

Conclusion générale

Conclusion générale

Les objectifs de ce travail sont d'étudier et décrire les mécanismes gouvernant les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs en semis direct avec paillis de résidus (SDP). Ils peuvent se résumer en deux grands points (section 4) :

1. Identifier, étudier et quantifier les principaux effets du SDP sur les composantes des bilans hydriques, thermiques et azotés d'une culture de maïs pluvial ;
2. Hiérarchiser ces effets et intégrer ceux d'ordre 1 au sein d'un modèle agronomique mécaniste global, capable de décrire convenablement l'ensemble des processus mis en jeu.

La partie intitulée *Étude des effets spécifiques du paillis* répond au premier objectif, en mettant en évidence et en quantifiant précisément les effets du paillis de résidus sur l'évaporation, les propriétés hydrodynamiques du sol et le ruissellement. La partie suivante, *Fonctionnement global du système sol-paillis-plante-atmosphère*, nous permet d'atteindre le second objectif par l'intermédiaire du modèle PASTIS-paillis, qui simule simultanément tous les effets importants du paillis de résidus.

En ce qui concerne l'évaporation et l'amplitude de la température du sol, nous avons expérimentalement mis en évidence une atténuation des gradients d'humidité et des amplitudes thermiques dans un sol non cultivé, en présence de paillis (section 3.2.1). L'atténuation est d'autant plus forte que le taux de couverture du paillis est important. Nous avons ensuite montré par la modélisation que le paillis limite la sollicitation énergétique du sol sous-jacent, en interceptant une partie de l'énergie incidente (rayonnement), et en limitant le transfert de vapeur d'eau du sol vers l'atmosphère (échange par convection forcée atténué dans le paillis). La réduction moyenne de l'évaporation du sol est proportionnelle au taux de couverture du paillis (coefficient de proportionnalité $\xi = 0,352$ (-)). Elle conduit donc au maximum à une réduction d'environ un tiers de l'évaporation pour une couverture totale. L'effet du paillis sur l'évaporation n'est donc pas majeur mais tout de même significatif.

L'effet du paillis sur l'infiltration dans le sol a été étudié au travers des propriétés hydrodynamiques du sol (chapitre 4). La manifestation de cet effet nécessite l'application répétée du traitement SDP. Au

bout de plusieurs cycles de culture, les décompositions partielles successives des paillis entraînent la mise en place d'un *tapis organique protecteur*, composé de petits débris organiques. Ce dernier peut couvrir une fraction du sol beaucoup plus importante que le paillis de l'année en cours (figure 1.2). La combinaison du paillis de l'année et du *tapis organique protecteur* assure une protection physique efficace des états de surface du sol, en empêchant la destruction de sa rugosité, et la formation d'une croûte. Parallèlement, l'enrichissement progressif de l'horizon superficiel du sol en matière organique permet une stabilisation de sa structure, et favorise le développement du nombre et de la taille des macropores. Ces deux actions n'ont pas d'effet marqué sur la courbe de rétention du sol, mais affectent fortement la conductivité hydraulique, et indirectement la sorptivité du sol. Ainsi, au bout de 4 ans, le SDP avec seulement $1,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de paillis permet le maintien d'une conductivité hydraulique à saturation de l'horizon de surface environ 10 fois plus élevée qu'en l'absence de paillis. Le SDP assure donc une forte capacité du sol à l'infiltration à long terme, y compris pour de faibles biomasses de paillis. Cet effet fondamental permet une bonne recharge en eau du sol, et explique l'essentiel des bénéfices du SDP.

L'effet du paillis sur le ruissellement est une combinaison de l'effet à long terme sur les propriétés hydrodynamiques du sol, et des effets immédiats d'interception de la pluie par les pailles, de tortuosité de l'écoulement, et de frottement sur les éléments du paillis. Les effets immédiats ont été constatés par Arreola Tostado (1996), lors de la mise en fonctionnement du dispositif en 1995 (section 5.1.2). L'effet sur les propriétés hydrodynamiques et celui d'interception de la pluie limitent fortement la production du ruissellement, et constituent l'action majeure du SDP sur ce dernier. Les effets de tortuosité et de frottement ralentissent l'écoulement (effet barrage), retardent son arrivée à l'exutoire, et favorisent une réinfiltration partielle de la lame ruisselée. Ces effets sur le transfert du ruissellement sont plus marginaux.

Enfin, on observe des effets indirects du SDP sur le cycle de l'azote et le développement de la culture. Pour ce qui est de l'azote, l'atténuation des amplitudes thermiques en surface et la plus forte humidité du sol, favorisent l'activité des micro-organismes, et *in fine* la minéralisation (section 6.2.2.2). Par ailleurs, l'enrichissement à long terme de l'horizon de surface en matière organique entraîne également une augmentation des flux de minéralisation dans cette horizon. Au niveau de la culture, la meilleure recharge en eau et le meilleur fonctionnement minéral du sol améliorent notablement l'alimentation de la culture en eau et en azote, et réduit considérablement les stress hydrique et azoté. En comparaison des traitement non paillés, la culture du maïs en SDP se caractérise par une système racinaire plus fourni, un appareil

| DESCRIPTION DE L'EFFET | CARACTÉRISATION | MÉCANISME(S) | INTENSITÉ |
|---|--|---|-------------------|
| Réduction de l'évaporation et des amplitudes thermiques du sol | Direct, à court terme, positif | Absorption d'énergie. Frein à la diffusion et à la convection de la vapeur d'eau | Modérée |
| Amélioration de la capacité du sol à l'infiltration | Direct, à long terme, positif | Maintien d'un K_s de surface élevé par protection de l'état de surface, et enrichissement du sol en matière organique | Importante |
| Réduction de la pluie parvenant au sol | Direct, à court terme, négatif | Interception d'une partie de la pluie | Modérée |
| Ralentissement du transfert du ruissellement | Direct, à court terme, positif | Tortuosité de l'écoulement et frottement sur le paillis | Légère |
| Amélioration de la minéralisation | Indirect, à court terme, positif | Augmentation de l'humidité et modération de la température | Légère |
| | Indirect, à long terme, positif | Enrichissement en matière organique du sol en surface | Légère |
| Amélioration du développement de la culture | Indirect, à court et long terme, positif | Meilleure recharge en eau et meilleur fonctionnement minéral | Importante |

TAB. 6.17: Synthèse des effets du semis direct avec paillis de résidus sur le fonctionnement du système sol-plante-atmosphère

aérien nettement mieux développé, et une production de matière sèche notablement plus forte (figure 6.30). L'ensemble des effets du paillis de résidus sont résumés dans le tableau (6.17).

En terme d'innovation conceptuelle, ce travail a montré que les échanges convectifs dans le paillis sont importants et peuvent être modélisés par une loi du type *renouvellement* (Chen *et al.*, 1997a,b), ne s'appuyant pas sur la *K-theory* (section 3.2.2). Ce nouveau formalisme peut contribuer à résoudre certains des problèmes rencontrés dans le cadre de la modélisation classique (Bussière, 1991; Gonzalez-Sosa, 1999b). Ce travail a également permis de réaliser des mesures en conditions réelles de la dynamique de ruissellement (parcelles de ruissellement, pluie naturelle) à pas de temps court (20 s), et de modéliser par des lois physiques la production et le transfert du ruissellement sur sol paillé (chapitre 5). A notre connaissance, les études expérimentales du ruissellement sur sol paillé à un tel degré de précision n'ont été réalisées que sur micro-parcelles ($\sim 1 \text{ m}^2$) avec simulateur de pluie (Dos Rei Castro, 1996), ou en laboratoire (Gilley *et al.*, 1991; Gilley & Kottwitz, 1995). Par ailleurs, les auteurs qui modélisent de façon mécaniste la dynamique du ruissellement sur sol couvert de résidus végétaux, ne s'appuient le plus souvent pas sur des données expérimentales précises (Munoz-Carpena *et al.*, 1993). En ce sens, l'approche proposée de la caractérisation et de la modélisation du ruissellement sur sol paillée est une avancée scientifique. Enfin, nous sommes parvenus à programmer de façon simple les principaux effets du paillis sous forme de modules, qui ont été couplés au modèle PASTIS (section 6.1). Le modèle PASTIS-paillis obtenu simule les bilans hydrique, thermique et azoté d'un sol cultivé, partiellement couvert de paillis. C'est à notre connaissance le seul outil mécaniste qui tienne compte de l'action physique d'un paillis, tout en permettant une simulation mécaniste de la croissance de la culture.

Certaines limites de ce travail sont apparues tant au niveau expérimental que théorique. Au niveau expérimental, les défauts de conception du protocole de mesures sont généralement mineurs, et décrits en détail dans les conclusions des chapitres 3 à 6. Le point faible le plus important est l'échec des mesures concernant l'azote minéral, qui a empêché la compréhension précise des mécanismes de transformation de l'azote en climat tropical, pour différents traitements. Au niveau de la modélisation, la faiblesse des connaissances dans ce domaine (Recous *et al.*, 2000) n'a pas permis de lever les indéterminations. En terme de portée et de robustesse de la modélisation, PASTIS-paillis a été calé mais pas validé. Il est donc difficile de savoir si ses paramètres calés seraient valides dans un autre contexte (paillis différent, climat différent, etc.). D'une façon générale et pour tous les modèles utilisés dans ce travail, une solide analyse de sensibilité aux paramètres et aux variables d'entrée serait nécessaire. Elle permettrait en particulier d'évaluer l'effet d'une erreur d'estimation des paramètres sur les sorties, et d'identifier ainsi les para-

mètres prédominants de chacun des modèles. Cette identification justifierait de façon plus rigoureuse la démarche de dégradation des modèles TEC-paillis et de ruissellement, en des modules rajoutés à PASTIS pour prendre en compte les effets du paillis de résidus (section 6.1.1.2).

Pour terminer, les perspectives qu'ouvre ce travail de recherche sont multiples. Tout d'abord, il serait intéressant d'améliorer, puis d'appliquer les outils qui ont été développés (TEC-paillis, modèle de ruissellement et PASTIS-paillis), à l'analyse des effets du semis direct avec paillis de résidus dans différentes situations agronomiques (technique de culture, type de paillis, etc.), pédologiques (profil pédologique, texture et structure du sol, albédo, etc.) et climatiques (pluie, humidité, température, rayonnement, vent, etc.). Des travaux de recherche en cours de réalisation au CIRAD devrait permettre au moins partiellement cette analyse. Parallèlement, il serait utile de confronter ces modèles à ceux rencontrés dans la littérature (tableau 1.14). Ceci permettrait de vérifier la pertinence générale de la prise en compte des effets du paillis, et d'apprécier les points forts et les limites de chacun des modèles. Enfin, la mise en œuvre du modèle PASTIS-paillis est relativement lourde. Ce modèle est adapté à la recherche scientifique mais se plie difficilement aux contraintes de la recherche agronomique de terrain. La dégradation de PASTIS-paillis en un modèle plus simple, simulant les effets du paillis sur les bilans hydriques et azotés, rendrait possible son utilisation par des utilisateurs plus nombreux et pour des applications plus diversifiées.

