termes de formalismes à explorer et corriger, de paramètres à caler et de dispositif expérimental à mettre en place pour pouvoir simuler de façon satisfaisante les SAMBA dans le contexte des Cerrados.

4.1. Capacité du modèle à simuler les cultures pures

Tout d'abord, certaines imperfections du modèle STICS-CA pour la simulation des cultures pures méritent d'être signalées.

Le modèle ne calcule pas correctement la température du sol sous mulch, prédisant ainsi des températures de sol plus élevées en présence de mulch qu'en absence de mulch, ce qui est contraire aux résultats observés par d'autres auteurs en conditions tropicales (Arshad and Azooz, 2003; Bristow, 1988). Le modèle néglige l'amortissement de l'onde thermique journalière à travers le mulch (Arreola Tostado, 1996; Findeling, 2001) et attribue au sol une température égale à celle de la culture. Cette imperfection du modèle entraîne probablement des erreurs sur la simulation de la cinétique de minéralisation des résidus, et par conséquent sur l'évolution des stocks d'azote dans le sol en présence de mulch. Or nos tentatives de calage du modèle pour le maïs en culture pure avec et sans mulch montrent que nos simulations du LAI étaient principalement sensibles à tous les paramètres pouvant modifier l'intensité des stress azotés simulés pendant la phase de croissance végétative (données non présentées). Les erreurs de simulation de la température du mulch pourraient donc expliquer au moins en partie pourquoi le modèle simule un LAI plus élevé pour la culture du maïs avec mulch que pour la culture du maïs en conventionnel, alors que les mesures indiquent le contraire.

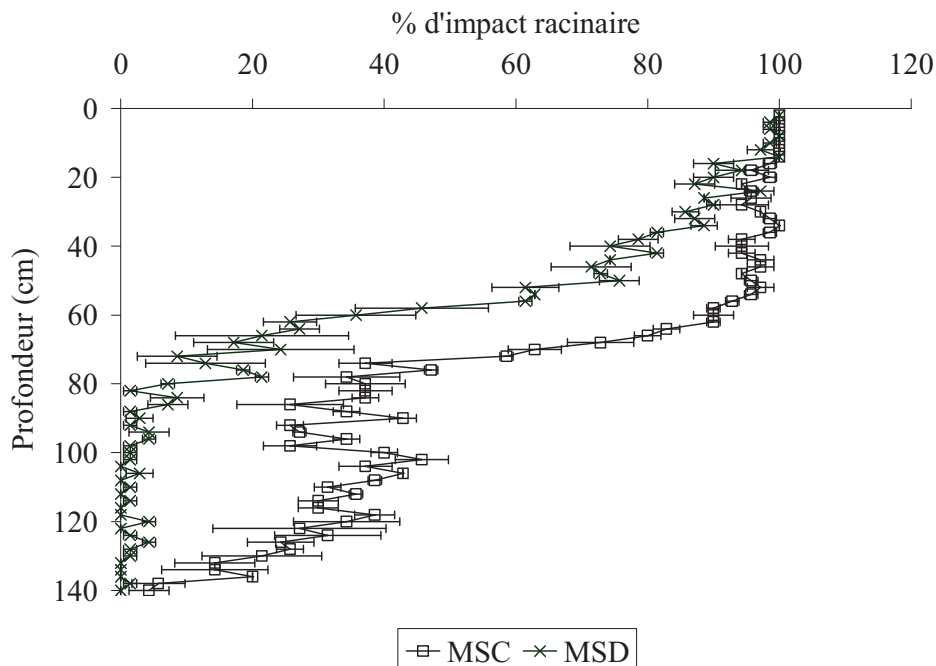


Figure 3.4: Profil racinaire des différents traitements à 20 jours après floraison du maïs en 2008-2009.

Tableau 3.3: Mesures de densité apparente à différentes profondeurs dans les traitements de maïs pur en semis direct (MSD) et semis conventionnel (MSC)

Traitements	Profondeurs de mesure de la densité apparente (cm)								
	5	15	25	35	50	70	90	110	135
MSD	1.17	1.16	1.30	1.26	1.08	1.01	1.05	1.02	1.02
MSC	1.08	1.13	1.23	1.27	1.02	0.99	1.06	1.01	1.01

Par ailleurs, des différences importantes ont été observées pour la distribution des racines dans le sol entre le maïs en semis direct sur mulch et le maïs conventionnel (Figure 3.4), et le modèle ne restitue pas ces différences. Les données de densité apparente (Tableau 3.3) et la caractérisation chimique du sol permettent d'écarter un effet de compaction du sol ou de la toxicité aluminique (Affholder, 2001; Horst et al., 1987) qui auraient pu être accentués en semis direct. Une autre possibilité est l'anoxie temporaire par excès d'eau dans la zone racinaire, dans la mesure où les stocks hydriques de notre essai atteignent rapidement des valeurs élevées en début de saison et s'y maintiennent jusqu'à la floraison. Affholder (2001) rapporte en effet des limitations de croissance racinaire du maïs par l'anoxie dans les Cerrados. Le risque d'anoxie est plus important avec le semis direct sous mulch qu'en culture conventionnelle dans la mesure où le mulch favorise l'infiltration de l'eau dans le sol. Par ailleurs ces sols ferrallitiques sont réputés pour être bien drainants, malgré des textures assez fines, de par leur caractéristique d'auto-floculation des argiles (Reatto et al., 1998). Le sol de notre site expérimental est particulièrement argileux et une étude fine du type d'argile aurait été nécessaire pour mieux évaluer ces conditions de drainage. Faute d'avoir prévu les mesures nécessaires, il n'a pas été possible de paramétrer le modèle pour utiliser son module optionnel de simulation du sol entre la capacité au champ et la saturation, de manière à explorer cette hypothèse.

Enfin le calcul par STICS des effets du mulch sur le ruissellement est connu pour être relativement imprécis (Scopel et al., 2004). Or la simulation des stress azotés s'est montrée très sensible, au cours du calage, à des variations du coefficient de ruissellement, en relation avec des augmentations des pertes en azote par lixiviation lorsque le ruissellement diminue, selon une logique déjà mentionnée par d'autres travaux (Maltas, 2007; Scopel et al., 2004).

Ainsi, ces défauts du modèle pour la simulation du maïs pur en semis direct sont tels qu'il n'est pas surprenant que la simulation des cultures en relais dans le maïs soit également non satisfaisante. On ne pourra espérer de progrès notable sans résoudre d'abord le problème de la simulation de la température sous mulch. Le dispositif expérimental aurait par ailleurs gagné en efficacité si l'on disposait d'estimations du ruissellement journalier sur les parcelles, et de la conductivité hydraulique du sol à saturation.

Quelques unes des teneurs observées d'azote dans le sol paraissent anormalement élevées (Figure 3.1) ce qui introduit quelques doutes sur la fiabilité des analyses d'azote de sol par extraction au KCl réalisées au laboratoire de l'EMBRAPA. Néanmoins, et ceci reste vrai que l'on fasse ou non abstraction des 10% des points s'écartant le plus de la moyenne des observations, on peut dire que la restitution par le modèle de l'évolution de l'azote dans le sol en fin de cycle est mauvaise en semis direct alors qu'elle est plutôt correcte en semis conventionnel. En effet, on a observé en station expérimentale une augmentation du stock d'azote dans le sol en fin cycle sur l'ensemble des traitements de maïs et de *Cajanus* pur en semis direct sous mulch. Cela peut être dû en premier lieu à la minéralisation des résidus en semis direct, plusieurs études en zones tropicale ayant montré l'importance de la minéralisation de ces résidus dans les bilans azotés (Maltas et al., 2009, Smith et al., 1992), processus que le modèle ne simule pas. Cette imperfection du modèle pourrait aussi être due au fait que l'estimation de la minéralisation de la matière organique est déficiente en semis direct à cause de la mauvaise simulation des températures sol sous le mulch. Le modèle sous-estimerait ainsi l'effet du paillis sur la minéralisation du compartiment organique du sol de par des températures plus favorables, ce qui serait particulièrement apparent en fin de saison des pluies quand la consommation des plantes devient plus faible (fin de cycle pour le maïs pur ou en présence de légumineuse moins exigeante de par sa capacité de fixation symbiotique). Maltas et al., (2009) rapporte également d'importantes quantités d'azote (81 à 116 kg de N/ha) apportées grâce à la minéralisation de la matière organique du sol et des résidus durant le cycle de la culture de maïs dans les Cerrados. Dans nos systèmes à faible niveau intrants et visant à maximiser l'utilisation des ressources naturelles, la présence du mulch est importante et joue un rôle dans la dynamique de l'azote et sa fourniture dans le sol, et peut contribuer à réduire fortement l'utilisation des engrais azotés.

Nous n'avons, par contre, pas observé d'augmentation du stock d'azote en fin de cycle en présence d'un mulch de *Brachiaria* sur le traitement *Brachiaria* pur. Ceci pourrait provenir

du fait que le *Brachiaria*, étant une graminée, le C/N élevé de ses pailles induit une minéralisation de l'azote plus lente, le plus souvent précédée par une immobilisation de l'azote minéral du sol (Mary et al., 1996; Thorup-Kristensen, 1994). Cet effet est probablement plus marqué après deux années de *Brachiaria* non fertilisé en azote comme dans le cas de notre essai.

Pour la culture pure de *Cajanus*, on ne peut espérer une bonne simulation de l'azote tant que l'évolution du stock d'eau dans le sol n'est pas mieux simulée par le modèle. Le modèle surestime largement le stock hydrique dans le sol, alors que l'expérimentation a montré que le *Cajanus* avait une grande capacité à extraire l'eau dans le sol en fin de cycle. Plusieurs études signalent que les légumineuses, telles que le *Cajanus cajan* sont capables avec leur enracinement très profond d'extraire l'eau du sol tard dans le cycle même en conditions hydriques peu favorables (Sekiya and Yano, 2002; Sekiya and Yano, 2004; Snapp and Silim, 2002).

La surestimation par le modèle des biomasses à la récolte, du rendement en maïs et de l'azote des plantes à la récolte est probablement due au fait que l'azote dans le sol est élevé en fin de cycle et que le modèle l'utilise pour faire de la biomasse et des grains sans contrainte. En réalité, malgré les taux élevés d'azote minéral dans ces sols des Cérados brésiliens, reportés dans d'autres études (Oliveira et al., 2002), cet azote est souvent retenu au niveau du sol et non complètement disponible pour les plantes à cause des charges élevées en anions (D'Andrea et al., 2001). Ce processus de rétention de l'azote dans ces sols était déjà simulé dans la version culture pure du modèle et se retrouve donc dans la version culture associée que nous utilisons, avec le calage effectué par Motisi et al. (2010).

4.2. Capacités du modèle à simuler les associations de cultures

La croissance et le développement des cultures sont étroitement liés aux disponibilités en ressources (eau, azote et lumière) dans le sol. La simulation des performances des cultures associées est donc dépendante d'une bonne simulation de la dynamique des ressources et de leur partage entre les deux espèces. Les imperfections du modèle en culture pure analysées au paragraphe précédent entraînent donc des biais sur les simulations des associations maïs-plante de couverture, et aurait dû en principe être déjà corrigées avant même de passer à l'étape de simulation des associations de culture. Or nous avons cependant fait tourner tel quel le modèle en association, par manque de temps pour corriger ces imperfections. Nous sommes quand même arrivés à bien simuler l'évolution du LAI et

du stock hydrique dans l'association maïs-Brachiaria. Par contre les résultats de simulation du LAI de l'association maïs-Cajanus sont encore non satisfaisants. Le modèle surestime très largement le LAI de l'association par rapport aux données mesurées.

Au niveau de la station expérimentale, les analyses de croissance ont montré que le maïs n'avait pas été affecté par la présence du Cajanus, qui a par contre subi la compétition du maïs par rapport à la biomasse du Cajanus en culture, quoique la différence ne soit pas significative (voir chapitre 2). On peut donc supposer que le LAI du Cajanus n'a également pas été affecté significativement par le maïs dans l'association en début de cycle, même si nous ne pouvons l'affirmer la mesure n'ayant porté que sur le LAI global des deux espèces. Mais, le maïs a dominé le Cajanus durant l'essentiel de son cycle (Annexe 4 a et b) alors que le modèle simule des inversions de dominance au profit du Cajanus très tôt en début de cycle. On pourrait surmonter cette imperfection du modèle en forçant la dominance du maïs sur le Cajanus en début de cycle, mais cette option n'est pas offerte par le modèle. Le modèle simule même un LAI du Cajanus de l'association supérieur au LAI simulé du Cajanus en culture pure. Dans le modèle, la hauteur est fonction du LAI, la croissance rapide du Cajanus en début de cycle simulée par le modèle explique cette inversion de dominance tôt dans le cycle. On pourrait supposer que le rayonnement qui arrive dans l'inter-rang en ce début de cycle n'est pas réduit par les plantules de maïs en tout début de croissance, le Cajanus interceptant le même rayonnement que s'il était tout seul. Shili-Touzi, (2009) a signalé des difficultés similaires pour simuler une association blé-luzerne par le modèle STICS-CA à cause de l'inversion de dominance, allant jusqu'à douter de la possibilité de simuler cette association par le modèle. La hauteur du blé en association n'est en effet pas affectée par la présence de la luzerne malgré une réduction importante du LAI du blé en association par rapport à la culture de blé pur. Un découplage de la simulation de la hauteur et du LAI serait donc nécessaire.

Cette mauvaise simulation de l'association maïs-Cajanus, renvoie aussi à des questions sur le dispositif expérimental. Permettait-il un calage des paramètres du module de transfert radiatif ? La réponse est non, puisque le modèle ne parvient pas à prendre en considération l'architecture des deux espèces en association.

4.3. Pistes d'amélioration

- Formalismes à corriger

Nous avons montré que le modèle calculait mal la température du sol sous mulch en négligeant l'effet écran du mulch, attribuant ainsi au sol une température supérieure à celle d'un sol sans mulch. Ce qui pourrait en conséquence influencer la dynamique de minéralisation des résidus. Le formalisme de calcul de la température devra donc être modifié, pour rendre compte de la présence du mulch à l'interface sol-atmosphère.

Dans son état actuel le modèle ignore la fourniture d'azote au sol par un mulch en décomposition et ne tient compte que de la contribution des résidus enfouis au stock d'azote organique puis minéral du sol. Notre discussion sur la simulation de l'azote du sol en fin de saison suggère cependant que la modélisation du flux d'azote provenant de la décomposition du mulch sera nécessaire pour appréhender correctement le bilan azoté des SAMBAS pour une saison agricole complète, en relation avec le climat de l'année.

Nos difficultés avec la simulation d'inversions de dominance conduisent à proposer de rendre la hauteur de culture indépendante du LAI. Une autre option serait, comme le préconisent Malézieux et al. (2009), d'intégrer des mécanismes de plasticité architecturale appropriés pour chaque plante.

- Dispositif expérimental à mettre en place

Le modèle STICS-CA est un modèle complexe avec de très nombreux paramètres spécifiques du sol et du génotype. La complexité s'accroît encore avec des associations de culture sous mulch. Il aurait été utile pour cela de rajouter à notre protocole les mesures suivantes :

- Pour la correction des formalismes de calcul de température du sol sous mulch et la prise en compte de la minéralisation des résidus non enfouis, il faut aussi disposer de données de mesures pour la confrontation/validation des améliorations apportées au modèle. Le dispositif de mesure devra permettre de disposer d'assez de mesures de température de sol et dynamique de minéralisation pour cela.
- L'analyse des différences importantes de colonisation racinaire observées entre semis direct et conventionnel, suggère l'hypothèse d'une anoxie liée à l'excès d'eau induite par la réduction du ruissellement et limitant la croissance racinaire. Le

dispositif devrait donc permettre une caractérisation plus fine des états hydriques et des flux d'eau (ruissellement, drainage).

- Le modèle simule les associations grâce au module de « transferts radiatif » qui calcule le partage du rayonnement en tenant compte des caractéristiques de chaque espèce (géométrie, hauteur, largeur. LAI) ainsi que de la largeur de l'inter-rang. Le dispositif doit permettre de caractériser finement les caractères de hauteurs, formes et géométrie des espèces notamment ceux des plantes de couverture, ainsi que les mesures de LAI et de rayonnement interceptée par chacune des espèces.
- Il doit permettre une caractérisation plus rigoureuse de l'évolution de stocks d'azote du sol.

5. Conclusion

Dans notre étude, les résultats de l'évaluation du modèle STICS-CA pour simuler les associations dans les conditions des SAMBAs dans les Cerrados brésiliens, ont permis d'identifier des défauts importants du modèle pour l'évaluation des performances agronomiques et des bilans d'eau et d'azote des SAMBAs comparés à des systèmes conventionnels. Dans le cas de cultures pures de maïs, mais aussi de cultures associées maïs-Brachiaria, en semis direct avec mulch, la simulation est satisfaisante pour les variables LAI, biomasse, stock hydrique et azote minéral du sol, avec cependant une moindre qualité de simulation pour cette dernière variable. Plusieurs hypothèses ont permis de mettre en évidence les difficultés du modèle à simuler correctement ces variables pour la culture pure de maïs conventionnel et l'association maïs-Cajanus en semis direct avec mulch, et de proposer des pistes d'amélioration. Il sera notamment nécessaire de corriger la simulation des effets du mulch sur la température du sol et d'introduire une simulation de la fourniture d'azote au sol à partir de la décomposition du mulch au cours de la saison pour disposer d'un modèle capable de quantifier les flux et le partage des ressources en eau, azote et rayonnement dans le contexte des SAMBAs. Ce travail de modélisation doit se baser sur un dispositif expérimental dans lequel une attention particulière devra être portée sur la qualité des suivis des variables eau et azote du sol et qui devra comporter une caractérisation relativement détaillée de la structure verticale du couvert de manière à permettre un calage correct des fonctions simulant la compétition entre espèces pour la lumière.

Chapitre 4 : Application des SAMBAs en parcelles de petits producteurs dans les Cerrados.

Ce chapitre est rédigé sous forme d'article qui sera ensuite condensé et repris pour être soumis à une revue d'agronomie.

1. Introduction

Comme beaucoup de zones de savanes tropicales, les Cerrados brésiliens sont caractérisés par des conditions pédoclimatiques contraignantes, avec des sols fragiles (Assad 2001, Reatto et al. 1998; Yamada, 2005) et des pluies intenses et abondantes réparties sur une période de 6 à 8 mois, entraînant des problèmes d'érosion et de perte de fertilité des sols (Séguy et al., 1996). Dans ce contexte, l'adoption de systèmes de culture innovants, comme le semis direct avec couverture végétale (SCV), associé à d'autres pratiques agro-écologiques comme l'association avec des plantes de couverture, sont des solutions intéressantes pour assurer une gestion agricole durable des sols (Freitas et Blancaneaux, 1991; Séguy et al., 1996). En effet, le semis direct sous couverture végétale permet entre autres de réduire les risques d'érosion, en limitant notamment le ruissellement (Erenstein, 2002; Findeling et al, 2003; Scopel et al., 2004), la dépendance aux machines louées et le temps de travail dû au labour (Bolliger et al., 2006). Ces systèmes sont largement répandus chez les grands producteurs, mais sont encore en phase d'introduction et d'adoption chez les petits producteurs (Triomphe et al., 2005).

Les systèmes agro écologiques multi espèces à base d'annuelles en semis direct (SAMBAs) consistent à améliorer les systèmes SCV par l'introduction de plantes de couverture en relais avec la culture principale. L'introduction d'une plante de couverture en association avec la culture principale permet de réduire la lixiviation des nitrates, que la présence d'un paillis a tendance à favoriser, l'augmentation de la proportion des pluies infiltrées conduisant sous climat subhumide à augmenter substantiellement le drainage (Scopel et al., 2004). Cela permet également d'utiliser l'ensemble de la période pluvieuse, au-delà du cycle de la culture principale, pour une meilleure valorisation des ressources disponibles. La durabilité du système est améliorée par une couverture permanente du sol qui réduit les risques d'érosion et par des restitutions organiques conséquentes et

régulières. De plus la culture en relais permet la production complète des deux cultures et donc une production de biomasse importante, même dans les zones où la période pluvieuse est trop courte pour permettre de les réaliser en successions (Gliessman, 1997; Jeranyama et al., 2000).

En effet, les associations de culture sont largement répandues chez les petits producteurs des zones tropicales (Willey, 1979, Malézieux et al. 2009). Elle se distinguent par leur plus grande productivité par unité de surface, leurs plus grande stabilité de la production de par la diversification des produits et donc par la réduction des risques qui sont souvent associés à la monoculture (Jensen, 1996; Hauggaard-Nielsen et al., 2001; Tsubo et al., 2005). L'augmentation de la production dans les associations (Jensen, 1996 ; Anil et al., 1998; Dapaah et al., 2003) peut être attribuée principalement à l'existence de complémentarité et/ou de facilitation entre espèces associées, une meilleure efficacité d'utilisation des ressources disponibles et une réduction de la pression des mauvaises herbes et des maladies (Willey, 1979; Anil et al., 1998; De Tourdonnet et al., 2008). Toutefois les relations entre espèces d'un système associé et leur productivité relative vont dépendre fortement des ressources disponibles, et donc des conditions pédoclimatiques dans lesquelles le système est appliqué, ainsi que des modes de gestion de chacune des espèces ou de l'ensemble (Anil et al., 1998).

Dans la région d'Unai, les petits producteurs bénéficient d'un important réseau laitier développé par une coopérative locale, la CAPUL, qui assure et garantit la collecte et l'achat du lait, et l'accès aux équipements nouveaux comme les cuves réfrigérées. Ils s'orientent ainsi de plus en plus vers l'intensification laitière, qui leur garantit une source de revenus (Gastal et al., 2003). Ils cherchent à continuer à produire durablement leur maïs grain sans ou avec peu d'intrants, tout en améliorant les ressources fourragères de leur troupeau. C'est particulièrement le cas pour les plus démunis installés par la réforme agraire, qui font face à de fortes contraintes pour la production de maïs tant au plan biophysique que pour l'accès au crédit, aux fertilisants et aux tracteurs. (Scopel et al., 2005b). Les SAMBAs à base de maïs et où la plante associée serait une plante fourragère pourraient donc être des options intéressantes pour ces petits producteurs à la fois pour la couverture et la protection du sol contre l'érosion, pour la production durable de maïs grain et pour l'intensification laitière (Oliveira et al., 2009). Des expérimentations en station expérimentale ayant fait l'objet du chapitre 2, menées en parallèle avec cette étude en milieu réel montrent qu'effectivement les SAMBAs permettent une amélioration significative de la production totale de biomasse sans compromettre la production en grains

du maïs. La plante de couverture n'affecte pas la production en grain de la culture principale et permet une production additionnelle de biomasse significative. Ce gain de productivité en biomasse est beaucoup plus important quand la plante de couverture est semée précocement au sein du maïs (8 à 10 jours après semis du maïs) comparé à un semis tardif (20 jours après floraison du maïs) et peut aller jusqu'au double dans le cas d'une association maïs-Cajanus. Toutefois les parcelles de production de maïs des producteurs de la région peuvent différer notablement des conditions de ces expérimentations en fonction des sols, des types de producteurs et de la façon dont ces derniers vont gérer leur système de culture (Scopel et al. 2005b).

L'objectif de ce travail est d'évaluer les SAMBAs, dans la diversité des conditions de cultures propres aux exploitations des petits producteurs de l'agriculture familiale de la région d'Unai dans les Cerrados. Nous analyserons dans quelle mesure la diversité de ces conditions agro-environnementales peut remettre en cause les résultats de l'évaluation de ces systèmes dans l'expérimentation en milieu contrôlé. Pour cela les SAMBA ont été comparés à une culture pure de maïs pendant deux années (2007-2008 et 2008-2009) dans un réseau de parcelles de 26 petits producteurs issus de la réforme agraire et couvrant une large gamme de conditions de milieux et de types d'exploitations agricoles.

2. Matériels et méthodes

2.1 Site

Le réseau de parcelles est réparti sur trois « assentamentos » de la réforme agraire (Santa Clara, Boa Uniao/Paraiso, Jiboia) du municiple d'Unai (16°23'S, 93 46°53'W) (Minas Gerais, Brésil) (Figure 4.1). Ils correspondent à différentes dates d'installation par la réforme agraire, et en conséquence à des types contrastés d'exploitations, notamment du point de vue de leur degré de spécialisation et d'intensification laitière. Ces assentamentos ont été créés en 1995, 1997, et 2001, respectivement pour Santa Clara, Boa Uniao/Paraiso, Jiboia, et comptent respectivement 42, 55 et 178 familles d'agriculteurs.

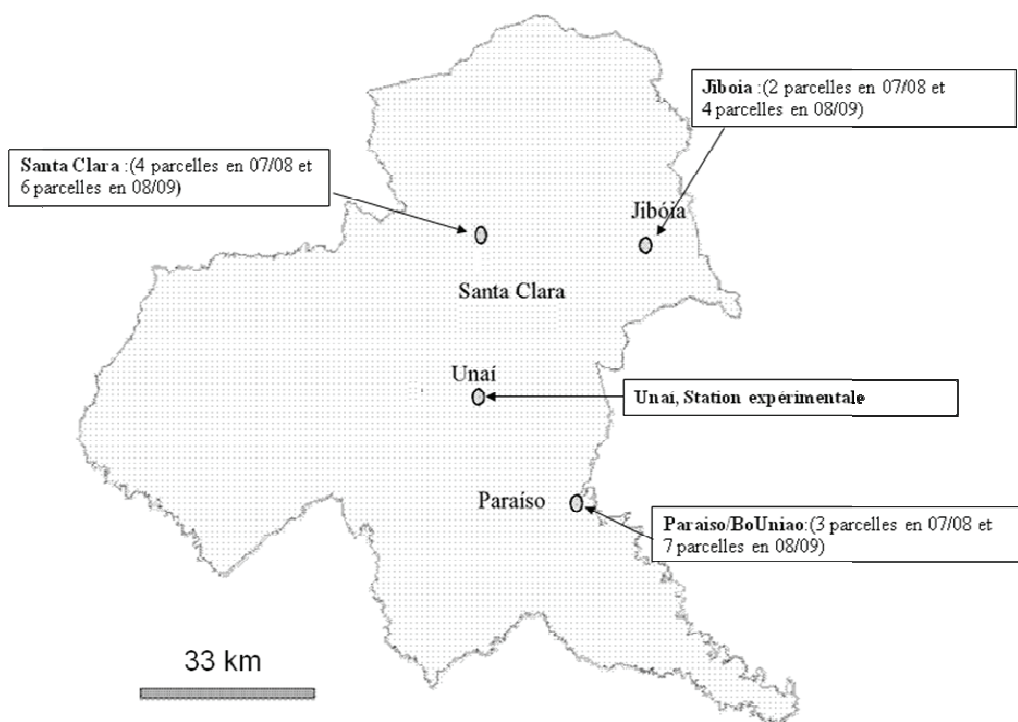


Figure 4.1 : Localisation du dispositif chez les petits producteurs dans le municiple d'Unai. Les chiffres entre parenthèses représentent le nombre d'agriculteurs participant à notre dispositif respectivement en 2007-2008 et 2008-2009.

Le climat est de type tropical subhumide, typique des Cerrados Brésiliens, et considéré comme homogène sur l'ensemble des trois assentamentos (Assad, 2001). Trois types de sol assez contrastés (Tableau 4.1) caractérisent les parcelles dans ces trois assentamentos. Le type appelé localement « Terra de cultura » correspond à des sols alluvio-colluviaux de bas

de pentes et de bas-fonds. Il est le plus favorable pour la culture avec une teneur en matière organique satisfaisante de l'ordre de 1.9% sur 0-20 cm de profondeur et une fertilité générale bonne (teneur en azote minéral en fin de cycle). Le deuxième type, les « Latossolos », sont des sols ferrallitiques rouges qui ont une fertilité moyenne. Ils présentent des teneurs en matière organique moyennes de 1.3% et des teneurs en azote total (azote organique et azote minéral) de 0.14% sur 0-20 cm de profondeur. Ces deux premiers types de sol se répartissent entre les assentamentos de Santa clara et Boa Uniao/Paraiso (Tableau 4.2). Enfin, les « Latossolos Arenoso » sont également des sols ferrallitiques mais très sableux de par la nature du substrat géologique sur lequel ils se sont développés. Ils sont peu fertiles de façon générale, pauvres en matière organique (0.9%) et en azote total (0.09%) et surtout en potasse sur 0-20 cm de profondeur. Dans notre étude, ils se retrouvent essentiellement dans l'assentamento de Jiboia (Tableau 4.2).

Tableau 4.1 : Caractéristiques des trois types de sols du réseau de parcelles

« Terra de cultura »	« Latossolo »	« Latossolo Arenoso »
Bonne fertilité générale	Fertilité moyenne	Mauvaise fertilité générale Carencés en potassium mais non limités en phosphore
Peu d'acidité	Forte acidité et saturation en aluminium	Forte acidité
Texture intermédiaire (41% d'argile sur 0-20 cm en moyenne)	Texture très argileuse, même si les sols sont bien structurés (58% d'argile sur 0-20 cm en moyenne)	Texture très sableuse (27% d'argile sur 0-20 cm en moyenne)
Teneur en matière organique satisfaisante (2.9% sur 0-20 cm en moyenne)	Teneur moyenne en matière organique (1.8% sur 0-20 cm en moyenne)	Plus pauvres en matière organique (1.4% sur 0-20 cm en moyenne)

Adapté de Schaller, 2007.

2.2. Dispositif expérimental

Le réseau de producteurs est constitué de 9 producteurs en 2007-2008 et 17 producteurs en 2008-2009 chacun ayant fourni une parcelle. Les parcelles suivies couvrent les différents types de sols présents dans la région de manière équilibrée (Tableau 4.2). 44 et 35% des parcelles étaient sur des « Terras de cultura » respectivement en 2007-2008 et 2008-2009 et 33 et 41% des parcelles étaient sur des « Latossolos » respectivement en 2007-2008 et 2008-2009 réparties sur les assentamentos Santa Clara et Paraiso/Boa União. Par contre les « Latossolos Arenoso » se trouvant essentiellement à Jiboia, toutes les parcelles de cette catégorie ont été choisies dans ce municípe (22 et 24% du total respectivement en 2007-2008 et 2008-2009).

Dans chaque parcelle, des plantes de couverture ont été semées en relais dans le maïs le plus rapidement possible dans les jours suivant le semis du maïs (situation la plus favorable d'après l'essai en station au Chapitre 2) dans deux placettes de 70 m² (Maïs-Brachiaria, MB et Maïs-Cajanus, MC). Les dates de semis des plantes de couverture différaient en fonction des dates de semis du maïs par l'agriculteur, des dates de passages des techniciens chez l'agriculteur pour le semis de la plante de couverture et/ou de la disponibilité de celui-ci. Et une autre placette de 70 m² a été délimitée dans laquelle le producteur était libre de toutes les options techniques, à l'exception du fait que le maïs y était conduit en culture pure (MPur). Au total dans chaque parcelle, nous avons donc 3 placettes correspondant aux 3 traitements étudiés chaque année.

En 2008-2009, nous avons rajouté dans chaque parcelle (16 des 17 parcelles), un quatrième traitement (MPur_S) destiné à évaluer l'impact du mode de gestion des mauvaises herbes par l'agriculteur, par comparaison directe avec le traitement (MPur) seulement. Ce traitement correspond à une quatrième placette de même taille dans laquelle le maïs est conduit en culture pure conventionnelle par le producteur, à la différence que les adventices sont sarclées aussi régulièrement que nécessaire afin que ces dernières n'aient pas d'impact sur la croissance et le rendement.

Au total, nous avons dans chaque parcelle de producteur en 2007-2008, neuf (9) parcelles ayant chacune les trois traitements (MB, MC et MPur) et en 2008-2009, dix sept (17) parcelles ayant chacune les trois traitements (MB, MC et MPur) et seize (16) parcelles parmi ces dernières ayant en plus le traitement (MPur_S).

Tableau 4.2 : Répartition du nombre de parcelles de producteurs suivant les assentamentos et le type de sol durant les deux années expérimentales.

Assentamentos	Type de sol			Total agriculteurs
	TC	L	LA	
Santa clara	(3 ; 3)	(1 ; 3)	0	(4 ; 6)
Jiboia	0	0	(2 ; 4)	(2 ; 4)
Boa Uniao/Paraiso	(1 ; 3)	(2 ; 4)	0	(3 ; 7)
Total agriculteurs	(4 ; 6)	(3 ; 7)	(2 ; 4)	(9 ; 17)

TC= « Terra de cultura » ; L= « Latossolo » et LA= «Latossolo Arenoso».

Les chiffres entre parenthèse représentent les effectifs respectifs en 2007-2008 et 2008-2009.

2.3. Pratiques culturales

En dehors des pratiques spécifiques aux placettes du dispositif expérimental les parcelles étaient conduites par les agriculteurs. Ces derniers décidaient des dates de semis du maïs, en fonction de la disponibilité du matériel commun disponible dans chacun des 3 assentamentos. Rappelons que le matériel concerné est constitué de semoirs le plus souvent utilisés pour le semis direct à traction animale, ce matériel est acquis et géré par les associations de producteurs. Le semis direct représentait 6 et 9 parcelles en 2007-2008 et 2008/9 respectivement, alors que le semis conventionnel après travail du sol représentait 3 et 8 parcelles respectivement. Les dates de semis du maïs se sont échelonnées entre le 22 Novembre et le 15 Décembre 2007 en 2007-2008 et entre le 17 Novembre et 15 Décembre 2008 en 2008-2009. Les plantes de couvertures ont été semées après la levée du maïs entre 9 à 22 jasm (jasm=jours après le semis du maïs) (moyenne: 17 jasm) en 2007-2008 et 4 à 44 jasm (moyenne : 20 jasm) en 2008-2009. Ces dernières ont été en moyenne plus tardives par rapport aux dates de semis des plantes de couverture à la station expérimentale, contrairement aux dates de semis du maïs qui ont été plus précoces (Tableau 4.3).

Chez 35% des producteurs participant à notre dispositif, la culture de maïs n'a reçu aucune fertilisation ni organique ni minérale. Lorsque la culture a reçu une fertilisation, celle-ci a été apportée sous forme minérale, soit en un seul apport au semis avec l'engrais de fond (82% des cas), soit en deux apports (au semis puis entre 36 et 47 jasm) sous forme d'urée. Les doses d'engrais de fond varient entre 2 et 23 , 7 et 63, et 4 et 47 kg/ha respectivement de N P K en 2007-2008 et 2 et 18, 7et 83 , et 4 et 50 kg/ha respectivement de N P K en 2008-2009. L'urée a été apportée chez très peu d'agriculteurs (2/9 en 2007-2008 et 2/17 en

2008-2009) à des doses de 24 et 20 kg/ha de N en moyenne respectivement en première année et en seconde année. De façon générale, en moyenne dans le cycle, 19 et 13 kg/ha d'azote ont été apporté respectivement en 2007-2008 et en 2008-2009 sur les parcelles ayant reçu une fertilisation. Ces niveaux de fertilisation sont faibles par rapport aux quantités apportées dans la station expérimentale (69 kg/ha de N), elles-mêmes déjà plus faibles que les quantités apportées par les grands producteurs des Cerrados (112 kg/ha de N) (Siqueira et al., 2010). Les moyennes sont encore plus faibles si on considère l'ensemble des parcelles (Tableau 4.3), compte tenu du nombre élevé de parcelles sans aucune fertilisation.

Les densités du maïs et du Cajanus à la récolte ont été en moyenne plus importantes dans la station expérimentale par rapport aux parcelles de producteurs. Pour les deux années confondues, les mauvaises herbes ont été plus abondantes dans les parcelles de producteurs que dans l'essai de station.

Tableau 4.3: Principales caractéristiques des pratiques culturales moyenne en parcelles producteurs et à la station expérimentale durant les années 2007-2008 et 2008-2009. Les chiffres entre parenthèses sont les écarts type.

	2007-2008		2008-2009	
	Moyenne Parcelles	Moyenne station	Moyenne Parcelles	Moyenne station
Date de semis Maïs	-5** (9)	0*	-3**(9)	0*
Date de semis plante de couverture (DAMS)	17(5)	8	20(9)	10
Densités Maïs à la récolte (plantes/m ²)	5(0.9)	7(0.8)	4 (1.2)	7(1)
Densité Plante de couverture (plantes de Cajanus/m ²)	9 (7)	15 (2.2)	28 (11)	31(5.3)
Quantité N apportée (kg.ha ⁻¹) sur l'ensemble des parcelles	10 (15)	69	9 (11)	69
Biomasse mauvaises herbes à la récolte (kg MS.ha ⁻¹)	400 (500)	250 (400)	500 (1500)	0

* :date de semis du maïs à la station expérimentale

** : nombre de jours avant (si négatif) ou après (si positif) la date de semis du maïs à la station expérimentale.

2.4 Mesures et observations

L'ensemble des interventions du producteur dans la parcelle, dont la gestion des mauvaises herbes été relevé depuis la préparation des parcelles jusqu'à la récolte du maïs et des plantes de couverture. La pluviométrie journalière a été notée entre Septembre et Avril par des agriculteurs de chaque assentamento grâce à des pluviomètres manuels.

Le LAI a été mesuré avec le LICOR LAI 2000 sur 2 répétitions pour chaque traitement, à la floraison du maïs (correspondant au stade de LAI max), complétées en 2008-2009 par des mesures à d'autres stades. Dans les associations, les mesures de LAI correspondaient au LAI global des deux espèces maïs-plante de couverture.

Des mesures de rendement de maïs (ainsi que ses principales composantes, nombre de plantes, nombre d'épis, Poids d'un grain), de biomasse de maïs et des plantes de couverture on été réalisées à la récolte du maïs sur 2 sous placettes de 2 interlignes*5m pour chaque traitement. L'ensemble de la biomasse de maïs, d'épis et de biomasse de plantes de couverture de la sous placette a été pesé au champ, puis des sous échantillons communs au 2 répétitions, de 4 plantes de maïs, 10 épis de maïs et 500 à 1000g de plantes de couverture ont été prélevés, pesés au champ puis séchés à 65°C pendant 3 jours au laboratoire pour déterminer le poids sec. Des analyses ont été réalisées sur ces sous-échantillons pour déterminer les teneurs, puis par multiplication par la biomasse sèche, les exportations en N, P et K des différents traitements sur l'ensemble des parcelles.

Pour les mesures de LAI max et de teneurs/accumulations en NPK des plantes, les mesures n'ont concerné que respectivement (44% en 2007/08 et 76% en 2008/09 des parcelles) et (86% des parcelles en 2007/08). Les autres mesures ont été faites sur l'ensemble des parcelles chaque année.

2.5. Analyses statistiques

L'analyse de la variance a été effectuée avec le logiciel STATGRAPHICS CENTURION V 15.2.06. Une analyse de variance sur l'ensemble des données recueillies les deux années a montré qu'il n'y avait pas d'interaction significative entre le traitement et, l'année, le type de sol ou l'assentamento, concernant les variables rendement grains du maïs, biomasse du maïs et biomasse totale (maïs + plante de couverture le cas échéant). Des analyse de variance ont été alors faites par type de sol pour chaque année agricole prise séparément, et ensuite une analyse de variance par année agricole (tous les sols

confondus), tout en faisant à chaque fois des comparaisons de moyennes (test LSD à 5%) entre les 3 différents traitements MB, MC, et MPur étudiés.

3. Résultats

3.1 Pluviométrie

Dans la zone d'étude, la plupart des pluies tombent entre Octobre et début Juin. La quantité totale a été similaire sur les trois assentamentos (entre 898 et 1084 mm) mais avec des différences dans la distribution temporelle (Figure 4.2). Les pluies ont été assez bien réparties sur Santa Clara et Jiboia et moins bien réparties sur Boa Uniao/Paraiso (39 évènements pluvieux). Globalement l'année 2008-2009 a été plus pluvieuse que l'année 2007-2008, avec une différence de 150 mm en moyenne tous sites confondus.

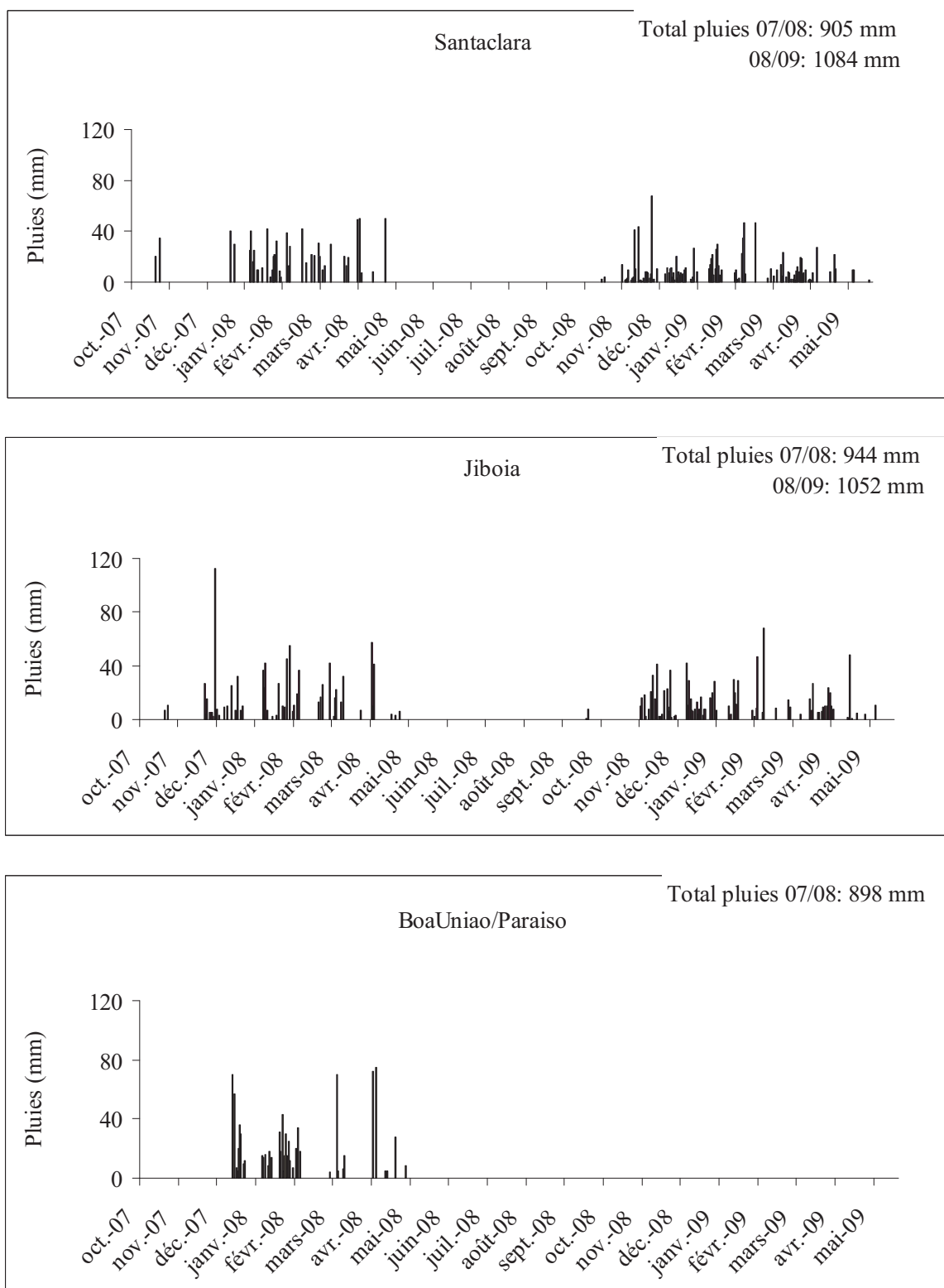


Figure 4.2 : Répartition des pluies mesurées par les agriculteurs sur les trois localités de la zone d'étude durant les saisons 2007-2008 et 2008-2009. Les données de pluies à Boa Uniao/Paraiso ont été perdues par le producteur pour l'année 2008-2009.

3.2 Analyse de la production

Le Tableau 4.4 présente un résumé de l'ensemble des données de production des différents traitements étudiés.

3.2.1 Rendements et biomasse du maïs

De façon générale (tous sols et années confondus) le rendement grain du maïs en culture pure a été en moyenne systématiquement plus élevé que le rendement en grain du maïs des traitements MC et MB, mais sans que cette différence ne soit significative ($p < 0.05$ et même $p < 0.1$). De fait ces rendements dans les parcelles de producteurs ont présenté une très forte variabilité avec un coefficient de variation de 59%. Sur les deux années confondues, les rendements maïs variaient entre 0.1 et 5.9 t/ha avec une moyenne de 3 t/ha en culture pure ($cv=53\%$), entre 0.5 et 6.9 t/ha avec une moyenne de 2.5 t/ha en MC ($cv=64\%$) et entre 0.3 et 5.5 t/ha avec une moyenne de 2.3 t/ha en MB ($cv=59\%$). Cette variabilité reste élevée au sein d'un type de sol.

Tableau 4.4 : Rendement grains du maïs, biomasse maïs et biomasse totale (kg/ha) en fonction de l'année, type de sol et traitement. Les lettres différentes sur la même ligne indiquent des différences significatives (LSD, 5%). TC= « Terra de cultura » ; L= « Latossolo » et LA= « Latossolo Arenoso ». MB= association maïs-Brachiaria; MC= association maïs-Cajanus et MPur= maïs en culture pur.

Période	Type de sol	Traitements			Traitements			Traitements		
		MB	MC	MPur	MB	MC	MPur	MB	MC	MPur
		<i>Rendement du maïs (kg/ha)</i>			<i>Biomasse de maïs (kg/ha)</i>			<i>Biomasse totale (kg/ha)</i>		
2007-2008	TC	3500a	3900a	4500a	9000a	9500a	11400a	11900a	13500a	11400a
	L	3200a	2800a	4000a	7500a	6500a	8200a	12700b	11400ab	8200a
	LA	1600a	2100a	2900a	4500a	5200a	7200a	7000a	5800a	7200a
	tous sols confondus	3000a	3200a	4000a	7500a	7500a	9400a	11100a	11100a	9400a
2008-2009	TC	2800a	2800a	3300a	7100a	7200a	7900a	9300a	12100a	7900a
	L	1775a	2049a	2284a	5300a	5342a	6321a	9263b	10180b	6321a
	LA	1002a	1185a	1378a	3252a	3504a	4045a	6060a	6080a	4045a
	tous sols confondus	1950a	2100a	2400a	5500a	5600a	6400a	8500ab	9900b	6400a
2007-2008&2008-2009	TC	3100a	3300a	3700a	7900a	8100a	9300a	10300a	12700a	9300a
	L	2200a	2300a	2800a	5900a	5700a	6900a	10300b	10500b	6900a
	LA	1200a	1500a	1900a	3700a	4100a	5100a	6400a	6000a	5100a
(toutes années et tous sols confondus)		2300a	2500a	3000a	6150a	6250a	7400a	9400b	10314b	7400a

Pour la même raison nous ne mettons pas en évidence de différences entre traitements pour la biomasse de maïs, même si elle est systématiquement plus élevée en culture pure pour chaque année ou type de sol.

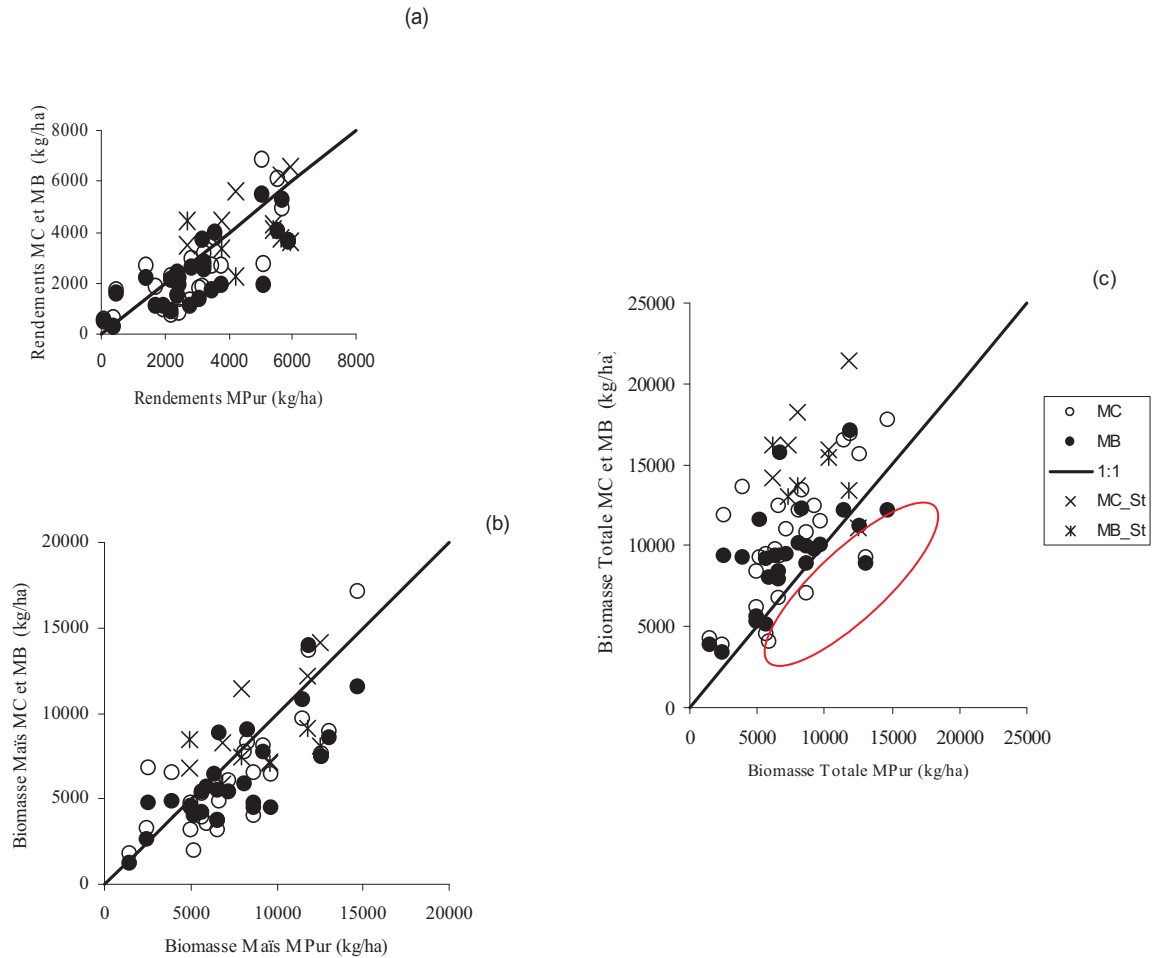


Figure 4.3 : Productions des associations maïs-plante de couverture (MC et MB) et maïs pur (MPur), (a) Rendement maïs grains, (b) Biomasse maïs et (c) Biomasse Totale (maïs + plante de couverture). MC_St et MB_St sont les productions mesurées dans des traitements identiques à MC et MB, respectivement, d'un essai de station expérimentale réalisé dans la région de l'étude.

Une comparaison des productions maïs en pur et en associé pour chaque parcelle (Figure 4.3) confirme la grande variabilité du rendement et de la biomasse à travers le dispositif. Généralement sur les deux années d'études nous retrouvons des cas pour lesquels il y a eu compétition des plantes de couverture sur le maïs, aussi bien pour la production en grains que pour la biomasse totale en maïs (Figure 4.3a et Figure 4.3b). Cette même tendance

avait été aussi observée au niveau de la station expérimentale, notamment dans l'association maïs-*Brachiaria* (MB), mais uniquement la deuxième année (Chapitre 2).

Lorsque l'on s'intéresse aux parcelles ayant subi une compétition plus marquée sur le maïs (entourées en rouges dans Figure 4.3a et Figure 4.3b), on trouve des cas avec des écarts de rendement grain importants, de plus d'1 t/ha par rapport au maïs en culture pure. Cette situation s'est présentée dans 17 parcelles en association (sur les 52, soit 33%) sur l'ensemble des données des deux années, réparties entre les deux types d'associations (9 cas en MC et 8 cas en MB). Ces parcelles se retrouvaient en majorité sur les « Terras de cultura » (7/17, soit 41%), et les « Latossolos » (7/17, soit 41%) et peu sur les « Latossolos Arenoso » (3/17, soit 18%).

3.2.2 Biomasse totale

Pour chacune des 2 années, la production de biomasse totale (maïs + plante de couverture) est significativement affectée par le traitement dans les « Latossolos », par contre il n'y a eu aucun effet traitement sur les deux autres types de sol (Tableau 4.4). Dans ces « Latossolos », la biomasse totale produite dans les associations a été significativement plus importante, chaque année, que la biomasse totale en culture pure de maïs.

De même, pour tous sols confondus, en 2008-2009, la biomasse totale produite a été significativement supérieure dans les associations maïs-plante de couverture à celle de la culture pure de maïs, avec une biomasse additionnelle de plus 33 et 55 % respectivement pour MB et MC par rapport à la biomasse produite en culture pure de maïs (MPur). Nous ne mettons pas en évidence de différence significative en 2007-2008, la variabilité entre parcelles ayant été particulièrement forte durant cette première campagne. 10 cas sur 18 (soit 56% des cas dont 4 MB et 6 MC) montrent tout de même une différence supérieure à 1.7 t/ha entre la culture associée et le maïs en pur.

L'analyse par parcelle (Figure 4.3c) confirme une tendance à une production plus élevée de biomasse totale dans les associations que dans la culture pure de maïs, mise en évidence dans les essais en conditions contrôlées (Chapitre 2).

Dans certaines parcelles toutefois, malgré la présence de la plante de couverture, la production en biomasse totale (maïs+plante de couverture) a été plus faible comparée au maïs en culture pure (entourées en rouge sur Figure 4.3c). Ce groupe particulier est caractérisé par une production de biomasse de la plante de couverture significativement

plus faible que sur les autres (0.9 contre 4.4 t/ha). Cette situation est présente dans 15% des cas seulement (4 en MB et 4 MC). Ces parcelles se retrouvaient en majorité sur les « Terras de cultura » (5 cas) et les « Latossolos Arenoso » (3 cas), il n’y avait en revanche aucun cas sur les « Latossolos » où les plantes de couverture se sont toujours bien comportées.

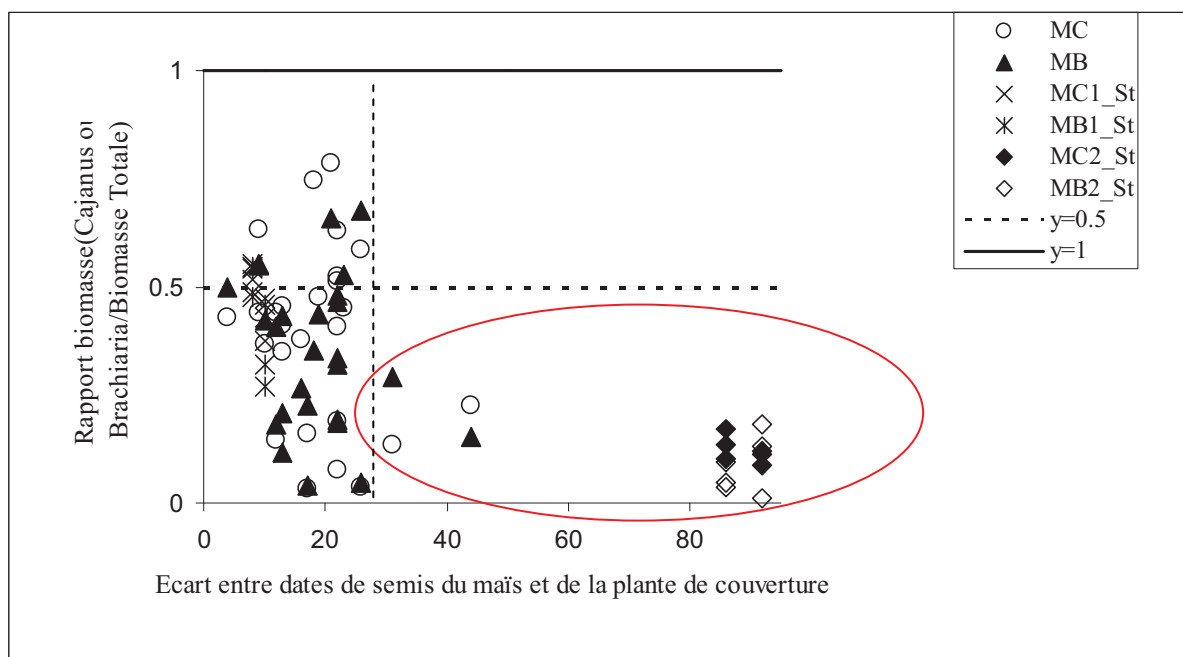


Figure 4.4 : Rapport biomasse plante de couverture sur biomasse totale de l’association à la récolte par type de sol, (a) cas MC et (b) cas MB. MC1_St, MB1_St (dates de semis précoces de la plante de couverture) et MC2_St, MB2_St (dates de semis tardives de la plante de couverture) sont les rapports en station expérimentale contrôlée.

Les plantes de couverture ont eu tendance à produire moins de la moitié de biomasse totale produite, sauf pour quelques cas pour l’association maïs-Cajanus, tendance que l’on retrouvait également en station expérimentale (Chapitre 2). La part des plantes de couverture dans la biomasse finale devient très faible quand les plantes de couvertures sont semées très tard dans le cycle. On constate dans la Figure 4.4, mêlant les situations en milieu réel et milieu contrôlé (chapitre 2), que, quelles que soient les conditions de culture, les plantes de couverture produisent beaucoup moins lorsqu’elles sont semées au-delà de 25-30 jasm. Par exemple les plantes de couverture semées 86 jasm en station expérimentale en 2008-2009 n’ont produit que 8% de la biomasse totale finale pour

l'association maïs-Brachiaria. Cette faible productivité des plantes de couverture peut résulter d'une forte compétition initiale du maïs et/ou d'une période pluvieuse pas assez longue pour la croissance et le développement des plantes de couverture après le cycle du maïs.

3.2.3 Effet année et type de sol

Lorsqu'on analyse plus spécifiquement l'effet année (Tableau 4.4), on constate que l'année 2007-2008 a été significativement ($P < 0.05$) plus productive que l'année 2008-2009 aussi bien en rendement maïs (3.4 contre 2.2 t/ha en moyenne), qu'en biomasse totale (10.5 contre 8.3 t/ha). Ceci semble en contradiction avec les meilleures conditions de pluies de cette deuxième année mais peut s'expliquer par le fait qu'en 2007-2008 les densités de maïs étaient significativement plus élevées qu'en 2008/09 (5 contre 4 plantes/m² en moyenne) induisant un plus fort nombre d'épis (4.4 contre 3.4 épis/m²). Par ailleurs, même si les différences ne sont pas significative, les parcelles sont moins affectées par les mauvaises herbes (0.7 contre 1 t/ha de mauvaises herbes à la récolte) en 2007-2008 et elles ont reçu un peu plus de fertilisant (10 contre 9 kg/ha de N en moyenne). La production de Brachiaria est plus faible la deuxième année alors que celle du Cajanus est plus élevée. Ceci peut s'expliquer par le fait que les apports en fertilisant, un peu plus important en première année ont favorisé la production du Brachiaria et ont atténué la concurrence avec le maïs, alors que les faibles apports en deuxième année ont pénalisé le Brachiaria et non le Cajanus qui est capable de fixer l'azote de l'air. On observe par ailleurs une plus grande variabilité des résultats la deuxième année que la première (66 contre 41% et 44 contre 32% de coefficient de variation respectivement pour le rendement et la biomasse totale), avec des extrêmes beaucoup plus marqués, qui expliquent aussi en moyenne cette deuxième année moins productive par la présence de très mauvaises parcelles.

De même, on constate qu'il y a un effet significatif du type de sol (Tableau 4.5) sur le rendement, la biomasse et la biomasse totale. Les « Latossolos Arenoso » sont significativement moins productifs en rendement grain et biomasse de maïs que les « Latossolos », qui le sont significativement moins que les « terras de cultura ». Ces deux derniers sols ont également produit une biomasse totale significativement supérieure à celle des « Latossolos Arenoso ».

Tableau 4.5 : Effet sol et effet année sur le rendement, biomasse maïs et biomasse totale.

	Type de sol			Année	
	TC	L	LA	2007-2008	2008-2009
Rendement (kg/ha)	3400c	2400b	1500a	3400b	2200a
Biomasse maïs (kg/ha)	8400c	6200b	4300a	8100b	5800a
Biomasse totale (kg/ha)	10800b	9200b	5800a	10500b	8300a
Biomasse plante de couverture (kg/ha)	3500ab	4600b	2300a	3600a	3700a

La différence de production entre traitement n'a été significative que sur la biomasse totale dans les « Latossolos » (Tableau 4.4). Ceci peut s'expliquer par le fait que chaque année sur les « Latossolos », les plantes de couverture se sont mieux comportées que sur les deux autres types de sol (Figure 4.5).

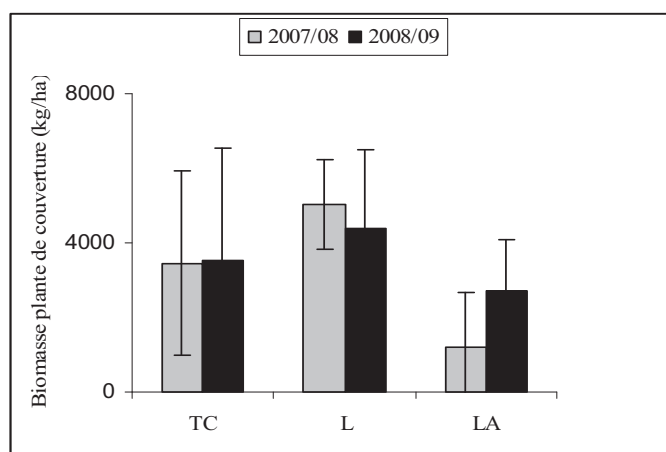


Figure 4.5 : Biomasse plante de couverture moyenne (kg/ha) par type de sol. Les barres verticales représentent les écarts type des mesures.

3.2.4 Semis direct vs semis conventionnel

Sur l'ensemble des données (tous traitements et années confondus), les résultats montrent un effet significatif du type de gestion du sol (Tableau 4.6). Le semis direct a permis une production en grains de maïs et en biomasse totale (maïs + plante de couverture) significativement plus importante qu'en semis conventionnel ($p < 0.05$), avec en moyenne (+0.8 t/ha et +2 t/ha respectivement pour le rendement et la biomasse totale). En semis

direct les parcelles ont été significativement ($P < 0.05$) moins envahies par les mauvaises à la récolte (0.2 contre 0.9 t/ha). Par ailleurs les dates de semis du maïs ont été significativement plus précoces (près de 4 jours de différence) qu'en semis conventionnel. Par contre les apports de fertilisation N et les densités de maïs ne sont pas différents entre les deux systèmes de semis.

De fait, si on n'analyse que les associations (toutes années confondues), le rendement en grains du maïs et la biomasse totale (maïs + plante de couverture) en semis direct sont significativement plus élevés qu'en semis conventionnel (+ 0.9 t/ha en moyenne pour le rendement et + 2.1 t/ha pour la biomasse totale). Cette différence n'est pas significative sur les cultures pures de maïs du fait d'une plus grande variabilité des résultats.

Tableau 4.6 : Rendement et biomasse totale des différents traitements en fonction du mode de semis durant 2007-2008 et 2008-2009. La même lettre sur la colonne moyenne générale indique l'absence de différence significative entre les deux systèmes pour les associations et pour les maïs pur (LSD, $p < 0.05$).

Système semis	Traitemen t	Rendement grains (kg/ha)				Biomasse totale (kg/ha)			
		2007-08	2008-09	Moyenn e année	Moyenn e générale	2007-08	2008-09	Moyenn e année	Moyenn e générale
Semis direct	MB	3261	2377	2731	2800b	1218 1	9252	10424	10800b
	MC	3417	2541	2891		1134 9	1119 6	11257	
	MPur	3722	3005	3292	3292a	9451	7464	8259	8259a
Semis conventionnel	MB	2342	1463	1703	1900a	8806	7677	7984	8700a
	MC	2632	1632	1905		1056 1	8453	9028	
	MPur	4470	1745	2488	2488a	9323	5104	6255	6255a

3.2.5 Effet qualité du contrôle des mauvaises herbes

On n'observe pas de différence significative entre la gestion des adventices par les producteurs et les placettes avec contrôle manuel, aussi bien pour le rendement en grains que pour la biomasse totale du maïs (Figure 4.6). Même si à la récolte les mauvaises herbes sont plus importantes dans les parcelles gérées par les producteurs (MPur), celles-ci n'ont pas affecté la production du maïs. Ceci peut s'expliquer par le fait que les mauvaises

herbes s'étant surtout développées en fin de cycle du maïs, elles n'ont pas entraîné de compétition notable. Globalement, on pourrait dire que le mode de gestion des parcelles par les agriculteurs semble assez satisfaisant concernant le contrôle des mauvaises herbes, malgré la variabilité élevée.

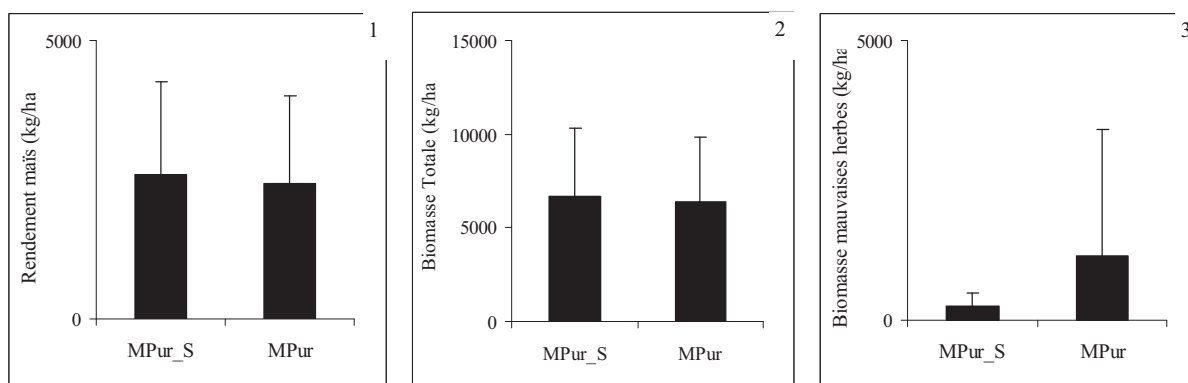


Figure 4.6 : Rendement grains du maïs (1), biomasse totale du maïs (2) et (3) biomasse mauvaises herbes à la récolte en fonction du mode de gestion de la parcelle. Les barres verticales représentent les écart-types.

3.2.6 Parcelles producteurs Vs Station expérimentale

Les rendements en grains et en biomasse du maïs ont été en moyenne plus faibles en parcelles de producteurs par rapport à la station expérimentale sur chacune des deux années expérimentales (Tableau 4.7). La différence de rendement a été plus marquée en deuxième année, avec plus de 2 t/ha de différence en faveur de la station expérimentale. En première année, la forte production de biomasse de maïs en parcelles de producteurs ne s'est pas traduite en supplément de rendement grains. En effet, sur certaines parcelles envahies par les mauvaises herbes ou très peu fertilisées, plusieurs pieds de maïs n'ont pas donné d'épis à la récolte (20 et 25% en parcelles de producteurs, respectivement en 2007-2008 et 2008-2009, contre 0 et 14% en station).

De la même manière, la production en biomasse totale (maïs + plante de couverture) a été en moyenne deux fois plus faible en parcelles de producteurs par rapport à la station expérimentale sur l'ensemble des deux années. La différence a été encore plus marquée en deuxième année, avec plus de 8 t/ha de différence en faveur de la station expérimentale. Les associations se sont donc montrées moins performantes en conditions réelles pour produire de la biomasse additionnelle.

Cette faible productivité du maïs et des plantes de couverture en milieu réel, est à mettre en relation avec une disponibilité plus limitée en ressources, notamment azotées car les producteurs en moyenne ont fait des apports en azote faibles (9 à 10 kg de N ha⁻¹ contre 69 kg de N ha⁻¹ dans l'essai), voire même inexistantes pour un nombre considérable d'entre eux. Les différences de teneurs en N confirment cela, en effet les teneurs en N du maïs sont inférieures en moyenne dans les parcelles des agriculteurs par rapport à la station expérimentale (18 contre 19 g N/kg dans l'essai pour le maïs en culture pure, par exemple).

Tableau 4.7: Principales caractéristiques de la productivité moyenne en parcelles de producteurs et en station expérimentale durant les années 2007-2008 et 2008-2009. Les chiffres entre parenthèses sont les écarts type.

	2007-2008		2008-2009	
	Moyenne Parcelles	Moyenne station	Moyenne Parcelles	Moyenne station
Rendement Maïs	3400 (1400)	4400 (1000)	2200 (1400)	5100 (1400)
Biomasse totale Maïs	8100(2800)	8000 (2000)	5800(3200)	11000(2300)
Biomasse plante de couverture (kg.ha ⁻¹)	3600(2300)	7800(700)	3700(2400)	7000(3500)
Biomasse totale (Maïs + plante couverture)	11100(3700)	15200 (1300)	9200(3700)	17400(6000)
Nombre d'épis à la récolte (épis/m ²)	4 (0.6)	7 (0.8)	3 (1.2)	6 (1.1)

3.3 Comportement du couvert végétal

3.3.1 LAI

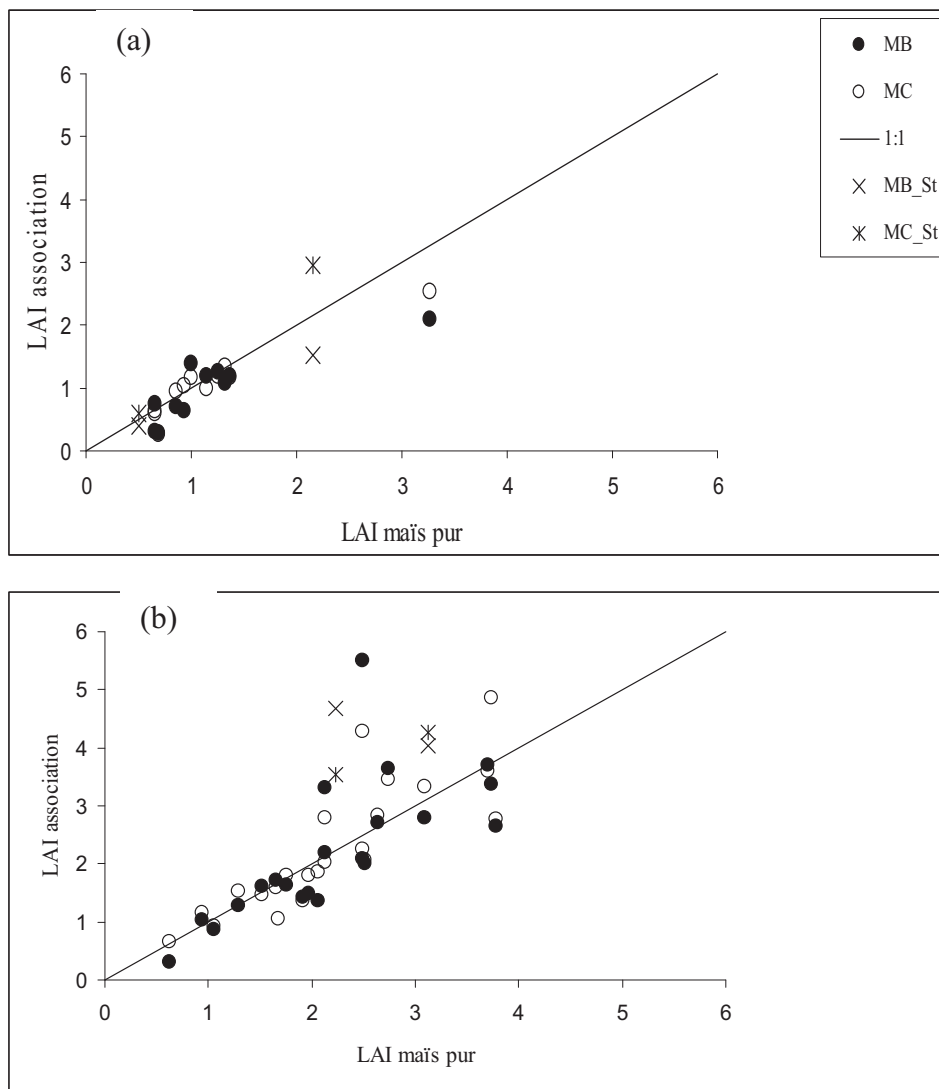


Figure 4.7 : LAI de l'association maïs-Plante de couverture (MC et MB) en fonction du LAI du Maïs pur, entre 24 47 jours après semis maïs (a) et entre 47 et 77 jours après semis maïs (autour de la floraison). MC_St et MB_St sont les LAI au niveau de la station expérimentale contrôlée.

Sur la Figure 4.7a, on constate que le LAI de l'association est peu différent du LAI du maïs pur en tout début de cycle quand les plantes de couverture sont en phase d'installation. Cette différence était déjà peu marquée dans les essais. Nous avons également quelques cas où le LAI de l'association est inférieur au LAI du maïs pur ce qui dénote une

croissance initiale de l'association moins favorable que celle du maïs pur. Ces quelques cas correspondent à des parcelles avec un très faible développement de la plante de couverture et parfois des densités de maïs inférieures aux densités du maïs en culture pure. A la floraison du maïs (LAI max) (Figure 4.7b), cette difficulté initiale semble s'être en partie estompée, le LAI de l'association étant similaire ou supérieur à celui du Maïs pur, tout en restant toutefois souvent inférieur aux LAI des associations en milieu contrôlé.

3.3.2 Accumulation de NPK par les plantes

Le Tableau 4.8 résume les teneurs en N, P et K du maïs et des plantes de couverture et les exportations totales des 3 éléments pour les différents traitements étudiés dans les parcelles des producteurs. Pour chacune des deux années, il n'y a pas de différence significative entre les traitements sur les teneurs N et P du maïs à la récolte sur les différents types de sol. Seule la teneur en K en 2007-2008 du maïs de l'association maïs-Cajanus est significativement inférieure aux autres traitements sur les « Latossolos Arenoso ». Cette tendance est maintenue lors de la deuxième campagne et reste significative sur l'ensemble des deux années confondues. Le Cajanus aurait un effet dépressif sur le K prélevé par le maïs dans l'association, ce surtout sur les sols fortement carencés en cet élément.

Au niveau des plantes de couverture, les teneurs N du *Brachiaria* sont significativement plus faibles que celles du Cajanus, quels que soient l'année et le type de sol (en moyenne 9 contre 21 g/kg et 8 contre 18 g/kg respectivement en 2007-2008 et 2008-2009). Par contre il n'y a pas de différence significative entre les deux plantes de couverture pour les teneurs en K et P. On observe une légère tendance à la baisse des teneurs N et une tendance à la hausse des teneurs P et K des plantes de couverture la seconde année en comparaison avec la première. La légère baisse de la teneur en N des plantes de couverture en deuxième campagne peut être liée à une plus grande productivité en moyenne par rapport à la première année, notamment pour le Cajanus.

Au niveau des plantes de couverture, les teneurs en N du *Brachiaria* sont significativement plus faibles que celles du Cajanus, quels que soient l'année et le type de sol (en moyenne 9 contre 21 g/kg et 8 contre 18 g/kg respectivement en 2007-2008 et 2008-2009). Par contre il n'y a pas de différence significative entre les deux plantes de couverture pour les teneurs en K et P. On observe une légère tendance à la baisse des teneurs en N et une tendance à la hausse des teneurs en P et K des plantes de couverture la seconde année en comparaison

avec la première. La légère baisse de la teneur en N des plantes de couverture en deuxième campagne peut être liée à une plus grande productivité en moyenne par rapport à la première année, notamment pour le *Cajanus*. La hausse des teneurs K et P peut être due au fait que les plantes de couvertures ont été plus compétitive pour ces deux éléments de par leur demande élevée, d'où vraisemblablement la faible productivité du maïs cette année là.

Les exportations en P et K sont par contre peu différentes entre traitements. Aucune comparaison avec les exportations du maïs pur ne fait apparaître de différence significative, les exportations étant soit comparables, soit même inférieures aux exportations en maïs pur (Figure 4.8c). Ces situations les moins favorables correspondent à des parcelles en « Terra de cultura » et en « Latossolo » en première année. Le traitement MC exporte en moyenne plus de P que la culture pure, en particulier sur les « Latossolos » où le *Cajanus* a mieux poussé les deux années. Les situations les moins favorables correspondent à des parcelles sur « Latossolo Arenoso » ou sur « Terra de cultura » la première année (Figure 4.8c).

Les exportations en K sont généralement meilleures dans les associations, surtout la deuxième année pour laquelle la différence avec le maïs pur est significative. Par contre sur les LA, carencés en cet élément, l'association MC est moins efficace et ce significativement en 2007-2008. Ces situations correspondent aux parcelles les moins favorables à l'association dans la Figure 4.8b des comportements par parcelle.

Tableau 4.8 : Teneurs en N, P et K (g/kg) du maïs (grain + paille) et des plantes de couverture (Brachiaria et Cajanus) et les exportations totales NPK (kg/ha) à la récolte des différents traitements en fonction de l'année et du type de sol. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (LSD, 5%).

Année	Type de sol	Traitements			Traitements			Traitements		
		MB	MC	MPur	MB	MC	MPur	MB	MC	MPur
		Teneurs N maïs (g/kg)			Teneurs K maïs (g/kg)			Teneurs P maïs (g/kg)		
2007-2008	TC	19a	19a	18a	21a	13a	24a	4a	5a	6a
	L	15a	17a	17a	18a	20a	29a	5a	6a	6a
	LA	14a	16a	19a	16b	6a	16b	1a	1a	3b
		16a	18a	18a	19ab	13a	23b	4a	4a	5a
2008-2009	TC	20a	17a	18a	22a	18a	21a	7a	6a	7a
	L	20a	19a	18a	24a	22a	23a	6a	5a	7a
	LA	21b	17a	19ab	22a	18a	21a	4a	4a	4a
		20b	18a	18a	23a	21a	23a	6a	6a	6a
2007-2008&2008-2009		19a	18a	18a	22ab	18a	23b	5a	5a	6a
		Teneurs N plante de couverture (g/kg)			Teneurs K plante de couverture (g/kg)			Teneurs P plante de couverture (g/kg)		
2007-2008	TC	10a	24b	-	15a	11a	-	1.5a	1.8a	-
	L	8a	21b	-	12a	10a	-	1.7a	2.3a	-
	LA	10a	18b	-	10a	9a	-	1.4a	1.8a	-
		9a	21b	-	12a	10a	-	1.5a	1.9a	-
2008-2009	TC	9a	19b	-	25b	15a	-	2.8a	2.5a	-
	L	9a	16b	-	22b	15a	-	1.6a	2.7b	-
	LA	8a	17b	-	11a	12a	-	1.5a	2a	-
		8a	18b	-	21b	14a	-	2a	2.4a	-
2007-2008&2008-2009		9a	19b	--	18b	13a		1.8a	2.2a	
		Exportations Totales N (kg/ha)			Exportations Totales K (kg/ha)			Exportations Totales P (kg/ha)		
2007-2008	TC	92ab	162b	74a	137a	115a	111a	20a	25a	25a
	L	75a	153b	71a	115a	112a	111a	21a	32a	26a
	LA	42a	106b	32a	45c	20a	34b	6a	3a	6a
		75a	145b	63a	108a	91a	91a	16a	21a	20a
2008-2009	TC	67a	118b	52a	111ac	125c	66a	24a	26a	19a
	L	59a	110b	38a	110b	110b	49a	15a	24b	14a
	LA	42a	66a	26a	52a	51a	29a	11a	13a	6a
		58a	103b	40a	97b	101b	50a	17ab	22b	14a
2007-2008&2008-2009		63a	116b	47a	100b	98b	64a	17ab	22b	16a

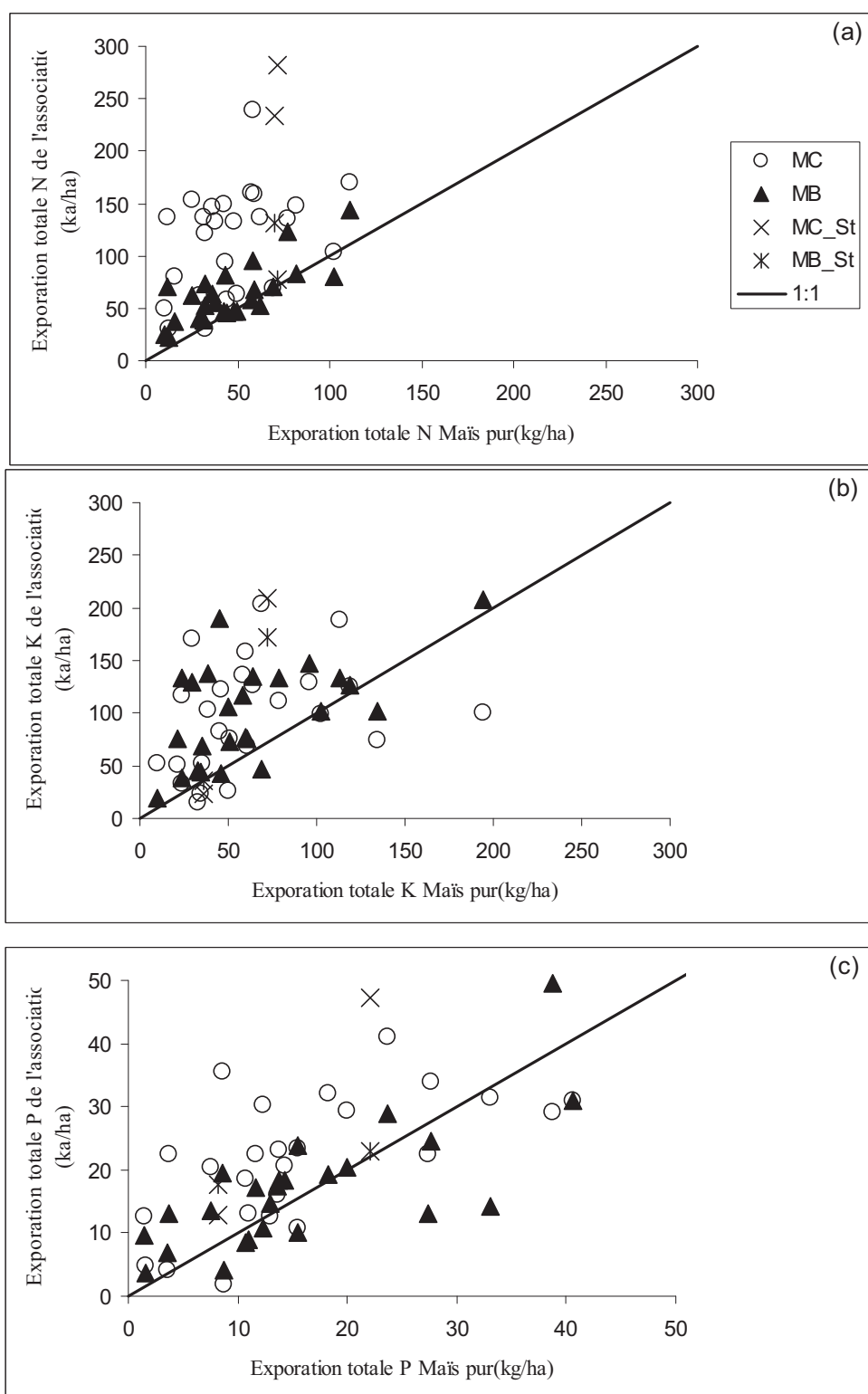


Figure 4.8 : Exportations totales N (a), K (b), et P (c) de l'association Maïs-Plante de couverture (MC et MB) en fonction des exportations du Maïs en culture pur à la récolte. MC_St et MB_St sont les points en station expérimentale contrôlée.

4. Discussion

4.1 Variabilité des résultats et poids des conditions pédo-climatiques

Les essais en parcelles d'agriculteurs ont montré que l'association en relais maïs-plante de couverture est possible sans compromettre la production en grains dans la majorité des situations des petits producteurs de la région d'Unai. Ils montrent aussi une très forte variabilité entre années et au sein même d'un type de sol. Cette forte variabilité est due à la fois à la diversité des modes de gestion des cultures par les producteurs, le plus souvent en interaction avec la diversité pédoclimatique des parcelles qu'ils exploitent (Doré et al., 2008).

Les différences de fertilité entre types de sols se sont traduites par une productivité moyenne moins importante sur les « Latossolos Arenoso », un peu meilleure sur les « Latossolos » et enfin supérieure sur les « Terras de cultura ». Cette relation directe entre fertilité naturelle et productivité primaire n'est pas toujours évidente dans cette région (Siqueira et al. 2010), mais apparaît plus fréquemment en conditions de petits agriculteurs ayant peu recours aux intrants chimiques externes pouvant compenser une déficience éventuelle de ressources minérales naturelles (Tittonell et al., 2005; Tittonell et al., 2007). Par contre la productivité moyenne a été plus faible la deuxième année pourtant plus pluvieuse que la première. Cela peut traduire le fait que ce n'est pas l'alimentation hydrique qui est en cause dans les différences entre année comme cela est fréquent en zone subhumide (Scopel et al., 2004). D'autres facteurs limitants ont pu intervenir en 2008-2009 telles que les densités plus faibles de maïs, la mauvaise installation des plantes de couverture, et/ou l'absence de fertilisation.

4.2. Rendement en grains du maïs

Comme cela avait été observé en station (chapitre 2) les SAMBAs n'affectent en général pas la production du maïs grains relativement à la culture pure de maïs. Cependant, la très grande variabilité des rendements à travers le réseau de parcelles des producteurs, et la faible puissance de notre dispositif expérimental, rendent difficile la mise en évidence d'un éventuel effet négatif de la plante de couverture sur le rendement du maïs. Sur l'ensemble des parcelles de notre étude, il y a eu 33% des cas où le rendement du maïs a été inférieur, dans l'association à la valeur atteinte en culture pure. Il s'agit de cas où la plante de couverture a produit significativement plus de biomasse comparativement aux autres cas

d'association. Un tel effet dépressif de la plante de couverture sur le rendement du maïs a été également observé par plusieurs auteurs sur des associations céréale-plantes de couverture (Carof et al., 2007; Shili-Touzi et al., 2010) quand la plante de couverture devient trop agressive.

Généralement, les réductions de la production du maïs diffèrent selon le type de sol, elles sont moindres respectivement sur « Terra de cultura » et « Latossolo », qui sont les plus fertiles, et plus marquées sur les « Latossolos Arenoso » durant les deux années. La compétition exercée par la plante de couverture s'accroît lorsque les ressources minérales fournies par le sol deviennent plus rares, dans ces situations recevant peu ou pas d'engrais minéraux.

L'effet dépressif en deuxième campagne se retrouve sur les rendements grains du maïs. En 2008-2009, la production du maïs est plus faible dans les parcelles paysannes, alors qu'en station expérimentale le maïs a répondu mieux en deuxième année, grâce notamment à une meilleure pluviométrie. Nous avons vu qu'une partie de ces différences de production sont surtout concentrées sur des situations où la densité de maïs a été plus faible en association, et où les mauvaises herbes ont été mal contrôlées. L'élaboration du rendement du maïs est en effet très sensible au nombre de plantes (Fleury, 1990) et à la compétition exercée par les mauvaises herbes (Rajcan and Swanton, 2001).

En moyenne, la productivité du maïs est plus faible dans les parcelles des producteurs par rapport à la station expérimentale. De plus, les réductions de rendement du maïs en association sont plus marquées dans les parcelles des producteurs, où le maïs a subi plus de compétition de la plante de couverture car les ressources disponibles sont plus limitantes. Par exemple, les apports d'azote sont de 10 kg/ha de N en moyenne chez les producteurs contre 69 kg/ha en station expérimentale, avec des teneurs en N relativement inférieures en parcelles par rapport à la station expérimentale. De plus, seulement 65% des producteurs ont apporté des engrais.

L'autre facteur explicatif des différences de rendement du maïs entre les parcelles de producteurs et la station expérimentale concerne les différences de densité de maïs à la récolte, avec en moyenne 4 à 5 plantes/m² contre 7 en station.

4.3. Production des plantes de couverture et biomasse totale

Plusieurs études ont montré la réduction de la production des plantes de couverture en association avec une culture principale dominante (Shili-Touzi et al., 2010; Carof et al.,

2007; Harris et al., 2007). Cependant, la plante de couverture permet une production de biomasse additionnelle par rapport à une culture pure du maïs sans que cela ne pénalise de façon significative la production en grains et biomasse de ce dernier. Au final, l'association produit une biomasse totale supérieure à celle produite par les cultures pures. Différents travaux sur les associations de cultures arrivent à la même conclusion (Jensen 1996 ; Hauggaard-Nielsen et al., 2003; Hauggaard-Nielsen et al., 2009). Cela témoigne d'une meilleure valorisation des ressources du milieu de l'association par rapport à une culture pure, comme l'ont signalé plusieurs études sur les associations de cultures (Jensen, 1996; Hauggaard-Nielsen et al., 2003; Hauggaard-Nielsen et al., 2009; Willey et al 1979). Généralement, dans une majorité de parcelles de producteurs de notre étude, les plantes de couverture ont bien produit une biomasse additionnelle notable par rapport au maïs en culture pure. On a noté cependant une grande variabilité de la production de biomasse de ces plantes de couverture dans les parcelles et leur présence ne permet pas d'augmenter systématiquement la biomasse totale du système. Ainsi, dans certains cas particuliers d'associations, la biomasse totale (maïs + plante de couverture) a même été inférieure à la biomasse totale du maïs en culture pure. Chez ces cas particulier, c'est plutôt les différences de densités, l'infestation par les mauvaises herbes par rapport à la culture pure de maïs, et la faible productivité de la plante de couverture qui a contribué à réduire la biomasse totale de l'association. La présence de mauvaises herbes en fin de cycle, même si elle ne porte plus préjudice à la croissance du maïs peuvent avoir concurrencé les plantes de couverture qui, elles, continuent leur croissance en fin de saison des pluies. En effet, dans ces parcelles la plante de couverture a été particulièrement peu productrice représentant à peine 20% de la production moyenne des autres parcelles associées. Donc dans ces parcelles, la pression du maïs et des mauvaises herbes sur les ressources a été trop forte pour permettre une croissance correcte de la plante de couverture.

Inversement une bonne installation des couvertures peuvent empêcher les mauvaises herbes de se développer dans cette partie tardive du cycle dans l'association (den Hollander et al., 2007; Teasdale, 1996). Cela peut être intéressant pour éviter la recharge du stock de semences dans le sol et donc diminuer la pression ultérieure des mauvaises herbes.

Ces cas particuliers de faible production de biomasse des plantes de couverture n'ont été observés que sur les types de sol « Terra de cultura » et « Latossolo Arenoso » et pas sur les « Latossolos ». Ceci pourrait résulter de la forte réserve utile de ces sols et de la capacité des plantes de couverture à bien valoriser, en fin de saison des pluie, l'eau stockée

grâce au paillis pendant le cycle cultural alors que le maïs a finit son cycle (Scopel et al., 2004).

Par ailleurs les dates de semis des plantes de couverture ont été significativement plus précoces dans les « Latossolos » (en moyenne 17 jasm) que dans les deux autres types de sol. Dans les « Terra de culture » les plantes de couverture ont été semées en moyenne 24 jasm et n'ont produit en moyenne que 1.6 et 0.4 t/ha respectivement pour le *Brachiaria* et le *Cajanus*. Sur ces sols plus fertiles, ce retard de semis des plantes de couverture vient se rajouter à une pression d'adventices plus importantes, comme c'est souvent le fait en conditions peu limitantes (Hauggaard-Nielsen et al., 2001; Major et al., 2005). Dans les « Latossolos Arenoso » les faibles productions des plantes de couverture peuvent s'expliquer par une forte compétition du maïs en conditions de faible fertilité. Cette compétition a été particulièrement forte pour l'association avec le *Cajanus* et a surtout porté sur le K, élément déficitaire dans ces sols.

4.4 SAMBA et système de gestion du sol

Dans le réseau des producteurs suivis nous avons deux groupes de producteurs selon les systèmes de semis adoptés : ceux qui ont fait du semis direct sous mulch et ceux qui ont fait du semis conventionnel avec du labour. L'existence de ces deux systèmes nous a permis d'évaluer le fonctionnement des associations en relais en semis direct et en semis conventionnel chez les producteurs. Le semis direct est souvent présenté comme une alternative intéressante pour remplacer les systèmes de culture conventionnels avec travail du sol (Seguy et al., 1996). En culture pure le rendement du maïs en semis direct est légèrement supérieur à celui du maïs en conventionnel, mais de façon non significative. Ce n'était pas le cas dans les essais, où le conventionnel se comportait mieux même si cela était également de manière non significative. D'autres résultats obtenus par Carof et al. (2006), montrent l'absence d'effet de travail du sol sur le rendement du blé lorsqu'il est cultivé seul sur le même site d'étude.

La comparaison des performances agronomiques de l'association conduite en semis direct comparée à celle en semis conventionnel a montré que le maïs en association présente un rendement et une biomasse totale (maïs + plante de couverture) significativement plus importante en semis direct par rapport au semis conventionnel. Au niveau des parcelles, l'infestation des mauvaises herbes en semis conventionnel a été plus importante que celle observée en semis direct en fin de cycle. En effet, en semis direct les producteurs font un désherbage chimique total systématique juste avant le semis du maïs, souvent effectué dans

de bonnes conditions, alors qu'en conventionnel l'utilisation d'herbicide avant semis n'était pas systématique chez les producteurs. Cela peut expliquer cette différence de production du maïs et la plante de couverture, comme dans d'autres situations où ces systèmes ont été comparés (Streit et al., 2002; Reddy, 2003). Griffith et al. 1986; Hairston et al. 1984; Shelby et al. 1988; Wilcox-Lee and Drost 1991 cités par Halford et al., (2001) précisent également que les systèmes de semis direct peuvent être plus productifs que les systèmes conventionnels en raison de l'amélioration de la qualité de sol et de l'efficacité d'utilisation de l'eau par les plantes.

L'effet de la fertilité sur la production constaté dans notre étude souligne également l'importance, dans ce contexte de faible accès aux intrants chimiques, de limiter la dégradation de cette fertilité des sols, afin de pouvoir maintenir la production de grains et la production de biomasse totale le plus longtemps possible. En effet, après quelques années de culture sur les sols des Cerrados, on constate une baisse de la productivité, spécialement lorsque ces sols sont travaillés de façon inappropriée (Goedert and Lobato, 1986; Séguy et al., 1996). Cette réduction est liée à l'utilisation intensive et continue d'outils de travail du sol accélérant les processus de dégradation des sols, en particulier l'érosion (Lindstrom et al., 1992). Il en résulte généralement une diminution des teneurs en matière organique (Bayer et al., 2000; Reicosky et al., 1995) et une dégradation des propriétés physiques des sols, principalement de leur état structural, qui se traduit par une compaction du sol (Kayombo and Lal, 1986). Ces phénomènes affectent la dynamique de l'eau et des nutriments, ainsi que le développement du système racinaire, ce qui se traduit par l'accélération des processus érosifs de ces sols (Blancaneaux et al., 1993).

4.5 Place des SAMBAs chez les petits producteurs

La production additionnelle de biomasse grâce à la plante de couverture en parcelles de producteurs, peut servir à la fois à couvrir le sol et à l'affouragement du bétail. Cependant, les résultats ont montré que le potentiel de production en parcelles de producteurs est faible et très variable par rapport à ce qu'on obtient en station expérimentale. Ce faible niveau de production est dû en partie à une faible utilisation d'intrants ou à des pratiques culturales mal adaptées. Les petits producteurs sont souvent confrontés à des difficultés d'accès aux crédits pour l'achat ou la location des outils de semis, de travail du sol et pour l'achat des fertilisants (Gastal et al., 2003), ce qui entraîne des modes de gestion très différents selon les producteurs. La faible qualité des semis et de la lutte contre les mauvaises herbes sont

également responsables de la faible productivité du maïs dans la région (Xavier et al., 2004; Scopel et al., 2005b).

La prise en compte de la diversité des sols dans le choix des pratiques est également importante. Certains producteurs ayant leurs parcelles sur des sols plus pauvres voient leurs productions encore plus faibles en association, du fait d'une disponibilité plus limitée des ressources. Dans ce contexte le semis direct sur mulch permettrait une reconstitution du stock de matière organique sur le long terme améliorant ainsi la fertilité des sols (Angers et al., 1997; Maltas, 2007). Associée aux plantes de couverture comme elle l'est dans les SAMBAs, cette technique peut même s'avérer intéressante sur le court terme avec une meilleure valorisation des ressources.

La biomasse additionnelle produite par les plantes de couverture dans nos parcelles peut potentiellement participer à l'alimentation du bétail et à l'intensification laitière sans porter préjudice à la production de maïs grain nécessaire à l'alimentation de la famille et des petits animaux (Scopel et al., 2005b). Toutefois, la gestion des deux espèces devient alors importante, afin de minimiser la compétition entre les deux espèces et permettre des conditions d'une meilleure valorisation des ressources dans ces conditions à ressources limitées. En semant précocement la plante de couverture au sein de l'interligne du maïs, on produit une biomasse additionnelle notable alors qu'un semis tardif de la plante de couverture réduit la production en biomasse de cette dernière. On peut ainsi réduire le développement des mauvaises herbes en occupant l'espace entre ligne du maïs très tôt dans le cycle.

Cependant, la gestion des plantes de couverture en semis direct sur mulch augmente également les risques de compétition entre activités pour la main d'œuvre, ressource rare dans ces systèmes de production et souvent partagée entre l'entretien du troupeau et les prestations en dehors de l'exploitation. Ceci peut constituer un frein à l'adoption des SAMBAs chez les petits producteurs (Oliveira et al., 2009). Affholder et al., (2010) montrent par exemple que les causes principales de la non adoption du semis direct sur mulch dans des exploitations du Vietnam sont la demande en travail et en intrants dans les premières années. La valorisation économique des plantes de couverture à travers l'intensification de la production du lait, source de revenu importante et garantie par la présence d'une coopérative laitière dans la région, peut être un moteur d'incitation à une meilleure acceptation des SAMBAs par les petits producteurs (Oliveira et al., 2009).

5. Conclusion

En parcelles de producteurs la productivité des SAMBAs a été caractérisée par une très grande variabilité. On observe cependant des tendances qui vont dans le même sens que les résultats obtenus en station (Chapitre 2). Le rendement du maïs n'est le plus souvent pas pénalisé de façon significative par la présence de la plante de couverture, ce qui permet en plus une production additionnelle non négligeable de biomasse. Les gains de production en biomasse totale de l'association en parcelles de producteurs sont le plus souvent moindres par rapport aux résultats obtenus en station expérimentale. Dans quelques cas, la biomasse produite par les associations peut même être inférieure à la biomasse produite en culture pure. La compétition exercée par la plante de couverture sur le maïs est observée de manière significative dans les situations aux ressources les plus limitées notamment en K.

Dans ce contexte de faibles ressources, l'association avec le *Cajanus* semble plus prometteuse qu'avec le *Brachiaria* pour répondre à la fois aux préoccupations de productivité et de durabilité des systèmes de culture à base de maïs.

Des pratiques visant à minimiser les processus de compétition, tant de la plante de couverture sur le maïs que du maïs sur la plante de couverture (dates relatives de semis, densités relatives, positionnement dans l'espace, choix de l'espèce...), et à optimiser la disponibilité en ressources, tant sur le court que sur le long terme (calage du cycle maïs, paillage, fertilisation, restitution organiques...) peuvent aider à améliorer le potentiel de production des SAMBAs dans le contexte des exploitations issues de la réforme agraire dans les Cerrados.

Chapitre 5 : Discussion générale et perspectives

Cette thèse avait comme objectif de caractériser et de modéliser le partage simultané de trois ressources (eau, azote et rayonnement) dans les systèmes de semis direct en relais et leurs conséquences sur la productivité globale (de la culture principale et de l'ensemble du système) et sur les flux d'eau et d'azote dans le sol.

L'objectif finalisé était de définir des stratégies de gestion pour une meilleure valorisation des ressources naturelles disponibles dans les associations de cultures en relais en semis direct.

Cette thèse se proposait de vérifier les trois hypothèses suivantes :

Hypothèse1: *l'insertion d'une plante de couverture en relais augmente les performances du système grâce à un accroissement de la valorisation des ressources (eau, azote et rayonnement) disponibles pour le système.*

Le dispositif en station expérimentale a permis de vérifier cette première hypothèse, à l'aide du critère du LER, en comparant les associations en relais maïs-plante de couverture à leurs équivalents cultures pures. Les résultats de comparaisons entre SAMBAs et cultures pures confirment cette hypothèse puisque les valeurs de LER supérieures à 1 obtenues avec les SAMBAs correspondent à une production de biomasse de l'ensemble maïs plante de couverture significativement supérieure à celle des cultures pures, à surface équivalente et sans intrants supplémentaires. Cette forte productivité s'accompagnant de valeurs élevée de LER partiel et par conséquent de LER totale particulièrement élevée dans le cas maïs-Cajanus, témoignant ainsi d'une meilleure valorisation des ressources.

Hypothèse 2: *L'amélioration de la performance du système vient d'une meilleure valorisation du rayonnement à la fois par augmentation du coefficient d'interception global du couvert associé et par allongement de la période où il est intercepté par des plantes productives.*

Pour vérifier cette seconde hypothèse aussi, le dispositif en station a été mobilisé, en comparant les interceptions du rayonnement des différents traitements. Les résultats d'interception montre une meilleure interception des SAMBAs au cours du cycle par

rapport aux cultures pures et même des différences significatives d'interception en fin de cycle alors que le maïs en phase de sénescence, la plante de couverture continue sa croissance jusqu'au début de la saison sèche, allongeant ainsi la période d'interception du rayonnement par des plantes cultivées dans la saison agricole.

***Hypothèse 3:** L'amélioration de la performance du système vient également d'une meilleure valorisation de l'azote (effet précédent, allongement du cycle, effet recyclage des nitrates, fixation) et de l'eau (exploration du profil plus en profondeur). Cette modification dépend du type de plante de couverture.*

Pour cette troisième et dernière hypothèse, les deux dispositifs expérimentaux (station et parcelles de producteurs) ont été mobilisés. Les résultats montrent une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau et de l'azote par les SAMBAs comparés aux cultures pures. Ces deux efficacités sont plus élevées dans le cas de l'association maïs-Cajanus que dans le cas de l'association maïs-Brachiaria.

En fin signalons qu'un travail de modélisation devait jouer un rôle important dans ce dispositif. Il devait permettre d'affiner la vérification des trois hypothèses à l'aide de critères quantitatifs le plus souvent difficilement mesurables directement dans les expérimentations tels que les efficacités de conversion des ressources, le LER, l'interception du rayonnement par espèce, les flux d'azote entre compartiments du système, etc, à des pas de temps plus courts que ceux de nos mesures de manière à mieux appréhender les dynamiques temporelles du partage des ressources au cours de la saison. Et surtout, disposer d'un modèle capable d'estimer ces critères pour des conditions climatiques différentes de celles des années de notre expérimentation, permettrait de mieux replacer nos résultats expérimentaux dans le contexte climatique régional.

Les difficultés de calage du modèle choisi pour le cas des SAMBAs, ainsi que des erreurs liées au formalisme de calcul de la température du sol dans ces systèmes, n'ont pas permis d'atteindre complètement les objectifs de ce travail de modélisation. Cependant, des propositions d'améliorations en ce sens ont été apportées et devront permettre d'affiner dans le futur les conclusions établies à l'aide d'une approche expérimentale plus classique.

Les travaux de cette thèse ont enrichi nos connaissances scientifiques et techniques sur le partage des ressources et les performances des SAMBAs, et plus particulièrement des

associations maïs-Brachiaria et maïs-Cajanus, en conditions de faibles intrants dans les zones humides et subhumides des Cerrados Brésiliens. Nous avons pu mettre en évidence le potentiel de tels systèmes, mais également aussi leurs limites, comparés aux cultures pures, pour produire une biomasse globale supérieure, sans pour autant limiter la production de grains du maïs, production commerciale principale pour les agriculteurs de la région.

Cette discussion finale s'articule autour des points suivants :

1) Les apports de la thèse en matière de connaissances sur le partage des ressources entre espèces et de valorisation globale du système en milieu tropical. Nous reviendrons pour cela sur les hypothèses de recherche formulées au chapitre 1 et testées avec deux dispositifs expérimentaux complémentaires (en station et chez les agriculteurs).

2) La méthodologie adoptée pour ce travail en ce qui concerne (i) la complémentarité entre ces deux dispositifs expérimentaux, et (ii) l'articulation entre l'expérimentation et la modélisation.

3) Les utilisations potentielles de ces résultats (i) pour accompagner l'évolution des systèmes de culture des petits producteurs en matière de lutte contre l'érosion, de réduction de la lixiviation des éléments minéraux et de maintien/amélioration de fertilité des sols ; (ii) pour choisir les espèces de plantes de couverture ; (iii) pour appuyer l'intensification de la production laitière des petites exploitations familiales ; (iv) pour accroître les synergies entre agriculture et élevage dans le cas du semis direct tout en développant la production du maïs pour l'alimentation humaine.

4) Les nouvelles pistes de recherche qui peuvent découler de ce travail, notamment en terme de modélisation des ces systèmes, et/ou de façon plus générale sur d'autres aspects des SAMBAs qui n'ont pas été abordés par ce travail.

1. Partage des ressources et performance des SAMBAs

Les deux questions précédemment identifiées dans le chapitre 1 ont été traitées à l'aide d'une approche expérimentale combinant à la fois dispositif en milieu contrôlé et dispositif en parcelles d'agriculteurs pendant deux années.

Sur l'ensemble de l'expérimentation en station, les LER partiel du maïs sont proches de 1 et dans certains cas supérieurs à 1 (Cas de l'association maïs-Cajanus). Et par conséquent,

les valeurs de LER en grains et en biomasse de l'association ont toujours été largement supérieures à 1. Cette augmentation de la performance de l'association est particulièrement nette pour l'association maïs-Cajanus en deuxième année, avec des valeurs de LER très élevées (>2). Ceci suggère des relations de facilitations par le Cajanus pour le maïs, probablement pour l'azote grâce aux restitutions des résidus de l'année antérieure et celles dues aux chutes importantes de feuilles de Cajanus au cours du cycle. Ces effets sont d'ailleurs plus marqués en deuxième année, avec de plus fortes exportations d'azote du maïs à la récolte par rapport à une culture pure. Cet azote supplémentaire est certainement issu de la minéralisation de l'importante biomasse de résidus de culture présentes à la surface du sol sous ce traitement et issues à la fois de la fixation biologique d'azote par le Cajanus (Annexe 1) (Gathumbi et al., 2002; Jeranyama et al., 2000) de l'année précédente mais aussi de son rôle de piège à nitrate avant que le maïs ne prélève significativement de l'azote. Il vient aussi probablement de la minéralisation des racines et des nodosités de la légumineuse pendant le cycle du maïs (Fillery, 2001; McNeill et al., 1997; Rego and Nageswara Rao, 2000; Rochester et al., 1998). On aurait donc une augmentation en deuxième cycle des phénomènes de facilitations sur le maïs et des performances de l'association. Le Cajanus a un bon potentiel d'amélioration de la fertilité des sols comparé à d'autres espèces utilisées comme engrais vert (Snapp et al., 1998), et plusieurs travaux ont souligné les effets bénéfiques sur le rendement des céréales dans les associations céréales-légumineuses (Akanvou et al., 2002; Snapp and Silim, 2002) en général et céréales-Cajanus (Snapp and Silim, 2002) en particulier.

Sur le réseau de parcelles de petits producteurs, nous avons observé les mêmes tendances que sur la station expérimentale: les SAMBAs permettent généralement une production de biomasse additionnelle, sans réduction significative du rendement du maïs.

Ces résultats obtenus confirment bien que l'insertion d'une plante de couverture en relais augmente les performances du système par rapport aux systèmes SCV en culture pure en termes de production en grain et en biomasse totale, grâce à un accroissement de la valorisation des ressources (rayonnement, eau et azote) disponibles, tel qu'énoncé par l'hypothèse 1.

Cependant, le maïs ne semble pas trop souffrir de compétition sauf avec *Brachiaria* la deuxième année, les deux cultures ayant vraisemblablement manqué d'azote. L'intensité des relations de compétition dépend de l'espèce de plante de couverture (Carof, 2007). En

deuxième année le maïs a été limité, par rapport à la culture pure, dans l'association avec le *Brachiaria*, probablement par manque d'azote. Même si aussi, nous avons observé un développement de ravageurs favorisé par la présence importante des résidus de *Brachiaria* de l'année précédente et que le contrôle chimique n'a pas réussi à contrôler efficacement, ce qui a entraîné des pertes à la levée du maïs. Ce problème de développement de ravageurs favorisé par les résidus de *Brachiaria* a été rapporté sur une culture de coton semée sous mulch de *Brachiaria* (Brévault et al., 2007).

L'association intercepte également plus de rayonnement, surtout en fin de cycle lorsque le maïs entrant en sénescence n'intercepte presque plus de rayonnement, alors que les plantes de couverture maintiennent un feuillage actif jusqu'en début de saison sèche, confirmant l'hypothèse 2.

Les plantes de couverture maintiennent leur croissance jusqu'à la fin des pluies et valorisent l'eau et l'azote disponible en fin de saison des pluies quand le maïs a arrêté toute activité physiologique à maturité du grain. Cette valorisation tardive semble également encore plus efficace avec *Cajanus*, notamment pour l'eau, l'efficacité d'utilisation de l'eau par l'association maïs-*Cajanus* étant presque double de celle des cultures pures. Les résultats montrent aussi qu'en fin de cycle, les stocks résiduels d'azote du sol étaient supérieurs dans le cas des cultures pures comparés aux stocks dans le cas des associations. Ce qui confirme la capacité de l'association à valoriser l'azote du sol et par voie de conséquence à réduire la lixiviation de l'azote par rapport aux cultures pures. Les profils de colonisation racinaire réalisés en deuxième année (Annexe 2) montrent une nette différence entre association en relais et culture pure de maïs, les associations exploitant plus de volume de sol en profondeur, ce qui leur permet d'avoir accès à des ressources en eau et en azote supérieures. Ceci est dû à la capacité qu'ont les plantes de couverture, en l'occurrence le *Cajanus*, de développer les racines en profondeur (Snapp and Silim, 2002). Ces résultats confirment l'hypothèse 3 sur une meilleure valorisation de l'azote et de l'eau à l'échelle de la saison de culture.

Par ailleurs, grâce au dispositif en parcelles d'agriculteurs, cette thèse nous a aussi permis de constater certaines particularités de l'application des SAMBAs dans les conditions réelles des exploitations.

- Une forte variabilité des pratiques et des conditions pédoclimatiques se traduisant par une forte variabilité des performances des SAMBAs étudiés.
- Une productivité en grains en moyenne moindre (1.6 t/ha de différence) sur les deux années du maïs en pur chez les producteurs par rapport à la station expérimentale, différence que nous avons pu relier aux différences de types de sols et de pratiques culturales (densités de peuplement, fertilisation, dates de semis).
- Dans certaines situations, surtout lorsque les ressources deviennent plus limitantes (sols pauvres, moindre fertilisation), le maïs semble souffrir de compétition plus forte et parfois la plante de couverture ne produit que très peu de biomasse aussi.
- Ces situations de faible valorisation des ressources des associations sont accentuées lorsque la gestion des cultures ne prenait pas en compte la gestion des ressources : mauvaise gestion initiale des mauvaises herbes, travail du sol, densités réduites dans l'association, date tardive de semis.

Nous avons également montré que les associations en relais se comportaient mieux en semis direct par rapport au semis conventionnel, dans le réseau des parcelles étudiées. Cet effet n'est peut-être pas vraiment le fait d'une meilleure valorisation directe des ressources disponibles, mais d'une meilleure maîtrise d'autres techniques (contrôle des mauvaises herbes, fertilisation chimique, et densité de plantes) et d'une amélioration de l'offre en ressources et de leur accès (structure du sol, dynamique de l'eau et de l'azote) en l'absence de travail du sol. En effet, dans les systèmes en semis direct sous mulch, la suppression des perturbations liées au travail mécanique, et le maintien d'une couverture végétale qui protège la surface du sol, entraîne souvent un accroissement de la stabilité de l'état structural et de l'efficacité d'utilisation de l'eau par les plantes par rapport aux systèmes conventionnels (Griffith et al. 1986; Hairston et al. 1984; Shelby et al. 1988; Wilcox-Lee and Drost 1991 cités par Halford et al., 2001). Par ailleurs, les producteurs en semis direct de ce réseau de parcelles ont fait systématiquement un contrôle chimique des mauvaises herbes avant le semis, ce qui n'était pas toujours le cas chez les producteurs en semis conventionnel, ce qui a pu contribuer à la meilleure maîtrise des mauvaises herbes en début de cycle (Reddy, 2002; Streit et al., 2002).

Même en conditions limitées en intrants, les SAMBAs sous semis direct ont montré un fort potentiel pour mieux valoriser les ressources disponibles, augmenter la

production totale de biomasse sans pénaliser la production de maïs, surtout dans le cas d'une association avec le Cajanus.

Mais nous avons vu en milieu réel que les SAMBAs peuvent se heurter à quelques difficultés de gestions limitant leur intérêt potentiel de valorisation des ressources disponibles et donc leur production, surtout lorsque les ressources deviennent très limitantes.

2. A propos de la démarche et des dispositifs

2.1. Complémentarité station expérimentale et réseaux de parcelles chez les producteurs

D'après Debaeke et al., (2008) les dispositifs en station expérimentale et en réseaux de parcelles sont complémentaires, dans leurs objectifs, dans leurs échelles spatiale et temporelle, dans l'appréhension des caractéristiques de l'exploitation et des concurrences possible entre chantiers au sein de celle-ci. Et aussi, par le problème du transfert d'une technologie de la station expérimentale à la parcelle du producteur. Le plus souvent on assiste à des baisses de performance dès qu'on passe de la parcelle expérimentale à la parcelle de producteur. Dans notre cas la station expérimentale a permis la comparaison directe des traitements, toutes conditions égales par ailleurs, en ce qui concerne la valorisation des ressources globales disponibles en production de grains maïs et de biomasse totale. Ces conditions ont aussi permis des mesures relativement fréquentes des états du couvert et du sol, donnant accès à un suivi temporel de la disponibilité et de la valorisation de certaines de ces ressources dans chaque traitement, et de les mettre en relation avec les résultats de production, que ce soit en culture pure ou en cultures associées en relais.

En réseau de parcelles de producteurs, cette analyse de la dynamique des ressources est difficile à effectuer pour de simples raisons logistiques résultant de la nécessité de prendre en compte la variabilité intra et inter parcellaires. Par contre l'intérêt de ce dispositif, est justement de permettre une confrontation à une plus grande variabilité de conditions d'application (variabilité des conditions pédoclimatiques et de mode de conduite des cultures) et donc d'analyser le domaine de validité des résultats obtenus en station.

Ces deux dispositifs nous ont permis de voir que le potentiel de production en parcelles producteurs est plus faible et très variable par rapport à la station expérimentale. Ceci n'est pas étonnant vu la variabilité pédologique et climatique entre les trois assentamentos de la

zone d'étude. Toutefois, les effets bénéfiques des SAMBAs se sont exprimés dans la majorité des parcelles avec une amélioration de la production de biomasse totale sans baisse du rendement du maïs par rapport à la culture pure du maïs et sans intrants supplémentaires.

On peut questionner la représentativité des niveaux de fertilisation utilisés dans l'expérimentation contrôlée, beaucoup plus élevés que ceux des parcelles d'agriculteurs. Nous avons pourtant essayé de reproduire en station les niveaux observés chez les agriculteurs dans des enquêtes préalables dans la région (Goudet, 2005; Scopel et al., 2005b) afin d'éviter la situation classique de non limitation par le facteur azote dans les stations expérimentales. Les écarts constatés entre nos parcelles et celles des agriculteurs suggèrent que la pression économique les a amenés à réduire considérablement la quantité d'engrais appliquée dans leurs parcelles de maïs entre les enquêtes rapportées en 2005 et les années de notre étude. L'accessibilité des parcelles, la synchronisation des opérations, et celle des observations ont été plus difficiles le réseau de parcelles. Ainsi certaines interventions comme le semis des plantes de couverture n'ont pas toujours été réalisées selon les recommandations des techniciens. Les mesures de LAI et de biomasse ne sont pas effectuées aux mêmes stades phénologiques ce qui complique les éléments de comparaison, non pas entre traitements au sein d'une parcelle mais entre parcelles et avec le dispositif en station.

De façon générale le dispositif de parcelles producteurs a permis de prospecter une large gamme de situations et de conditions, toutefois la multiplicité des facteurs non contrôlés par rapport au nombre de parcelles suivies et à la variabilité des rendements mesurés, ne permettent pas de tester l'effet de certains facteurs. Il eût fallu pour pallier ce problème, soit augmenter le nombre de situations suivies (Naudin et al., 2010), soit structurer l'échantillon selon un nombre plus restreints d'hypothèses à tester (Doré et al., 2008 ; Scopel et al., 1994).

2.2. Combinaison expérimentation-modélisation :

L'approche expérimentale a été restreinte à deux années dans le cadre de cette thèse mais également de par le coût d'un tel dispositif. Nous avons eu la chance de bénéficier de deux années contrastées du point de vue de la pluviométrie, qui, même si elles n'ont pas jouées pleinement dans le dispositif en milieu réel parce que gommées par d'autres facteurs

limitants, se sont clairement manifestés en milieu contrôlé sur le niveau moyen de productivité et sur les interactions entre espèces. Cependant ces interactions sont difficiles à appréhender uniquement par expérimentation si l'on veut prendre en compte la variabilité du climat (Launay et al., 2009; Shili-Touzy et al., 2010).

A contrario, les processus de compétition et complémentarité/facilitation que l'on voulait étudier ont pu être mis en évidence malgré le contraste climatique des deux années. Il est probable que ces processus se seraient manifestés encore plus sur des pas de temps plus longs de par leur liaison avec les effets cumulatifs des systèmes de culture, notamment à travers la matière organique du sol. Par exemple, comme cela a été le cas dans l'association maïs-Cajanus, l'azote absorbé ou fixé par la légumineuse pourrait chaque année être restitué à la culture suivante pouvant ainsi conduire à réduire les besoins en fertilisants azotés de la culture de maïs, dès la deuxième année. De plus, l'accroissement de production de biomasse grâce à la plante de couverture peut conduire à augmenter la teneur en matière organique du sol, améliorant ainsi sa fertilité sur le long terme et l'offre en azote du sol (Maltas et al., 2007). Par contre dans le cas de l'association maïs-Brachiaria en deuxième année, l'azote a été limitant car la restitution a été plus lente qu'avec une légumineuse (Mary et al., 1996 ; Thorup-Kristensen, 1994), entraînant plus de compétition cette année là entre les espèces. Il n'est pas dit que sur le long terme malgré tout, les restitutions liées à la production de Brachiaria, même dans des conditions peu importantes de fertilisation azotée, ne conduisent pas également à une croissance lente des stocks de matière organique du sol, et donc à terme à un accroissement de la fourniture d'azote minéral par l'humus du sol. Toutefois de telles augmentations de stocks ne sont observées généralement qu'avec de forts apports initiaux d'azote minéral ou avec l'association avec une légumineuse (Boddey et al., 1997)

Le recours à la modélisation vise à évaluer plus efficacement les conséquences de ces nombreuses interactions sur les performances agronomiques et environnementales des SAMBAs sur le court, le moyen et long terme (Shili-Touzi et al., 2010). Ceci suppose cependant de disposer de données de qualité pour paramétrer et évaluer le modèle.

Pour quantifier le partage des ressources entre cultures de l'association, on a donc envisagé de mener ensemble ces deux approches, l'une en station expérimentale, avec randomisation en blocs aléatoire pour tester les hypothèses et acquérir les données du calage du modèle et l'autre par modélisation pour tester ces hypothèses dans une plus large

gamme de conditions. Toutefois une telle combinaison aurait été beaucoup plus efficace avec un modèle ayant déjà abouti à la simulation de tels systèmes dans un contexte similaire. Dans notre cas le modèle était supposé adapté à la simulation des cultures associées et déjà calé et évalué dans les conditions locales sur maïs en culture pure dans sa version culture pure (Motisi et al., 2010).

Les objectifs non pas été atteints en terme de quantification des flux d'eau et d'azote et de partage des ressources entre les espèces dans notre contexte. En effet, il n'a pas été possible d'obtenir un calage du modèle restituant les différences de croissance et de production du maïs et des plantes de couvertures entre les différentes situations en cultures pures, et donc sa validation et son évaluation sur les associations en relais de notre dispositif expérimental.

Le modèle ne calcule pas correctement la température du sol sous mulch, n'a pas pu être paramétré pour prendre en compte l'anoxie temporaire liée à l'excès d'eau dans le sol qui joue peut être un rôle en contraignant la croissance racinaire et il néglige la fourniture d'azote au sol via la décomposition des résidus du mulch. Tout cela ne semble pas avoir de conséquences néfastes pour la simulation de la croissance et du rendement du maïs, mais rend difficile le calage de la simulation de la croissance des plantes de couverture, qui semblent bénéficier en partie au moins de cet azote issu du mulch, dont la minéralisation dépend de la température du sol. Cela rend aussi difficile le calage des flux d'azote dans le sol et du stock d'azote en fin de saison de culture, ne permettant pas finalement de simuler l'évolution à long terme des statuts organiques et minéraux du sol pour l'azote sous les différents systèmes de culture étudiés.

Le modèle est extrêmement sensible à la compétition pour la lumière dans l'association maïs-Cajanus, où les architectures des deux plantes, telles que prises en compte dans le modèle, sont très semblables. De faibles variations de paramétrages conduisent soit à simuler des inversions de dominance que nous n'avons pas observées, soit une sous-estimation importante des performances de la plante de couverture associée.

Pour la plupart de ces difficultés il est probable que des améliorations dans le dispositif expérimental et son évaluation auraient facilité le calage du modèle. Ces améliorations auraient pu porter sur une augmentation du nombre des variables mesurées dans chaque situation culturale (hauteur, formes des espèces), de la fréquence et de la méthode de mesure de certaines variables (LAI et rayonnement intercepté séparément par espèce dans l'association), de la précision de mesure de certaines variables (état hydrique du sol,

dosage de l'azote minéral du sol...). Il serait utile également de prévoir d'autres traitements (des traitements associant maïs-plante de couverture et leurs équivalents en cultures pures en conditions non limitantes pour l'eau et l'azote) pour un meilleur calage du modèle sur une plus grande gamme de disponibilité en ressources.

Toutefois, sans la correction d'un certain nombre de formalismes du modèle il paraît peu réaliste d'espérer progresser sur la modélisation du partage de ressources en cultures associées dans nos conditions. Il est notamment indispensable de modifier le mode de calcul de la température du sol sous mulch dans STICS pour représenter correctement le fonctionnement des systèmes paillés en milieu tropical.

En dépit de ses limites le dispositif expérimental a permis de réaliser le travail de calage du modèle choisi, pour simuler la croissance des cultures pures de maïs et Brachiaria ainsi que pour l'association maïs Brachiaria. Cependant, certains défauts structurels du modèle n'ont pas permis de l'utiliser pour simuler correctement les cultures associées en relais dans le cadre des objectifs que nous nous étions fixés: 1) la quantification des flux et des répartitions de ressources entre espèces dans les différentes situations prospectées (parcelles d'agriculteurs et milieu contrôlé), 2) l'extrapolation à d'autres types de situations non prospectées.

3. Quelle utilisation potentielle de ces résultats pour les petits producteurs des Cerrados.

La compétition et la facilitation et/ou complémentarité entre les espèces pour les ressources (eau, azote et lumière), dépendent fortement du choix des espèces plante de couverture (Akanvou et al., 2002; Carof, 2007) et des dates de semis en association avec une culture principale (Akanvou et al., 2002). Dans notre cas d'étude, il était important de semer la plante de couverture de façon précoce au sein d'un maïs déjà bien établi. Ceci a permis à la plante de couverture de produire une quantité significative de biomasse sans affecter le rendement de maïs. A l'inverse, en semis tardif, la plante de couverture a produit très peu de biomasse à cause d'une période de croissance trop courte en fin de saison pluvieuse, rapidement limitée par le manque d'eau et de nutriments, comme précédemment observé par Akanvou et al. (2002).

Même dans des conditions pédoclimatiques variées et de très faibles apports en intrants, les SAMBAs ont montré une productivité globale intéressante qui permettrait à la fois, une

production de biomasse utilisable sous forme de mulch pour le maintien et la protection des sols, et un affouragement en période de soudure aux vaches laitières. Ces cultures peuvent ainsi aider à l'intensification des systèmes pour une production laitière qui grâce au développement de la coopérative locale de collecte, peut constituer une source de revenus importante pour les petits producteurs. Les deux plantes de couverture sont en effet de bonnes espèces fourragères, le *Cajanus* réputé pour sa qualité protéique élevée (ICRISAT, 1993) et le *Brachiaria* pour sa valeur énergétique et sa pérennité. Dans les deux cas les agriculteurs peuvent utiliser la parcelle comme pâturage direct pour le bétail, ou pratiquer l'affouragement en stabulation. Les deux plantes de couverture peuvent donc être un élément d'intégration de l'agriculture et de l'élevage dans ces exploitations qui ont un accès limités aux intrants, notamment l'engrais azoté. L'association maïs-*Cajanus* a le potentiel de produire assez de biomasse pour à la fois permettre d'avoir un paillis pour la protection du sol, un bilan azoté équilibré et d'avoir une quantité de fourrage additionnel riche en protéines pour l'intensification laitière. (Scopel et al., 2004) montrent en effet qu'une quantité limitée de résidus (1.5 T/ha) peut suffire à réduire les pertes d'eau par ruissellement et à augmenter les rendements. De même, une restitution de seulement 75 kg de N/ha permettrait de compenser largement les exportations d'azote dans les grains de maïs. Ceci semble possible en semis direct dans les Cerrados (Maltas, 2007), car cela correspondrait à la restitution de 3.5 t/ha de biomasse de *Cajanus*, soit à peine 40%, de l'azote accumulé par le *Cajanus* dans l'association maïs-*Cajanus* en moyenne sur les deux années de notre étude. Cela ouvre donc de fortes possibilités pour une double utilisation de cette légumineuse fourragère (fourrage et paillis). Il restera cependant à vérifier la synchronisation entre minéralisation des résidus de *Cajanus* et besoin en azote du maïs lui succédant (Crews and Peoples, 2005), mais aussi le risque potentiel d'immobilisation de l'azote minéral par la dégradation de ces résidus, risque considéré comme faible lorsque les résidus sont laissés à la surface (Coppens et al., 2006; Corbeels et al., 2003; Maltas et al., 2009).

Sur le long terme, les plantes de couverture, de par leur action sur la productivité primaire et la quantité de résidus organiques restitués au système, peuvent également avoir un effet sur le stockage de la matière organique du sol (Bernoux et al., 2006; Siqueira et al., 2010) et donc contribuer à maintenir la productivité des systèmes sur plus longtemps. Toutefois les niveaux requis de restitutions végétales pour le maintien des stocks organiques du sol

correspondent à d'autres niveaux et il a été montré que 12 t MS/ha sont parfois nécessaires tous les ans dans les Cerrados (Corbeels et al, 2006).

Avec *Brachiaria* toutefois, le maintien de la productivité sur plusieurs années exigera probablement l'utilisation d'intrants externes comme l'azote, particulièrement si une partie de la biomasse est exportée comme fourrage. Nos résultats expérimentaux ont montré une baisse de la production dès la deuxième année. La présence des résidus de graminées peut également faciliter le développement de parasites (Brévault et al., 2007) dommageables pour les plantes de maïs. C'est particulièrement préjudiciable pour les petits producteurs qui n'ont pas souvent accès à l'utilisation des produits chimiques.

Sur le long terme, en conditions de faible utilisation des intrants, l'association Maïs-Cajanus semble donc être la meilleure solution. Le semis de la plante de couverture peut se faire, soit à l'aide d'un semoir direct à traction animale, soit manuellement lors de la réalisation d'une autre opération culturale (désherbage par exemple). Cependant, cette opération augmente le temps de travail dans ses systèmes ou la main d'œuvre est rare, ce qui expliquerait le moindre intérêt des agriculteurs pour les plantes de couverture (Affholder et al. 2009) par rapport au semis direct dans la paille avec utilisation d'herbicides (Oliveira et al., 2009).

De plus la présence de plantes de couverture trop fortement développées peut gêner considérablement la récolte du maïs. Or, Xavier et al., (2010) ont identifié la récolte, généralement manuelle, comme une des principaux critères de pénibilité du travail utilisés par les producteurs pour l'évaluation des systèmes de culture à base de maïs. La recherche de stratégies visant à réduire le temps de travail lors du semis des plantes de couverture et l'identification de variétés de Cajanus, ou d'autres légumineuses fourragères, à port bas qui ne gêne pas la récolte manuelle du maïs seraient donc essentielles pour l'avenir. D'un point de vue économique, pour que ces plantes de couverture fourragères soient adoptées et contribuent pleinement à la durabilité de la production agricole, il est important également que la biomasse additionnelle qu'elles permettent de produire trouve une valorisation économique. Leur valorisation fourragère est donc primordiale, soit directement sur l'exploitation, soit sur le marché des fourrages de saison sèche.

Les SAMBAs représentent donc une alternative technique intéressante pour l'intensification écologique chez les petits producteurs familiaux de lait de la région. Ils peuvent contribuer à produire, en plus de la production de grains de maïs, un

complément fourrager significatif pour le début de la saison sèche sans recourir à des augmentations significatives d'intrants, grâce à une meilleure valorisation des ressources de l'écosystème cultivé et, dans le cas particulier de l'association maïs Cajanus en semis direct sous mulch de résidus, grâce à des relations de facilitation entre espèces qui l'emportent sur les relations de compétition. Toutefois les limites qu'entraînent l'utilisation de ces biomasses et les conséquences qu'elles peuvent avoir sur l'efficacité globale de ces systèmes, notamment sur le long terme reste encore à caractériser.

4. Pistes de recherche

Notre travail met en évidence certains points nécessitant encore un effort de recherche.

- Expérimentation et modélisation : quels progrès pour la modélisation fonctionnelle des SAMBAs

Le modèle STICS-CA est un modèle complexe avec un grand nombre de paramètres. Comme cela a été fait en zone tempérée (Launay et al., 2009; Shili-Touzi et al., 2010), la modélisation des associations de culture sous mulch en zone tropicale doit s'appuyer sur des dispositifs de mesure complexes conduits sur plusieurs années. Il faut notamment collecter les données permettant de modifier la structure du modèle sur les points identifiés dans ce travail :

- formalisme de calcul de la température du sol sous mulch,
- modélisation des flux d'azote provenant de la décomposition du mulch,
- découplage du calcul de la hauteur de culture et du LAI.

- Fonctionnement et conduite des SAMBAs :

Pour améliorer ces systèmes, conduits avec peu d'intrants, il serait nécessaire d'étudier l'impact de la plante de couverture sur la maîtrise des bioagresseurs (mauvaises herbes, ravageurs, vecteurs maladies). Nos expérimentations ont été conduites en conditions de maîtrise quasi totale des mauvaises herbes, ravageurs et maladies, ce qui ne nous a pas permis d'évaluer l'impact de la plante de couverture sur ces derniers dans l'environnement cultivé.

Des études sur d'autres modes de gestion des associations seraient également nécessaires : répartition spatiale des espèces, densités, dates de semis, niveau de fertilisation.

- Etudes sur la place des SAMBA dans les petites exploitations en zone tropicale :

Les SAMBAs paraissent avoir une place dans les exploitations qui s'orientent vers la production intensive de lait. Les biomasses produites peuvent ainsi contribuer efficacement à l'alimentation du bétail, à condition d'en laisser assez pour assurer la protection du sol. Cette étude n'a pas traité ce volet, entre le compromis à faire sur l'utilisation des biomasses et ses conséquences sur les fonctions écologiques remplies par les plantes de couvertures et leurs résidus. Cette question doit être traitée de manière à pouvoir évaluer le degré d'intensification (nombre de vaches et production laitière) qu'il serait possible de baser sur le gain de biomasse fourni par les SAMBAs, compte tenu des faibles potentialités de productions et leurs variabilités intra et interannuelles en parcelles producteurs.

Nous pouvons aussi suggérer d'autres études sur la pertinence technico économique de ces systèmes pour les différents types de producteurs à différents stades d'insertion dans la filière laitière. Il est possible que le rôle du maïs dans ces exploitations évolue en fonction de l'évolution des rapports des exploitations avec cette filière, avec des conséquences favorables ou défavorables sur l'opportunité représentée par les SAMBAs. Par exemple, on constate actuellement un développement de l'utilisation du maïs par ensilage chez certains exploitants qui se spécialisent nettement dans la production laitière. Quelles adaptations des SAMBAs serait pertinente pour ce contexte, sachant notamment que la partie de la saison qui suit la date d'ensilage est encore très arrosée ? Enfin, la pertinence technico économique d'une proposition d'innovation dans les systèmes de culture n'est pas une condition suffisante pour son adoption par des agriculteurs. Celle-ci peut être facilitée par l'implication de ces derniers dans le processus de tests et d'évaluations de ces mêmes innovations dans des dispositifs partagés, co-construit, et notre dispositif en parcelles de producteurs peut être aussi vu comme un premier pas dans ce sens. Au-delà, il serait souhaitable d'associer à la démarche des compétences en sociologie des innovations et des processus d'apprentissage.

Le développement des SAMBAs dans les conditions tropicales humides et subhumides reste un défi pour la recherche et le monde agricole. Mais les connaissances que nous apportons sur les performances agronomiques et environnementales des SAMBAs renforcent l'idée qu'il s'agit de voies intéressantes pour l'intensification écologique. Elles renforcent aussi la possibilité que des chercheurs et des agriculteurs en étroite

collaboration, confrontant des résultats en station et résultats en parcelles producteurs, disposant de modèles capables d'extrapoler ces résultats à d'autres situations édapho-climatiques et à des variantes techniques, définissent ensemble les modalités techniques les mieux à même de faciliter leur diffusion et leur adoption par les agriculteurs pour la durabilité des exploitations.

Références bibliographiques

- Affholder, F., Jourdain, D., Quang, D.D., Tuong, T.P., Morize, M., Ricome, A., 2010. Constraints to farmers' adoption of direct-seeding mulch-based cropping systems: A farm scale modeling approach applied to the mountainous slopes of Vietnam. *Agricultural Systems* 103, 51-62.
- Affholder, F. 2001. Modélisation de culture diagnostic agronomique régional : mise au point d'une méthode et application au cas du maïs chez les petits producteurs du Brésil Central. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon. 217 p. + annexes, Paris.
- Affholder, F., Scopel, E., Neto, J.M., Capillon, A., 2003. Diagnosis of the productivity gap using a crop model. Methodology and case study of small-scale maize production in central Brazil. *Agronomie* 23, 305-325.
- Akanvou, R., Kropff, M.J., Bastiaans, L., Becker, M., 2002. Evaluating the use of two contrasting legume species as relay intercrop in upland rice cropping systems. *Field Crops Res.* 74, 23-36.
- Akinnifesi, F.K., Makumba, W., Sileshi, G., Ajayi, O.C., Mweta, D., 2007. Synergistic effect of inorganic N and P fertilizers and organic inputs from *Gliricidia sepium* on productivity of intercropped maize in Southern Malawi. *Plant and Soil* 294, 203-217.
- Alberts E.E., Neibling W.H., 1994. Influence of crop residues on water erosion, in: Unger P.W. (Ed.), *Managing Agricultural Residues*, Lewis Pub, USA, pp. 20–39.
- Alsaadawi I., Dayan F.E., 2009. Potentials and prospects of sorghum allelopathy in agroecosystem. *Allelopathy Journal*, 24, 255-270.
- Andersen, M.K., Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P., Jensen, E.S., 2004. Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops. *Plant Soil* 266, 273-287.
- Angers, D., and S. Recous. 1997. Decomposition of wheat straw and rye in soil as affected by particle size. *Plant and Soil* 189:197-203.
- Anil, Park, Phipps, Miller, 1998. Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK. *Grass & Forage Science* 53, 301-317.
- Arreola Tostado, J., 1996. Etude et modélisation de l'effet des paillis sur le bilan hydrique - Le cas du semis direct sous paillis au Mexique., CIRAD. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier. 82 p.
- Arshad, M.A., Azooz, R.H., 2003. In-row residue management effects on seed-zone temperature, moisture and early growth of barley and canola in a cold semi-arid region in northwestern Canada. *American Journal of Alternative Agriculture* 18, 129-136.
- Assad, E. D. (Coord.). 2001. *Chuva no Cerrado: análise e espacialização*. 2. ed. rev. ampl. Planaltina: Embrapa Cerrados, 423 p.
- Bainville, S., Affholder, F., Figuié, M., Netto, J.M., 2005. Les transformations de l'agriculture familiale de la commune de Silvânia: une petite révolution agricole dans les Cerrados brésiliens. *Cahiers Agricultures*. 14, 103-110.
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil & Tillage Research* 53, 215-230.
- Basinger, J.M., Kluitenberg, G.J., Ham, J.M., Frank, J.M., Barnes, P.L., Kirkham, M.B., 2003. Laboratory Evaluation of the Dual-Probe Heat-Pulse Method for Measuring Soil Water Content. *Vadose Zone J.* 2, 389-399.

- Baumann, D.T., Bastiaans, L., Kropff, M.J., 2002a. Intercropping system optimization for yield, quality, and weed suppression combining mechanistic and descriptive models. *Agronomy Journal* 94, 734-742.
- Baumann, D.T., Bastiaans, L., Goudriaan, J., van Laar, H.H., Kropff, M.J., 2002b. Analysing crop yield and plant quality in an intercropping system using an eco-physiological model for interplant competition. *Agric. Syst.* 73, 173-203.
- Bayer, C., Mielniczuk, J., Amado, T.J.C., Martin-Neto, L., Fernandes, S.V., 2000. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research* 54, 101-109.
- Bechini, L., Stockle, C.O., 2007. Integration of a cropping systems simulation model and a relational database for simple farm-scale analyses. *Agronomy Journal* 99, 1226-1237.
- Bernoux, M., Cerri, C.C., Cerri, C.E.P., Neto, M.S., Metay, A., Perrin, A.S., Scopel, E., Razafimbelo, T., Blavet, D., Piccolo, M.D., Pavei, M., Milne, E., 2006. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. *Agronomy for Sustainable Development* 26, 1-8.
- 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 Research* 88, 69-83.
- Bertness, M.D., Callaway R., 1994. Positive interactions in communities. *Trends in Ecology & Evolution* 9, 191-195.
- Blancaneaux, P., De Carvalho, W., Da Motta Jr, P. E. F., De Carvalho Filho, A., et Pereira, N. R., 1993. "Sistemas pedológicos no Cerrado de Goiás. Município de Silvânia Região Centrooeste do Brasil". EMBRAPA -CPAC, Brasília, pp. 32.
- Boddey, R.M., De Moraes Sá, J.C., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., 1997. The contribution of biological nitrogen fixation for sustainable agricultural systems in the tropics. *Soil Biology and Biochemistry* 29, 787-799.
- Bolliger, A., J. Magid, T.J. Carneiro Amado, F. Skora Neto, M. de Fatima dos Santos Ribeiro, A. Calegari, R. Ralisch, and A. de Neergaard., 2006. Taking Stock of the Brazilian "Zero-Till Revolution": A Review of Landmark Research and Farmers' Practice." *Adv. Agron.* 91: 47-110.
- Bremner, J.M., Mulvaney, C.S., 1982. Nitrogen-total. IN: A.L. Page et al. (ed) *Methods of soil analysis*, Part 2, 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI. pp 595-624.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Mchet, J.M., Meynard, J.M., Delecolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.
- 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.
- Bristow, K.L., 1988. The role of mulch and its architecture in modifying soil temperature. *Soil Research* 26, 269-280.
- Brooker, R.W., Callaghan, T.V., 1998. The balance between positive and negative plant interactions and its relationship to environmental gradients: a model. *Oikos* 81:196-207.

- Brooker, R.W., Maestre, F.T., Callaway, R.M., Lortie, C.L., Cavieres, L.A., Kunstler, G., Liancourt, P., Tielborger, K., Travis, J.M.J., Anthelme, F., Armas, C., Coll, L., Corcket, E., Delzon, S., Forey, E., Kikvidze, Z., Olofsson, J., Pugnaire, F., Quiroz, C.L., Saccone, P., Schiffers, K., Seifan, M., Touzard, B., Michalet, R., 2008. Facilitation in plant communities: the past, the present, and the future. *Journal of Ecology* 96, 18-34.
- Burle, M.L., Lathwell, D.J., Suhet, A.R., Bouldin, D.R., Bowen, W.T., Resck, D.V.S., 1999. Legume survival during the dry season and its effect on the succeeding maize yield in acid savannah tropical soils. *Trop. Agric.* 76, 217-221.
- Caldwell, R. M. and Hansen, J.W., 1993. Simulation of multiple cropping systems with CropSys. In *Systems Approaches for Agricultural Development*, Eds. A L Penning de Vries, P Teng, K Metselaar. pp 397-412. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Caldwell, R.M., 1995. Simulation models for intercropping systems. In *Ecophysiology of tropical intercropping*. Eds. H Sinoquet and P Cruz. pp. 353-368. INRA, Paris.
- Callaway, R.M., Walker, L.R., 1997. Competition and Facilitation: A Synthetic Approach to Interactions in Plant Communities. *Ecology* 78, 1958-1965.
- 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. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon. 130p., Paris.
- Carof, M., de Tourdonnet, S.p., Saulas, P., Le Floch, D., Roger-Estrade, J., 2007. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. II. Competition for light and nitrogen. *Agron. Sustain. Dev.* 27, 357-365.
- Connolly, J., Goma, H.C., Rahim, K., 2001. The information content of indicators in intercropping research. *Agriculture Ecosystems & Environment* 87, 191-207.
- Corbeels, M., A.M. O'Connell, T.S. Grove, D.S. Mendham, and S.J. Rance. 2003. Nitrogen release from eucalypt leaves and legume residues as influenced by their biochemical quality and degree of contact with soil. *Plant and Soil* 250,15-28.
- Corbeels, M., Scopel, E., Cardoso, A., Bernoux, M., Douzet, J.M., Neto, M.S., 2006. Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. *Global Change Biology* 12, 1773-1787.
- Coppens, F., R. Merckx, and S. Recous. 2006. Impact of crop residue location on carbon and nitrogen distribution in soil and in water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science* 57, 570-582.
- 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., Crozat, Y., 2005. Assessment of root system dynamics of species grown in mixtures under field conditions using herbicide injection and N-15 natural abundance methods: A case study with pea, barley and mustard. *Plant Soil* 276, 177-192.
- Corre-Hellou, G., Fustec, J., Crozat, Y., 2006. Interspecific Competition for Soil N and its Interaction with N₂ Fixation, Leaf Expansion and Crop Growth in Pea–Barley Intercrops. *Plant and Soil* 282, 195-208.
- 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 Research* 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 Research* 113, 72-81.
- Crews, T.E., Peoples, M.B., 2005. Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-based agroecosystems? A review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72, 101-120.
- Dahmardeh, M., Ghanbari, A., Syasar B., Ramroudi, M., 2009. Effect of intercropping maize (*Zea mays* L.) with cow pea (*Vigna unguiculata* L.) on green forage yield and quality evaluation. *Asian J. Plant Sci.* 8, 235-239.
- D'Andrea, A.F., Silva, M.L.N., Curi, N., Guilherme, L.R.G., 2004. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. *Pesq. Agropec. Bras.* 39, 179-186.
- Dapaah, H.K., Asafu-Agyei, J.N., Ennin, S.A., Yamoah, C., 2003. Yield stability of cassava, maize, soya bean and cowpea intercrops. *The Journal of Agricultural Science* 140, 73-82.
- De Tourdonnet S, Shili I, Scopel E., 2008. Utilisation des mulchs vivants pour la maîtrise des flores adventices. Carrefour de l'innovation agronomique. Dijon.
- De Wit, C.T., Van Den Bergh, J., 1965. Competition between herbage plants. *Neth. J. Agric. Sci.* 13, 212-221.
- Debaeke P., Petit M-S, Bertrand M., Mischler P., Munier-Jolain N., Nolot J.-M., Reau R., Verjux N., 2008. Evaluation des systèmes de culture en stations et en exploitations agricoles : où en sont les méthodes. In *Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?*, Actes du colloque du 27 mars 2008, Educagri.
- 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. *European Journal of Agronomy* 26, 92-103.
- Derpsch, R. and T. Friedrich. 2009. Global overview of conservation agriculture adoption. 4th Congress on Conservation Agriculture. February 4-7, 2009. New Delhi, India.
- Doré, T., Clermont-Dauphin, C., Crozat, Y., David, C., Jeuffroy, M.-H., Loyce, C., Makowski, D., Malézieux, E., Meynard, J.-M., Valantin-Morison, M., 2008. Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 28, 151-161.
- Embrapa, 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de solos., Rio de Janeiro, Brazil.
- Erenstein, O., 2002. Crop residue mulching in tropical and semi-tropical countries: An evaluation of residue availability and other technological implications. *Soil and Tillage Research* 67, 115-133.
- Espigares, T., Lopez-Pintor, A., Benayas, J.M.R., 2004. Is the interaction between *Retama sphaerocarpa* and its understorey herbaceous vegetation always reciprocally positive? Competition-facilitation shift during *Retama* establishment. *Acta Oecologica-International Journal of Ecology* 26, 121-128.
- Fillery, I.R.P. 2001. The fate of biologically fixed nitrogen in legume-based dryland farming systems: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 41, 361-381.
- Findeling, A., 2001. Etude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts, 355p., Montpellier.
- Findeling, A., Ruy, S., Scopel, E., 2003. Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *J. Hydrol.* 275, 49-66.

- Fleury, A., 1990. Methodologie de l'analyse de l'élaboration du rendement. In "Physiologie et production du Maïs", 279-290. INRA, Pau.
- Fukai, S., Trenbath, B.R., 1993. Processes determining intercrop productivity and yields of component crops. *Field Crops Res.* 34, 247-271.
- Gaiser, T., de Barros, I., Sereke, F., Lange, F.-M., 2010. Validation and reliability of the EPIC model to simulate maize production in small-holder farming systems in tropical sub-humid West Africa and semi-arid Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 135, 318-327.
- Gastal, M.L., Xavier J.H.V., Zoby, J.L.F., Rocha, F.E.d.C., Silva, M.A.D., Ribeiro, C.F.D.D.A., Couo, P.H.M., 2003. Projeto Unai: diagnóstico rápido e dialogado de três assentamentos de reforma agrária. Embrapa Cerrados. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 118. 74p.
- Gathumbi, S.M., Cadisch, G., Giller, K.E., 2002. N-15 natural abundance as a tool for assessing N-2-fixation of herbaceous, shrub and tree legumes in improved fallows. *Soil Biol. Biochem.* 34, 1059-1071.
- Ghosh, P.K., Manna, M.C., Bandyopadhyay, K.K., Ajay, Tripathi, A.K., Wanjari, R.H., Hati, K.M., Misra, A.K., Acharya, C.L., Rao, A.S., 2006. Interspecific interaction and nutrient use in soybean/sorghum intercropping system. *Agronomy Journal* 98, 1097-1108.
- Gliessman, S.R., 1997. Agroecology: Ecological processes in sustainable agriculture. Ann Arbor press, Chelsea, USA. 357p.
- Goedert, W. J., Gomes de Souza, D. M., et Lobato, E., 1987. Fosforo. In "Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo." (W. J. Goedert, ed.), pp. 129-166. Nobel, São Paulo.
- Gonçalves R., 2004. La naissance du Mouvement des Travailleurs Sans Terre et la longue lutte des « gens sans terre ». *Carré rouge*, 29, 36-46.
- Goudet M., 2005. Agriculture des assentamentos de la réforme agraire dans le municípe d'Unai (Minas Gerais – Brésil) : Pratiques, perceptions et acteurs locaux. Mémoire de fin d'études pour le DIAT, Centre National d'Etudes Agronomique des Régions Chaude, 135 p.
- Grant R.F., 1992. Simulation of competition among plant populations under different managements and climates. *Agron. Abstr.*, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Guanziroli, C.E., 1998. Reforma agrária e globalização da economia: o caso do Brasil. Rio de Janeiro: FAO/Incrá/UFF.
- Harris, R.H., Hirth, J.R., Crawford, M.C., Bellotti, W.D., 2007. Companion crop performance in the absence and presence of agronomic manipulation. *Aust. J. Agric. Res.* 58, 690-701.
- Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P., Jensen, E.S., 2001a. Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops – a field study employing 32P technique. *Plant and Soil* 236, 63-74.
- Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P., Jensen, E.S., 2001b. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crops Research* 70, 101-109.
- 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, 289-300.
- Hauggaard-Nielsen, H., Jensen, E.S., 2005. Facilitative root interactions in intercrops. *Plant Soil* 274, 237-250.

- Hauggaard-Nielsen, H., Andersen, M.K., Jørnsgaard, B., Jensen, E.S., 2006. Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea-barley intercrops. *Field Crops Res.* 95, 256-267.
- Hiebsch, C.K., McCollum, R.E., 1987. Area-x-Time Equivalency Ratio: A Method For Evaluating The Productivity Of Intercrops. *Agron J* 79, 15-22.
- Hinsinger, P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. International Symposium on phosphorus cycling in the soil plant continuum, Beijing, China, 17-23 September 2000., pp. 173-195.
- Horst, W. J., Wagner, A., et Marschner, H., 1987. Effect of Aluminum on root growth, cell division rate and mineral content in roots of *Vigna unguiculata* genotypes. *Z. Pflanzenphysiol* 109, 45-103.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística : <http://www.ibge.gov.br>
- ICRISAT, 1993. Nutritive Value and Uses of Pigeonpea and Groundnut. Skill Development Series no. 14. 44p.
- Jensen, E.S., 1996. Grain yield, symbiotic N-2 fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil* 182, 25-38.
- Jeranyama, P., Hesterman, O.B., Waddington, S.R., Harwood, R.R., 2000. Relay-intercropping of sunnhemp and cowpea into a smallholder maize system in Zimbabwe. *Agron. J.* 92, 239-244.
- Kayombo, B., Lal, R., 1986. Effects of soil compaction by rolling on soil structure and development of maize in no-till and disc ploughing systems on a tropical alfisol. *Soil and Tillage Research* 7, 117-134.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., 1993. Resource capture and use in intercropping: solar radiation. *Field Crops Res.* 34, 273-301.
- Kelley, K.W., Sweeney, D.W., 2005. Tillage and urea ammonium nitrate fertilizer rate and placement affects winter wheat following grain sorghum and soybean. *Agron. J.* 97, 690-697.
- Kiniry, J.R., Williams, J.R., Gassman, P.W., Debaeke, P., 1992. A general, process-oriented model for two competing plant species. *Transactions of the Asae* 35, 801-810.
- Kohun, P.J., Waramboi, J.G., 2001. Integrating crops with livestock to maximise output of smallholder farming systems. (ACIAR Proceedings No. 99). Food security for Papua New Guinea. Proceedings of the Papua New Guinea Food and Nutrition 2000 Conference, PNG University of Technology, Lae, Papua New Guinea, 26-30 June 2000. 2001. 656-661. 23 ref.
- Lal, R., Reicosky, D.C., Hanson, J.D., 2007. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research* 93, 1-12.
- Landers, J.N., 2001. Zero tillage development in tropical Brazil: the story of a successful NGO activity. *FAO Agricultural Services Bulletin*.
- 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.
- Lefroy, E., Hobbs, R., O'Connor, M., Pate, J., 1999. What can agriculture learn from natural ecosystems? *Agroforestry Systems* 45, 425-438.
- Li, L., Yang, S., Li, X., Zhang, F., Christie, P., 1999. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean. *Plant and Soil* 212, 105-114.

- Li, L., Sun, J., Zhang, F., Li, X., Yang, S., Rengel, Z., 2001. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Res.* 71, 123-137.
- Li, Y.-Y., Yu, C.-B., Cheng, X., Li, C.-J., Sun, J.-H., Zhang, F.-S., Lambers, H., Li, L., 2009. Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and symbiotic N₂ fixation of faba bean. *Plant and Soil* 323, 295-308.
- Lindstrom, M.J., Nelson, W.W., Schumacher, T.E., 1992. Quantifying tillage erosion rates due to moldboard plowing. *Soil and Tillage Research* 24, 243-255.
- Lowenberg-DeBoer, J., Krause, M., Deuson, R., Reddy, K.C., 1991. Simulation of yield distributions in millet-cowpea intercropping. *Agricultural Systems* 36, 471-487.
- Lupwayi, N.Z., Clayton, G.W., O'Donovan, J.T., Harker, K.N., Turkington, T.K., Rice, W.A., 2004. Soil microbiological properties during decomposition of crop residues under conventional and zero tillage. *Canadian Journal of Soil Science* 84, 411-419.
- Macena da Silva, F.A., 2004. Parametrization and modelling of water balance in a no-tillage system in the Brazilian Cerrado. Thèse de doctorat, Universidade estadual de Campinas-Faculdade de engenharia agricola. 180 p.
- Major, J., Steiner, C., Ditommaso, A., Falcão, N.P.S., Lehmann, J., 2005. Weed composition and cover after three years of soil fertility management in the central Brazilian Amazon: Compost, fertilizer, manure and charcoal applications. *Weed Biology and Management* 5, 69-76.
- 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.
- Malezieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., de Tourdonnet, S., Valantin-Morison, M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 43-62.
- Maltas, A., 2007. Analyse par expérimentation et modélisation de la dynamique de l'azote dans les systèmes sous semis direct avec couverture végétale des Cerrados brésiliens. Thèse de doctorat. Université de Montpellier II. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 202 p + Annexes.
- Maltas, A., Corbeels, M., Scopel, E., Wery, J., da Silva, F.A.M., 2009. Cover Crop and Nitrogen Effects on Maize Productivity in No-Tillage Systems of the Brazilian Cerrados. *Agron. J.* 101, 1036-1046.
- Mary, B., S. Recous, D. Darwis, and D. Robin. 1996. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and Soil* 181:71-82.
- McNeill, A.M., C. Zhu, and I.R.P. Fillery. 1997. Use of in situ ¹⁵N-labelling to estimate the total below-ground nitrogen of pasture legumes in intact soil-plant systems. *Aust. J. Agri. Res.* 48, 295-304.
- Mead, R., Willey, R.W., 1980. The Concept of a Land Equivalent Ratio and Advantages in Yields from Intercropping. *Exp. Agric.* 16, 217-228.
- Morris, R.A., Garrity, D.P., 1993. Resource capture and utilization in intercropping; non-nitrogen nutrients. *Field Crops Research* 34, 319-334.
- Motisi, N., Maltas, A., Affholder, F., Sierra, J., Scopel, E., Corbeels, M., 2010. Modelling nitrogen dynamics and maize production in direct seeding mulchbased cropping systems in the Brazilian Cerrados using the STICS soil-crop model. In: *Agro 2010, the XI ESA Congress, Montpellier, Montpellier, France, 29Aout, 3 septembre 2010*, pp. 273-274.

- Mpairwe D.R., Sabiiti E.N., Ummuna N.N., Tegegne A. and Osuji P., 2002. Effect of intercropping cereal crops with forage legumes and source of nutrients on cereal grain yield and fodder dry matter yields. *African Crop Science Journal*, 10, 81-97.
- Naudin, K., Gozé, E., Balarabe, O., Giller, K.E., Scopel, E., Impact of no tillage and mulching practices on cotton production in North Cameroon: A multi-locational on-farm assessment. *Soil and Tillage Research* 108, 68-76.
- Neto, M.S., Scopel, E., Corbeels, M., Cardoso, A.N., Douzet, J.-M., Feller, C., Piccolo, M.d.C., Cerri, C.C., Bernoux, M., 2010. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. *Soil Till. Res.* 110, 187-195.
- Oliveira, J.R.A.D., Vilela, L., Ayarza, M.A., 2000. Adsorção de nitrato em solos de cerrado do Distrito Federal. *Pesq. Agropec. Bras.* 35, 1199-1205.
- Oliveira, M.N., Xavier J.H.V., Almeida S.C.R., Scopel E., (Eds), 2009. Projeto Unaí: Pesquisa e desenvolvimento em assentamentos de reforma agrária. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 264p.
- Pinchinat, A.M., Soria, J., Bazan, R., 1976. Multiple cropping in tropical America. In "Multiple cropping" Papendick, R.I. et al., (ed.) *ASA Special Publ.* 27, Am. Soc. Agron., Madison, WI. p. 51-63.
- Rajcan, I. and Swanton, C. J. 2001. Understanding maize-weed competition: resource competition, light quality and the whole plant. *Field Crops Res.* 71,139-150.
- Rao K., Steenhuis T., Cogle A., Srinivasan S., Yule D., Smith G., 1998. Rainfall infiltration and runoff from an alfisol in semi-arid tropical India. I. No-till systems, *Soil Till.Res.* 48, 51-59.
- Ratnadass, A., Michellon, R., Randriamanantsoa, R., Seguy, L., 2006. Effects of soil and plant management on crop pests and diseases. In: *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*, CRC Press, 589–602.
- Reatto, A., Correia, J.R., Spera, S.T., 1998. Solos do bioma Cerrados. In: Matiko Sano S., Pedrosa de Almeida, S. (Eds.), *Cerrado, Ambiente e flora*, EMBRAPA-CPAC, Planaltina, DF, Brazil. pp. 47-88.
- Reatto, A., Bruand, A., Silva, E.M., Martins, E.S., Brossard, M., 2007. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequence across the Brazilian Central Plateau. *Geoderma* 139, 51-59.
- Reddy, K.N., 2003. Impact of Rye Cover Crop and Herbicides on Weeds, Yield, and Net Return in Narrow-Row Transgenic and Conventional Soybean (*Glycine max*)1. *Weed Technology* 17, 28-35.
- Rego, T.J., Nageswara Rao, V., 2000. Long-term effects of grain legumes on rainy-season sorghum productivity in a semi-arid tropical vertisol. *Exp. Agric.* 36, 205-221.
- Reicosky, D.C., Kemper, W.D., Langdale, G.W., Douglas, C.L., Rasmussen, P.E., 1995. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *Journal of Soil and Water Conservation* 50, 253-261.
- Robertson, M.J., Carberry, P.S., Chauhan, Y.S., Ranganathan, R., O'Leary, G.J., 2001. Predicting growth and development of pigeonpea: a simulation model. *Field Crops Research* 71, 195-210.
- Saccone, P., 2007. Rôle des interactions entre plantes et place des espèces à stratégie dispendieuse dans les dynamiques forestières sous l'influence des changements globaux : cas d'un système montagnard et d'un système alluvial. *UNIVERSITE J. FOURIER-GRENOBLE I.* 236p.
- Schaller, N., 2007. Dynamique de l'eau et de l'azote dans les systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal chez les petits producteurs de l'agriculture familiale : cas des Cerrados brésiliens. *DAA. AgroParisTech.* 66p.

- Scopel, E., 1994. Le semis direct avec paillis de résidus dans la région de V. Carranza au Mexique : Intérêt de cette technique pour améliorer l'alimentation hydrique du maïs pluvial en zones à pluviométrie irrégulière. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, Montpellier. 334 p.
- Scopel, E., Muller, B., Arreola Tostado, J.M., Chavez Guerra, E., Maraux, F., 1998. Quantifying and modelling the effects of a light crop residue mulch on the water balance: an application to rainfed maize in western Mexico. XVI Congrès Mondial de Science du sol. 20-26 Août 1998, Montpellier, France.
- Scopel, E., Da Silva, F.A.M., Corbeels, M., Affholder, F.O., Maraux, F., 2004. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. *Agronomie* 24, 383-395.
- Scopel, E., Findeling, A., Guerra, E.C., Corbeels, M., 2005a. Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield. *Agronomy for Sustainable Development* 25, 425-432.
- Scopel E., Triomphe B., Goudet M., Xavier J.H.V., Sabourin E., Corbeels M., Macena Da Silva F.A., 2005b. Potential role of CA in strengthening small-scale farming systems in the Brazilian Cerrados, and how to do it. In : FAO. 3rd World Congress on Conservation Agriculture : Linking Production, Livelihoods and Conservation, Nairobi, Kenya, 3rd to 7th October 2005 . s.l. : s.n., [8] p.. *Congrès Mondial d'Agriculture de Conservation*. 3, 2005-10-03/2005-10-07, Nairobi, Kenya.
- Séguy, L., Bouzinac, S., Trentini, A., Côrtes, N.A., 1996. L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. *Agriculture et Développement* 12, Numéro spécial.
- Séguy, L., Bouzinac, S., Maeda, E., Maeda, N., 1998. Brésil : semis direct du cotonnier en grande culture motorisée. *Agriculture et développement* 17, 3-23.
- Sekiya, N., Yano, K., 2002. Water acquisition from rainfall and groundwater by legume crops developing deep rooting systems determined with stable hydrogen isotope compositions of xylem waters. *Field Crops Research* 78, 133-139.
- Sekiya, N., Yano, K., 2004. Do pigeon pea and sesbania supply groundwater to intercropped maize through hydraulic lift?--Hydrogen stable isotope investigation of xylem waters. *Field Crops Research* 86, 167-173.
- Shili-Touzi, I., De Tourdonnet, S., Launay, M., Dore, T., 2010. Does intercropping winter wheat (*Triticum aestivum*) with red fescue (*Festuca rubra*) as a cover crop improve agronomic and environmental performance? A modeling approach. *Field Crops Research* 116, 218-229.
- Smith, G.D., Coughlan, K.J., Yule, D.F., Laryea, K.B., Srivastava, K.L., Thomas, N.P., Cogle, A.L., 1992. Soil management options to reduce runoff and erosion on a hardsetting Alfisol in the semi-arid tropics. *Soil and Tillage Research* 25, 195-215.
- Sinclair, F.L., Ludlow, M.M., 1986. Influence of soil water supply on the plant water balance for four tropical grain legumes. *Aust. J. Plant Physiol.* 13, 329-341.
- Snapp, S.S., Silim, S.N., 2002. Farmer preferences and legume intensification for low nutrient environments. *Plant Soil* 245, 181-192.
- Sooroshian S., Gupta V.K., 1993. Model calibration. In: Singh VP. (ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publication, 1130.
- Souza Martins, J., 2000. Reforma agrária, o impossível diálogo sobre a História possível (ou a arte de não fazer política, fazendo), à paraître, TempoSocial, usp.
- Stinner, B.R., House, G.J., 1990. Arthropods and Other Invertebrates in Conservation-Tillage Agriculture. *Annu. Rev. Entomol.* 35, 299-318.
- Streit, B., Rieger, S.B., Stamp, P., Richner, W., 2002. The effect of tillage intensity and time of herbicide application on weed communities and populations in maize in central Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 92, 211-224.

- Strock, J.S., Porter, P.M., Russelle, M.P., 2004. Cover Cropping to Reduce Nitrate Loss through Subsurface Drainage in the Northern U.S. Corn Belt. *J Environ Qual* 33, 1010-1016.
- Strock, J.S., Porter, P.M., Russelle, M.P., 2004. Cover Cropping to Reduce Nitrate Loss through Subsurface Drainage in the Northern U.S. Corn Belt. *J Environ Qual* 33, 1010-1016.
- Teasdale JR, 1996. Contribution of cover crops to weed management in sustainable agricultural systems, *J. Prod. Agri.* (9), 475-479.
- Thery H., 2000. *Le Brésil*. Armand Colin, 4ème ed., Paris.
- Thorup-Kristensen, K., 1994. The effect of nitrogen catch crop species on the nitrogen nutrition of succeeding crops. *Fert. Res.* 37, 227-234.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671-677.
- Tittonell, P., van Wijk, M.T., Rufino, M.C., Vrugt, J.A., Giller, K.E., 2007. Analysing trade-offs in resource and labour allocation by smallholder farmers using inverse modelling techniques: A case-study from Kakamega district, western Kenya. *Agricultural Systems* 95, 76-95.
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P.A., Rowe, E.C., Giller, K.E., 2005. Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya: I. Heterogeneity at region and farm scale. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 110, 149-165.
- Tonitto, C., David, M.B., Drinkwater, L.E., 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112, 58-72.
- 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 du Sud au Nord". Communication au colloque international « Techniques de travail de la terre, hier et aujourd'hui, ici et là-bas », Nantes, 25-28 octobre 2006. CICPR, Université de Nantes, Centre d'Histoire des Techniques (CNAM-EHESS), Association d'histoire des sociétés rurales, Association française des musées d'agriculture. Actes à paraître.
- Tsubo, M., Walker, S., Mukhala, E., 2001. Comparisons of radiation use efficiency of mono-/inter-cropping systems with different row orientations. *Field Crops Research* 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, 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.
- Vandermeer, J., 1986. A Computer-based Technique for Rapidly Screening Intercropping Designs. *Exp. Agric.* 22, 215-232.
- Vandermeer, J., 1989. *The Ecology of Intercropping*. Cambridge University in press.

- Van Noordwijk, M., Lusiana, B., 1998. WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 43, 217-242.
- Viera-Vargas, M.S., Souto, C.M., Urquiaga, S., Boddey, R.M., 1995. Quantification of the contribution of N₂ fixation to tropical forage legumes and transfer to associated grass. *Soil Biology and Biochemistry* 27, 1193-1200.
- Whitmore, A.P., Schroder, J.J., 2007. Intercropping reduces nitrate leaching from under field crops without loss of yield: a modelling study. *European Journal of Agronomy* 27, 81-88.
- Willey, R.W., 1979. Intercropping—its importance and research needs. 1. Competition and yield advantages. *Field Crop Abst.* 32, 1-10.
- Xavier, J.H.V., Santos, C.E.S., Zoby, J.L.F., Macena da Silva, F.A., Oliveira M.N., 2004. Adaptação e utilização de dispositivo metodológico participativo para apoiar o desenvolvimento sustentável de assentamentos de reforma agrária. Planaltina DF : Embrapa Cerrados.
- XAVIER, J. H. V., GOMES, M. C., ANJOS, F. S. dos., ALMEIDA, S. C. R., OLIVEIRA, M.N. de, SCOPEL, E., CORBEELS, M., Muller, A.G., 2010. Modelo multicritério construído com agricultores familiares para compreender a racionalidade na avaliação da produção de milho grão sequeiro. In: Congreso de Co-Innovación de Sistemas Sostenibles de Sustento Rural, Minas. Anais.Montevideo : Facultad de Agronomía - Universidad de la República Oriental del Uruguay, 2010. v. 1. p. 137-140. <http://www.revistas.ufg.br/index.php/pat/article/view/3953/4513>>. Acesso em: 08 set. 2009.
- Xiao, Y., Li, L., Zhang, F., 2004. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and faba bean using direct and indirect ¹⁵N techniques. *Plant and Soil* 262, 45-54.
- Yamada, T., 2005. The Cerrado of Brazil: A Success Story of Production on Acid Soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 51, 617-620.
- Zhang, F.S., Li, L., 2003. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant and Soil* 248, 305-312.

ANNEXES

ANNEXE 1. Estimation de la fixation symbiotique par le *Cajanus* dans l'association maïs-cajanus

- **Methodology**

The percentage of plant N derived from N fixation (%Ndfa) in unfertilized legumes was estimated using the ^{15}N natural abundance method, providing an integrated measurement for the entire growth period until harvest. Analyses of $\delta^{15}\text{N}$, the part per thousand deviation of the $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratio relative to atmospheric N_2 , in above-ground plant material was performed by an EA Eurovector autoanalyser and an Isoprime isotope ratio mass spectrometer. The %Ndfa in sole and intercropped pigeon pea was then calculated as follows ($\%Ndfa = 100 * (\delta^{15}\text{N}_{\text{Ref}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{pigeon pea}}) / (\delta^{15}\text{N}_{\text{Ref}} - \beta)$) (Amarger et al., 1979): The sole crop of *Brachiaria* growing adjacent to the area of the sampled pigeon pea crop was used as the non- N_2 fixing reference plant ($\delta^{15}\text{N}_{\text{Ref}}$). The correction factor β , reflecting the $\delta^{15}\text{N}$ of the N_2 -fixing plant when fully dependent on N_2 fixation, has not been established for pigeon pea under the agro-ecological conditions of this study. We used the lowest detected $\delta^{15}\text{N}$ -value in pigeon pea (-1.24) as β , as proposed by (Carlsson et al., 2006). For each treatment the average value of $\delta^{15}\text{N}$ was considered for the final calculation of %Ndfa for pigeon pea.

- **Résultats (Nitrogen from N_2 fixation)**

The natural abundance of ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$) in *Brachiaria* as reference plant (Table) averaged 2.6 (range -0.9 to 4.6) units, higher than that detected in the pigeon pea as a sole crop (1.02 with a range -1.24 to 2.25) and intercropped (0.37 with a range -0.51 to 1.13). The soil heterogeneity probably affected $\delta^{15}\text{N}$ values resulting in the high variability of the results. The percentage of total above-ground N acquisition derived from N_2 fixation (%Ndfa) of the intercropped pigeon pea was higher than that of the sole pigeon pea (58 and 41% respectively).

The $\delta^{15}\text{N}$ value of maize intercropped (with pigeon pea) was negative, indicating that or i) maize has taken a part of its N from a pool of soil nitrogen with a lower $\delta^{15}\text{N}$ than the one explored by *Brachiaria*, or ii) it took it from direct or indirect transfer of fixed N in pigeon pea, or iii) that there was specific discrimination against ^{15}N via root uptake and/or transfer

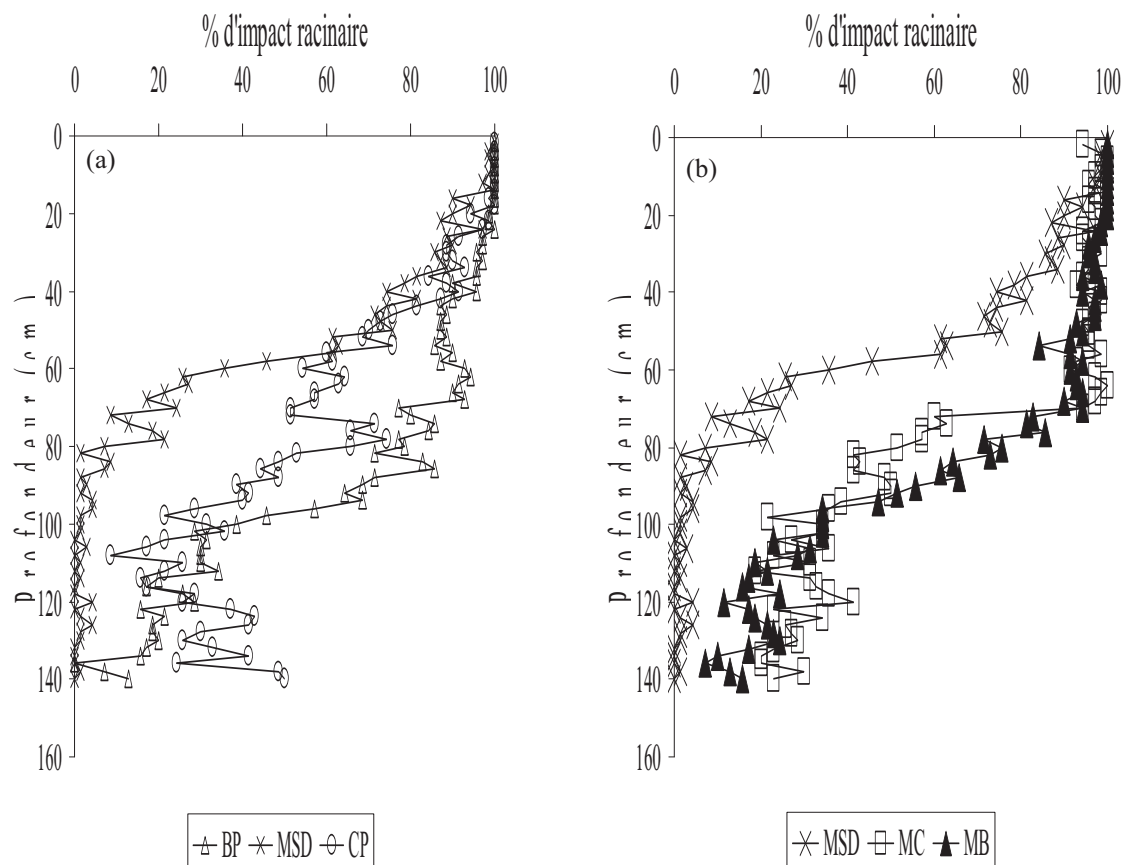
from roots to shoots in maize as compared to the other analyzed plant species. Unfortunately, this part of transferred N could not be quantified from the available data.

Table: Data of $\delta^{15}\text{N}$ values at harvest in 2008-09 growing season for Brachiaria sole crop (SC) as reference plant, Maize intercropped (IC) with Pigeon pea, Pigeon pea sole crop, and Pigeon pea intercropped with Maize (mean values of $n=3$, \pm standard error). The percentage of N in sole- and intercropped Pigeon pea derived from N_2 fixation (%Ndfa), was calculated from the mean values of $\delta^{15}\text{N}$ in Pigeon pea and Brachiaria.

$\delta^{15}\text{N}$	Brachiaria	SC	2.60 ± 3.09
	Maize	IC	-0.67 ± 0.77
	Pigeonpea	SC	1.02 ± 1.74
	Pigeonpea	IC	0.37 ± 0.87
%Ndfa	Pigeonpea	SC	41%
	Pigeonpea	IC	58%

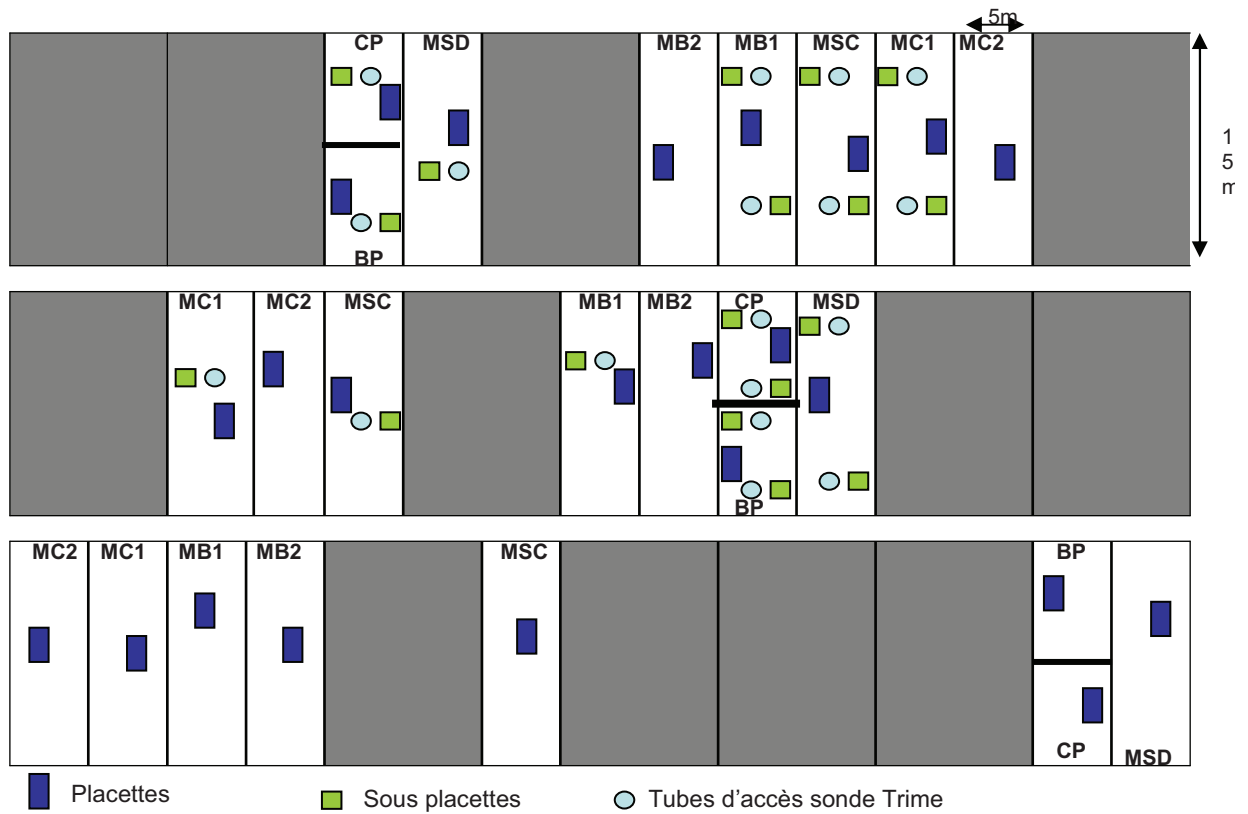
Amarger, N., Mariotti, A., Mariotti, F., Durr, J., Bourguignon, C., Lagacherie, B., 1979. Estimate of symbiotically fixed nitrogen in field grown soybeans using variations in ^{15}N Natural abundance. *Plant and Soil* 52, 269-280.
 Carlsson, G., Palmborg, C., Huss-Danell, K., 2006. Discrimination against ^{15}N in three N_2 -fixing *Trifolium* species as influenced by *Rhizobium* strain and plant age. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science* 56, 31-38.

ANNEXE 2. Profils racinaires des différents traitements à 20 jours après floraison du maïs en station expérimentale en 2008-2009. Les plantes de couverture ont été semées 10 jours après le semis du maïs. (a) Cultures pures de maïs, Brachiaria et Cajanus, (b) Culture pure de Maïs et cultures associées maïs-plante de couverture (MB et MC).



MB= maïs-Brachiaria ; MC= maïs-Cajanus ; MSD= maïs pur ; BP= Brachiaria pur ; CP= Cajanus pur, tous conduits en semis direct avec mulch. Barres horizontales représentent les écarts types des mesures.

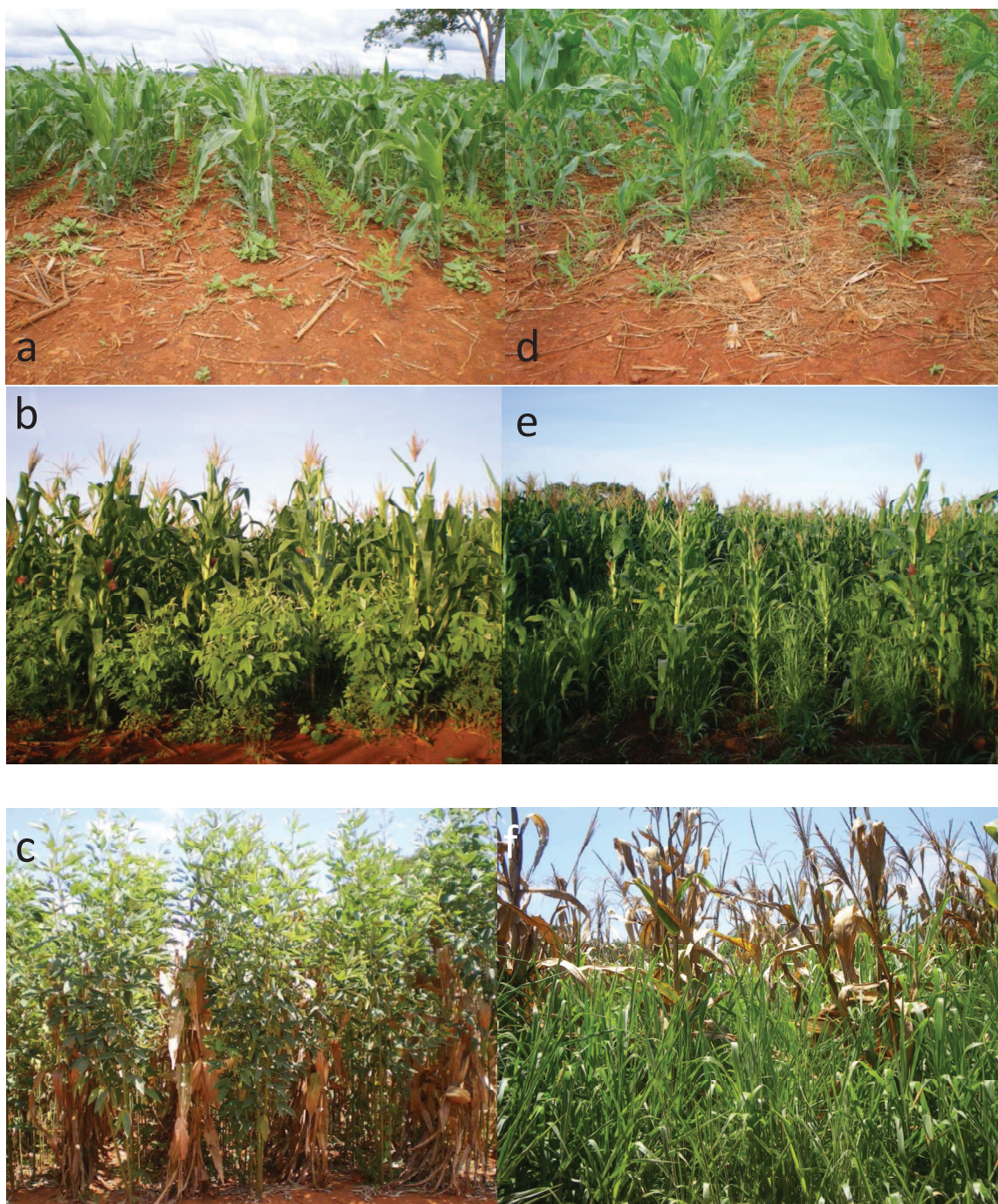
ANNEXE 3. Plan expérimental en station expérimentale



MB= maïs-Brachiaria ; MC= maïs-Cajanus ; MSD= maïs pur ; BP= Brachiaria pur ; CP= Cajanus pur, tous conduits en semis direct avec mulch ; MSC= maïs pur en conventionnel. Les suffixes « 1 » et « 2 » font référence respectivement à la date de semis précoce et tardive de la plante de couverture au sein du maïs.

ANNEXE 4. Photographies des traitements de maïs associé avec une plante de couverture en station expérimentale en 2008-2009. Les plantes de couverture ont été semées 10 JASM (jours après le semis du maïs). (a, b et c) maïs-Cajanus et (d, e et f) maïs-Brachiaria.

(a et d) 32 JASM ; (b et e) 70 JASM ; et (c et f) 120 JASM.



Analyse intégrée du partage des ressources (eau, azote et rayonnement) et des performances dans les systèmes de culture en relais sous semis direct en zone tropicale subhumide

Résumé

Cette thèse visait à caractériser et à modéliser la dynamique des trois ressources principales que sont l'eau, l'azote et le rayonnement dans une association en relais maïs-plante de couverture en semis direct en région tropicale subhumide et ses conséquences sur la productivité de la culture principale et de l'ensemble du système et sur les flux d'eau et d'azote dans le sol.

Le travail repose sur un dispositif expérimental mis en place dans les Cerrados, à Unai (Minas Géras, Brésil) en 2007 pour deux années agricoles, d'une part en station expérimentale permettant un effort de mesure intense et précis, et d'autre part dans un réseau de parcelles d'agriculteurs offrant une large gamme de situations pédoclimatiques et de modalités de mise en œuvre des systèmes de culture étudiés. Dans ces dispositifs, la culture principale était du maïs, et la plante de couverture associée en relais était une culture fourragère tropicale, soit la légumineuse, *Cajanus cajan* soit la graminée, *Brachiaria ruziziensis*. Deux dates de semis, précoce et tardive étaient considérées pour le semis de la plante de couverture au sein du maïs, dans le cas de l'essai en station. Ce travail montre que rendement du maïs n'a pas été significativement affecté par la présence de la plante de couverture semée précocement au sein du maïs, en comparaison avec le rendement du maïs en culture pure. En revanche, la production en biomasse de la plante de couverture a été significativement réduite dans l'association. Le semis précoce de la plante de couverture au sein du maïs permet une production en biomasse significativement plus importante qu'un semis tardif (20 jours après floraison du maïs), et une production totale en biomasse de l'ensemble de l'association significativement plus importante par rapport aux cultures pures. Cette production totale a été de plus du double comparée à celle de la culture pure de maïs dans le cas de l'association maïs-Cajanus. Les valeurs du « Land Equivalent Ratio » (LER) du rendement en grain de maïs et de la production de biomasse ont été supérieures à 1, atteignant jusqu'à 2.03 témoignant d'une meilleure valorisation des ressources par les espèces associées et l'avantage de tels systèmes pour produire à la fois du grain et du fourrage.

La thèse montre aussi la forte variabilité du potentiel de production de ces systèmes en parcelles de producteurs et suggère que lorsque les ressources en eau et en azote sont moins importantes que dans l'essai en station, des compétitions entre maïs et plantes de couverture peuvent réduire les performances agronomiques du maïs et/ou de la plante de couverture comparativement à la culture pure équivalente. La biomasse totale produite reste cependant supérieure à celle de la culture pure de maïs, sauf pour de rares exceptions où de plus faibles disponibilités en ressources, parfois accentuées par des difficultés de gestion technique, le maïs semble souffrir de compétition plus forte et/ou la plante de couverture ne produit que très peu de biomasse. La thèse évalue la capacité d'un modèle de simulation de culture associées, STICS-CA, à fournir une analyse plus fine de la dynamique du partage des ressources dans ces systèmes et à en estimer les performances agronomiques et certains impacts environnementaux en fonction de conditions techniques et édapho-climatiques différentes de celles de notre dispositif. Des modifications mineures et le calage du modèle ont conduit à une simulation satisfaisante des cultures pures de maïs et *Brachiaria* et de l'association maïs-*Brachiaria* en semis direct sur mulch pailleux. En revanche il n'a pas été possible d'obtenir une simulation satisfaisante du maïs en semis conventionnel sur sol labouré, ni du *Cajanus* en culture pure et de l'association maïs-Cajanus en semis direct. La thèse fournit des informations sur les imperfections du modèle et propose des améliorations aussi bien en termes de formalismes pour la prise en compte de la minéralisation du mulch, qu'en termes de dispositif expérimental.

Mots clés : compétition; facilitation ; intensification écologique ; plantes de couverture ; rendement ; eau ; azote ; rayonnement ; LER ; semis direct ; cultures associées en relais, modélisation

Quantification of resource sharing (water, nitrogen and radiation) and performance of no-tillage relay intercropping systems under sub-humid tropical zone

Abstract

This thesis aimed to characterize and to model the dynamics of the three main resources, water, nitrogen and radiation intercropping with maize under sub-humid tropical climate, with their effects on the productivity of the main crop on nitrogen and water flows in the soil.

The study used field experiments that were carried out in Unai (Minas Géras, Brazil), in the Cerrado region, during two crop growing seasons starting in 2007: 1) an on-station experiment allowing an intensive and precise monitoring of crop and soil processes; 2) on-farm trials offering a wide range of soil/climate and crop management conditions. In these experiments, the main crop was maize, and the intercropped cover crop was a tropical fodder crop, either leguminous, *Cajanus cajan* or a grass *Brachiaria ruziziensis*. In the case of the on-station experiment, two dates, early (8 to 10 days after maize sowing) and late (20 days after maize flowering), were considered for the sowing of the cover crop in established maize. The results showed that maize grain yield was not significantly affected by the presence of the relay cover crops in comparison with maize as a sole crop, even when the cover crop was sown soon after maize emergence. In contrast, the production of total above-ground biomass by the cover crop was significantly lower when grown with maize than when grown as a sole crop. When sown early in the intercropped systems the cover crop produced higher total aboveground biomass than when sown late, and total aboveground biomass production of maize intercropped with a cover crop was much higher than that of any of the crops sown alone. The total biomass produced by maize and pigeon pea was more than double that of maize grown alone. The Land Equivalent Ratio (LER) values of both maize grain yield and biomass production was higher than 1 whatever the intercrop system was, with maximal value of 2.03. These results suggest the more efficient use of available resources by the intercropped crops and the potential of such systems to produce both maize grains and forage.

The thesis also showed the high variability in crop biomass production of these systems in farmer's fields. It is suggested that when water and nitrogen resources are less available (compared to the experimental station), competition between maize and cover crops can reduce the agronomic performances of maize and/or the cover crop compared to the pure sole crop. In our study, total aboveground biomass produced by intercropping was however higher than that of the maize sole crop, except on poor fields with poor management. Under these conditions, maize suffered from strong competition with the cover crop and/or the cover crop produced very little biomass.

The thesis evaluated the capacity of the STICS intercrop model, STICS-CA, to provide a better quantitative analysis of the resource sharing in relay intercropping with maize and to estimate their agronomic performances according to technical practices and soil and climate conditions that were different from those of our experimental station. On one hand, minor modifications and model calibration led to satisfactory simulations of the sole maize and *Brachiaria* crops and the intercropped maize-*Brachiaria* system under no-tillage with mulch. On the other hand, it was not possible to obtain satisfactory simulations of sole maize under conventional tillage, nor of sole pigeon pea or intercropped corn-Cajanus under no-tillage with mulch. The thesis provided information on the model imperfections and proposed a way forward (experiments and model formalism) for taking into account the mineralization of the mulch of crop residues.

Key words: competition; facilitation; ecological intensification, cover crop; yield; biomass; water; nitrogen; radiation; LER; no-tillage ; relay intercropping, modelling.