

Institut National Polytechnique de Toulouse
Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse

Mémoire pour l'obtention du diplôme d'
Habilitation à Diriger des Recherches

Changements d'usage des terres dans les agro-systèmes
d'Afrique sub-saharienne.
Propriétés des sols et dynamique des matières organiques.

Dominique MASSE

Docteur-Ingénieur

Ingénieur de Recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement

Soutenu le 15 Octobre 2007 devant le jury :

Francis ANDREUX, Professeur Université de Bourgogne, rapporteur
Jean-Luc CHOTTE, Directeur de Recherche IRD, examinateur
Maritxu GUIRESSE, Maître de Conférence ENSA de Toulouse, examinatrice
Sabine HOUOT, Directrice de Recherche INRA, rapporteur
Benoît JAILLARD, Directeur de Recherche INRA, rapporteur
Jean-Claude REVEL, Professeur ENSA de Toulouse, président du jury

Avant propos

En 1992, après mes premiers pas trois ans auparavant sur les terres africaines au Nord Cameroun, je soutenais une thèse de docteur-ingénieur à l'ENSAT, et j'intégrais l'ORSTOM sous la direction de Roger Pontanier, parti trop vite et de Christian Floret pour travailler sur les sols et leur utilisation dans les savanes d'Afrique de l'Ouest. Durant 9 ans au Sénégal, dans le cadre du programme régional de recherche sur les jachères en Afrique de l'Ouest, j'ai pu ainsi continuer à parcourir ces terres des zones soudano-sahéliennes du Sénégal et du Mali. Les jachères dans les agrosystèmes étaient notre objet de recherche mais constituaient notre point d'entrée pour des études plus globales sur la gestion des écosystèmes naturels et cultivés dans les savanes Ouest-Africaine. Mes activités auprès de C Floret, écologue et coordonnateur régional du projet Jachère, m'ont ainsi amené à de nombreuses disciplines allant de la pédologie, à l'hydrologie, l'écologie, l'agronomie voire aux sciences humaines, enrichissant ainsi mes connaissances auprès de nombreux collègues du Sud et du Nord. C'est à l'issue de ce programme, qu'ont débuté les nouvelles unités de recherche dans le cadre réformé de l'ORSTOM qui changeait de nom pour s'appelaient alors l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) ; nouvelle dénomination et nouvelle orientation dont l'esprit de recherche scientifique en coopération auprès des chercheurs du Sud était néanmoins conforme à ce que R Pontanier m'avait enseigné depuis mon entrée dans l'institut.

L'année 2001 correspond à mon entrée dans une nouvelle unité de recherche et une nouvelle affectation. Ayant commencé à collaborer avec Jean Luc Chotte à Dakar j'ai adhéré à son projet de nouvelle unité de recherche intitulée IBIS « Interactions biologiques dans les sols des écosystèmes tropicaux », et ai été affecté au Burkina Faso pour contribuer au développement d'un chantier de recherche de l'UR les systèmes de culture de substitution à la pratique de la jachère. Les matières organiques des sols sont alors devenus mon principal mot-clé de mes activités de recherche. Je n'oublie pas durant cette période mes fructueuses collaborations avec mes collègues chercheurs à Ouagadougou ; Victor Hien, toujours à l'écoute et prompt à collaborer, Ablassé Bilgo dont l'enthousiasme ne semble jamais s'arrêter, Robin Duponnois toujours à la recherche de l'excellence et fourmillant d'idées et dont j'ai beaucoup appris, tout comme avec Michel Lepage qui je l'espère déploiera encore pour quelques années toute ses connaissances de l'écologie des savanes, Edmond Hien, passionné par les sols et qui est ma référence actuellement en pédologie africaine. C'est au contact de biologistes et microbiologistes du sol qu'est venue l'idée de développer une modélisation originale des processus microbiens de la minéralisation des matières organiques. Appliquer les systèmes multi-agents à des microbes dans le sol ne fut pas sans difficultés et reste un défi à relever.

En 2006, après avoir passé près de 15 ans en Afrique de l'Ouest, je m'ouvre à de nouveaux horizons, Madagascar et ses Hautes Terres, qui furent mes premières images des sols tropicaux avec l'enseignement et l'expérience du Professeur Bourgeat qui m'avait encadré à l'ENSAT. Toujours autour des matières organiques, mes travaux s'intéressent plus particulièrement à l'agriculture péri-urbaine qui est un moteur du développement agricole dans les

pays en voie de développement, et à la valorisation agricole des déchets urbains ou industriels. Ce thème que j'ai commencé à aborder au Burkina Faso m'a ouvert à de nouvelles collaborations fructueuses. A Antananarivo, je tiens à associer à ce travail Alain Albrecht, que je remercie pour la relecture et ses conseils prodigués pour ce mémoire, ainsi qu'à Lydie Lardy, et la Professeur Lilia Rabeharisoa qui nous accueille chaleureusement au laboratoire des RadioIsotopes de l'Université d'Antananarivo. Dans mes remerciements, je n'oublie pas tous mes collègues de l'unité de recherche « Séquestration du Carbone et Biofonctionnement des sols » installés dans les différentes implantations de l'UR SeqBio.

Je terminerai comme je l'avais fait dans l'avant-propos de ma thèse de docteur-ingénieur par une pensée à mes parents, incontestablement mes premiers professeurs d'agriculture. Je dédie également ce travail à ma « grande » famille, comme on le dit si bien en Afrique, et, en premier lieu à mon épouse, Claudine, et mes trois filles, Floriane, Elsa et Gaïa, aux quelles j'impose des absences et de nombreux voyages. Ce travail leur est entièrement dédié.

Résumé

Les systèmes de production agricole des régions sub-sahariennes subissent depuis quelques décennies de nombreuses transformations sous la contrainte de changements socio-économiques (croissance de la population, globalisation des échanges, exode rural, etc...) ou environnementaux (sécheresse persistante, modifications des climats). Ces changements ont un impact sur les propriétés des sols, plus particulièrement sur le fonctionnement biologique et la dynamique des matières organiques. Il est nécessaire de prendre en compte la gestion des ressources organiques de l'échelle de l'agrégat de sol à celle de l'agrosystème pour définir les voies d'amélioration de la production agricole. Dans le futur, il est proposé d'étudier les relations entre l'organisation spatiale des déterminants de la minéralisation des matières organiques dans les sols tropicaux et la production primaire. Dans ces sols où les ressources organique et minérale sont naturellement faibles, il est ainsi proposé de tester l'hypothèse selon laquelle les pratiques agricoles doivent maintenir ou générer une organisation spatiale appropriée des propriétés édaphiques pour améliorer les services écosystémiques rendus par les sols cultivés.

Abstract

During the last decades, social, economical or environmental changes have modified land use systems. Consequently, soil processes such as the dynamic of soil organic matter have been altered. Therefore the sustainability of West African farming systems relies very much on the management of organic resources. Moreover, it is so crucial importance to investigate the dynamics of these organic resources at different scales from the aggregates to the farming systems. After having explored this scientific field, the development of my research will focus on the importance of the primary production on the spatial organisation of the main determinants responsible for SOM dynamic (e.g. soil biota, organic substrates). The hypothesis that it low input farming systems relies on the spatial organisation of soil properties have to be tested.

Sommaire

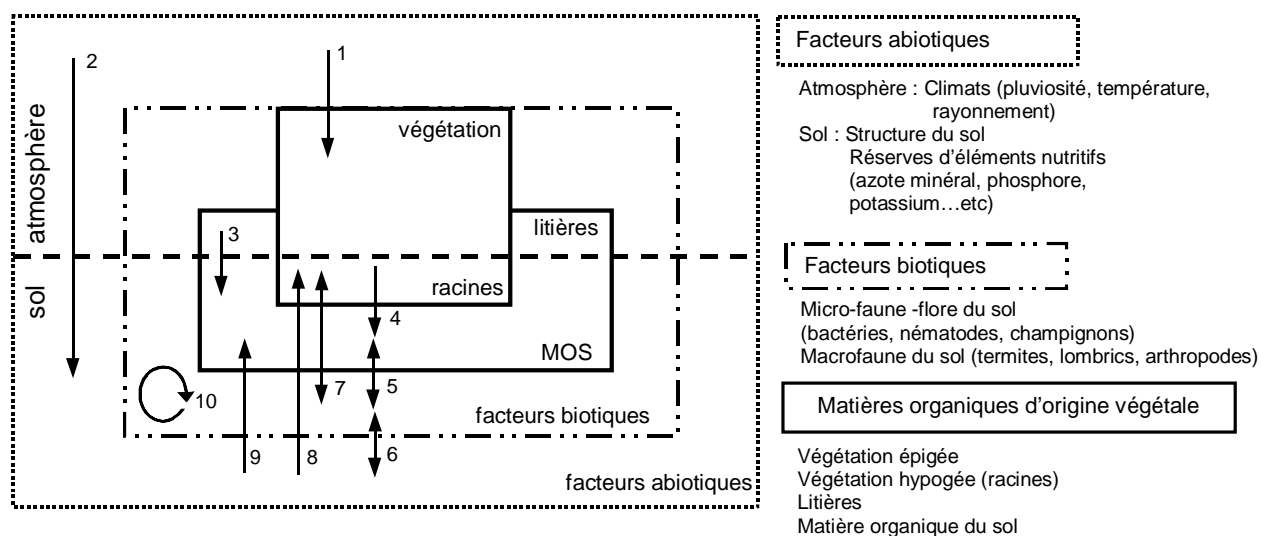
AVANT PROPOS	3
RESUME	5
ABSTRACT	5
SOMMAIRE	7
1 INTRODUCTION	9
2 LES SYSTEMES DE PRODUCTION A ROTATION CULTURE-JACHERE. MATIERE ORGANIQUE ET BIOFONCTIONNEMENT DES SOLS	15
2.1 MATIERE ORGANIQUE ET BIOFONCTIONNEMENT DES SOLS AU COURS DU TEMPS DE JACHERE.	15
2.1.1 <i>La matière organique des sols dans les systèmes de production à rotation culture-jachère.</i>	15
2.1.2 <i>Les flux de carbone dans les terroirs agricoles</i>	17
2.1.3 <i>Le fonctionnement biologique dans les sols des systèmes à rotation culture-jachère.</i>	21
2.2 AMELIORATION DES JACHERES DE COURTE DUREE.....	27
2.3 LA GESTION DE LA FERTILITE DES SOLS DANS LES SAVANES D'AFRIQUE DE L'OUEST : EVOLUTION ET ALTERNATIVE A LA ROTATION CULTURE-JACHERE	30
2.3.1 <i>Synthèses des résultats</i>	30
2.3.2 <i>Les améliorations ou les alternatives possibles</i>	31
3 INTRANTS ORGANIQUES DANS LES AGROSYSTEMES	35
3.1 DES PRATIQUES DE RECYCLAGE DE RESIDUS ORGANIQUES DANS DES AGRO-SYSTEMES SAHELIENS.....	35
3.1.1 <i>Des pratiques de conservation des eaux et des sols associés à l'apport de fertilisants organiques</i>	35
3.1.2 <i>Evolution du carbone organique des sols après un parage d'animaux domestiques</i>	37
3.1.3 <i>Qualité des sols sous apports de déchets urbains solides en zone péri-urbaine</i>	39
3.2 LA DECOMPOSITION DES MATIERES ORGANIQUES DANS LES SOLS	41
3.2.1 <i>Qualité des matières organiques et leur minéralisation dans les sols</i>	42
3.2.2 <i>Spatialisation des processus microbiens de la décomposition des MO : simulation informatique des processus microbiens de la minéralisation des matières organiques des sols</i>	47
4 PERSPECTIVES DE RECHERCHE.	55
4.1 CONTEXTE ET OBJECTIF DES TRAVAUX DE RECHERCHE POURSUIVIS	55
4.2 LA VARIABILITE SPATIALE DES DETERMINANTS DU BIOFONCTIONNEMENT DES SOLS TROPICAUX : QUELQUES ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES.	57
4.3 LE PROJET DE RECHERCHE : HYPOTHESE DE TRAVAIL.....	59
4.4 LES TRAVAUX DE RECHERCHE PROPOSES.....	61
4.4.1 <i>Les pratiques agricoles d'apports organiques dans les systèmes de production agricole</i>	61
4.4.2 <i>Organisation spatiale des ressources organiques et productivité: simulation informatique individus centrée</i>	63
5 CURRICULUM VITAE	67
6 PUBLICATIONS, TRAVAUX ENCADRES ET CO-ENCADRES, ANIMATION DE PROJETS. ..	69
6.1 PUBLICATIONS	69
6.1.1 <i>Publications dans des revues scientifiques à comité de lecture</i>	69
6.1.2 <i>Livres ou chapitres de livre</i>	71
6.1.3 <i>Publications dans des actes de séminaire à comité de lecture</i>	71
6.1.4 <i>Mémoires, Thèse, Rapports</i>	72
6.1.5 <i>Divers communications, posters, conférence, cours</i>	72
6.2 TRAVAUX ENCADRES ET CO-ENCADRES	74
6.2.1 <i>Thèses</i>	74
6.2.2 <i>DEA, DESS, Ingénieur, Licence</i>	75
6.3 ANIMATION ET GESTION DE PROJET.....	76
7 REFERENCES CITEES	77

1 Introduction

L'agriculture des pays en voie de développement est primordiale à bien des égards. Elle est la principale activité des habitants de ces pays. L'Afrique Sub-saharienne regroupait en 2000, 626 millions d'habitants dont 61 pour cent (soit 384 millions) travaillent dans l'agriculture (statistiques de la FAO ; <http://faostat.fao.org/>). Cette agriculture est en grande partie une agriculture de subsistance. Mais s'y associe une agriculture de production de biens exportables sources de revenus extérieurs pour les états et les populations ; par exemple le coton au Burkina Faso ou au Mali, l'arachide au Sénégal. L'Afrique Sub-Saharienne est confrontée à une croissance démographique importante avec des prévisions de doublement de la population d'ici 2050. Cette croissance sera essentiellement urbaine et s'accompagnera de besoins en nourriture croissants. Enfin, dans ces pays en voie de développement, les activités agricoles demeurent le principal moyen à court et moyen terme de diminution de la pauvreté que ce soit en milieu rural ou en milieu urbain (Dixon *et al.*, 2001).

L'agriculture est l'ensemble des travaux transformant le milieu naturel pour la production de végétaux et d'animaux utiles à l'Homme. L'objectif est pour le paysan d'optimiser l'exploitation du milieu naturel. La notion de durabilité, qui s'est imposée plus récemment dans les recherches agronomiques, introduit la notion de préservation des capacités de production du milieu naturel. L'agronomie doit donc s'intéresser à toutes les échelles du milieu naturel : de l'agrégat de sol et des microorganismes associés et leur génome, à la dimension du paysage dans lequel s'insère les agrosystèmes en passant par la parcelle agricole et les plantes cultivées. Naturellement, l'homme, et au-delà les communautés humaines jouent un rôle primordial dans le développement des relations entre ces différents niveaux d'observations. Plus récemment, est apparue une fonction supplémentaire attribuée à l'agriculture. Les systèmes agricoles, intervenant sur le milieu naturel, se doivent de le préserver voire de l'améliorer sa qualité. La préservation de la biodiversité et la mitigation des gaz à effet de serre sont maintenant des dimensions prises en compte dans les politiques de développement économique et agricole. Ceci devient d'ailleurs la préoccupation majeure des acteurs de la recherche-développement dans les pays du Nord.

L'agriculture sub-saharienne est en pleine évolution. Les systèmes de production dits traditionnels sont modifiés sous la contrainte de changements socio-économiques (croissance de la population, globalisation des échanges, exode rural, etc...) ou environnementaux (sécheresse persistante, modifications des climats). Suivre ces évolutions permet non seulement d'acquérir des connaissances sur les processus biologiques et physico-chimiques qui déterminent le fonctionnement dans toutes leurs dimensions des systèmes agro-écologiques, mais également de répondre à la demande d'innovations pour assurer durablement les fonctions de production et de régulation de l'environnement dévolues à l'agriculture.



1. Relation climat-production primaire, Fixation symbiotique de l'N atmosphérique 2. Intrants agricoles (engrais, pesticides). Fixation de l'N atmosphérique par microorganismes du sol. Apports d'éléments par les pluies 3. Décomposition des litières par la microfaune/microflore et la macrofaune 4. Décomposition des racines 5. Consommation des matières organiques par les organismes vivants du sol (énergie, nutriments), décomposition des organismes morts 6. Nutrition minérale des organismes du sol. Effets de la structure du sol sur son activité biologique. 7. Symbioses (rhizobium, mycorhizes). Prédation sur les racines 8. Nutrition minérale des plantes. Effets de la structure du sol sur l'enracinement. Rhizosphère 9. Protection physique de la MOS. Fixation d'éléments sur complexe argilo-humique 10. Interactions biologiques (prédation, mutualisme, commensalisme)

Figure 1: Relations ou interactions entre les différents compartiments biotiques et abiotiques dans un système sol-plante.

Les sols et leur qualité sont un maillon fort de la production agricole ; ils sont le support de la plante cultivée, et sont au centre des grands cycles biogéochimiques constituant des réserves d'éléments nutritifs, qui participent aux cycles de l'eau entre l'atmosphère et la terre. Ces sols sont des milieux complexes où les processus biologiques et chimiques qui s'y déroulent définissent leur qualité. L'étude de l'évolution des sols dans un contexte de changement des agricultures est primordiale pour accompagner au mieux la mise en place de systèmes agricoles productifs et durables.

L'équilibre et le fonctionnement des systèmes écologiques sont sous la dépendance de transferts ou de flux continus de matières, d'énergies et d'informations qui traversent les différents compartiments constitutifs de ces systèmes (Frontier & Pichod-Viale, 1998). Dans les agrosystèmes à faible utilisation d'intrants chimiques, les composés organiques sont les vecteurs de ces flux de matière et d'énergie (Woomer & Swift, 1994). Les matières organiques peuvent être considérées comme une ressource renouvelable. Leur dynamique met en jeu des formes variées de carbone manipulées par divers acteurs (homme, plante, animal) qui les produisent, les consomment ou les transforment de façon non indépendante le long de chemins trophiques. La productivité des agrosystèmes est basée en grande partie sur la gestion de ces ressources organiques, plus particulièrement dans les zones soudaniennes et soudano-sahéliennes caractérisées par des sols à texture sableuse (Nye & Greenland, 1960 ; Pieri, 1989 ; Floret *et al.*, 1993).

Le sol, considéré dans sa dimension écologique, est un compartiment essentiel de ces systèmes. Il abrite en partie les processus de décomposition et de minéralisation de la MO. Il est également un milieu vivant qui héberge une très grande diversité d'organismes qui interagissent entre eux (Lavelle *et al.*, 1995 ; Swift, 1998), déterminant des flux de matière et d'énergie. Dans les sols, sous le vocable « matière organique du sol » (MOS), on rassemble un continuum de formes vivantes et mortes allant du résidu végétal ou animal frais aux substances humiques associées ou juxtaposées à des particules minérales (Morel, 1989). La MOS a un rôle agro-écologique fondamental largement reconnu : stimulation de l'activité biologique qui y puise son énergie, source directe d'éléments nutritifs pour les êtres vivants et amélioration de certaines propriétés physiques et chimiques du sol (Pieri, 1989 ; Tiessen *et al.*, 1994 ; Feller *et al.*, 2000). Plus récemment, dans les agricultures intensives, les préoccupations liées à la durabilité et à la protection de l'environnement ont incité également la recherche agronomique à reconsidérer la place des ressources organiques dans les techniques agricoles (Brussaard & Ferrera-Cerrato, 1997 ; Tilman, 1998). L'amélioration d'une production agricole durable passe par une meilleure compréhension de la dynamique spatio-temporelle des matières organiques dans les sols et leur environnement. La Figure 1 schématise l'ensemble des compartiments biotiques et abiotiques d'un système sol-plante ainsi que les relations ou interactions entre ces différents compartiments.

Les recherches présentées dans ce mémoire concernent l'évolution de la qualité des sols (propriétés physico-chimiques et biologiques) dans un contexte de changement d'usages des terres dans les pays en voie de développement. L'approche se veut écologique par la prise en compte de la place des sols dans leur environnement écosystémique.

Encadré 1

La zone d'étude entre 1989 et 2006 : au cœur des savanes sub-sahariennes



La zone d'étude s'étend entre les 10^{ème} et 14^{ème} parallèle Nord, du Sénégal au Nord Cameroun. D'un point de vue climatique, les climats soudanien à soudano-sahélien dominent avec deux saisons contrastées : une saison sèche et une saison humide avec des pluviosités annuelles moyennes allant de 400 à 1000 mm respectivement du Nord au Sud. Géologiquement, la roche mère est issue de formations primaires du pré Cambrien et de roches magmatiques. La géomorphologie de la région peut se résumer à de vastes plateaux peu élevés, disséqués laissant apparaître à la suite d'érosions récentes des surfaces latéritiques. Les sols sont dominés par les sols ferrugineux tropicaux plus ou moins lessivés. Selon la classification FAO, ces sols se situent entre des arénosols, lixisols, acrisols ou luvisols (FAO, 1998). Concernant les formations végétales naturelles, cette zone est le domaine des savanes allant du nord au sud des savanes arides des régions sub-sahéliennes aux savanes plus humides densément arborées (Kowal & Kassam, 1978 ; Menaut *et al.*, 1995). Les principales espèces ligneuses appartiennent à la famille des Combretaceae alors que les Andropogonae caractérisent la strate herbacée de ces savanes.

Trois terroirs caractéristiques de la zone :

- Le terroir de Sonkorong représentatif du Bassin Arachidier dans le centre du Sénégal. Cette zone agroécologique appartient au domaine soudano-sahélien (pluviosité annuelle 500-800 mm). Elle présente une forte pression foncière liée à la culture de l'arachide. La jachère a pratiquement disparu. Elle subit de nombreuses contraintes au développement agricole et rural : sécheresse, érosion éolienne et hydrique, dégradation du couvert ligneux et herbacée, extension des terres dégradées. On assiste alors à une diminution des rendements, un déficit fourrager et une pénurie de bois-énergie et de bois d'œuvre.
- Le terroir de Sare Yorobana en Haute Casamance (Sénégal) appartient au domaine soudano-sahélien avec une pluviosité annuelle de 800 à 1000 mm. Elle est caractérisée par une pression anthropique relativement peu élevée avec des faciès végétaux encore diversifiés (jachère longue, savane boisée, forêt sèche). Dans cette zone à vocation agro-sylvo-pastorale, la production arachidière et cotonnière se développe rapidement.
- Le terroir de Bondoukuy au Burkina Faso, au climat nord soudanien au sud soudanien (800-1000 mm), est caractérisé par une pression foncière de plus en plus forte. Le système de production est à base de coton à l'Ouest et céréalière au Sud-Ouest. Le développement de la culture de coton attire des migrants en provenance de la zone nord. Les sols cultivés, en général de nature sablo-limono-argileuse plus ou moins lessivés perdent de plus en plus leur fertilité par appauvrissement de la matière organique.

La première partie de mes travaux concerne l'étude des jachères et leur rôle dans le maintien des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols dans les systèmes de production à rotation culture-jachère. Par la suite, constatant que les systèmes à jachère ne pourraient pas se reproduire et se développer, mes travaux se sont orientés sur la valorisation des ressources organiques à partir de l'hypothèse qu'elles soient la clé de l'augmentation durable de la production agricole dans systèmes agraires des pays en voie de développement. Pour cela, ont été abordés l'effet de la qualité biochimique des matières organiques sur leur dynamique dans les sols, ainsi que l'importance de la variabilité spatiale des interactions substrat organique et microorganisme. Des investigations ont portées également sur différents systèmes de culture présentant des pratiques de recyclage de matières organiques résiduelles.

Les travaux menés depuis 1992 se sont déroulés au Sénégal puis au Burkina Faso dans des régions représentatives des agricultures de savanes sub-sahariennes (Encadré 1). Dans un premier temps seront présentées les recherches sur les propriétés des sols dans les systèmes de production à rotation culture-jachère, avec une analyse plus particulière sur la dynamique de jachères de courte durée. Avant de présenter les perspectives de recherche, seront présentés des travaux de recherche particuliers sur la dynamique des matières organiques dans les sols.

Encadré 2

« La jachère en Afrique Tropicale » Projet UE 7ACP RPR269 1994-2004

Objectifs

L'objectif du projet était de réaliser un programme d'étude, d'amélioration et de gestion de la jachère au niveau de terroirs villageois dans des pays d'Afrique tropicale. Il s'agissait d'insérer le cycle culture-jachère, ou les modes de substitution à la jachère lorsqu'elle a disparu, dans une stratégie de développement durable. Le renforcement des capacités nationales d'intervention dans le domaine objet de l'étude était aussi un des objectifs affichés du projet.

Les pays concernés ont été : Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Mali, Niger, Sénégal.

Mise en œuvre (organisation)

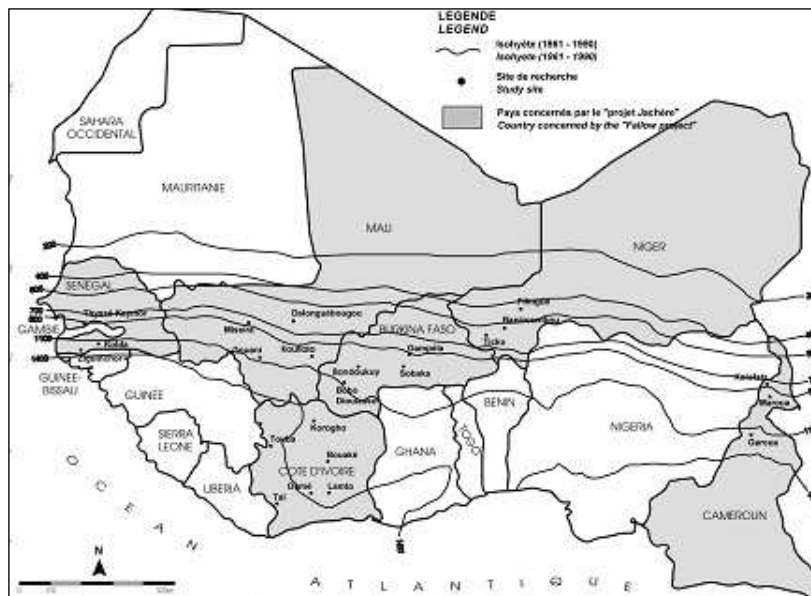
Le programme de recherche a été coordonné par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex ORSTOM, France) sous l'égide de la CORAF. Il a associé plusieurs institutions de recherche et d'enseignement supérieur : CNRST (Burkina Faso), CNRA (Côte d'Ivoire), IER (Mali), Faculté d'Agronomie (Niger), ISRA (Sénégal), CIRAD (France), CEFÉ/CNRS (France), NRI (Grande Bretagne) et de nombreuses universités du Nord et du Sud.

Le projet a été financé dans les 5 pays par le 7ème FED et par la France. Un projet financé par la DGXII a permis d'associer un pays d'Afrique centrale, le Cameroun, à ces recherches sur la jachère.

Principaux résultats

Les actions entreprises ont privilégié des recherches à caractère finalisé pour l'amélioration, la valorisation ou la substitution de la jachère par d'autres pratiques. En effet face à la saturation de l'espace cultivable, des techniques de "jachères améliorées" ont été proposées avec des essais par les chercheurs dans les terroirs retenus, pour maintenir les fonctions indispensables de la jachère (fonctions de restauration de la fertilité, de production fourragère et de bois etc.). Elles ont parfois été aussi obtenues en station. Ces techniques doivent donc encore être validées en milieu réel, aux niveaux local et régional, et appropriées par les paysans.

Un premier volume publié sur les résultats du Programme Jachère représente les Actes du « Séminaire international sur la Jachère en Afrique tropicale » (Floret & Pontanier, 2000b). Il contient les communications présentées, dans l'ordre des dix sessions et le texte des posters. Un second volume intitulé " De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances " est publié chez le même éditeur (Floret & Pontanier, 2000a). Il contient dix articles de synthèse qui font le point des connaissances actuelles sur les mêmes thèmes.



Localisation des sites d'études du projet « La Jachère en Afrique tropicale »

2 Les systèmes de production à rotation culture-jachère. Matière organique et biofonctionnement des sols

Dans les régions soudaniennes et soudano-sahéliennes d’Afrique de l’Ouest, la gestion de la fertilité est traditionnellement basée sur l’alternance d’une phase de culture suivie d’une période de jachère plus ou moins longue. Ces jachères reconstituent la fertilité chimique, physique et biologique des sols et assainissent les sols des adventices des cultures ou autres phytopathogènes. Ces jachères ont également un rôle de production de diverses ressources pastorales, médicinales ou autres produits de cueillette. Elles interviennent également dans la gestion foncière des terroirs agricoles et peuvent avoir un rôle socio-culturel (Floret & Pontanier, 2000a). Dans un premier temps, le programme « les jachères en Afrique de l’Ouest » (encadré 2) a développé des recherches sur les différents variables biotiques et abiotiques au cours de la jachère après abandon culturale. Une attention particulière a été portée sur le rôle de la biodiversité végétale. Dans des conditions de pression foncière, les jachères ont été confrontées à un raccourcissement de leur durée. Une des voies d’amélioration des systèmes de production agricole était alors d’accélérer les processus de modifications des déterminants de la fertilité biophysiques et chimiques des sols sur des jachères de courte durée. Pour cela, on a émis l’hypothèse que l’introduction d’espèces végétales dites amélioratrices dès l’abandon cultural permettait de diminuer le temps de jachère et un retour à une période de culture plus rapide.

Dans cette partie, je présenterai une synthèse des résultats sur l’évolution de la matière organique et sur le biofonctionnement des sols au cours de la période de jachère, les études sur l’amélioration des jachères de courte durée et enfin je terminerai par les options alternatives aux jachères de longue ou de courte durée dans les systèmes de production soudaniens ou soudano-sahéliens.

2.1 Matière organique et fonctionnement biologique des sols au cours du temps de jachère.

2.1.1 La matière organique des sols dans les systèmes de production à rotation culture-jachère.

La Figure 2 présente une synthèse des teneurs en carbone total des sols (0-10 cm) mesurées sur des parcelles de jachère de durée variable sur trois sites d’étude (Encadré 1). Ces teneurs sont représentées en fonction de la teneur en éléments fins des sols. Si on observe les teneurs en carbone des sols des jachère de longue durée (>10 ans) des trois sites tous les types de sol confondus, on distingue deux droites de régression entre carbone et éléments fins du sol. Par l’analyse de l’occupation des parcelles, Ouattara *et al.* (1997) corrèlent ces droites à deux séries de parcelles agro-écologiques distinctes : l’une correspondrait à des parcelles proches de formations forestières et qui subissent peu de périodes de culture (« droite des forêts »), l’autre indiquerait un équilibre de savanes où la culture itinérante a été largement pratiquée (« droite des savanes »).

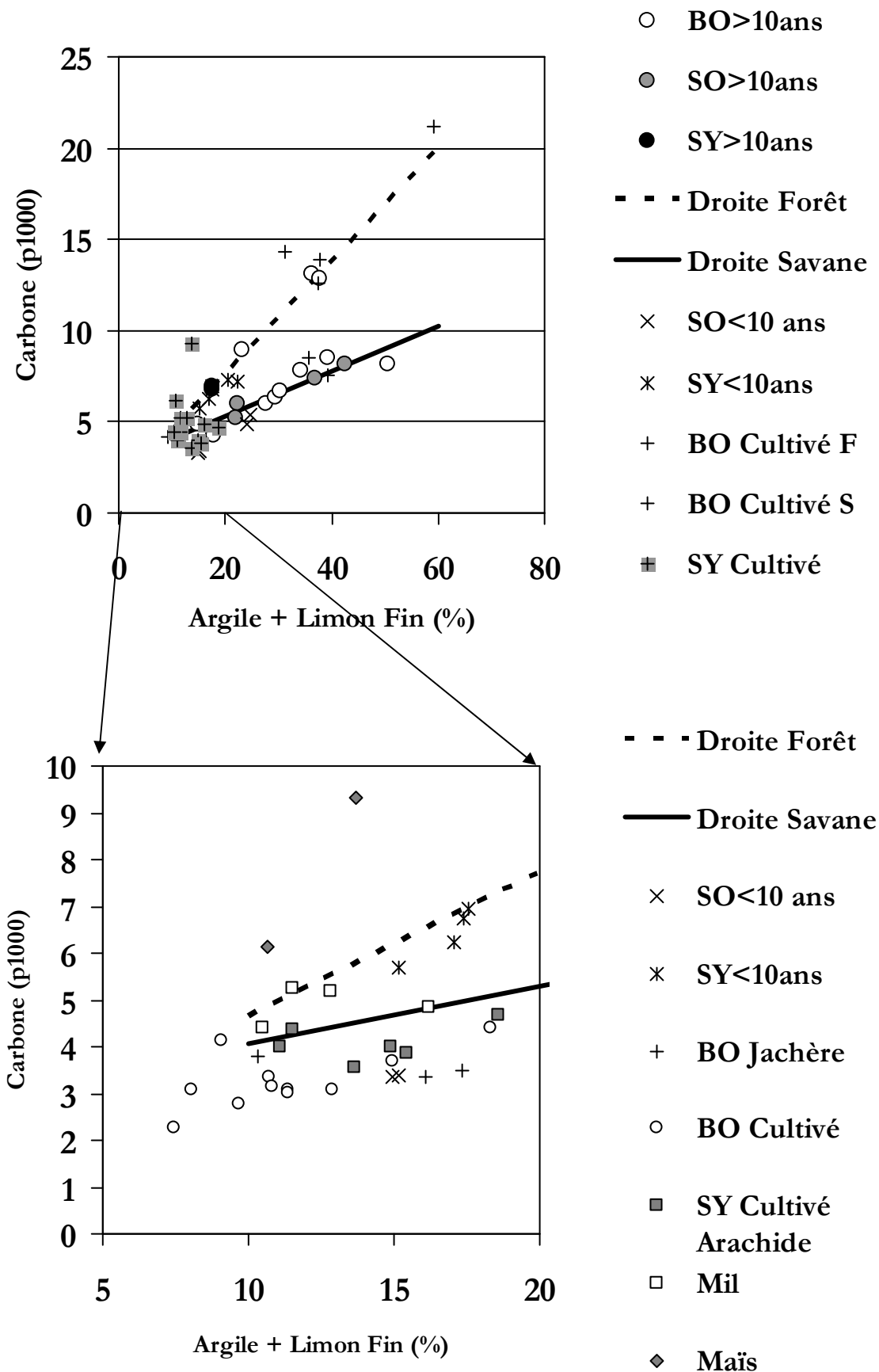


Figure 2 : Teneurs en carbone des sols (mg.kg⁻¹) en fonction de la texture pour différentes parcelles de jachère et de culture sur les sites de Bondoukuy BO (Burkina Faso), Sonkorong SO et Sare Yorobana SY (Sénégal).

Si on représente les teneurs en carbone des jachères d'âge inférieur à 10 ans et des parcelles cultivées, on remarque que les points se répartissent autour de ces deux droites de régression. En revanche, les parcelles cultivées ou jachère ne présentent pas de teneur en carbone significativement différente (relativement à leur teneur en éléments fins). Si on se concentre sur les sols à faible teneur en éléments fins, qui sont les plus représentés dans la zone étudiée, il apparaît que les différences sont peu significatives entre les différents modes d'occupation culture ou jachère. Seules deux points se distinguent avec des teneurs en carbone relativement élevées. Ils représentent des champs dits de case (à proximité des lieux d'habitation) et qui ont des sols fortement amendés en matière organique d'origine domestique.

Ces résultats indiqueraient la mise en place d'un équilibre du statut organique des sols largement tributaire d'un passé culturel et écologique assez lointain, mais beaucoup moins influencé par le passé culturel récent (10-15 ans). Cette différence serait d'autant plus importante que les teneurs en argile et limon fin seraient élevées. Le retour d'un sol, qui a subi de nombreux cycles culturels et qui se situerait dans un système de savane, à un équilibre originel semblerait alors extrêmement difficile qui ne pourrait pas être atteint après des jachères de moyenne durée (10-20 ans). Ces hypothèses restent à vérifier, de même qu'une caractérisation plus précises des formes de ces matières organiques dans les deux systèmes décrits. L'autre interprétation de ces résultats est que les matières organiques dans les sols sableux étant peu protégées de la minéralisation (notamment physiquement), les sols de ces agro-systèmes ne sont pas en mesure de stocker de la matière organique. Les flux des matières dans les sols sont extrêmement rapides, et par conséquent fortement tributaire des entrées (en quantité et en qualité), et des acteurs biologiques de la décomposition.

2.1.2 Les flux de carbone dans les terroirs agricoles

Des observations sur le système complet sol-plante par classe d'âge de jachère montre que la succession post-culturelle est avant tout un processus cumulatif de biomasse d'origine végétale ; des 26 tCha⁻¹ accumulées dans les jachères de longue durée, seule une tonne se situe dans le sol (Figure 3). La défriche, durant laquelle les herbes, les rameaux et les feuilles sont brûlés et les troncs exportés au village, entraîne une perte de plus de 50 % du capital minéral accumulé dans la biomasse (Manlay *et al.*, 2002a ; Manlay *et al.*, 2002b ; Manlay *et al.*, 2002c). Les jachères ont donc un rôle majeur à l'échelle du terroir comme zone de production de matières organiques (production primaire) qui seront transférées soit spatialement (transfert par les animaux domestiques, l'homme) soit temporellement (rotation culture jachère) (Manlay, 2000). La Figure 4 résume les différents flux de carbone organique dans un système à rotation culture-jachère.

Une étude menée entre 1994 et 1999 sur le terroir de Sara Yorobana en Haute Casamance au Sénégal a permis d'établir les flux de carbone à l'échelle d'un agro-système. Ce terroir agrosylvo pastoral présente une organisation en auréole autour du village, assez classique en zone soudanienne et soudano-sahélienne.

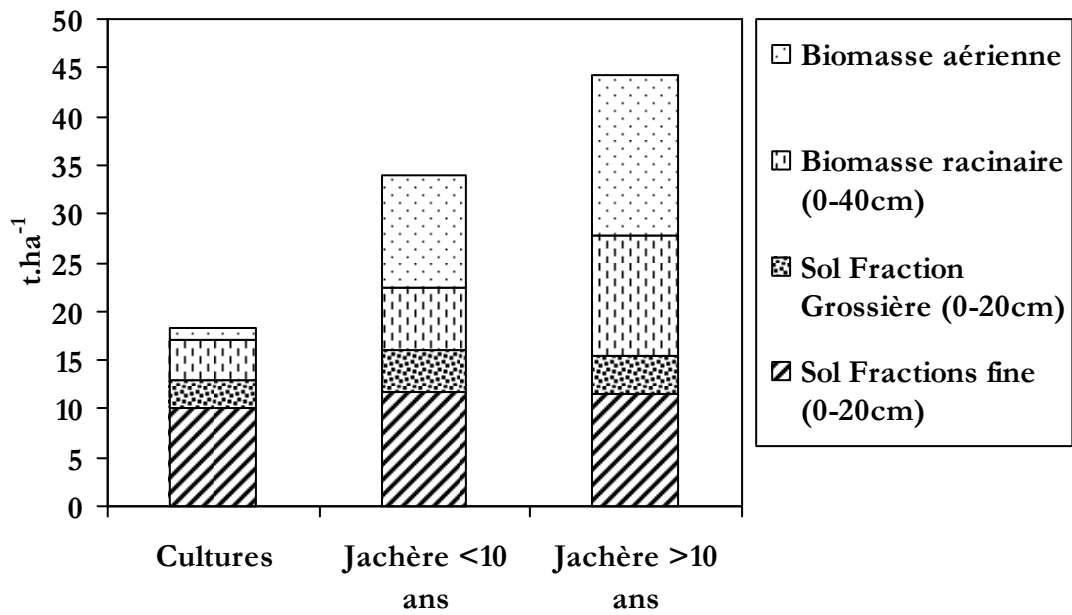
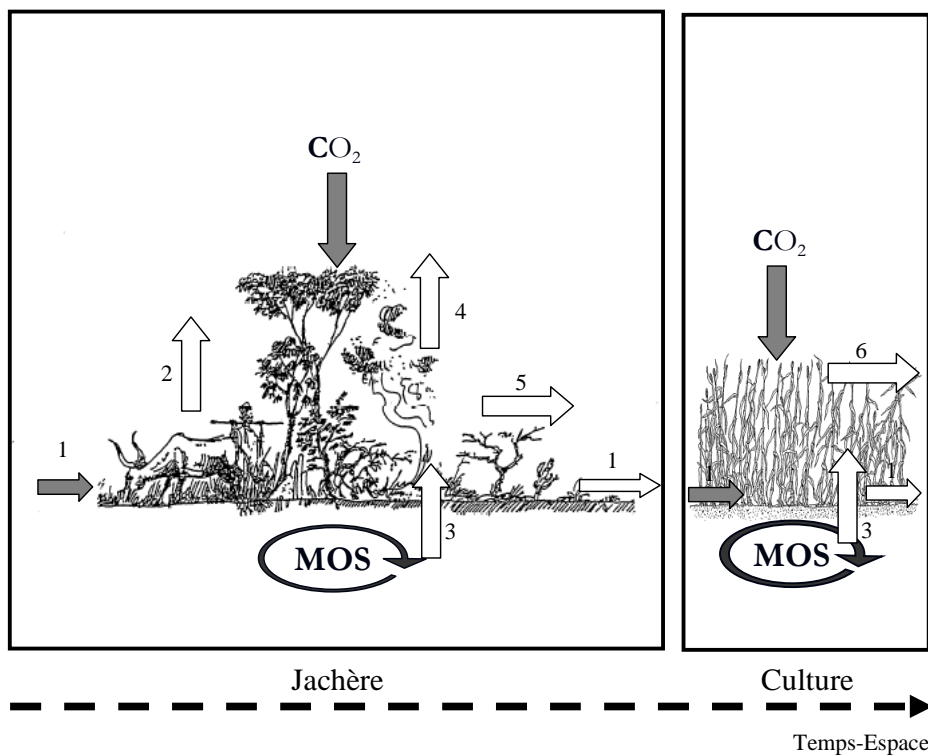


Figure 3 : Stocks de carbone ($t.ha^{-1}$) dans le système sol-plante des parcelles cultivées et en jachère sur le terroir de Sare Yorobana (Haute Casamance, Sénégal).



1 Erosion ; 2 Activité biologique (notamment des animaux domestiques) ; 3 Activité biologique des sols ; 4 Feux ; 5 Prélèvements (cueillette, bois énergie, bois d'œuvre) ; 6 Récolte

Figure 4 : Cycle Culture-Jachère dans les régions soudano-sahéliennes et soudaniennes en Afrique de l'Ouest. Représentation simplifiée du cycle du carbone.

A partir des mesures des stocks de matières organiques (sol, végétation) dans les différentes parcelles selon leur mode d'occupation, et une évaluation des transferts de matières organiques entre les différentes parcelles ou village, Manlay et al. (2002a ; 2002b ; 2002c ; 2004a ; 2004b) ont pu établir un bilan de carbone, d'azote et de phosphore à l'échelle du terroir (Figure 6). L'auréole de brousse est la principale source de carbone du terroir sous la forme de biomasse (production agricole, bois, fourrage). Dans cette auréole, les sorties de carbone sont élevées dans les champs cultivés (75 % du carbone dans la biomasse aérienne BA) et faible dans les jachères (3,2 % de carbone dans la BA). Des valeurs élevées ont aussi été enregistrées pour les cultures vivrières des champs de case (65 %) et des rizières (68 %). Mais la redistribution du carbone est bénéfique à l'auréole de case aux dépens des autres auréoles. La même observation est faite sur l'azote et le phosphore où seuls les champs de case présentent un bilan positif principalement du fait des apports en provenance des autres auréoles notamment par l'élevage (Figure 5). Les apports en carbone dans les cultures vivrières de cette auréole (3,8 tCha⁻¹an⁻¹) sont plus importants que les quantités généralement préconisées pour compenser la minéralisation du carbone organique du sol. Ainsi, l'organisation du terroir de Sare Yorobana agit comme un impluvium pour le carbone et les nutriments drainant les ressources organiques des zones périphériques vers les cultures vivrières pluviales des champs de case qui assurent l'essentiel de la production agricole. Ce modèle d'organisation en auréole permet ainsi de produire des céréales (principale culture vivrière) de façon permanente et durable avec des rendements relativement élevés sur 7% de la surface gérée par le village.

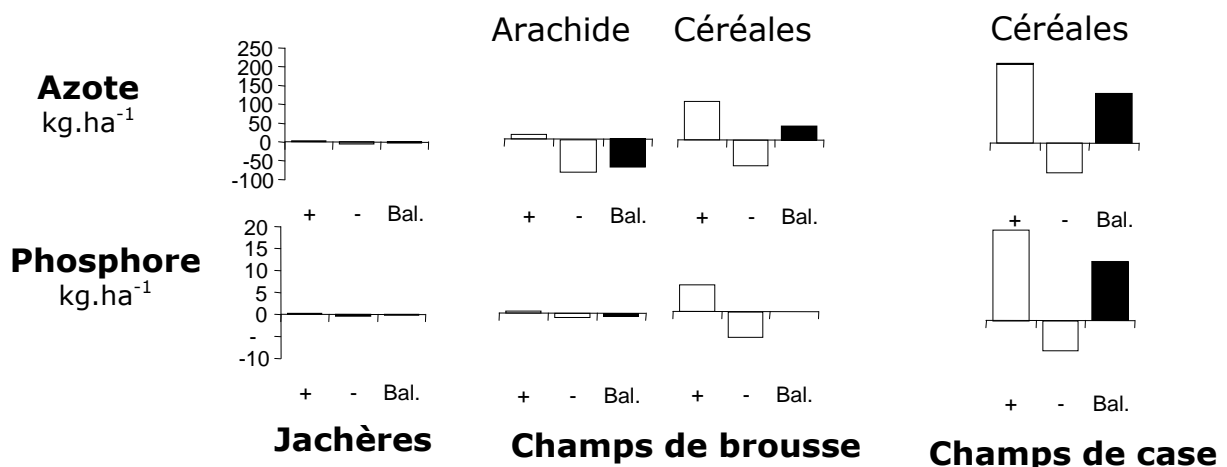
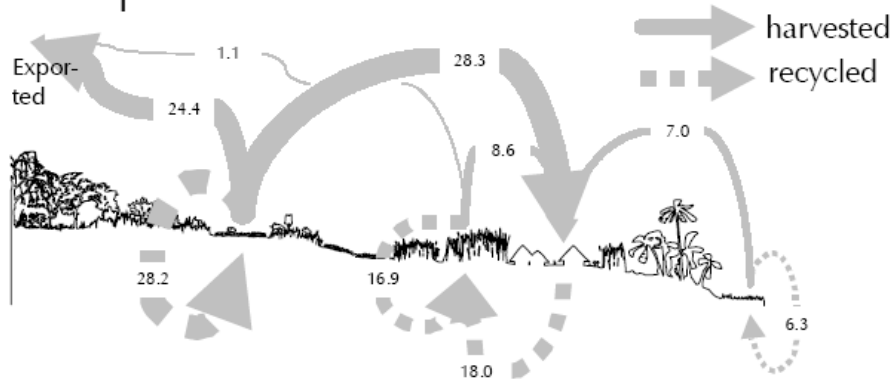


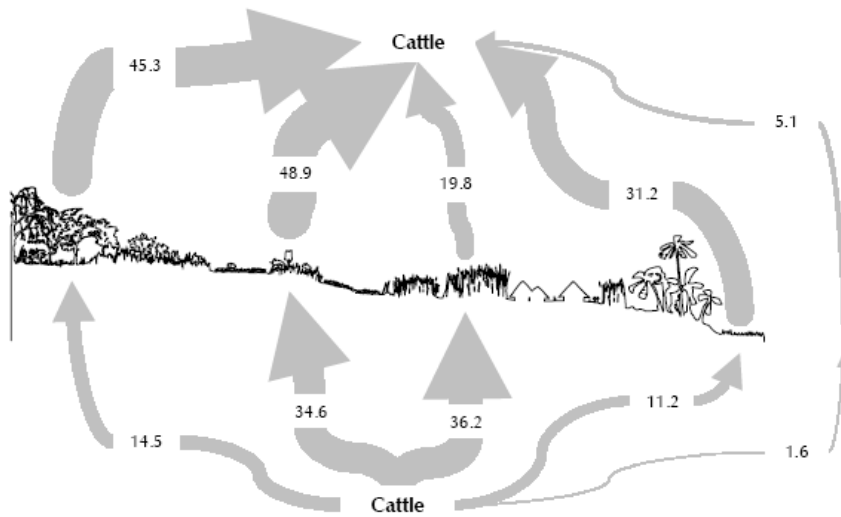
Figure 5 : Bilan (Bal.) des entrées (+) et sorties (-) d'azote et de phosphore dans les parcelles de jachère et cultivées dans les différentes auréoles d'occupation du sol du terroir de Saré Yorobana, Haute Casamance, Sénégal, d'après Manlay (2000).

Savanna ring	Bush ring	Compound ring	Farm-yard	Palm grove	Rice fields	Other
--------------	-----------	---------------	-----------	------------	-------------	-------

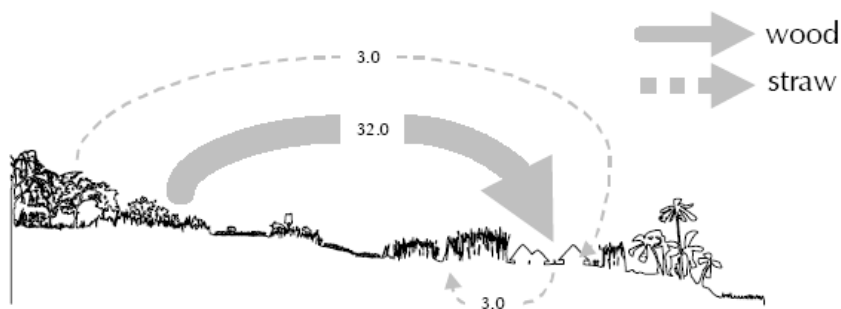
a. Crop



b. Livestock



c. Wood and straw



Savanna ring	Bush ring	Compound ring	Farm-yard	Palm grove	Rice fields	Other
--------------	-----------	---------------	-----------	------------	-------------	-------

Les flux liés au bétail concernent la saison sèche uniquement. La largeur des flèches est proportionnelle à la valeur du flux. (d'après Manlay, 2000)

Figure 6 : Flux anthropogéniques de carbone (tonnes) établis de novembre 1996 à novembre 1997 à Sare Yorobana (Haute Casamance, Sénégal).

2.1.3 Le fonctionnement biologique dans les sols des systèmes à rotation culture-jachère.

L'activité biologique des sols est un paramètre déterminant des cycles biogéochimiques des écosystèmes. Sur les différents sites d'étude du programme jachère, différents groupes biologiques du sol ont fait l'objet d'investigations.

2.1.3.1 Macrofaune du sol

Sur les sites expérimentaux de Sonkorong et Sare Yorobana au Sénégal, la macrofaune totale des sols de jachères d'âge différent a été évaluée selon la méthode TSBF (Sarr *et al.*, 1998 ; Chotte *et al.*, 2000 ; Fall *et al.*, 2000 ; Lavelle *et al.*, 2000). La Figure 7 montre la forte variabilité de la densité totale de la macrofaune qui semble toutefois se stabiliser avec la durée de la jachère. Les groupes les plus abondants sont les termites et les fourmis. La densité des termites, ainsi que celles de la plupart des groupes, ont tendance à augmenter avec l'âge de jachère ainsi qu'avec la mise en défens des parcelles. Les groupes fonctionnels définis à l'intérieur des différents groupes taxonomiques présentent des dynamiques plus marquées par rapport au temps de mise en jachère (Figure 8). Ainsi, les vers endogés géophages apparaissent plus abondants dans les jachères anciennes avec toutefois une tendance à la diminution dans les jachères plus anciennes (30 ans). En revanche, les vers épigés qui vivent et se nourrissent principalement dans la litière sont plus présents dans les anciennes jachères comparativement aux jachères plus jeunes. De même pour les termites, la dynamique des groupes trophiques diffère selon l'âge de jachère. Alors que les champignonistes, tel que *Microtermes hollandei* sont les plus abondants principalement dans les jachères de courte durée, les humivores comme *Ancistrotermes crucifer*, second groupe par leur abondance, sont particulièrement fréquents dans les jachères de longue durée (Figure 8).

2.1.3.2 La diversité des nématodes dans les jachères au Sénégal

Les jachères ont également un rôle d'assainissement des sols cultivés après une période de culture. Les adventices sont éliminées dès les premières années de jachère (Fournier *et al.*, 2000). Les nématodes phytoparasites évoluent après la mise en jachère (Cadet & Floret, 1995 ; Cadet *et al.*, 2000b ; Cadet *et al.*, 2005). Au Sénégal, aucune variation significative du nombre totale de nématodes phytoparasites n'est enregistrée entre les différentes situations (culture ou jachère). En revanche la diversité spécifique s'accroît avec l'âge de jachère et surtout la structure spécifique des nématodes phytoparasites est profondément modifiée (Figure 9). Des espèces pathogènes dominantes dans les parcelles cultivées, telle que *Scutellonema cavenessi*, sont toujours présentes dans les jachères de longue durée mais elles sont toutefois nettement moins abondantes. D'autres espèces dominant la population des nématodes dans les jachères à l'image de *Helicotylenchus dihystrera*. Des essais ont permis de montrer que les cortèges d'espèces que l'on retrouve dans les jachères âgées sont beaucoup moins pathogènes que les populations des parcelles cultivées ou de jeunes jachères (Villénave & Cadet, 2000). L'accroissement de la diversité spécifique et le changement dans la composition spécifique sont synonymes de baisse de l'effet pathogène, indépendamment du nombre de parasites présents. Les résultats obtenus indiquent qu'il suffirait de maîtriser la composition spécifique d'un peuplement de nématodes pour diminuer son effet pathogène plutôt que de chercher par des moyens chimiques à éradiquer totalement les nématodes phytoparasites (Cadet *et al.*, 2000a).

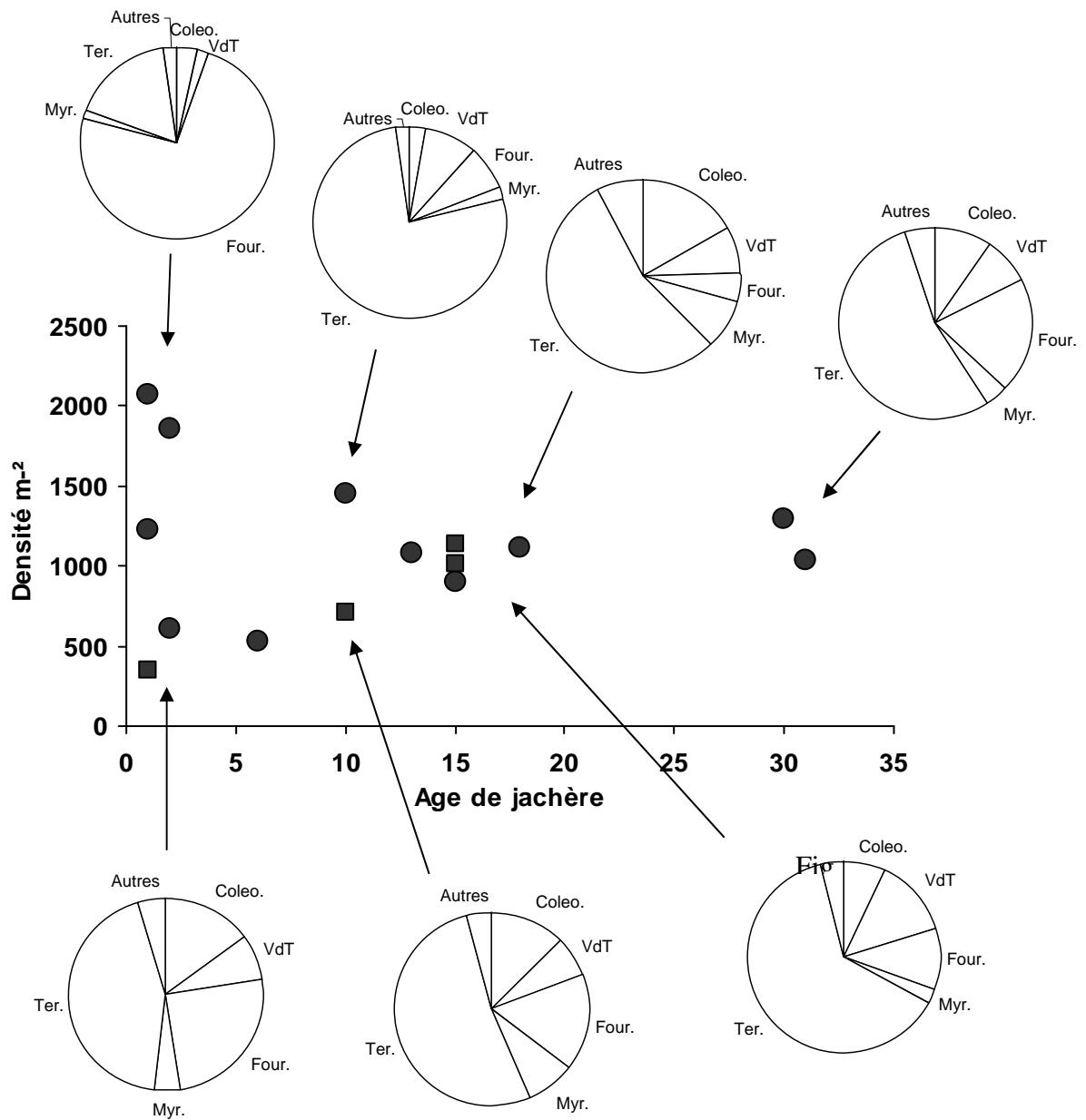


Figure 7: Diversité et densité de la macrofaune totale en fonction du temps de jachère sur les terroirs de Sare Yorobana (rond noir) et Sonkorong (carré noir) évaluée par la méthode TSBF. Ter termites ; Myr myriapodes ; Four fourmis ; VdT vers de terre ; Coleo coleoptères d'après Fall *et al.* (2000) et Lavelle *et al.* (2000).

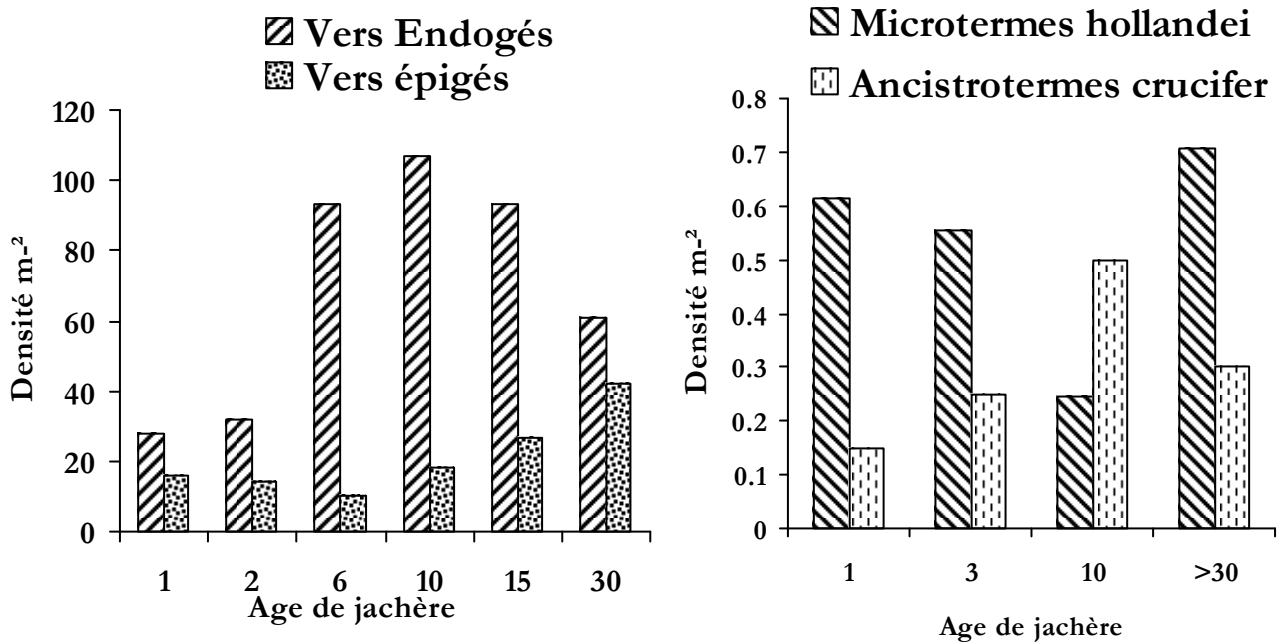


Figure 8: Densité des groupes biologiques de vers de terre (graphe de gauche) et de termites (graphe de droite) en fonction de l'âge de jachère sur le terroir de Sara Yorobana (Sénégal) d'après Fall *et al.* (2000), Sarr *et al.* (2000), Lavelle *et al.* (2000).

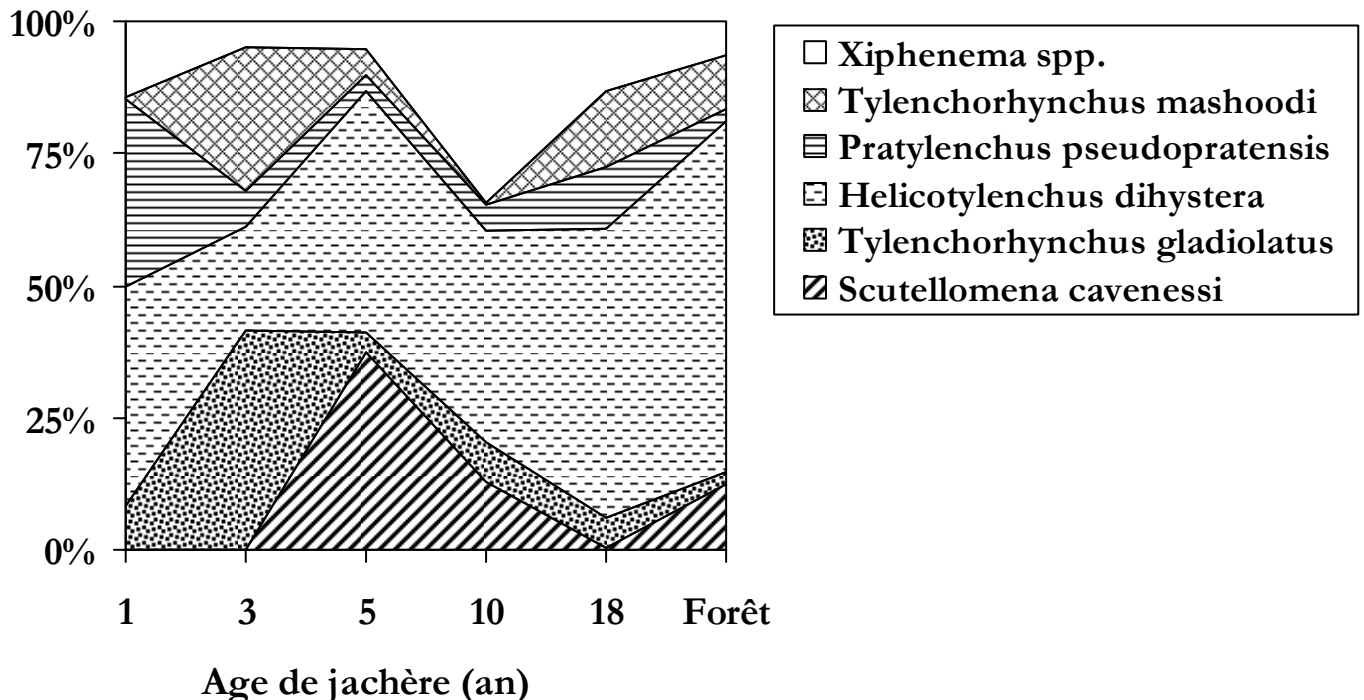


Figure 9: Structure du peuplement de nématodes phytoparasites dans différentes jachères de différents âges et dans une formation forestière au Sénégal d'après Cadet *et al.* (2000b).

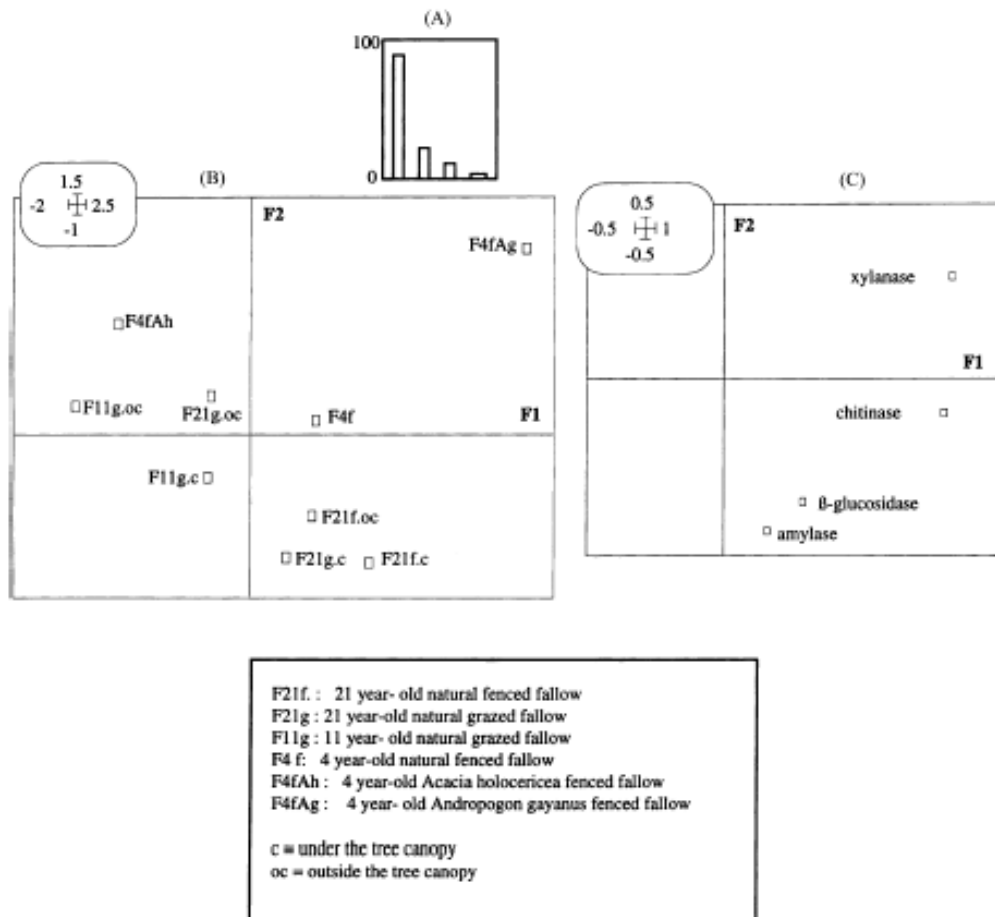


Figure 10 : Analyse en composantes principales des activités enzymatiques sur des sols prélevés dans des jachères de Sonkorong, Sine Saloum (Ndour *et al.*, 2001).

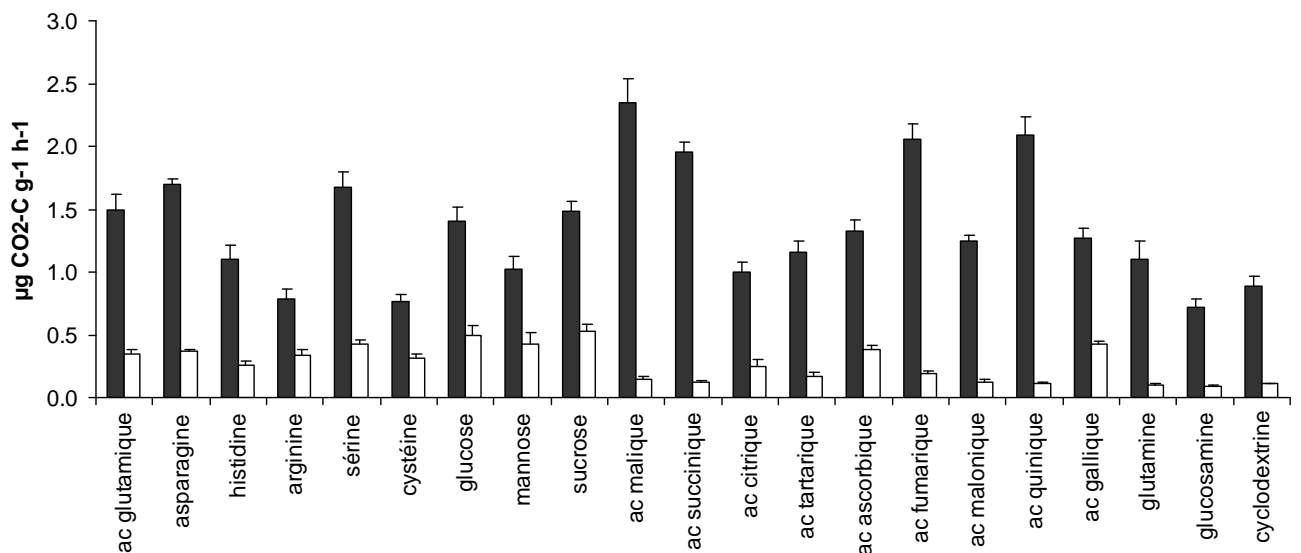


Figure 11 : Profils de réponse catabolique des sols en présence de divers composés organiques dans des sols de jachère et cultivés à Sonkorong, Sine Saloum, Sénégal (Sall *et al.*, 2006).

2.1.3.3 Activité et diversité microbienne

Des mesures dans les sols de Sonkorong et de Sare Yorobana au Sénégal indiquent peu de variation dans les premiers centimètres de sol de modification majeure de la biomasse microbienne en fonction de l'âge de la jachère. Toutefois, une mise en défens total pendant plus de 10 ans révèle une augmentation de la biomasse microbienne. Cet effet de la jachère relativement faible peut être attribué, corrélativement à l'évolution de la matière organique des sols, à la nature sableuse des sols étudiés (N'Dour *et al.*, 2000). L'activité enzymatique mesurée sur ces mêmes sols révèle une augmentation des activités phosphatases, β -glucosidases et polysaccharidases en fonction de l'âge de la jachère (Figure 10). L'effet est nettement plus important dans les sols prélevés sous la canopée des arbres dans les jachères anciennes (Ndour *et al.*, 2001). L'activité potentielle de fixation d'azote a été comparée entre des jachères de 3 ans et des jachères de longue durée (19 ans). Le gain enregistré sur la durée de la jachère serait de l'ordre de 90% ; cette amélioration serait le fait d'une augmentation de l'activité potentielle de fixation de l'azote pour l'essentiel dans les fractions plus grossières de ces sols ($>50\mu\text{m}$) (Chotte *et al.*, 2000).

La diversité microbienne a été évaluée sur des sols (0-10cm) de jachère (21 ans) et de culture (4 ans de culture après 17 ans de jachère) par la diversité catabolique (Sall *et al.*, 2006). Cette dernière méthode définit une diversité fonctionnelle des microorganismes du sol par la mesure d'un profil de réponses cataboliques du sol en présence de divers composés organiques simples (Degens & Harris, 1997). Les sols de jachère présente une plus grande diversité catabolique (Figure 11). Les profils cataboliques (réponse de 21 substrats organiques) sont différents entre les deux sols. Les dégagements de CO₂ sont significativement supérieur pour l'ensemble des substrats organiques appliqués sur les sols de jachère ($p<0,05$). L'indice de Simpson-Yule, définissant la diversité catabolique, est significativement supérieur sur ces sols de jachère (E= 18,6) par rapport au sol cultivé (E= 16,5).

2.1.3.4 Champignons mycorrhiziens

Dans les sols des différentes jachères du site de Sonkorong, le genre *Glomus*, dont les spores sont marron à marron foncé, est le plus abondant ; il représente plus de 93% du nombre total moyen de spores (116,4 spores 100g⁻¹ dans la jachère de douze ans anthropisée et de 418,8 spores 100g⁻¹ dans la jachère de quatre ans protégée) (Duponnois *et al.*, 2000). Pour *Glomus*, le nombre moyen de spore le plus élevé a été enregistré dans les jachères de 4 ans (de 224 à 382,4 spores.100 g⁻¹ de sol) et le plus bas dans la jachère de 12 ans (110,4 spores.100 g⁻¹ de sol). *Scutellonema verrucosa* a été détectée en abondance dans le sol de la jachère protégée la plus ancienne (20 ans, protégée). L'abondance des spores est fortement corrélée à la texture et aux caractéristiques chimiques du complexe d'échange des sols des différentes jachères ; la présence de *S. verrucosa* est liée aux sols à texture grossière alors que les glomales sont observées dans des sols les plus argileux. L'abondance de ces groupes est aussi liée à certains éléments chimiques du sol ; la présence des glomales est corrélée positivement aux teneurs en magnésium, en calcium et en phosphore, alors que celle de *S. verrucosa* est corrélée positivement à la teneur en phosphore. De longues périodes d'abandon des cultures aboutissent généralement à une diminution de la présence et de l'activité de la symbiose mycorrhizienne.

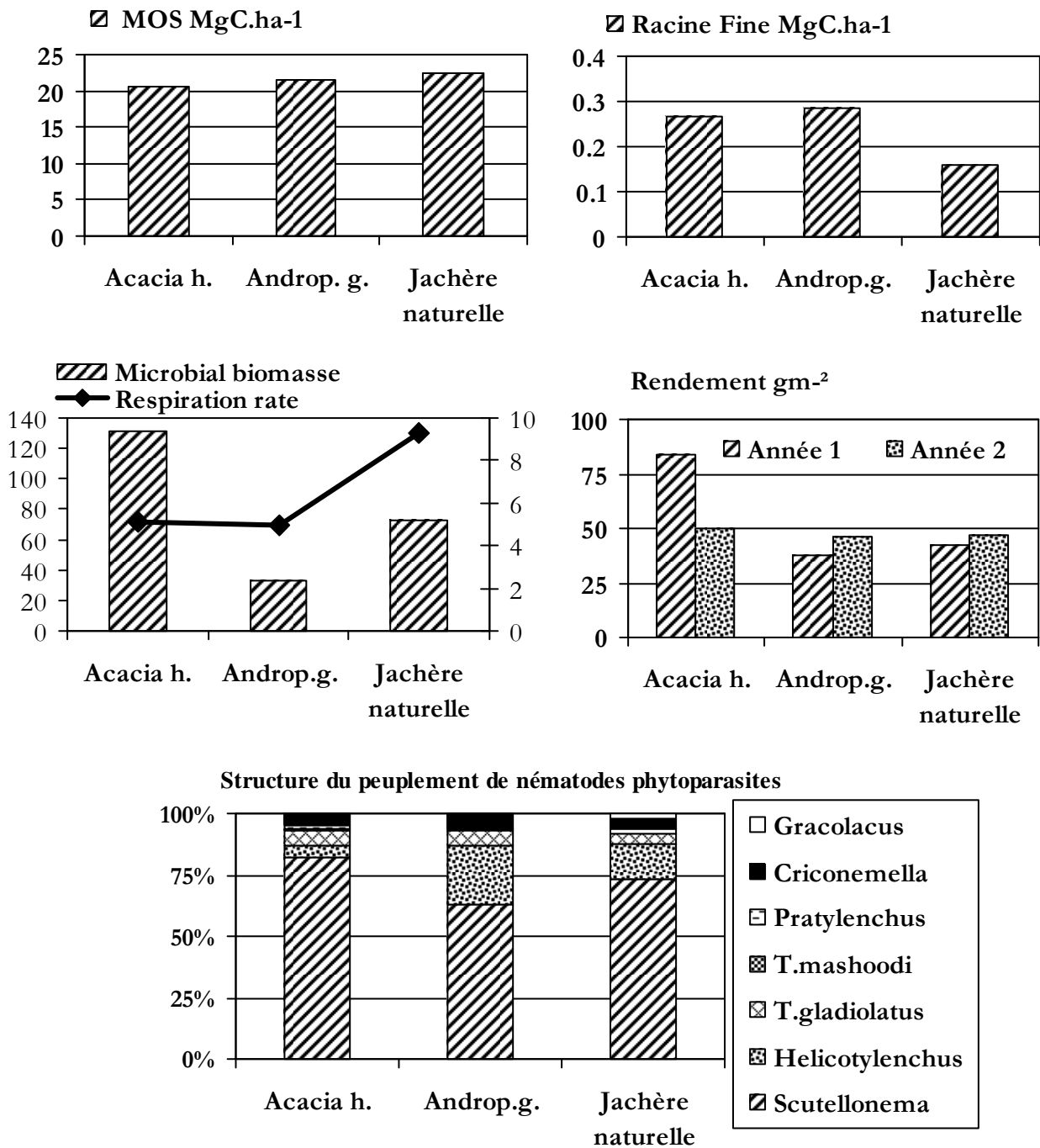


Figure 12 : Modification dans les sols (0-10cm) des jachères de courte durée (4 ans) naturelle, et après l'introduction d'une espèce ligneuse légumineuse (*Acacia holosericea*) ou d'une graminée pérenne (*Andropogon gayanus*) à Sonkorong, Sénégal.

Les résultats obtenus dans ce programme indiquent que le nombre de spores est maximal dans les jachères de moins de cinq ans. Cela suggère que le phénomène symbiotique peut être optimisé sur une courte période lorsque la végétation est protégée de l'impact des populations (feux de brousse, passage de troupeaux, etc.).

La biodiversité des organismes vivants dans le sol évolue au cours de la période d'abandon cultural dans les systèmes de rotation culture jachère. Si, spécifiquement peu de changement significatif apparaissent, il semble bien que, pour la plupart des taxons, la structure des peuplements à l'image des nématodes soit modifiée et fasse apparaître la domination de certains groupes fonctionnels ou trophiques. Ces évolutions sont déterminées par la nature des sols. En ce sens, la dominance de sols sableux dans les régions soudanaises et soudano-sahéliennes limite l'effet des jachères sur les modifications de la qualité biologique des sols. Enfin, les arbres ont un rôle important dans les transformations des sols notamment à travers la litière et le système racinaire qui créent des conditions favorables à une amélioration de la diversité et l'activité biologique ; les espèces herbacées ayant moins d'effets sur les sols (Masse *et al.*, en préparation). Il apparaît donc que la gestion et l'amélioration des jachères passent par une manipulation de la végétation ; c'est ce que nous avons tenté dans le cas des études sur le raccourcissement du temps de jachère et l'amélioration par l'introduction d'espèces végétales améliorantes dès les premières années de mise en jachère.

2.2 Amélioration des jachères de courte durée

Face aux évolutions démographiques, les besoins en production agricole ont eu pour conséquence une diminution des temps de mise en jachère dans les systèmes de rotation culture-jachère. S'est alors posée la question du rôle des jachères de courte durée qui dominent les paysages agricoles sur la restauration de la fertilité des sols (Bilgo, 2005), et des voies d'amélioration du fonctionnement de ces jachères.

Etant donné que la végétation post-culturale joue un rôle déterminant dans les fonctions attribuées aux jachères dans les agro-systèmes, l'hypothèse a donc été de considérer que l'amélioration des jachères de courte durée passerait par une modification de la structure végétale dès l'abandon cultural ; ceci pouvant se faire par l'introduction d'espèces végétales dites améliorantes. C'est ainsi qu'au Sénégal, des expérimentations ont été mises en place pour tester l'effet de la composition végétale sur les propriétés du sol (Masse *et al.*, 1998 ; Masse *et al.*, 2000 ; Masse *et al.*, 2004 ; Cadet *et al.*, 2005). L'effet de la présence de ligneux a ainsi été expérimenté, de même que l'introduction d'une légumineuse ligneuse à croissance rapide (*Acacia holosericea*), ou de la graminée pérenne (*Andropogon gayanus*). Cette dernière est une graminée largement répandue dans les savanes d'Afrique de l'Ouest et qui n'apparaît qu'après quelques années de jachère (environ 6 ans) et elle est considérée par les paysans comme un signe d'une fertilité du sol restaurée. Après 4 années de jachère, les quantités de carbone organique dans les sols (0-10 cm) ne sont pas significativement différents entre jachère naturelle et améliorée (Figure 12). L'activité microbienne apparaît fortement influencée par la présence des *A. holosericea*. Les jachères avec introduction d'espèces à forte production ont permis d'augmenter le stock de biomasse accumulée à l'image de la biomasse racinaire.

Tableau 1 : Propriétés chimiques et microbiennes sur des sols d'une expérimentation sur les jachères de courte durée à Bondoukui, Burkina Faso (moyenne±SE ; n=4) of soil (0-10cm). CR champ cultivé ; F jachère sous végétation naturelle, FAG jachère enrichie avec *Andropogon gayanus*. (Bilgo *et al.*, 2006)

Site	Treatment	Carbon mg g ⁻¹	Nitrogen mg g ⁻¹	C/N ratio	Phosphorus µg g ⁻¹	Soluble Phosphorus µg g ⁻¹	Microbial Biomass µgC g ⁻¹	β- glucosidase activity µg pNP g ⁻¹ h ⁻¹	Urease Activity µgN g ⁻¹ h ⁻¹	Basal Respiration µgC-CO ₂ g ⁻¹ d ⁻¹	qCO ₂ µgC-CO ₂ mg ⁻¹ C-MB d ⁻¹
Guiguemde	F	6.9±0.07	0.39±0.02	17.9±0.5	86±37	2.78±0.28	63±11	35±6	25±1	3.4±0.2	58.7±7.2
	FAG	6.6±0.05	0.37±0.03	18.1±0.9	126±4	3.74±0.62	68±8	30±3	28±7	6.2±0.2	93.9±7.1
	CR	4.1±0.03	0.27±0.02	15.3±0.6	121±12	2.47±0.26	31±6	20±5	15±5	1.9±0.1	67.2±8.0
Karembiri	F	3.6±0.06	0.31±0.05	12.0±1.3	51±3	4.79±1.67	43±1	21±2	18±3	9.7±2.4	164.7±56.9
	FAG	4.3±0.01	0.34±0.02	12.6±0.6	58±5	3.43±0.78	47±2	30±2	21±2	7.3±0.2	157.1±5.0
	CR	2.6±0.06	0.25±0.05	10.4±1.2	53±4	4.28±0.39	17±1	13±1	15±3	3.2±0.6	201.3±46.0
Sourou	F	9.6±0.19	0.65±0.14	15.3±1.7	95±6	4.13±0.20	93±12	46±2	24±1	10.6±1.7	114.4±7.1
	FAG	9.7±0.25	0.61±0.08	16.2±1.1	72±4	4.34±0.06	97±5	44±6	28±0	9.0±1.4	91.5±9.0
	CR	5.2±0.14	0.42±0.05	12.6±0.9	72±11	2.66±0.33	56±2	19±5	31±3	4.3±0.3	77.1±2.9
Zimapi	F	5.5±0.01	0.40±0.02	13.8±0.3	121±6	3.19±0.15	99±10	44±1	26±5	10.7±0.3	110.1±6.6
	FAG	4.6±0.02	0.33±0.02	14.1±0.6	89±8	3.37±0.04	83±8	26±3	18±1	8.5±0.2	104.8±8.5
	CR	3.6±0.02	0.31±0.01	11.5±0.3	141±7	3.46±0.20	65±3	22±2	22±5	4.1±0.3	63.4±4.2
ANOVA											
Site effect		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.139	<0.001	<0.001	0.026	<0.001	<0.001
Treatment effect		<0.001	<0.001	<0.001	0.08	0.422	<0.001	<0.001	0.526	<0.001	0.105
Interaction effect		<0.001	0.111	0.947	0.001	0.322	0.73	0.039	0.136	0.068	0.499
Tukey test on Treatment			CR<FAG=F	CR<FAG=F			CR<FAG=F			CR<FAG=F	
ANOVA by Site : Treatment effect											
Guiguemdé		<0.001	0.002	0.047	0.886	0.166	0.14	0.146	0.258	<0.001	0.131
Tukey test		CR<FAG<F	CR<FAG=F							CR<FAG<F	
Karembiri		<0.001	0.11	0.383	0.556	0.686	<0.001	0.002	0.329	0.063	0.503
Tukey test		CR<F<FAG					CR<FAG=F	CR<FAG=F			
Sourou		<0.001	0.091	0.185	0.194	0.011	0.001	0.011	0.103	0.009	0.17
Tukey test		CR<FAG=F				CR<FAG=F	CR<FAG=F	CR<FAG=F		CR<FAG=F	
Zimapi		<0.001	0.001	0.008	0.005	0.45	0.055	<0.001	0.447	<0.001	0.011
Tukey test		CR<FAG<F	CR<FAG=F	CR<FAG=F	FAG<F=CR			CR<FAG<F		CR<FAG<F	CR<FAG=F

En revanche, le peuplement des nématodes phytoparasites est très peu différent entre la jachère naturelle et les jachères à *Andropogon* ou *Acacia*. L'effet positif sur le rendement après défriche a été observé uniquement la première année. Ceci est dû pour l'essentiel à la forte litière produite sous *Acacia*, et qui a été brûlée pour la mise en culture fournissant ainsi une dose importante d'éléments minéraux. Sur ces essais, il a été montré que les bilans de certains éléments minéraux du sol (phosphore, potassium, calcium) présentent des déséquilibres (diminution des stocks) qui peuvent ainsi accentuer une dégradation chimique des sols au cours des cycles culture jachère de courte durée. La gestion de la biomasse accumulée pendant la jachère, même si elle est de courte durée, conditionnera ainsi l'effet sur le rendement des cultures après jachère (Masse *et al.*, 2004).

Au Burkina Faso, sur le terroir de Bondoukui, une expérimentation a été réalisée au cours de laquelle sont comparés des sols (0-10 cm) sous jachères de courte durée (5 à 6 ans) sous végétation naturelle ou enrichie avec *Andropogon gayanus* à des sols cultivés (Bilgo *et al.*, 2006). Ces essais ont été mis en place sur des parcelles cultivées divisées en trois sous parcelles de quatre types de sol. Après 5 à 7 ans de mise en jachère, le carbone (+64%) et l'azote (+35%) organique du sol, la biomasse microbienne (+76%), la respiration basale (+141%) ainsi que l'activité β -Glucosidase (+86%) sont significativement supérieurs dans les sols de jachère par rapport au sol prélevé dans la sous parcelle en culture quelque soit le type de sol (Tableau 1). Le quotient métabolique ne présente pas de différences significatives entre les traitements. Enfin aucune différence n'est démontrée entre les sols des jachères à *Andropogon gayanus* et ceux des jachères sous végétation naturelle.

Au Mali ont été menées des recherches sur le rôle des feux de brousse sur les propriétés édaphiques et la dynamique de la végétation au cours des premières années de jachère (Dembélé, 1996). Une expérimentation factorielle a été mise en place testant trois pratiques de feu: un feu précoce, un feu tardif et une absence de feu sur deux types de sols sableux et limono-argileux, protégés ou non contre le pâturage. Après trois et quatre années, quel que soit le sol, les principaux indicateurs chimiques ne sont pas modifiés. Les pratiques de feu précoce ou d'absence de feu modifient la dynamique de la matière organique avec une augmentation des quantités de carbone dans la fraction granulométrique grossière (20-2000 μm). Le feu, qu'il soit précoce ou tardif, modifie les états de surface et sensibilise le sol à la dégradation et à l'érosion. La biomasse herbacée et le couvert végétal constituent de bons indicateurs pour expliquer les effets des différentes pratiques du feu (Masse *et al.*, 1997).

2.3 La gestion de la fertilité des sols dans les savanes d'Afrique de l'Ouest : évolution et alternative à la rotation culture-jachère

2.3.1 Synthèses des résultats

Les divers travaux menés dans le cadre du programme Jachère sur la gestion de la fertilité biophysique des sols dans les régions soudano-sahéliennes et soudaniennes ont révélé l'importance de la dynamique de la végétation dans le déterminisme de l'évolution de la qualité des sols au cours de la jachère. Sur un terroir agricole, les jachères sont le lieu principal de production d'une ressource organique renouvelable et exploitable. Cette ressource organique est redistribuée pour assurer la production agricole (rotation culture jachère, pâturage). La biomasse produite dans les jachères participe, de par l'énergie et les minéraux qu'elle transporte, au maintien de l'intégrité écologique des systèmes et plus particulièrement celui du sol (Perry *et al.*, 1989 ; Frontier & Pichod-Viale, 1998). Cette intégrité productive est maintenue par les propriétés physico-chimiques mais surtout en zone tropicale par les activités biologiques dans les sols.

La végétation est à l'origine de l'accumulation de matière organique, permettant un recyclage et un stockage des éléments minéraux qu'ils proviennent des horizons supérieurs (immobilisation) ou des horizons en profondeur (remontée). Dans cette végétation, les ligneux apparaissent comme l'élément clé. Ils sont capables de fixer des éléments minéraux en profondeur, de modifier les sols par leur système racinaire et de favoriser la diversité des niches écologiques et par conséquent des organismes vivants du sol et de leur activité. Le temps nécessaire pour qu'une jachère atteigne un état suffisamment propice à la mise en culture est donc tributaire de la vitesse de croissance des ligneux. De même certaines graminées pérennes sont capables de transformer les propriétés physico chimiques des sols (par exemple *Andropogon gayanus*) mais d'un point de vue du bilan minéral, ces plantes auront tendance à n'assurer qu'une immobilisation des minéraux se trouvant en surface et donc dans la zone cultivée. Seule les légumineuses peuvent apporter un surplus d'azote provenant de la fixation de l'azote atmosphérique.

Pour assurer leur efficacité sur la qualité des sols, les jachères doivent être gérées pour maximiser la production et la diversité végétale. Un contrôle des feux de brousse et des prélèvements (fourrage, bois) est ainsi nécessaire. De plus, les techniques de défriche peuvent également limiter l'efficacité d'une jachère sur la période de culture suivante (brûlis, dessouchage, etc.). Le maintien de certaines souches peut être un gage pour un maintien de la diversité au cours des rotations culture-jachère successives. Enfin, le système racinaire apparaît déterminant étant la seule partie qui ne subit pas de prélèvements ou de brûlis. Les ligneux ou herbacées possédant un système racinaire conséquent permettraient donc à la jachère d'assurer une efficacité maximale sur la restauration d'une qualité biophysique des sols.

Cependant, les jachères de longue durée disparaissent au profit des jachères de courte durée. Dans nos différents essais, ces jachères de courte durée ne semblent pas avoir la capacité de modifier les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols. Les espèces à croissance rapide, ligneuse et légumineuse comme les *Acacia*, ou les graminées pérennes peuvent permettre d'accumuler une biomasse disponible et recyclable pour une période de culture après défriche.

Cependant, la mauvaise gestion de cette biomasse végétale au moment de la défriche risque d'accentuer la dégradation des propriétés minérales des sols à travers par exemple une part exportée trop importante de la biomasse produite au cours de la période de jachère. La jachère de courte durée peut alors devenir une pratique minière sur les stocks d'éléments minéraux du sol au même titre qu'une culture permanente non fertilisée.

2.3.2 Les améliorations ou les alternatives possibles

Intensifier les parcelles cultivées par apport d'engrais minéraux et contrôle des adventices par les pesticides

La première solution qui apparaît est de maintenir plus longtemps les parcelles cultivées pour ne pas avoir recours à la jachère ou diminuer la pression sur les jachères. Pour compenser les exportations minérales ou organiques d'une culture, l'apport en plus grande quantité d'intrants chimiques (engrais, pesticides) est une solution classique. L'état actuel de l'agriculture des pays du Sud du Sahara ne permet pas du fait du coût prohibitif de ces intrants d'en augmenter leur utilisation. De plus, sur la base des expérimentations de longue durée en Afrique de l'Ouest, la fertilisation minérale doit être accompagnée d'une fumure organique. Cependant, la disponibilité de cette fumure organique est également limitée. Par ailleurs, les apports importants sur certaines cultures de rente tel que le coton commencent à montrer des problèmes de pollution non négligeable dans les sols à texture sableuse qui dominent l'Afrique de l'Ouest. Le devenir de ces intrants chimiques (fertilisants ou pesticides) est pour l'instant très peu étudié dans les conditions des sols tropicaux d'Afrique de l'Ouest.

Rotation culturale ou association culturale pour maintenir les propriétés des sols cultivés

Pour maintenir ou améliorer la fertilité physico-chimique des sols cultivés de façon permanente, il est possible d'introduire dans les systèmes de culture des plantes qui ont une action bénéfique sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Ces plantes sont généralement des légumineuses, voire les graminées pérennes testées au cours du programme Jachère. Les légumineuses ont comme principal avantage de pouvoir enrichir le sol en azote à partir de la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. Les graminées pérennes jouent un rôle à la fois chimique en concentrant dans leur rhizosphère des éléments minéraux, mais également physique en modifiant l'agrégation et la porosité des sols. Cependant, pour ces dernières, il apparaît que ces effets nécessitent un certain nombre d'années pour apparaître notamment en ce qui concerne *Andropogon gayanus*, principale espèce native dans les savanes sub-sahariennes. L'introduction de ces plantes peut se faire soit en rotation avec une culture soit en association. Ces pratiques sont développées à travers les systèmes de culture à couvert végétal (SCV). L'objectif de ces pratiques est de produire un couvert végétal sur le sol nu (soit entre deux cycles culturaux soit entre des lignes de plantes cultivées pendant la culture). Ces pratiques ont été validées principalement dans des régions humides. Des difficultés apparaissent dans les zones plus sèches où de longues périodes sans pluie ne permettent pas de maintenir un couvert végétal vivant et plus particulièrement pour les espèces qui ont fait leur preuve par ailleurs. L'association culturale, c'est-à-dire combiner au cours du même cycle cultural l'association de deux plantes complémentaires à la fois productrices d'un produit consommable, semble la voie la plus intéressante. Les systèmes de culture traditionnels présentent déjà ce type de pratiques sur les

champs de case où il n'est pas rare même dans les régions les plus sèches de voir simultanément sur une même parcelle différentes plantes associées : sorgho et mil, maïs et légumineuses, etc. Des études sont nécessaires pour optimiser ces pratiques d'association culturale autorisant une production végétale importante et durable.

Produire de la biomasse à l'échelle du terroir en favorisant les ligneux et les légumineuses

L'objectif est ici de reconstituer une ressource organique mobilisable à l'échelle du terroir. Implanter des jachères nouvelles qui immobilise des terres cultivables ne semble pas possible dans des terroirs fortement occupés. La solution serait d'étendre le principe des parcs arborés avec une intégration des arbres dans les parcelles de culture. Traditionnellement ces parcs existent dans de nombreuses régions : parcs à *Acacia albida* ou à *Cordyla pinnata* du Bassin arachidier au Sénégal, parcs à Karité au Burkina Faso. Cependant ces espèces sont des espèces à croissance très lente et leur régénération peut être liée à la présence d'une période de jachère tel que le parc à Karité. Les systèmes de culture en couloir longtemps fer de lance de l'agroforesterie n'ont pas donné non plus de résultats significatifs, généralement dus aux faibles gains en terme de rendement par rapport au travail fourni. L'autre alternative est d'introduire l'arbre en bordures des parcelles cultivées sous forme de haies vives. De nombreuses espèces ont été testées pour servir de haies jouant un rôle à la fois de protection contre la divagation des animaux mais également un rôle de production de bois ou de fruits comme *Ziziphus mauritiana*. Dans ce cas, une contrainte majeure à lever concerne les règlements fonciers traditionnels qui peuvent s'avérer incompatibles avec le principe d'un embocagement du paysage.

Favoriser l'intégration de l'agriculture et de l'élevage.

La disparition des zones de parcours dans le terroir a bien souvent éloigné les troupeaux en dehors des agrosystèmes en quête de nourriture. L'objectif serait de maintenir un élevage dans le terroir. Pour cela, il est nécessaire d'intensifier la production de fourrages sur certaines parcelles du terroir. Divers espèces fourragères sont connues et ont été testées. *Stylosanthes hamata* est utilisée dans les zones cotonnières du Sud Mali. Des espèces ligneuses sont également connues pour leur valeur fourragère et pourrait être implantées dans les systèmes de production. Pour favoriser le développement de l'intégration de l'agriculture et de l'élevage, il est cependant nécessaire de lever la contrainte économique sur les filières de commercialisation des produits de l'élevage que ce soit le lait ou la viande. Bien souvent, le faible attrait de ces filières ne favorise pas l'investissement financier et surtout humain dans ces systèmes de production. On rencontre ces conditions favorables à proximité des pôles urbains où se développe un élevage en stabulation favorisant la production de fumiers valorisés dans les parcelles cultivées. Mais, généralement l'affouragement de ces animaux se fait essentiellement au dépend des maigres jachères qui demeurent dans le paysage ou au détriment d'un maintien des résidus de récolte dans la parcelle.

L'analyse des stocks et flux de matière organique à l'échelle d'un terroir a montré l'importance de l'organisation des systèmes agraires dans le maintien en culture permanente de certaines parcelles. Ainsi, dans les terroirs à forte pression agricole, des parcelles agricoles sont maintenues en culture permanente avec des rendements relativement élevés et durables, grâce à

des apports organiques issus de l'élevage ou des déchets domestiques. Il apparaît nécessaire de maîtriser au mieux ces flux de matières organiques sur un terroir agricole. Le maintien de l'élevage ou son intégration dans les systèmes de production est alors essentiel.

L'augmentation durable de la production agricole passe donc par une meilleure gestion des ressources organiques produites sur le terroir agricole (biomasse végétales, fécès). Améliorer les pratiques agricoles basées sur le recyclage d'intrants organiques dans les agricultures des pays en développement est l'objectif principal des travaux de recherche que j'ai menés ces dernières années.

Notons que cette question est également d'actualité dans les agricultures des pays riches pour réduire les implications environnementales des systèmes de production des agricultures industrielles (Brussaard & Ferrera-Cerrato, 1997 ; Tilman, 1998 ; Mäder *et al.*, 2002).

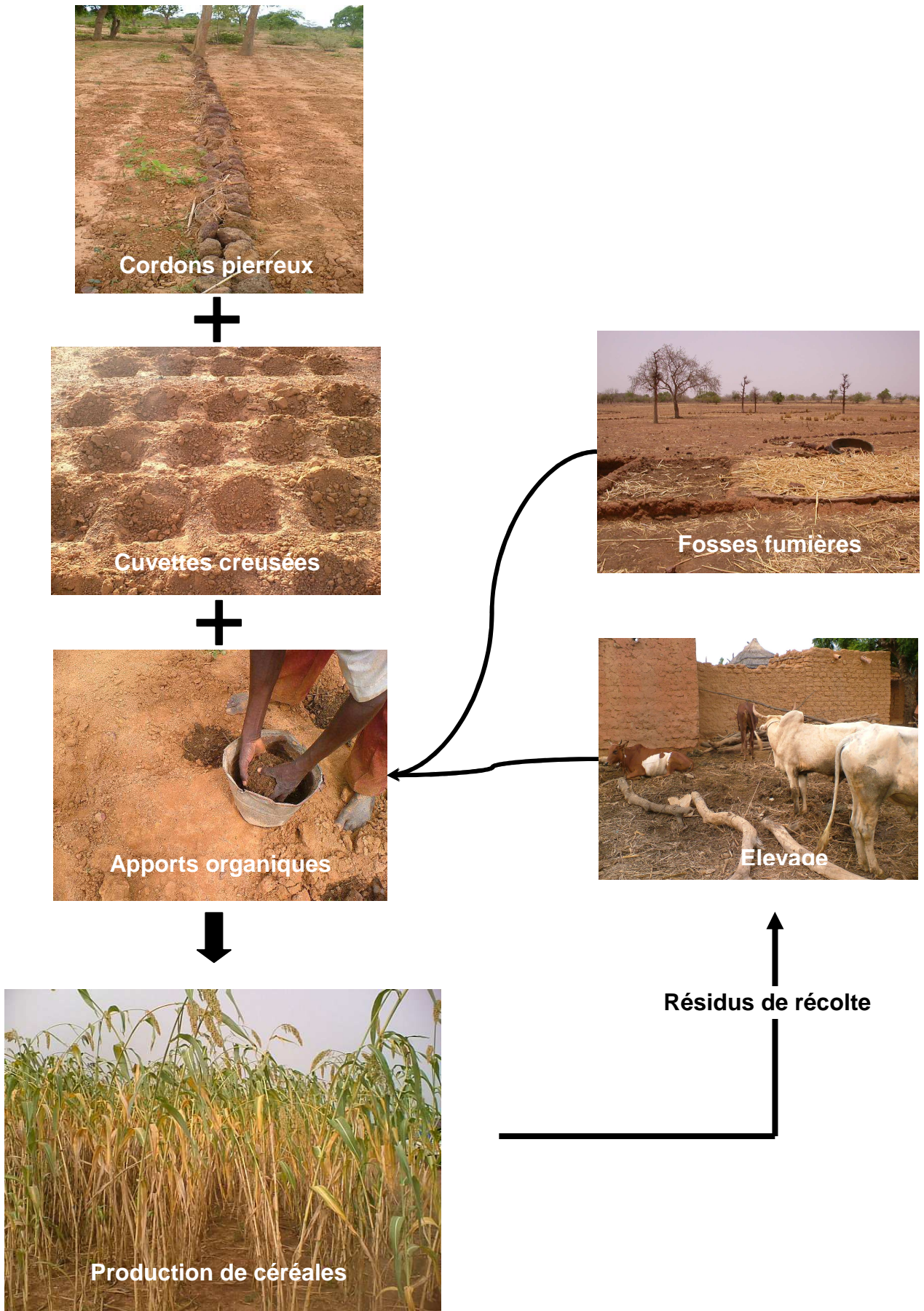


Figure 13 : Principes des pratiques *zai* et *djengo* dans le Yatenga au Burkina Faso

3 Intrants organiques dans les agrosystèmes. Etudes de cas et processus de décomposition des matières organiques dans les sols.

On trouve dans les terroirs agricoles de nombreuses pratiques de recyclage des matières organiques. Ces pratiques s'appuient généralement sur un brûlis des matières organiques permettant notamment d'accélérer la disponibilité de certains éléments minéraux. Par exemple la biomasse végétale aérienne est entièrement brûlée au cours de la défriche d'une jachère ; il en est de même des résidus de récolte conservés sur le champ. L'élevage, là où il est intégré à l'agriculture (zone de savanes) assure un transfert de fertilité par les parcs nocturnes en saison sèche sur des champs choisis par les paysans. Plus récemment, des stabulations tout au long de l'année d'animaux domestiques se sont développées permettant dans certains terroirs une véritable production de fumier. Des techniques agricoles se sont développées basées sur une conservation des eaux et des sols et sur une fertilisation organique nécessitant la production d'un substrat organique (technique du *zaï* au Burkina Faso et au Niger). Liée à la forte croissance des populations urbaines, une agriculture spécifique généralement intensive s'est développée en périphérie des centres urbains. Ces pôles urbains génèrent des quantités importantes de déchets urbains riches en matière organique plus ou moins transformées. Les paysans utilisent parfois ces déchets solides bruts comme fertilisant ce qui ne va pas sans poser des problèmes environnementaux et sanitaires même si ces pratiques permettent une forte augmentation des productions agricoles.

Dans cette troisième partie, je présente trois études présentant différentes situations d'usage de matières organiques dans des systèmes de culture. Ces travaux ont été accompagnés de recherche sur les déterminants de la décomposition des matières organiques dans les sols : l'effet de la qualité biochimique des résidus organiques apportées, et la dimension spatiale des processus de décomposition des matières organiques dans les sols.

3.1 Des pratiques de recyclage de résidus organiques dans des agro-systèmes sahéliens

3.1.1 Des pratiques de conservation des eaux et des sols associés à l'apport de fertilisants organiques

En 2005 et 2006, des recherches ont été menées sur le terroir de Ziga dans le Yatenga (Burkina Faso). Ce village a fait l'objet de programmes de recherche-action dans les années 1980-1990 menés par l'INERA et le CIRAD. Il était intéressant de revenir une vingtaine d'année plus tard pour évaluer l'évolution des systèmes de production. Le principal enseignement de cette étude est l'importance prise par des pratiques agricoles associant une conservation des eaux de ruissellement et une fertilisation localisée par des matières organiques contrairement aux perspectives de la recherche-développement de l'époque. Le *zaï* est une pratique consistant à creuser des cuvettes généralement sur des sols encroûtés et d'y apporter de la fumure organique (Figure 13).

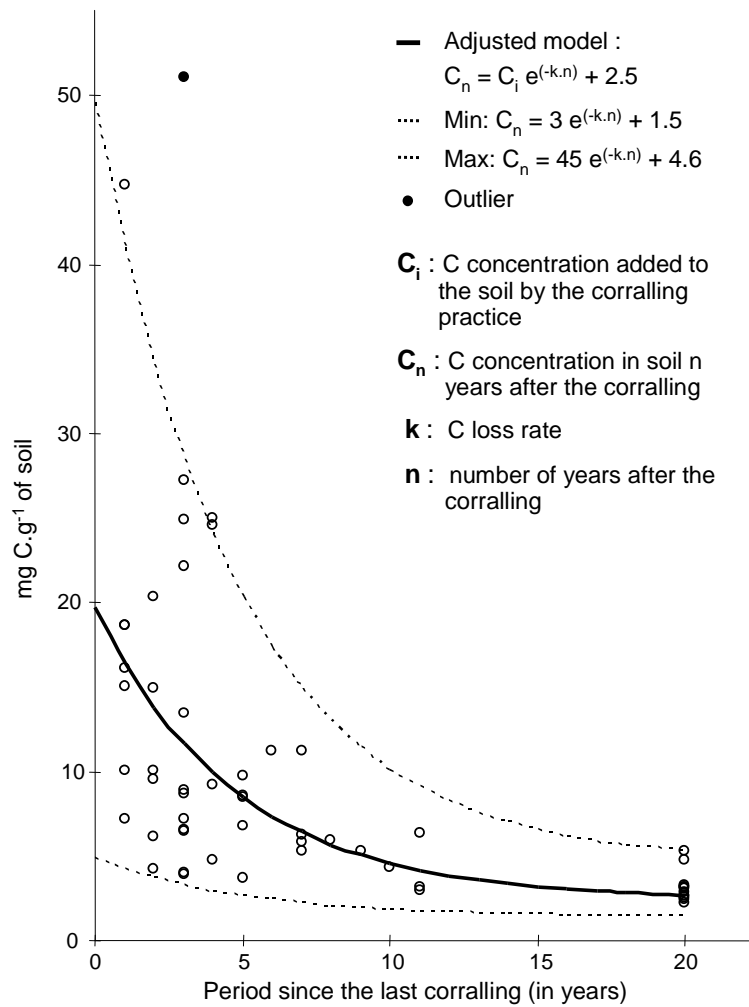


Figure 14 : Teneurs en carbone des sols (0-10 cm) en fonction de la durée après un parcage nocturne d'animaux domestiques pendant 2 à 3 mois. Un modèle exponentiel de décroissance de la relation entre teneur en carbone et durée après parcage a été ajusté.

C'est une ancienne pratique utilisée pour réhabiliter des sols dégradés ou peu propices à la mise en culture. Cette technique s'est particulièrement développée dans les parcelles agricoles de Ziga accompagnée d'une maîtrise du ruissellement à l'échelle du petit bassin versant par des cordons pierreux. Une pratique similaire mais non décrite dans les études précédentes, le *djengo*, est en revanche totalement apparue au cours de ses 20 dernières années. Le nom de cette pratique correspond au nom de l'outil à long manche qui est utilisé pour travailler. Les outils à long manche permettent un travail en station debout adapté aux sols sableux facile à travailler. Cette pratique est appliquée sur les sols sableux non encroûtés (Kaboré, 2005). Les principales caractéristiques d'un *zai* vont dépendre de la disponibilité en fumure organique de l'exploitation et de la main d'œuvre disponible. Suivant les exploitations, cinq variantes de la pratique du *zai* ont été définies en fonction de la période de confection des cuvettes et du type d'apport de la fumure organique. On note en moyenne 22000 à 35000 poquets.ha⁻¹ et il faut 62 jours pour aménager un hectare de *zai* ; les cuvettes ont 30-34 cm de diamètre et 9-11 cm de profondeur et chaque cuvette reçoit entre 200 et 600 g de fumure organique, ce qui correspond à 8 t.ha⁻¹ et 14 t.ha⁻¹. Dans le cas du *djengo*, la cuvette où est semé le sorgho est creusée après la première pluie en sol humide. L'apport localisé de fumure organique est aussi la règle habituelle (de 7 à 9 t.ha⁻¹). Le *djengo* demande moins de temps de travail (21 jours.ha⁻¹). Ces deux pratiques révèlent une stratégie d'intensification des systèmes de culture par une localisation des fumures organiques et minérales, ainsi qu'une meilleure gestion de l'eau pluviale. Ces pratiques permettent d'atteindre des rendements importants sur des sols dégradés au départ. Associées aux aménagements anti-érosifs à l'échelle des petits bassins versants, ces techniques permettent d'assurer la viabilité des agrosystèmes. Les résultats montrent ainsi une régénération du couvert arboré/arbustif à Ziga suite à la mise en place des cordons pierreux et à la pratique du *zai* ou du *djengo*. (Kaboré, 2005). Cependant, ces techniques demandent de disposer de matières organiques. A Ziga, les fosses fumières sont répandues dans les exploitations agricoles où la stabulation au sein de l'exploitation de quelques animaux permet de récupérer du fumier d'origine animale. Celui-ci est stocké dans les fosses en y ajoutant des résidus de récolte ou autres résidus végétaux récoltés dans les zones non cultivées. Les matières organiques sont alors plus ou moins compostées dans ces fosses. Une étude est en cours pour évaluer la qualité des matières organiques issues de ces fosses fumières et leur dynamique au cours du temps après avoir été déposées dans les cuvettes.

3.1.2 Evolution du carbone organique des sols après un parcage d'animaux domestiques

Dans les systèmes agropastoraux du Sahel Ouest-africain, les jachères et la fumure animale sont les principales sources de fertilité. Plusieurs études se sont attachées à décrire la dynamique de libération des nutriments contenus dans le fumier, mais aucune, à notre connaissance, ne s'est intéressée à l'évolution à long terme des apports de fumier dans les sols tropicaux. Une étude, au nord du Burkina-Faso, a cherché à estimer l'effet résiduel du fumier selon le nombre d'années écoulées après parcage d'animaux domestiques (Freschet, 2006 ; Freschet *et al.*, in press).

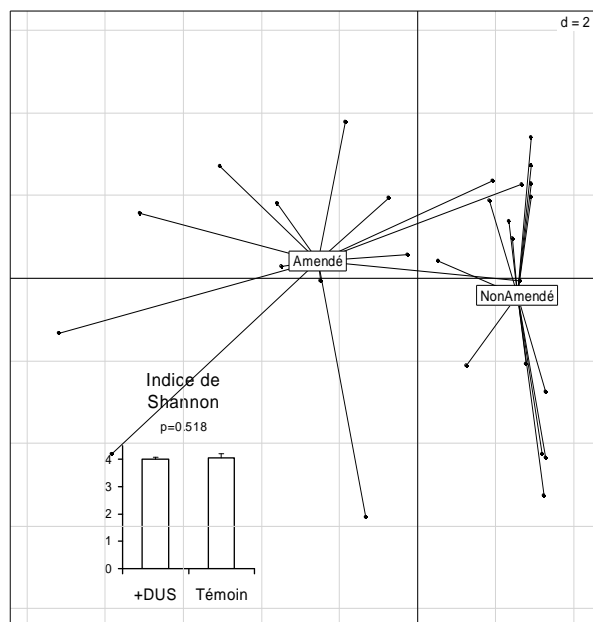
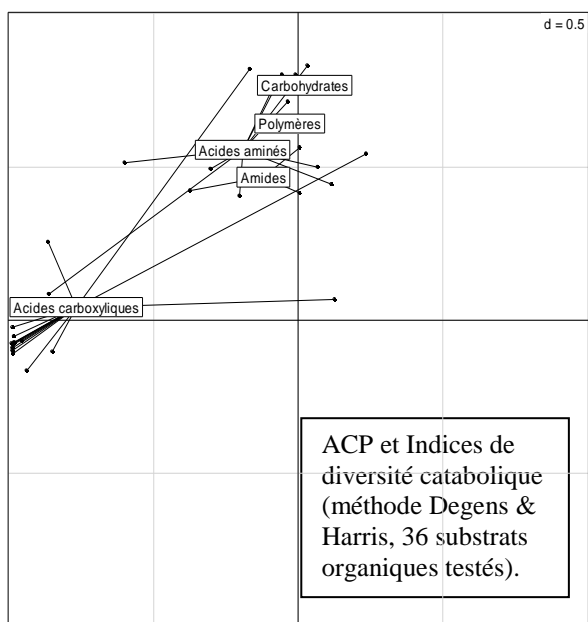
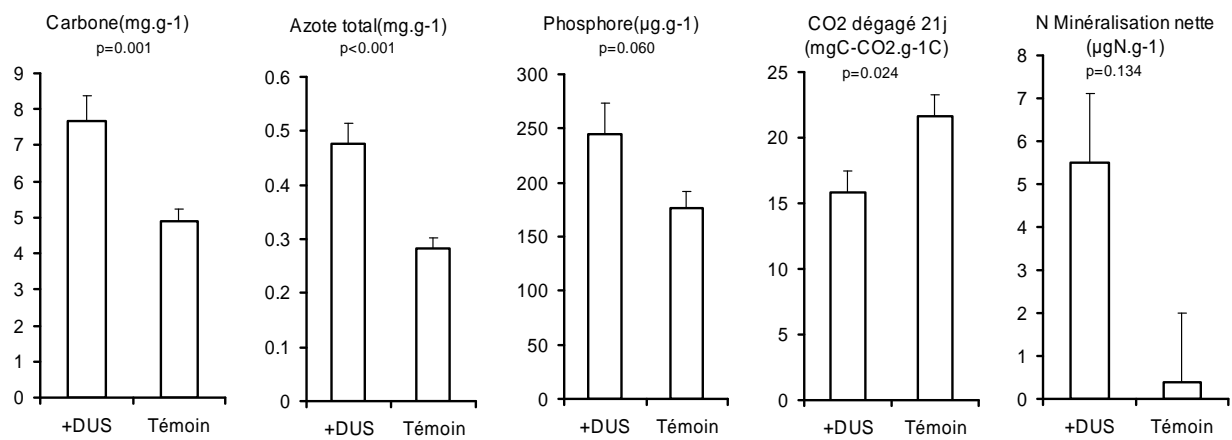


Figure 15 : Comparaison des propriétés chimiques et microbiologiques entre les sols des parcelles amendées ou non amendées avec des déchets urbains solides (DUS).

En effet, dans ces régions sahéliennes, les animaux domestiques sont réunis pendant la saison sèche et confiés à des bergers qui les parquent la nuit dans des parcelles cultivées. Chaque année, ces zones de parcage à l'intérieur du champ changent. Cette pratique donnait l'opportunité d'avoir in situ des sols ayant subi à un instant donné un apport organique permettant d'évaluer la dynamique des matières organiques dans ces sols. Des mesures d'activité microbienne, de matière organique du sol (MOS) et de production végétale ont servi à évaluer cet effet. La pertinence des analyses par spectroscopie proche à infrarouge (SPIR) pour évaluer cet arrière effet a également été testée. Enfin, un modèle de dynamique de la MOS a été élaboré et ajusté à nos données. L'effet résiduel diminuait rapidement entre la première et la cinquième année après parcage mais restait significatif jusqu'à la onzième année (Figure 14). L'analyse par SPIR n'a pas permis de discriminer les groupes de parcelles suivant leur âge après parcage. Elle a cependant montré des résultats encourageant dans une perspective de prédiction des variables carbone total, azote total et biomasse microbienne. La durée et l'amplitude de l'effet résiduel des parcages d'animaux dépendent principalement de la quantité de fumier appliquée. Les différences de MOS constatées entre des parcelles non parquées depuis de nombreuses années peuvent ainsi être attribuées aux quantités variables de MO introduites dans les sols quelques années auparavant. Les potentiels de production végétale et de dénitrification étaient limités en deçà d'un seuil de MOS. Dans les conditions de ces parcages, pour obtenir un effet significatif sur les teneurs en MOS, les apports doivent être de l'ordre de $24 \text{ kgMS.m}^{-2}\text{an}^{-1}$ de sol et pour que cet effet dure au-delà de cinq années, les apports de fèces doivent être de l'ordre de $60 \text{ kgMS.m}^{-2}\text{an}^{-1}$.

3.1.3 Qualité des sols sous apports de déchets urbains solides en zone péri-urbaine

Les déchets ménagers dans les villes des pays en voie de développement sont riches en matière organique. Ils constituent donc une ressource fertilisante importante que les agriculteurs installés dans les périphéries des villes utilisent pour assurer une production agricole. Cette utilisation se fait aussi bien en culture maraîchère qu'en culture céréalière. Autour de la ville de Ouagadougou, les paysans utilisent ces déchets urbains solides comme fertilisant parfois de façon intensive. Dans le cadre de l'étude de l'interaction entre qualité et dynamique des matières organiques dans les sols, il s'avère intéressant d'étudier les parcelles agricoles qui reçoivent ce type de matière organique très spécifique. Cependant, ces déchets non triés et pouvant contenir des polluants posent le problème également de l'impact éco-toxicologique de ces pratiques agricoles.

En 2004, j'ai initié des travaux sur l'usage des déchets urbains solides (DUS) dans les systèmes de production en zone péri-urbaine de Ouagadougou. Il s'agissait dans un premier temps d'évaluer l'impact sur les propriétés chimiques, biologiques et éco-toxicologiques des sols de l'apport des déchets urbains (Kaboré, 2004). Sur 3 sites autour de la ville de Ouagadougou, à partir d'enquête auprès des paysans, 28 parcelles ont été choisies représentant 14 parcelles amendées de façon plus ou intensive en DUS et 14 parcelles non amendées. Dans chaque parcelle, les sols ont été prélevés le long d'un transect de 20 m et réunis dans un échantillon composite.

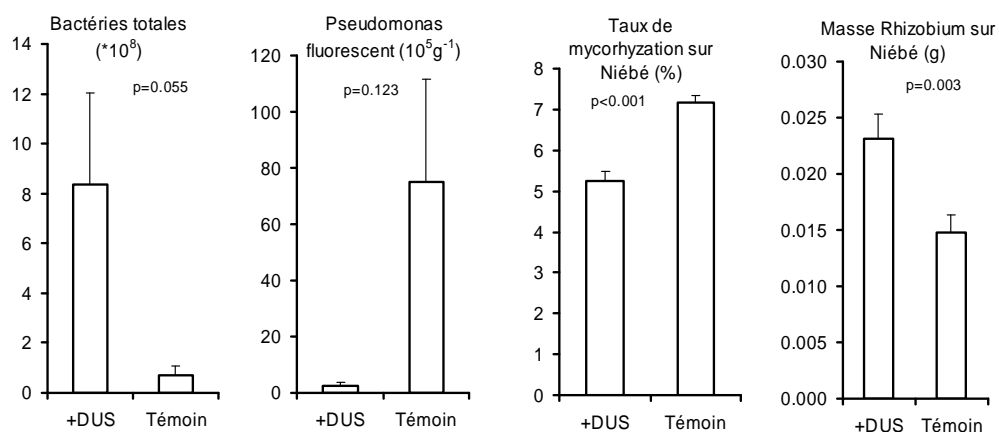


Figure 16 : Divers paramètres microbiologiques sur des sols amendés ou non avec des déchets urbains solides

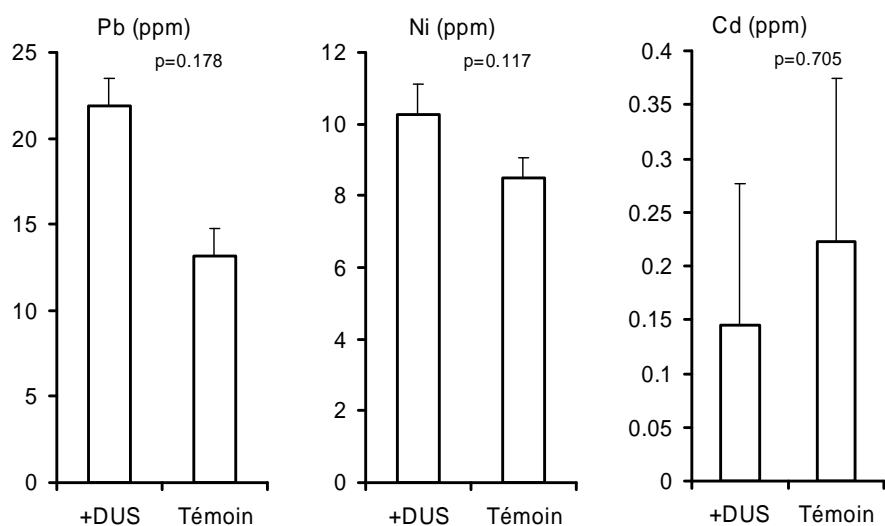


Figure 17 : Comparaison des teneurs en métaux lourds sur des sols amendés (+DUS) ou non (Témoin) avec des déchets urbains solides.

Les prélèvements ont été réalisés entre 0 et 10 cm de profondeur. Les paramètres mesurés sont le carbone et l'azote total, le phosphore, le dégagement de CO₂ au cours d'une incubation au laboratoire de 21 jours, la diversité catabolique (méthode de Degens & Harris (1997)), des paramètres microbiologiques concernant certains groupes microbiens clé tels que les *Pseudomonas fluorescens*, les actinomycètes, les rhizobium et les champignons mycorhiziens. Concernant l'impact éco-toxicologique, les teneurs en métaux lourds (Cd, Pb et Ni) ont été évalués, enfin des tests d'écotoxicité ont été réalisés.

Les résultats montrent que, comparé au sol témoin (Figure 15) :

- les déchets ont contribué à relever le taux de matière organique des sols de 57 % ;
- le taux d'azote total du sol a été augmenté de 73 % suite à l'apport de déchets ;
- le phosphore total a été amélioré de plus de 43 % ;
- les pH des sols qui étaient acides au départ sont passés à neutres avec l'amendement des déchets.

L'amélioration des propriétés chimiques des sols est significative. Cependant, les études de minéralisation du carbone et de l'azote indiquent que la matière organique accumulée dans les sols des parcelles amendées serait difficilement minéralisable. La mesure de la diversité catabolique fonctionnelle ne montre pas un changement de la diversité des communautés de microorganismes dans les sols amendés (Figure 15).

Les paramètres microbiologiques évalués montrent une incidence négative de l'épandage des déchets urbains sur le nombre totale de *Pseudomonas fluorescent* et sur le potentiel de mycorhization. Le nombre total de bactéries augmente ainsi que la symbiose rhizobienne (Figure 16). Ces résultats indiquent des modifications liées à l'utilisation des DUS sur les groupes microbiens des sols. Les teneurs en métaux lourds sont relativement faibles par rapport aux normes internationales. Les parcelles amendées en DUS présentent une légère augmentation des teneurs en plomb et en nickel (Figure 17). Toutefois, sur les parcelles les plus amendées de l'échantillonnage, les teneurs en métaux lourds pourraient atteindre des valeurs très élevées se rapprochant des normes autorisées (Barnier, 2004).

Au-delà des propositions d'une amélioration de la gestion des déchets urbains solides utilisés en agriculture, notamment par le tri et le compostage, ces sols s'avèrent être un modèle d'étude intéressant pour évaluer l'impact de forts apports en matière organique sur des sols sableux généralement très pauvre en matière organique.

3.2 La décomposition des matières organiques dans les sols

Les processus de transformation des composés organiques sont des phénomènes complexes où interviennent divers facteurs dont les principaux sont (i) la nature des substrats organiques, (ii) les communautés microbiennes impliquées dans les processus de décomposition et (iii) les caractéristiques du milieu dans lequel se passe les processus.

Parallèlement à des études de terrain sur le recyclage de résidus organiques, j'ai participé ou réalisé des travaux sur les interactions entre la nature des matières organiques apportées au sol et les microorganismes impliqués dans leur transformation. Considérant la relation trophique étroite entre les décomposeurs et les ressources organiques consommées dans un sol comme déterminant de la disponibilité en éléments nutritifs pour les plantes et les microorganismes, deux

hypothèses ont été testées : l'une portant sur le rôle des caractéristiques biochimiques des matières organiques sur leur dynamique et l'autre a posé la question sur l'importance de la répartition spatiale entre les matières organiques consommées et les organismes consommateurs dans le sol. Cette dernière question a été abordée par un travail de modélisation individu-centrée des processus microbiens de la décomposition des matières organiques des sols.

3.2.1 Qualité des matières organiques et leur minéralisation dans les sols

Plusieurs études ont été menées à partir d'incubation de sols *in vitro* pour établir la relation entre l'apport de différents substrats organiques, les réponses microbiennes et la minéralisation de ces matières dans un sol. A partir du suivi de différents indicateurs d'activité microbienne au cours d'incubations de différents substrats, il a été montré que l'ajout d'un substrat organique stimule une activité microbienne (biomasse microbienne totale, activités deshydrogenase et β -glucosidase) dont l'amplitude initiale est déterminée par la quantité de carbone soluble contenu dans le substrat organique (Figure 18). La présence de phénols ralentit les processus microbiens au cours de cette phase d'activité microbienne plus intense (Sall *et al.*, 2003). La fraction soluble est souvent identifiée comme un compartiment facilement dégradable dans les modèles de décomposition des matières organiques. Il est cependant important de considérer les composés phénoliques qui peuvent diminuer fortement le coefficient de minéralisation de la matière organique de ce compartiment.

L'objectif de l'étude suivante fut de caractériser la dynamique des communautés bactériennes et fongiques en fonction de la qualité biochimique de résidus organiques et de la disponibilité de N minéral du sol. En conditions contrôlées ($28 \pm 0.5^\circ\text{C}$; 134 jours ; humidité du sol 100% de la capacité au champ), un sol prélevé (sol ferrugineux tropical lessivé ; 0-10cm) dans une parcelle en jachère depuis 20 ans a été incubé en présence de résidus végétaux de qualité biochimique contrastée avec ou sans azote minéral (Figure 19). Les activités microbiennes (respiration) et enzymatiques (chitinase, β -glucosidase) ont été mesurées tout au long de l'incubation. Un dénombrement des populations fongique et bactérienne ainsi que la structure génétique des populations ont également été effectués (Sall, 2004). Les activités enzymatiques ont augmenté au cours des quinze premiers jours et plus fortement en présence des siliques à haute teneur en N (Figure 19). L'ajout d'azote minéral n'a d'effet que sur l'activité β -glucosidase au cours de la première phase d'incubation alors qu'il est significatif pour l'activité chitinase en fin d'incubation (Sall, 2004). De même, la densité des bactéries et des champignons sont significativement supérieurs dans des sols en présence de résidus végétaux par rapport au sol non amendés, quelle que soit la qualité biochimique des résidus qui, elle n'a pas d'effet sur la densité microbienne. L'apport d'azote minéral a un effet positif sur la densité bactérienne pour les résidus riches en azote (SHT) alors que ce facteur a un effet négatif sur la densité des champignons dans le cas des apports de résidus pauvres en azote (SBT). La variation des activités enzymatiques au cours du temps reflète probablement une modification de la disponibilité des substrats pour les communautés microbiennes. La présence de composés facilement dégradables entraîne une augmentation de la biomasse microbienne et des activités enzymatiques et favorise la croissance de micro-organismes classés r-stratégistes comparés aux micro-organismes classés K-stratégistes qui décomposent en continue les composés récalcitrants. L'activité des chitinases présente une

corrélation positive avec les champignons, alors que l'activité des β -glucosidases est positivement corrélée aux bactéries. Ce résultat est en accord avec la croissance microbienne et la disponibilité des substrats pendant les premiers jours. La β -glucosidase hydrolyse la celliobiose et la cellodextrine pour donner du glucose, source majeur de C pour les micro-organismes.

La caractérisation des communautés microbiennes par l'approche moléculaire (DGGE) n'a pas permis d'identifier des différences majeures aux seins des populations bactériennes et fongiques. Une forte similarité est à constater entre les profils du sol non amendé et les sols amendés avec les résidus. Ce résultat inattendu est différent de ceux obtenus récemment par d'autres travaux (Dilly *et al.*, 2004). Ces auteurs ont montré respectivement une variation de la diversité fongique et bactérienne au cours de la décomposition de litières végétales. Cette contradiction avec nos résultats pourrait s'expliquer par des différences méthodologiques. En effet, l'analyse de la diversité des communautés dans ces travaux cités a été effectuée directement sur les échantillons de litières en contact avec le sol, alors que notre étude a porté directement sur du sol dans lequel les résidus broyés ont été mélangés. Dans de telles conditions, il serait possible que la succession des communautés microbiennes au cours de la décomposition ne soit pas visible directement sur le sol. Les effets des résidus sur les activités microbiennes et la population des décomposeurs sont très localisés selon le contact sol-résidu. Ainsi, Gaillard *et al.* (2003) ont évalué une zone limite de 4 à 5 mm d'influence de la résidusphère dans laquelle, la composition biochimique contrastée des résidus est à l'origine des quantités différentes de C et N qui migrent par gradient dans le sol et stimulent différemment l'activité et la croissance des micro-organismes. Cela suppose alors une hétérogénéité spatiale de la biodégradation des résidus dans le sol qu'il conviendrait de prendre en compte pour percevoir des différences majeures.

L'étude de la diversité de la structure fongique montre un effet drastique de N exogène sur les champignons. La différence entre les sols amendés et fertilisés et non fertilisés est considérable (37 % et 46 % pour les parois de siliques (SBT) et (SHT) et 36 % pour la racine). Cela indique clairement que l'addition N exogène modifie la communauté fongique. Les profils DGGE indiquent un nombre de bande moins élevé dans les amendements fertilisés que ceux non fertilisés. En conséquence, la fertilisation azotée, dans ce travail, diminue les espèces fongiques. Ce résultat est conforté par un dénombrement des champignons par CFU qui a montré moins de champignons dans les sols fertilisés. Les mécanismes à l'origine du changement de ces communautés, particulièrement les composantes fongiques, restent largement inconnus dans la littérature. Néanmoins, certains auteurs ont suggéré que la réponse des champignons à la fertilisation semble être directement liée à l'effet de N inorganique sur la croissance et l'activité des champignons (Donnison *et al.*, 2000), ou proviendrait d'une augmentation du pH du sol qui induit alors un effet osmotique toxique (Söderström *et al.*, 1983).

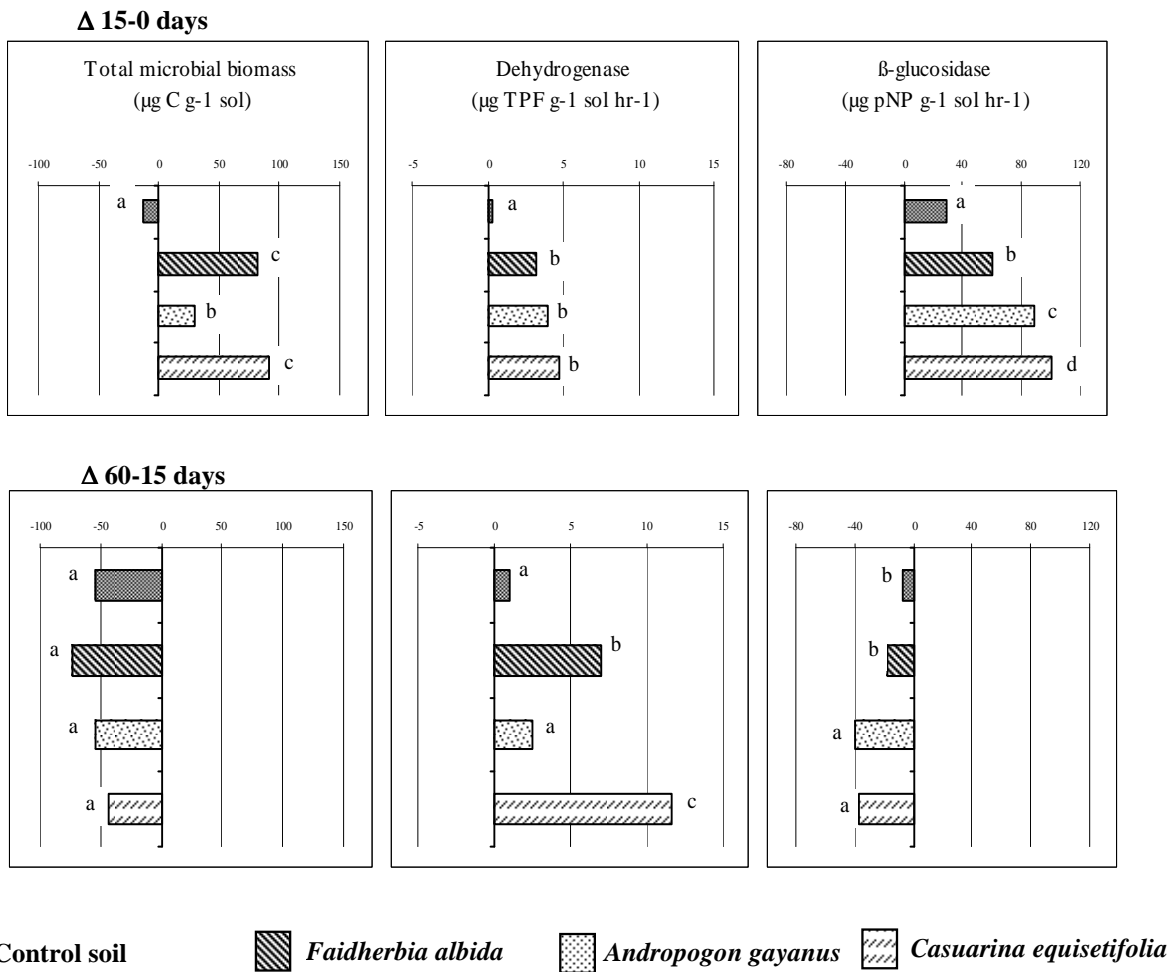


Figure 18 : Variations of total microbial biomass, dehydrogenase, and β -glucosidase activities during the 0-15 days and 15-60 days periods (Sall *et al.*, 2003).

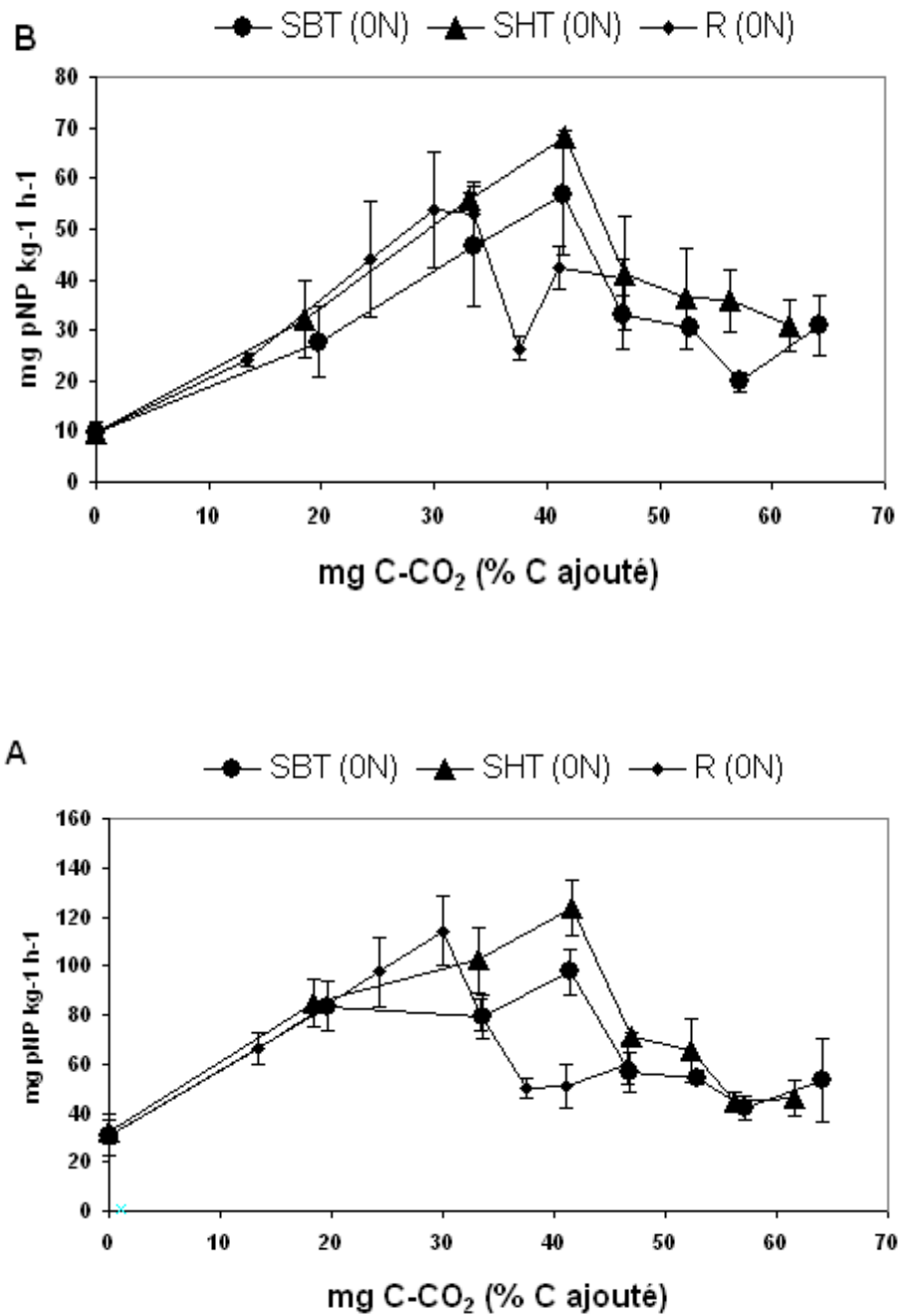


Figure 19 : Relation entre l'activité β -glucosidase (A), l'activité N-acetyl- β -glucosamidase (B) et la minéralisation du C des résidus pour les traitements sans ajout (0N) de N minéral. Les barres représentent les valeurs des écart-types. Les points correspondent à des mesures à 8, 15, 23, 34, 48, 80 et 134 jours après le début de l'incubation. R : Racine, SHT : Silique Haute Teneur en N, SBT : Silique Basse Teneur en N.

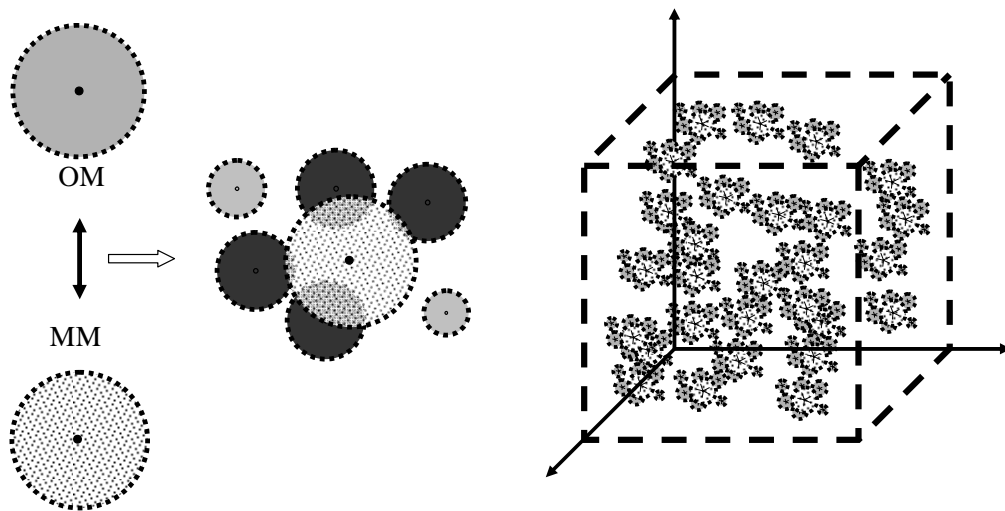


Figure 20 : MIOR individual-based model. Random distribution in space (on the right side) of objects (on the left side) assumed to be spheres representing the microorganisms MM (light gray) and the organic matter OM (mid gray). The distance between the centers of two spheres compared with the sum of the radii of these spheres is used to determine the accessibility of an MM to an OM

3.2.2 Spatialisation des processus microbiens de la décomposition des MO : simulation informatique des processus microbiens de la minéralisation des matières organiques des sols

(Extrait de la publication Masse, D., Cambier, C., Brauman, A., Sall, S.N., Assigbetsé, K. & Chotte, J.-L. 2007. MIOR, an individual-based model for simulating the spatial patterns of soil organic matter microbial decomposition. European Journal of Soil Science. Sous presse.)

Introduction

Soil is a complex system. Many biological processes take place in soil, determining functions that provide various services within ecosystems: turn-over of organic matter, symbiotic and non-symbiotic atmospheric nitrogen fixation, denitrification, aggregation, etc (Chenu & Stotzky, 2002 ; Young & Crawford, 2004). Soil is a medium with solids, liquids and gases in which the mineral and organic particles form variable sized aggregates delimiting pores (Tisdall & Oades, 1982 ; Feller & Beare, 1997 ; Six *et al.*, 2000 ; Six *et al.*, 2004). This organization creates micro-environments that are suited to microbial activity to varying extents (Chotte *et al.*, 1997). Some studies have investigated the spatial distribution of microbes in soil. Nunan *et al.* (2001) described the spatial distribution of bacteria cells in an undisturbed soil by large-scale imaging of thin sections. They confirmed the patchiness of bacteria distribution as a result of cell growth mechanisms and of environmental constraints. Grundmann & Debouzie (2000) observed the micro-scale distribution of the NH_4^+ and NO_2^- oxidizer community in a bulk soil at a micromillimeter scale. Recent studies have pointed out the importance of taking into consideration the distribution within the soil matrix of microbial activity hot spots (Gaillard *et al.*, 2003 ; Vieublé-Gonod *et al.*, 2003). Young & Crawford (2004) emphasized the importance of 3D dynamic modeling to study the structural organization of soil that has to be associated with spatial representation of the biological activity in soil (Ettema & Wardle, 2002).

Soil, therefore, must be considered not as a uniform space but as a changing pattern of "spots" characterized by microbial activity of variable intensity. The question of the extent to which this heterogeneous space affects the microbial processes involved in the various services provided by the soil to the ecosystems is fundamental.

Individual-based models or multi-agent systems have been used in many social and life science fields and more recently for environmental applications (Bousquet & Le Page, 2004). This approach offers substantial advantages for ecological modeling such as the recognition of the distinct behavior of individuals in a spatially fluctuating environment (Ginot *et al.*, 2002). Individual-based models (IBM) and multi-agents systems (MAS) allow levels of heterogeneity, i.e., microorganisms and organic substrates, and their distribution in a spatial environment to be taken into consideration. So far as we are aware, in microbiology only one IBM has been proposed. This simulated the growth of bacteria cultured in a liquid medium (Kreft *et al.*, 1998).

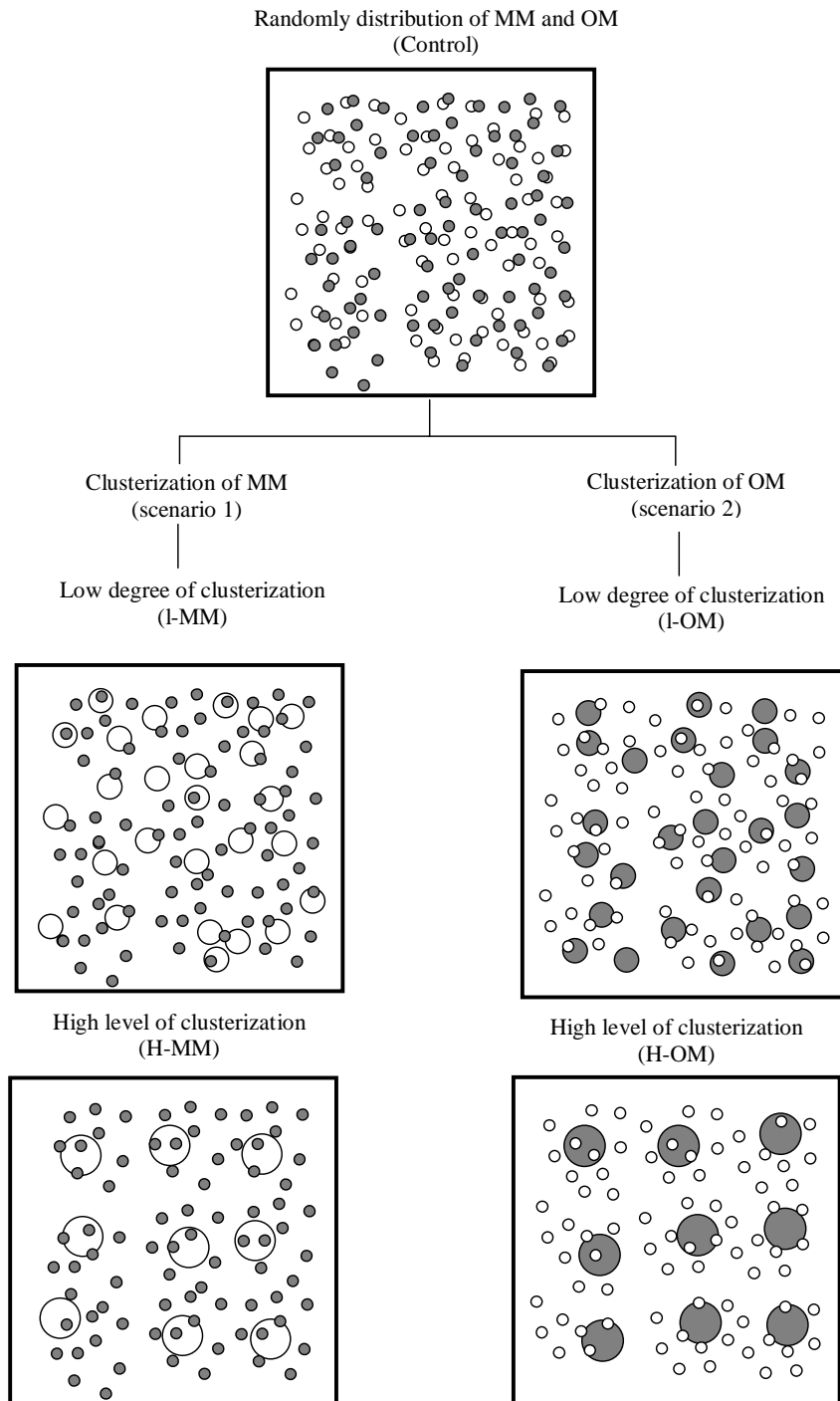


Figure 21 : Theoretical representation of the scenarios simulated. Based on a random distribution (Control) of two sets of objects MMs (white) and OMs (black), the objects are regrouped in heaps at two degrees of clusterization: l- low and H- high. Scenario 1 clusters the MMs (on the left, l-MM and H-MM) and scenario 2 clusters the OMs (on the right, l-OM and H-OM).

Experimental simulations: effect of MM or OM clustering

This paper compares the impact of MetaMior clustering or OMsphere clustering on simulated values of carbon content of MetaMior (MM-C_{content}), C-CO₂ respiration over time (500 time steps). Two different scenarios, e.g. MM clusterization (scenario 1) and OM clusterization (scenario 2) were tested. Two cases were considered for each scenario: a low degree of clusterization (denoted respectively l-MM and l-OM for each scenario), a high degree of clusterization (denoted respectively H-MM and H-OM for each scenario). Figure 21 illustrates the different level of clusterization. The total carbon and the relative occupied space of the sets of OMs and MMs was the same for each scenario. Reducing the number of objects (OMs and MMs) increased their volume (and their radius) (Figure 21).

Results

The individual dynamics of the aggregates microorganisms MMs in the model depend on the number of contacts with the organic matters entities Oms (Figure 22). This number determines the amount of carbon available to maintain their basic metabolism and then their growth needs. According to the simulation results, the dynamics of the total microbial biomass MB-C and mineralization of the OMs (Figure 23) depend on the number of MMs without any carbon resources. In the MIOR model, as these microorganisms do not have access to energy resources, they show negative growth. When organic matter is added, the smaller the proportion of organisms with access to this resource, the more the total microbial community will be dominated by the negative growth of the microorganisms without resources.

In experiments of adding organic matter carried out in laboratory or field conditions, it is quite conceivable that only a part of the microbial community has access to the organic substrates added. One single application cannot fill all the soil pores whether it is soluble or solid, whole or ground, applied to the surface or dug in. Equally, the microbial community in the soil may remain inactive either owing to local conditions that inhibit its development (anoxia, acidity, water stress, etc) or because it is located in very stable micro-structures protected from the external environment. Several studies have demonstrated that micro-structures, such as 2-50 μm micro-aggregates, protect soil microorganisms from desiccation or chemical stress such as mercury spiking (Vargas & Hattori, 1986 ; Ranjard *et al.*, 2000). Under such conditions, soil microorganisms are unaffected by organic inputs or decline. However, adding organic matter several times or any disruption of the soil may, just by chance or by changing environmental conditions, increase the probability of microorganisms encountering organic resources, as described by the dynamic aggregate model used by Six *et al.* (Six *et al.*, 2000). The MIOR model should, therefore, be modified to give a less static representation of the relationship between microbial and organic entities.

Encadré 3

The MIOR model

An individual-based model, or a multi-agent system, comprises (i) an environment that is usually a space, (ii) a set of objects situated in this environment (iii) a set of agents, which are specific objects representing the active entities in the system (iv) a set of relations that link objects (and therefore agents) together and (v) a set of operations, making it possible for the agents to perceive, produce, transform and manipulate objects (Bousquet & Le Page, 2004). In this study, the bulk soil was considered as a volume with two sets of objects (Figure 20):

- Microorganisms, referred to as MetaMior (MM),
- Organic substrates, referred to as OMsphere (OM).

The MetaMior object

Since (i) the density of the soil microorganisms is too large (between 10^6 to 10^9 cells per g of soil) (Paul & Clark, 1996) to allow a computer representation of each cell, and (ii) a microbial cell is unlikely to be found as a single cell in soils, a MetaMior (MM) corresponds to an aggregate of microorganisms. A MetaMior is characterized by its carbon content $MM-C_{content}$ and its nitrogen content ($MM-N_{content}$) which is determined by the C-to-N ratio of microorganisms (CN). Two physiological states are considered:

- A dormant state where no substrate is consumed, with cells in a resting state,
- An active state where microbial cells consume energy and nutrients to fulfil their basal metabolism and thereafter allow their growth.

Cell metabolism converts substrate into biomass and metabolites (CO_2 , inorganic N) using the equation described in the SOMKO model (Gignoux *et al.*, 2001). A dormant MetaMior (MM) becomes active when its maintenance needs are fulfilled by the presence of organic C as a source of energy. Maintenance energy encompasses all energy expenditure not directly contributing to growth. It corresponds to the respiration rate RR ($time^{-1}$) which is considered to be constant with time. It also determines the CO_2 respiration. When the source of energy (organic C) is not sufficient to support microbial growth, a fraction of the biomass, corresponding to the carbon deficit, becomes dormant. On the other hand, when the maintenance needs are satisfied, the active part of an MM is able to grow. The MM growth is limited by a potential growth rate GR ($time^{-1}$) and depends on the balance of carbon and nitrogen availability. At each time step of the simulation, the MetaMior needs for carbon and nitrogen are evaluated using the following equations:

$$- MM-C_{needs} = RR \times MM-C_{content} + GR \times MM-C_{content} \text{ (eq. 1)}$$

$$- MM-N_{needs} = CN \times GR \times MM-N_{content} \text{ (eq. 2)}$$

The OMsphere object

Organic matter (OMsphere) entities are split into several pools. Each pool is characterized by a C-to-N ratio (CN) and a decomposition rate (i.e., k). Available carbon and nitrogen for the MetaMior is calculated at each time step using the following equations:

$$- OM-C_{available} = \sum k_i C_i \text{ (eq. 3)}$$

$$- OM-N_{available} = \sum k_i C_i CN_{OMi} \text{ (eq. 4)}$$

MetaMiors (MMs) and OMspheres (OMs) are spheres randomly distributed in a continuous 3D space (Figure 1). One important attribute of an MM agent is its neighboring collections of OMs which determine the amount of C and N available for it. Two objects are neighbors if the distance between their centers is no more than the sum of the radii of their respective spheres. The radius of the sphere representing one object is calculated from its volume which is defined as the total volume occupied in the whole environment by the whole collection of these objects divided by the number of these objects. The sets of objects (e.g. MM, OM) were randomly distributed in a 3D environment (Figure 20). Their respective coordinate and the collections of neighboring objects were defined for each object.

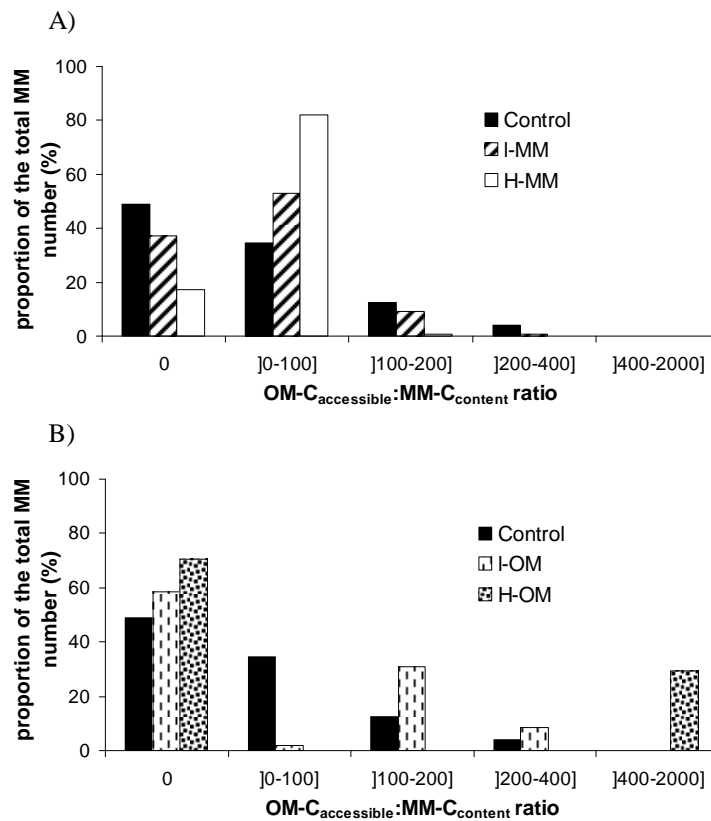


Figure 22 : Number of MMs (as a proportion of the total number of MMs) classified by the ratio C-OM_{accessible}:C-MM_{content} for A) scenario 1 (MM clusterization, I-MM, H-MM), for B) scenario 2 (OM clusterization, I-OM, H-OM) compared in each case with the distribution without clusterization (control).

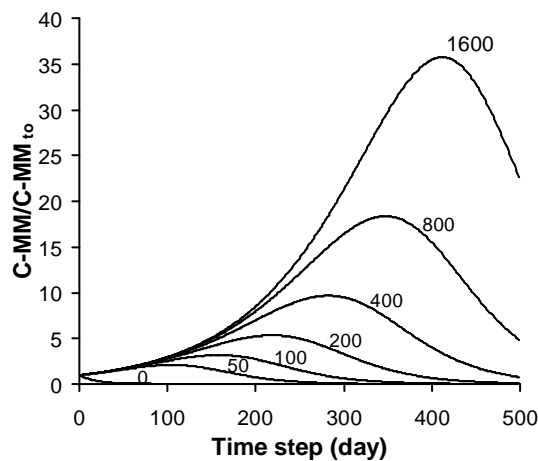


Figure 23 : Change in the microbial biomass of an MM (C-MM_{content}) expressed with respect to the initial quantity (C-MM_{to}) as a function of time for the values in ratio C-OM_{accessible}:C-MM_{content} from 0 to 1600.

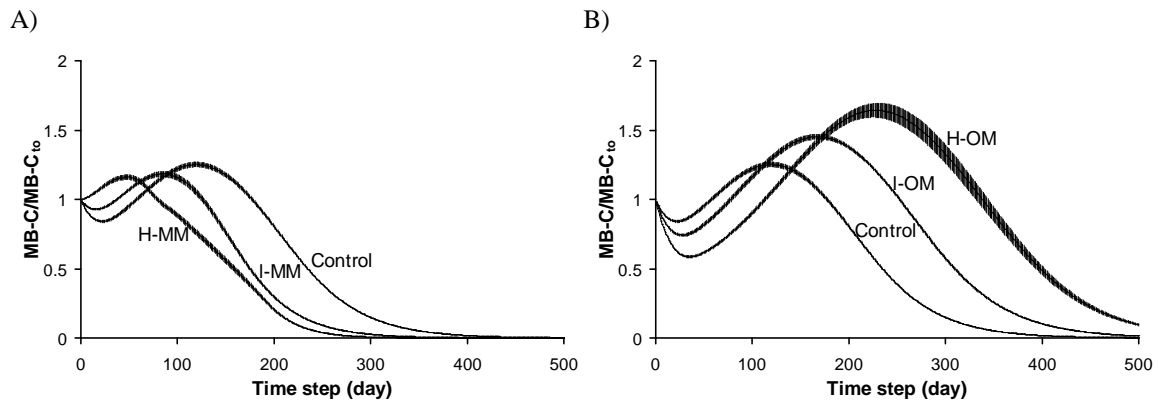


Figure 24 : Change in the microbial biomass MB-C (expressed with respect to the total initial MB-C MB-C_{to}) over time for scenarios 1 (A) and 2 (B) and the different degrees of clusterization of MMs (I-MM and H-MM) and OMs (I-OM and H-OM) compared with the distribution without clusterization (control). The bars represent the standard deviation (n=5).

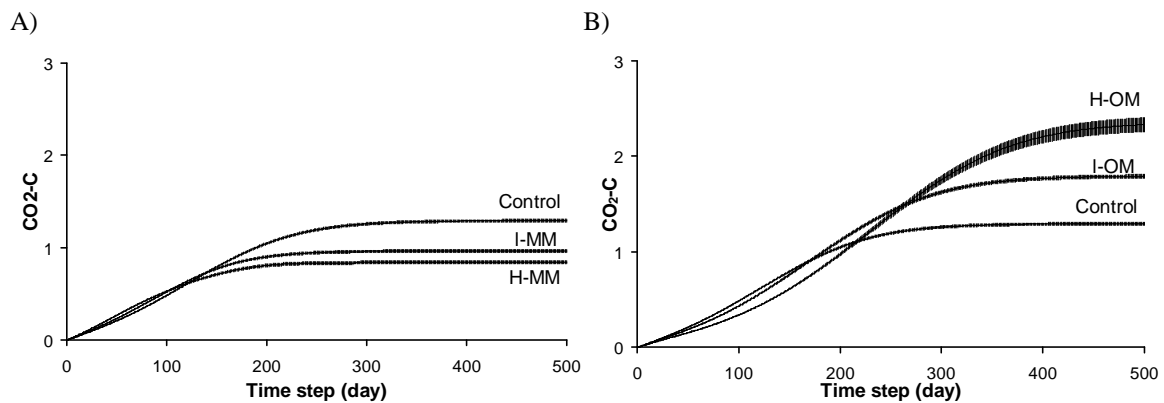


Figure 25 : Change in CO₂-C release over time for scenarios 1 (A) clusterization of MMs and 2 (B) clusterization of OMs, and the different degrees of clusterization of MMs (I-MM and H-MM) and OMs (I-OM and H-OM) compared with the distribution without clusterization (control). The bars represent the standard deviation (n=5).

The analysis of scenario 1 (clusterization of MMs) indicates that, with the same resource distribution, a concentration of microbial activity in limited areas, limits the mineralization of the organic resources in the long term (Figure 25A). Although this concentration of microbial activity allows each microorganism hot spot to access carbon and nitrogen, it implies also a reduction in the ratio between the microbial biomass and the organic resources, limiting the growth of the microorganisms. However, over the short simulation times, the differences in mineralization appear to be insignificant when the microbes are more and more concentrated into hot spots. These simulation results indicate that carbon mineralization would also depend on the size of the hot spots of microbial activity. In a study describing these hot spots in a Scottish arable field soil, Nunan *et al.* (2002) show that the surface horizon (Ap horizon) is characterized by smaller hot spots than those in the zones of activity observed in the adjacent horizon (Bt horizon). It would be interesting to confirm the hypothesis raised by the results from our simulations, comparing the mineralization processes of the addition of organic matter to undisturbed samples taken from these two horizons.

The analysis of scenario 2 (clusterization of OMs) indicates that for the same distribution of microorganisms, the increase in size and density of the organic substrates accentuates the extremes values of microbial biomass as well as the mineralization of the organic matter. In the MIOR model, the reduction in the number of OMs together with the increase in the size of OMs implies a reduction in the number of MMs with access to a resource, which explains an initial decrease in MB-C (Figure 24B). However, the limited number of MMs which have access to these resources have a larger amount of carbon available which allows better growth leading during the second phase a higher mineralization rate. Bending & Turner (1999) showed from an experimental study that the size of particles of vegetal residues incorporated into the soil affect microbial activity (CO₂ release and microbial biomass) interacting with the biochemical quality of this organic residue. The experimental values obtained by these authors are in line with the simulations produced by the MIOR model: the release of CO₂ and the microbial biomass are higher in the presence of large organic residues (0.2 to 4 cm square). Angers & Recous (1997) carried out an experiment using other organic residue (wheat straw) and reached the opposite conclusion: small residues (0.06 cm long) showed much greater mineralization than residues more than 0.5 cm long. These authors consider the determining factor to be the potential contact surface of these residues with the soil, as smaller vegetal residues appear to have a larger contact surface. These results were obtained for incubation times of about 100 days (Figure 25B). During this period, our simulation results using MIOR also showed higher mineralization for small OMs (Control). It would be of interest to extend the incubation times to see whether the mineralization of relatively larger residues increased in the long term, as would appear to be confirmed by the work of Angers and Recous (1997).

This theoretical work shows that the OM mineralization is modified when the spatial distribution of organic matter or microorganisms changes. The MIOR model used to simulate exchanges of carbon and nitrogen between entities representing microorganisms and organic substrates indicates that the change in size and number of these objects disrupts the dynamics of the microbial biomass and the amounts of CO₂ respired. The number of contacts between microbial communities and their substrate determine the dynamics of the decomposers and the

dynamics of the substrate decomposition products. This parameter will naturally be a function of the specific surface of a residue and the size of the microbial activity spots as well as their relative distribution in space. The number of microorganisms that do not have access to any organic resource has a significant effect on the microbial activity in a soil.

4 Perspectives de recherche.

4.1 Contexte et objectif des travaux de recherche poursuivis

De la nécessité d'utiliser des matières organiques dans les agrosystèmes...

Dans les sols, les matières organiques sont à la fois un déterminant de la production agricole (source d'éléments nutritifs pour les plantes) mais ont également un rôle environnemental (par son implication dans les cycles biogéochimiques). L'organisation des systèmes de production agricole d'Afrique sub-saharienne et plus généralement des pays en voie de développement est basée en grande partie sur une gestion des matières organiques produites sur le terroir. Les changements d'usages accompagnés des changements climatiques agissent sur les équilibres établis par les pratiques de recyclage des matières organiques dans les terroirs rendant ainsi vulnérables ces systèmes. Pour assurer durablement une sécurité alimentaire et contribuer au développement de l'agriculture des pays du Sud, il apparaît essentiel de faire évoluer les pratiques agricoles pour augmenter la productivité des sols et celle du travail. Concernant la gestion de la fertilité des sols, ces pratiques doivent inclure l'usage de matières organiques en tant que fertilisant ou amendement dans les systèmes de culture. Ceci n'exclue pas l'utilisation des intrants chimiques qui demeure nécessaire à l'augmentation significative des productions agricoles des pays en voie de développement. Cependant, pour faire face à des problèmes de coûts élevés des intrants, et de préservation de l'environnement, les innovations agricoles en terme de fertilisation ou d'amendement doivent conduire à une utilisation optimale des intrants chimiques. L'apport des matières organiques dans les sols tropicaux cultivés peut résoudre cette équation.

Des modes d'usage des matières organiques dans les pratiques agricoles...

Les matières organiques qui participent à la gestion de la fertilité biophysique et chimique des sols dans les terroirs agricoles concernent pour l'essentiel les résidus de récolte ou de défriche (y compris les systèmes racinaires des plantes cultivées ou présentes dans les jachères), les déjections animales déposées directement sur les sols ou redistribuées à partir des zones de parcs, enfin les déchets domestiques des villages. En périphérie des villes, les déchets urbains d'origine domestique ou industrielle peuvent être disponibles. Les techniques d'usage de ces différentes matières en tant que fertilisant ou amendement sont également variées. Ainsi, avant leur application, ces matières organiques exogènes (MOE) peuvent subir des transformations plus ou moins avancées. Le compostage est l'une des pratiques les plus préconisées dans les projets de développement agricole. Cependant, force est de constater que ces dernières techniques ne se sont pas généralisées dans le monde agricole des pays en voie de développement. L'une des raisons avancées de cet échec est tout particulièrement l'inadaptation des MOE produites aux besoins des paysans et de leurs systèmes de culture. Si les processus et les techniques de compostage semblent bien documenter et maîtriser, il n'en va pas de même de l'évolution des MOE dans le sol et leur impact sur la production agricole ou les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols. Les connaissances actuelles en région tropicale apparaissent souvent empiriques voire acquises par des recherches agronomiques ne prenant pas en compte la complexité des sols et notamment son fonctionnement biologique.

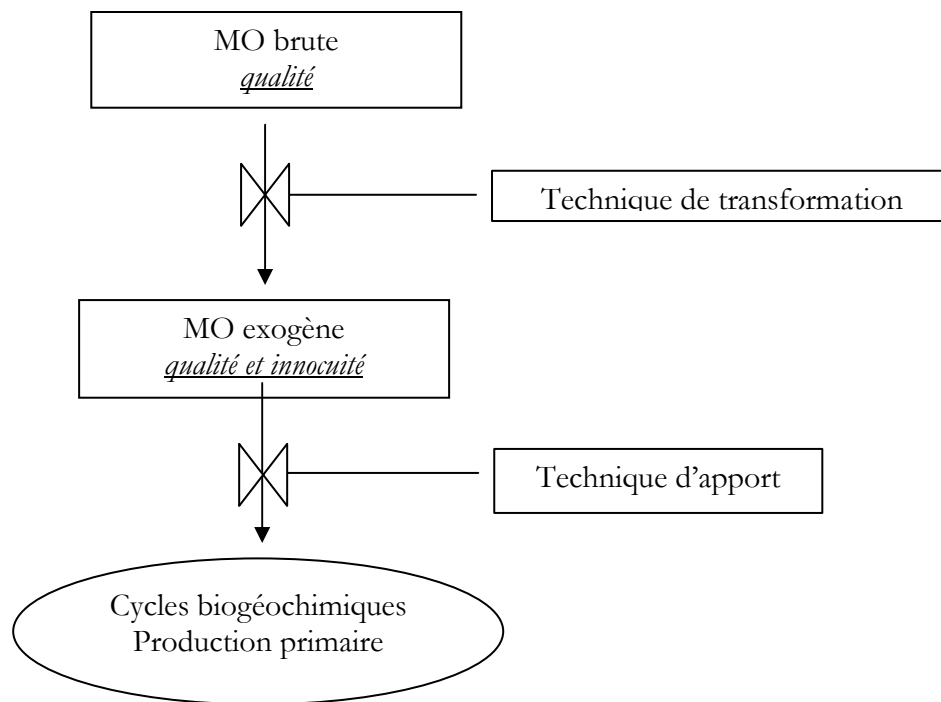


Figure 26 : Schéma d'amélioration des techniques agricoles basée sur la valorisation de matières organiques dans les sols en tant que fertilisant ou amendement.

Le projet de recherche que je poursuis concerne les matières organiques exogènes (MOE) utilisées dans les sols tropicaux cultivés. L'étude de leur dynamique dans les sols doit permettre d'élaborer des référentiels techniques pour une utilisation adaptée des MOE en tant que fertilisant ou amendement dans les systèmes de production agricole des pays en voie de développement.

L'introduction de MOE dans des sols cultivés a pour objectif de synchroniser les besoins nutritifs de la plante cultivée avec les éléments libérés par la minéralisation de ces matières organiques tout en préservant leur participation au maintien des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols (Woomer & Swift, 1994). Les processus de transformation des composés organiques dans les sols sont des phénomènes complexes où interviennent divers facteurs dont les principaux sont (i) la nature des substrats organiques, (ii) les communautés microbiennes impliquées et (iii) les caractéristiques du milieu dans lequel se déroule les processus. Ces facteurs interagissent dans l'espace et le temps à de multiples échelles de l'agrégat à l'écosystème ou l'agro-écosystème. La hiérarchisation entre ces différents facteurs explique la variabilité de la dynamique des matières organiques entre différents écosystèmes (Lavelle *et al.*, 1993). Pour améliorer les services rendus (fertilisation, amendement) par une matière organique exogène apportée dans un sol cultivé, on pourra donc agir sur ces différents facteurs, ce qui d'un point de vue technique consiste à transformer la qualité des MOE, par exemple par le compostage, et/ou adapter les techniques d'application des MOE dans les sols cultivés (Figure 26).

Si la question de l'effet des caractéristiques physiques et biochimiques des matières organiques sur leur dynamique dans les sols est largement étudiée, les modes d'application dans les sols de ces matières fertilisantes ou amendantes le sont beaucoup moins. Mes travaux se concentreront sur cette dernière question.

4.2 La variabilité spatiale des déterminants du biofonctionnement des sols tropicaux : quelques éléments bibliographiques.

A l'échelle des écosystèmes ou agrosystèmes, on peut observer à partir des zones d'habitation des gradients de fertilité et de rendements agricoles. Cette variabilité n'est pas liée à des différences intrinsèques des sols mais à une redistribution des ressources organiques disponibles sur le terroir agricole (Manlay *et al.*, 2002a ; Manlay *et al.*, 2002b ; Manlay *et al.*, 2002c ; Samake *et al.*, 2005 ; Tiftonell *et al.*, 2005a ; Tiftonell *et al.*, 2005b ; Giller *et al.*, 2006). Manlay *et al.* (2004a) s'interrogent sur l'effet de ces flux de matières organiques sur la viabilité des agrosystèmes en zone de savanes tropicales. Ces différents travaux montrent que le gradient de fertilité des sols est accentué dans les zones les moins peuplées. En effet, les agriculteurs ont dans ces régions un accès difficile à des ressources (intrants, main d'oeuvre) concentrent alors leur effort sur une partie des sols de leur exploitation. Si la disponibilité en amendements organiques est restreinte, une attribution particulière sur certaines parcelles telles que les champs de case aura pour conséquence une diminution des quantités de matière organique du sol des autres parcelles. Au-dessous d'un certain seuil de teneur en matière organique dans les sols, l'application de certaines ressources, en fertilisant ou en travail, est moins efficace en terme de production. Une fois ce seuil atteint, il est alors préférable de concentrer les ressources organiques sur les sols de

meilleure qualité (Giller et al., 2006). Il est clair que la disponibilité en ressources en fertilisants ou amendements organiques ou minérales interagit avec des contraintes socio-économiques, tels que le travail, avec pour conséquence une variabilité spatiale de la fertilité des sols. A l'inverse, il est nécessaire de tenir compte de la variabilité spatiale ou des gradients de réponse des sols aux fertilisants pour déterminer la meilleure stratégie de répartition des ressources organiques ou de fertilisants à l'échelle du terroir (Rowe *et al.*, 2006 ; Tiftonell *et al.*, In press). La création de ces «lots de fertilité» serait la résultante d'un environnement marqué par le manque de ressources à la fois biophysiques et économiques comme on le retrouve dans les terroirs agricoles au Sud du Sahara (Tiftonell et al., 2006).

A l'échelle d'une parcelle cultivée ou d'une formation naturelle, la variabilité spatiale des espèces végétales, animales, et les propriétés physiques ou chimiques des sols est étudiée et souvent expliquée par la corrélation spatiale entre ces différents éléments (Goovaerts & Chiang, 1992 ; Roy & Singh, 1995 ; Sierra, 1996 ; Wijesinghe & Hutchings, 1999 ; Corre *et al.*, 2002 ; Carvalho *et al.*, 2003 ; Franklin & Mills, 2003 ; Treves *et al.*, 2003 ; Stark *et al.*, 2004 ; Han *et al.*, 2007). Ces études sont généralement menées grâce à des outils statistiques qui ont été développés permettant de modéliser la variabilité spatiale et de la cartographier (Legendre & Fortin, 1989 ; Goreaud *et al.*, 2002 ; Griffith & Peres-Neto, 2006 ; Perry *et al.*, 2006). En écologie, de nombreuses études ont cherché à expliquer la diversité et la variabilité spatiale des peuplements végétaux. Les interactions dans l'espace entre les différents compartiments ou acteurs déterminent la biodiversité des peuplements végétaux (Tilman & Downing, 1994 ; Goreaud *et al.*, 2002 ; Loreau & Holt, 2004 ; Wijesinghe *et al.*, 2005). Dans les savanes de Côte d'Ivoire, la production primaire des savanes sur des sols naturellement peu fertiles d'un point de vue physico-chimiques s'expliquerait par la concentration spatiale des éléments nutritifs et la faculté des plantes à exploiter efficacement ces zones grâce à des stratégies d'exploration du sol par le système racinaire (Abbadie *et al.*, 1992 ; Mordelet *et al.*, 1996). Les macro-organismes telles que les termites ou les vers de terre créent des structures biogéniques qui sont des zones où les facteurs agissant sur la minéralisation des matières organiques sont modifiés (Lavelle, 1997 ; Brussaard, 1998 ; Fall *et al.*, 2004). Le maintien de la diversité de ces structures est un gage de durabilité dans les écosystèmes (Lavelle *et al.*, 2001). De même, les racines ou les résidus organiques modifient localement les conditions environnementales pouvant stimuler ainsi des processus ou des activités biologiques particulières (Founoune *et al.*, 2002 ; Kuzyakov, 2002 ; Cheng *et al.*, 2003 ; Gaillard *et al.*, 2003 ; Assigbetsé *et al.*, 2005 ; Marschner & Timonen, 2005 ; Personeni *et al.*, 2005).

A l'échelle de l'agrégat de sol, la variabilité spatiale de l'activité microbiologique ont été décrites sur des échelles centimétriques voire millimétriques (Grundmann & Gourbiere, 1999 ; Grundmann & Debouzie, 2000 ; Grundmann *et al.*, 2001 ; Nunan *et al.*, 2001 ; Nunan *et al.*, 2002 ; Vieublé-Gonod *et al.*, 2003 ; Vogel *et al.*, 2003). Les agrégats de sol et leur dynamique dans le temps sous l'action de différents facteurs extérieurs comme le climat (gel et dégel, humidification et dessiccation), le travail du sol déterminent l'accessibilité des matières organiques aux microorganismes. Six *et al.* (2000) considèrent ces mécanismes comme le moteur des processus de décomposition ou de stockage des matières organiques dans les sols. De même, Schimel & Bennett (2004) indiquent que le cycle de l'azote dans les sols est lié à l'organisation de microsites

caractérisés par des dynamiques locales particulières. Les relations entre ces sites dans l'espace sont un des facteurs essentiels du fonctionnement global d'un sol.

Des pratiques agricoles basées sur une localisation des apports organiques

Les pratiques culturelles traditionnelles dans les régions sub-sahariennes exploitent des effets de localisation des apports organiques. Les zones de parcage d'animaux sur les champs cultivés au cours de la saison sèche sont des zones de plus forte productivité qui peuvent se maintenir sur plusieurs années (Powell *et al.*, 1996). Les agriculteurs ne cherchent pas à étaler ces apports sur l'ensemble de la parcelle mais préfèrent concentrer annuellement les apports sur une petite surface. Les études que nous avons menées au Burkina Faso montrent que pour avoir une persistance sur plusieurs années d'un arrière effet de ces apports organiques, il est nécessaire d'apporter de grande quantité de matières organiques par unité de surface (Freschet *et al.*, in press). Dans la même région du Yatenga, des pratiques combinant un contrôle des eaux de ruissellement et des apports localisés de matières organiques se sont développés au cours de ses vingt dernières années. Ces techniques appelées localement « zaï » ou « djengo » ont permis aux paysans non seulement de récupérer des terres au sol difficilement cultivable, mais également de diminuer les risques de perte de production liées à des pluviosités aléatoires (Roose & Barthes, 2001 ; Kaboré, 2005). A Madagascar, des agriculteurs pratiquent des apports organiques localisés pour fertiliser des plants de tomate. Ils alternent dans l'espace et annuellement des apports relativement conséquents leur permettant selon leur propos d'augmenter non seulement la production mais de constituer un sol durablement fertile à partir de sols naturellement peu productifs (Ndienor, 2006).

4.3 Le projet de recherche : hypothèse de travail

La variabilité spatiale est donc une évidence en écologie et plus particulièrement pour le fonctionnement des sols. Sa prise en compte est nécessaire pour définir les facteurs qui maintiennent et régulent la biodiversité des sols, influencent la structure des communautés végétales et leur production (Ettema & Wardle, 2002). En d'autre terme, l'organisation spatiale dans un sol des ressources organiques ou minérales et des organismes vivants de cette ressource (faune et flore du sol, plantes) ne doit pas être considérée uniquement comme une conséquence du fonctionnement écologique mais également comme un déterminant des services écosystémiques rendus par les sols, notamment sa capacité à supporter une forte productivité végétale, ou à résister à des contraintes extérieures liées à des changements d'usage ou climatique. Ceci sera d'autant plus vrai que les sols sont naturellement pauvres en ressources organiques et minérales. Par conséquent, pour améliorer des systèmes de culture ou pour restaurer des sols dégradés, les nouvelles pratiques basées sur des apports organiques exogènes doivent prendre en compte l'organisation spatiale des différentes composantes qui déterminent la biodisponibilité des éléments nutritifs pour les plantes.

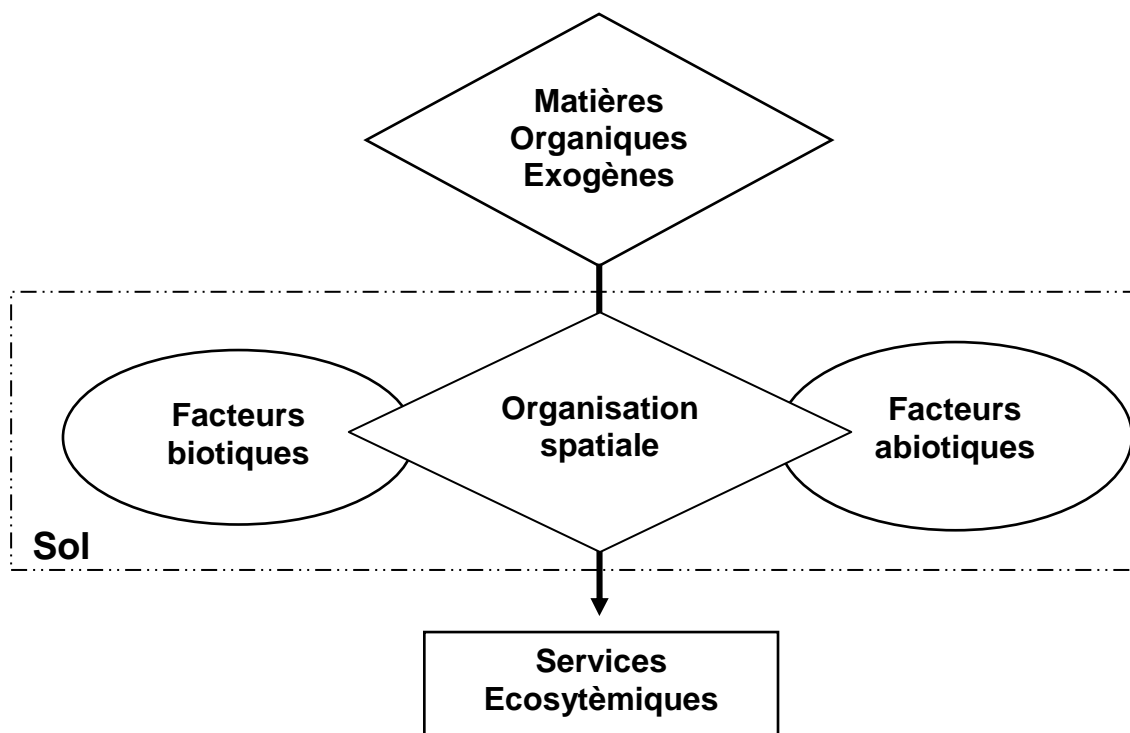


Figure 27 : Schéma hypothétique de recherche pour l'amélioration des pratiques agricoles pour les services écosystémiques rendus par les sols. Contrôler les matières organiques entrantes et l'organisation spatiale des interactions entre facteurs abiotiques et biotiques dans les sols permet de piloter les services écosystémiques rendus par ces sols.

L'hypothèse générale proposée est que **l'organisation spatiale du fonctionnement biologique des sols est un paramètre de contrôle de la dynamique des matières organiques et de la production primaire dans les sols naturellement pauvres en ressources minérales et organiques. Corollairement, pour maintenir durablement les services écosystémiques rendus par ces sols, il est nécessaire de générer cette variabilité spatiale par des techniques agricoles appropriées (travail du sol, gestion des apports organiques et minéraux)** (Figure 27).

4.4 Les travaux de recherche proposés

Mes activités de recherche s'appuieront sur l'étude et l'amélioration des pratiques agricoles d'apports organiques pour fertiliser ou amender les sols, et des travaux sur l'organisation spatiale à différents niveaux d'échelle (l'agrégat, le peuplement végétal cultivé ou naturel, le système agraire ou le bassin versant) par la modélisation informatique.

4.4.1 Les pratiques agricoles d'apports organiques dans les systèmes de production agricole

Pour « piloter » les services écosystémiques des sols dans les systèmes de production agricole tropicaux, les deux facteurs sur lesquels on peut agir sont les matières organiques exogènes disponibles et les pratiques d'apport de ces matières. Les études sur les interactions entre les caractéristiques physiques et biochimiques des MOE et les pratiques d'apport seront privilégiées.

Caractérisation et valeur agronomique des matières organiques exogènes

De nombreux indicateurs sont utilisés pour définir la valeur agronomique d'une matière organique. Des tests au champ dans les conditions proches des systèmes de culture demeurent les plus appropriés. Cependant il est nécessaire d'avoir des indicateurs analytiques permettant d'évaluer rapidement les potentialités agronomiques ou environnementales d'une matière organique introduite dans un sol, voire au cours de son évolution dans un processus de transformation comme le compostage. La composition chimique ou des tests biologiques en condition contrôlée constituent un ensemble de méthodes qui permettent de classer les matières organiques en fonction de leur évolution dans les sols (Francou, 2003 ; Houot *et al.*, 2004). Plus récemment, les analyses spectrales, dans le proche et le moyen infra-rouge (SPIR, SMIR), apparaissent comme des outils prometteurs pour caractériser rapidement et à faible coût ces produits, ce qui peut s'avérer intéressant pour les pays en développement (He *et al.*, 2000 ; Shepherd *et al.*, 2003 ; Shepherd & Walsh, 2007). Ces travaux contribueront à l'établissement de normes qualitatives des matières organiques utilisables en agriculture comme fertilisant ou amendement. Ces normes n'existent pas dans les pays tropicaux ou sont issues des travaux réalisés en milieu tempéré et dans les agricultures des pays du Nord.

Qualité biochimique des matières organiques exogènes et biodisponibilité en éléments nutritifs

L'objectif est de définir les caractéristiques biochimiques d'une matière organique adaptées à une plante cultivée et aux techniques agricoles qui lui sont appliquées. Les questions

portent donc sur les relations entre la composition biochimique des matières organiques introduites dans les sols et les cycles des éléments nutritifs pour les plantes. Ces relations sont largement étudiées pour les matières organiques produites dans les systèmes végétaux naturels telles que les litières, voire les résidus de récolte. Le compostage est une pratique qui permet d'accélérer la minéralisation de matières organiques, d'assainir des résidus organiques issus par exemple de l'élevage ou de l'industrie. L'impact de matières organiques complexes produites par compostage sur la dynamique des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols demande à être approfondie. Des expérimentations seront menées pour préciser les dynamiques minérales, physiques et biologiques dans les sols avec l'apport de différentes matières plus ou moins complexes. Il sera tenu compte des interactions entre la qualité des matières organiques et l'activité microbienne des sols.

Pratiques d'apports localisés de MOE

L'objectif est de comprendre l'effet d'apports localisés de matières organiques au niveau du système sol-plante. Apporter localement une matière organique revient à augmenter la quantité de matière organique apportée par unité de surface. La question porte alors sur l'effet sur le sol et son fonctionnement d'une concentration croissante de matières organiques exogènes (MOE). Les hypothèses à tester se résument ainsi : selon leur qualité biochimique, l'apport de MOE dans le sol en grande quantité implique une entrée importante de matières organiques facilement minéralisables et d'éléments nutritifs. Ces entrées modifient des propriétés physico-chimiques des sols et des activités biologiques des sols (diversité, agrégation). La décomposition des matières organiques difficilement minéralisables est accélérée (priming effect). L'arrière effet de l'apport des MOE est important. L'effet environnemental de l'apport de MOE (par exemple la séquestration du carbone, ou la diminution de la vulnérabilité des sols à une perturbation) s'ajoute à l'effet sur la production végétale. Des expérimentations au champ, en pot ou in vitro seront menées pour répondre à ces différentes hypothèses.

Les zones périurbaines : sites d'étude privilégiés

Dans un premier temps, ces travaux seront réalisés dans le cadre de la problématique de développement des agricultures urbaines et périurbaines. Ces agricultures apparaissent essentielles dans le développement des pays du Sud. L'urbanisation croissante crée une forte demande en produits alimentaires, mais produit de grandes quantités de déchets qu'il convient de gérer. Cette agriculture, pourvoyeuse potentielle d'emplois et de richesses, apparaît très diversifiée bénéficiant de la proximité des marchés de vente de produits agricoles mais également de fourniture d'intrants. Elle attire ainsi également les moyens humains et des capacités d'investissements. Ces systèmes de production sont en forte mutation et il convient de les appuyer par des recherches pour faciliter leur développement tout en maîtrisant leurs impacts environnementaux. Scientifiquement, les systèmes agraires en zone urbaine ou périurbaine constituent donc des champs d'investigation intéressants pour mener ces études sur les pratiques de fertilisation ou d'amendement à base de produits organiques, et au-delà offrent des modèles de terrain variés pour comprendre les processus de transformation des matières organiques dans les sols.

Deux thèses, que j'ai initiées et que j'encadre, sont en cours sur la valorisation agricoles des déchets urbains, l'une à Ouagadougou (Encadré 4) et l'autre à Antananarivo (Encadré 5). Ces

deux thèses permettront d'inventorier les ressources organiques utilisées ou disponibles pour l'agriculture autour de ces deux villes de pays du Sud. A Ouagadougou, on s'attachera plus particulièrement à tester les hypothèses concernant les modes d'apports de matières organiques en fonction de leur qualité. A Antananarivo, sera testé l'effet de la qualité des apports organiques sur les propriétés des sols. Ces thèses seront réalisées dans le cadre d'un programme Corus2 (financement Ministère des Affaires Etrangères).

4.4.2 Organisation spatiale des ressources organiques et productivité: simulation informatique individus centrée.

Je poursuivrai mes travaux sur la dynamique des matières organiques dans les sols ainsi que celles des ressources organiques à l'échelle des terroirs, en implémentant les différents simulateurs informatiques déjà mis en œuvre : le modèle MIOR et le modèle MIROT.

Le modèle MIOR a permis d'aborder d'un point de vue théorique l'effet de la répartition spatiale relative d'entités organiques et microbiennes. Cependant, cette première tentative de simulation individus-centrée du fonctionnement microbien d'un sol et de la dynamique des ressources organiques a montré des limites et des voies de développement futur. L'une des contraintes majeures a été l'impossibilité de simuler un très grand nombre d'entité, comme les bactéries, nous obligeant à créer un niveau d'agrégation des microorganismes. Cependant, ces méta-agents n'ont pas de représentation réelle nous limitant notamment dans le développement de modèles expérimentaux pour valider les résultats obtenus par le modèle MIOR. Il est donc nécessaire de travailler avec les informaticiens pour avoir la possibilité de simuler des grands nombres d'entités informatiques. Une autre possibilité d'évolution du modèle MIOR est de simuler des entités qui interagissent à des différents niveaux d'échelle. Il est ainsi possible d'inclure des niveaux trophiques supérieurs tels que par exemple les nématodes bactérivores ou les ingénieurs du sol. Enfin, l'association au modèle MIOR d'une représentation de la structure physique du sol est proposée ; est ainsi proposé un modèle fractal de la structure du sol dans lequel serait simulé le modèle MIOR (Cambier, Perrier et al, en cours).

Le modèle MIROT de simulation des flux de carbone et des ressources organiques à l'échelle d'un terroir agricole n'a pas encore fourni de résultats probants. Un nouveau développement informatique est en cours qui proposera un modèle informatique générique permettant de créer son propre simulateur adapté au terroir étudié (Thèse de M Belem). A partir de ces simulateurs on testera alors l'effet de la gestion des ressources organiques à l'échelle de la parcelle sur les flux de carbone qui régissent la viabilité de l'agrosystème.

Ces études à différents niveaux d'échelle spatiale et temporelle par la simulation informatique permettront de tester l'invariabilité des règles qui régissent la dynamique des ressources organiques de l'agrégat au système agricole. Ces questions s'inscrivent dans le cadre théorique des sciences de la complexité dans lequel je me positionne.

Encadré 4

THÈSE DE Wind-Tinboma Théodore KABORE
Université de Ouagadougou.
2007-2009

VALORISATION DES DECHETS URBAINS DANS LES SYSTEMES DE PRODUCTION AGRICOLE AU BURKINA FASO. RELATION ENTRE LA QUALITE BIOCHIMIQUE DES COMPOSTS ET LEUR UTILISATION EN AGRICULTURE

Cette thèse se propose de contribuer à l'amélioration du recyclage des déchets urbains solides par compostage. Pour cela, il est question d'améliorer la qualité des composts issus du traitement des déchets urbains solides et d'adapter, à ces propriétés, les techniques agricoles dans les systèmes de culture en Afrique Sub-Saharienne.

En particulier, ce projet établira les relations entre la qualité physico-chimique et biologique des composts issus du traitement des déchets urbains solides, le mode d'utilisation de ces résidus organiques par les paysans et les effets sur les sols en terme de biodisponibilité des éléments minéraux nutritifs et de modification des propriétés physico-chimiques des sols.

Les recherches proposées s'articulent autour de trois questions et hypothèses principales :

1 Inventaire et caractérisation des pratiques paysannes d'utilisation de résidus organiques en zone rurale et péri-urbaine.

Hypothèse: les agriculteurs ont des critères descriptifs de la qualité des résidus organiques qu'ils utilisent dans leur système de culture. Ces descripteurs d'ordre physiques (texture apparente, odeurs, couleur) et biologiques (moisissures) déterminent leur mode d'utilisation.

2 Evolution de la qualité de composts en fonction des caractéristiques des matières organiques compostées

Hypothèse: Dans un compost, l'augmentation de la proportion d'éléments organiques fortement humifiés, ainsi que les fréquences de retournement permet d'accélérer la minéralisation de déchets organiques riches en lignine et cellulose, et détermine la qualité chimique et biochimique du compost final.

3 Techniques d'apports des composts en fonction de leur qualité biochimique.

3.1 Dynamique en fonction de l'apport concentré ou épandu

Hypothèse : Dans les sols tropicaux, les résidus organiques apportés localement dans les sols ou mélangé au sol présentent des dynamiques de minéralisation différentes. Cet effet interagit avec la qualité du compost.

3.2 Effet de la temporalité des apports de compost dans les sols cultivés en fonction de leur qualité biochimique

Hypothèse : La date d'apport au sol de résidus organiques dépend de la qualité biochimique des résidus. Le temps de résidence sur le sol augmente la biodisponibilité en éléments minéraux issus de la minéralisation des résidus organiques les plus récalcitrants grâce à l'action de la macrofaune du sol.

Les sites d'études sont situés dans la zone péri-urbaine de Ouagadougou. Des tests agronomiques sur des parcelles agricoles seront également réalisés sur des terroirs en milieu rural. L'expérimentation en milieu contrôlé accompagnera les expérimentations au champ. Les mesures concernent la qualité des résidus organiques (les méthodes spectrales seront privilégiées notamment la spectrométrie proche infra rouge), la minéralisation de la matière organique et la biodisponibilité en azote (incubations au laboratoire), la qualité des sols (activité microbienne, chimie du sol).

Les résultats attendus sont

- Connaissances sur l'effet de la qualité des matières organiques et de leur évolution dans les sols tropicaux cultivés.
- Grille d'appréciation de la qualité des composts utilisés par les agriculteurs en milieu rural et périurbain.
- Modèle de compostage et de pratiques agricoles en fonction de la qualité de résidus organiques compostés.
- Contribution au développement des méthodes spectrales d'analyse de la qualité des composts utilisés en agriculture et au Burkina Faso

Ce projet de thèse sera réalisé sous la direction conjointe de l'UFR SVT de l'Université de Ouagadougou (P Zombré) et de l'UR179 de l'IRD (D Masse). A l'encadrement sera associé l'équipe SOL de l'UMR ECG de Paris-Grignon (S Houot). Cette thèse sera réalisée en alternance entre le centre IRD de Ouagadougou, le laboratoire de l'équipe SOL de l'UMR ECG et le laboratoire SeqBio du centre IRD de Montpellier.

Le financement des activités est assuré par le projet ANR-ECCO DUSSOL et l'UR 179 de l'IRD.

Encadré 5

THESE DE Virginie Falinirina
Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo.
2007-2009

VALORISATION AGRICOLE DES DECHETS URBAINS. QUALITE DES MATIERES ORGANIQUES ET SERVICES ECOSYSTEMIQUES DES SOLS.

L'objectif de cette thèse est d'évaluer les modifications des propriétés des sols en fonction de l'apport de matières organiques. L'hypothèse testée est que la qualité biochimique des matières organiques utilisées comme apport fertilisant modifie les services rendus par le système sol-plante. Dans ce cas les services écosystémiques rendus concernent d'une part les services environnementaux (séquestration du carbone, mitigation des gaz à effet de serre) et d'autre part la fonction productive du sol à travers la production d'une plante cultivée.

Les objectifs spécifiques sont :

- évaluer la notion de qualité et la valeur agronomique des substrats organiques auprès des producteurs ;
- mettre en évidence l'influence des pratiques de tri ou de compostage des déchets sur les propriétés des résidus organiques utilisés en agriculture ;
- étudier les effets de la qualité des matières organiques sur le fonctionnement biologique du sol et la dynamique du carbone du sol.

L'approche reposera sur plusieurs phases :

- L'une sera l'enquête auprès des paysans sur l'usage des matières organiques dans leurs systèmes de culture afin de définir des éléments qualitatifs des matières organiques déjà utilisées
- Caractériser différentes matières organiques issues de tri ou de compostage des bio-déchets urbains en déterminant la teneur en éléments nutritifs pour les plantes, la vitesse de minéralisation des matières organiques et la minéralisation de l'azote. Cela permet de déterminer les valeurs amendantes (stockage de carbone dans le sol) ou fertilisante (biodisponibilité en nutriments) de ces différentes matières organiques.
- Tester les impacts sur une production végétale des différentes matières organiques : déterminer la production de biomasse en fonction des éléments qualitatifs

Les méthodes feront appel à des enquêtes en milieu paysan dans les zones périurbaines. Une expérimentation au champ sera mise en place pour tester l'impact sur le sol de l'apport de différents types de matières organiques. Trois facteurs seront testés : la qualité de la matière organique, la dose d'apport (équivalent carbone, azote ou phosphore d'un apport de fumier moyen), et la fertilisation minérale. Cette approche expérimentale au champ sera accompagnée de tests en milieu contrôlé au laboratoire (incubation) et sous serre (test de croissance en pot).

Le résultat attendu de ces travaux un modèle de classifications des fertilisants organiques en fonction de leur qualité et de leur impact sur les sols.

Cette thèse est co-encadrée par le Pr Lilia Rabeharisoa (ESSA, Université d'Antananarivo) et D Masse (IRD, Madagascar). Des séjours sont prévus pour les travaux de laboratoire sur les propriétés microbiennes des sols au laboratoire de l'UR SeqBio à Montpellier (Financement MAE et AUF).

5 Curriculum Vitae

Dominique MASSE

Ingénieur de Recherche (1^{ère} Classe) à l'Institut de Recherche pour le Développement

Date de naissance : 1 Avril 1964

Marié 3 enfants

Adresse : IRD, BP434, 101 Antananarivo, Madagascar.

Tel : + 261(0)324211590.

Fax : + 261 2236982.

Courriel : dominique.masse@ird.fr.

Http://www.mpl.ird.fr/SeqBio

Diplôme : 1981 Baccalauréat série C (Académie de Lille)
1985 Maîtrise de Biologie des Organismes et des Populations (Université Lille I)
1987 Ingénieur Agronome (ENSA Toulouse)
1992 Docteur-Ingénieur Sciences Agronomiques (INP Toulouse)

Parcours professionnel:

2006- : Ingénieur de Recherche IRD. Unité de recherche SeqBio, Madagascar

2003-2006 : Ingénieur de Recherche IRD. Unité de recherche SeqBio, responsable du chantier Burkina Faso.

2001-2003 : Ingénieur d'Etude IRD. Unité de recherche IBIS, chantier Burkina Faso.

1992-2001 : Ingénieur d'Etude ORSTOM puis IRD. Adjoint au coordonnateur régional du Projet « Jachères en Afrique de l'Ouest » ; projet réunissant 5 pays d'Afrique de l'Ouest financé par le FED.

1989-1991 : Volontaire Service National et Doctorant ORSTOM, Réhabilitation des terres dégradées, Cameroun

1987-1989 : Ingénieur au laboratoire de pédologie de l'ENSAT. Drainage des sols en Haute Garonne.

Recherches :

- Dynamique de la qualité des sols dans les systèmes à rotation culture-jachère. Amélioration des jachères de courte durée.
- Dynamique des matières organiques dans les sols. Modélisation Individus centrés des processus microbien de la décomposition des matières organiques des sols.
- Flux de carbone dans le cycle culture-jachère. Modélisation par systèmes multi-agents.
- Usage des matières organiques dans les systèmes de culture en Afrique de l'Ouest : fosses fumières et zaï dans le Yatenga.
- Gestion des déchets urbains solides en agriculture péri-urbaine. Usages agricoles de matières organiques exogènes.
- Vulnérabilité des systèmes agricoles aux changements d'usages et climatiques.

Responsable de projet de recherche

- PNSE-ACI 2001-2004. Simulation (multi-agents) du fonctionnement microbiologique des sols. Application à la dynamique des matières organiques. (01-PNSE-23). Budget 36000 €.
- ANR-ECCO 2005-2007. Recyclage des déchets urbains solides dans les zones agricoles péri-urbaines (Ouagadougou, Burkina Faso): bio-indicateurs de qualité des sols et compostage des résidus organiques. Projet n°11. Budget 37000 €
- CORUS2 2007-2010. Valorisation agricole des déchets urbains ou industriels : impact sur la qualité des sols et amélioration des pratiques culturales de fertilisation organique. Burkina Faso et Madagascar. Projet n°6049. Budget 61000 €.

Formation, encadrement, co-encadrement d'étudiants

10 thèses de doctorat, 20 diplômes DEA, Master, DESS, Ingénieur.

Principales collaborations

FOFIFA, Madagascar

Université d'Antananarivo, Laboratoire des RadioIsotopes, Madagascar

Université de Ouagadougou, département Sciences de la vie et de la Terre, Burkina Faso

Institut National de l'Environnement et de la Recherche Agronomique, Burkina Faso

Institut Sénégalais de Recherche Agronomique, Sénégal

Université Cheick Anta Diop, Sénégal

Institut d'Economie Rurale, Mali

Laboratoire d'Ecologie, Ecole Normale Supérieure, France

Laboratoire d'Informatique de Paris VI, France

UMR ECG, INRA INA PG

UMR SADAPT, INRA INA PG

UMR Bioemco, INRA CNRS ENS INA PG

6 Publications, travaux encadrés et co-encadrés, animation de projets.

6.1 Publications

6.1.1 Publications dans des revues scientifiques à comité de lecture

Rang A

1. Cadet P., Martiny B., **Masse D.**, Thioulouse J. (1995). Developpment of nematode population during fallow periods in the soudanese-sahelian region of Senegal. *Nematologica*, 41:277-356.
2. Sarr M., Agbogba C., Russell-Smith A., **Masse D.** (2001). Effects of soil faunal activity and woody shrubs on water infiltration rates in a semi-arid fallow of Senegal. *Applied Soil Ecology* 16(3):283-290.
3. Gignoux J., Abbadie L., Hall D., House J., **Masse D.**, Nacro H.B. (2001). Design and test of a generic cohort model of soil organic matter decomposition : the SOMKO model. *Global Ecology and Biogeography* 10:639-660.
4. Ndour N.Y., Chotte J.L., Pate E., **Masse D.**, Rouland C. (2001). Natural and improved fallows in tropical semi-arid zone (Sénégal) : variations in soil enzyme activities. *Applied Soil Ecology* 18:229-238.
5. Manlay R.J., Kaïre M., **Masse D.**, Chotte J.L., Ciornei G., Floret C. (2002). Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna - I. The plant components under semi-permanent cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88:215-232.
6. Manlay R.J., **Masse D.**, Chotte J.L., Feller C., Kaïre M., Fardoux J., Pontanier R. (2002). Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna - II. The soil component under shifting cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88:233-248.
7. Manlay R.J., Chotte J.L., **Masse D.**, Laurent J.Y., Feller C. (2002). Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna - III. Plant and soil components under continuous cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88:249-269.
8. **Masse D.**, Pate E., Ndiaye-Faye N. & Cadet P. (2002). Effect of fallow improvement on the nematode community in the sudanian region of Senegal. *European Journal of Soil Biology* 38:205-211.
9. Founoune H., Duponnois R., Meyer J.M., Thioulouse J., **Masse D.**, Chotte J-L., Neyra M. (2002). Interactions between ectomycorrhizal symbiosis and fluorescent pseudomonads on *Acacia holosericea*. Isolation of Mycorrhiza helper bacteria (MHB) from a Soudano-sahelian soil. *FEMS Microbiology Ecology* 1370:1-10.
10. Sall S. N., **Masse D.**, Bernhard-Reversat F., Guisse A., Chotte J-L. (2003) Microbial activities during the early stage of laboratory decomposition in tropical leaf litters: the effect of interactions between litter quality and exogenous inorganic nitrogen. *Biology & Fertility of Soil* 39:103-111.
11. Manlay R.J., Ickowicz A., **Masse D.**, Floret C., Richard D., Feller C. (2004). Carbon, nitrogen and phosphorus spatialized budget of a village territory of the West African savanna – I. Element pools and mixed-farming system structure. *Agricultural System* 79:55-81.
12. Manlay R.J., Ickowicz A., **Masse D.**, Floret C., Feller C., Richard D. (2004). Carbon, nitrogen and phosphorus spatialized budget of a village territory of the West African savanna – II. Element flows and functioning of the mixed-farming system. *Agricultural System* 79:83-107.

13. **Masse D.**, Manlay R.J., Diatta M., Pontanier R., Chotte J-L (2004). Soil properties and plant production after experimental modification of the vegetation in short-term fallows in Senegal. *Soil Use Management* 20(1):92-95.
14. Manlay R.J., **Masse D.**, Chevallier T., Russell-Smith A., Friot D., Feller C. (2004). Post-fallow decomposition of woody roots in the West African savanna. *Plant & Soil* 260:123-136.
15. Duponnois R., Paugy M., Thioulouse J., **Masse D.**, Lepage M. (2005). Functional diversity of soil microbial community, rock phosphate dissolution and growth of *Acacia seyal* as influenced by grass-, litter- and soil-feeding termite nest structure amendments. *Geoderma* 124:349-361.
16. Duponnois R., Founoune H., **Masse D.**, Pontanier R. (2005) Inoculation of *Acacia holosericea* with ectomycorrhizal fungi in a semi-arid site in Senegal : growth response and influences on the mycorrhizal soil infectivity after 2 years plantation. *Forest Ecology and Management* 207:351-362.
17. Cadet P., **Masse D.**, Thioulouse J. (2005) Relationships between plant-parasitic nematode community, fallow duration and soil factors in the Sudano-Sahelian area of Senegal. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 108(4):302-317.
18. Sall S.N. **Masse D.**, Ndour N.Y.B., Chotte J-L. (2006) Does cropping modify the decomposition function and the diversity of the soil microbial community of tropical fallow soil ? *Applied Soil Ecology* 31:211-219.
19. Bilgo A., **Masse D.**, Sall S.N, Serpantié G., Chotte J-L., Hien V. (2007) Soils properties in crop-fallow systems in Burkina Faso, West Africa. *Biology and Fertility of Soils* 43:313-320. doi: 10.1007/s00374-006-0107-4.
20. **Masse D.**, Cambier C., Brauman A., Sall S., Assigbetsé K., Chotte J-L. (2007) MIOR, an individual based model of the microbial process of soil organic matter decomposition. *European Journal of Soil Science* doi: 10.1111/j.1365-2389.2007.00900.
21. Freschet G., **Masse D.**, Hien E., Sall S.N., Chotte J-L. Long-term evolution of organic matter from manuring practice in a tropical cultivated soil and its consequences on soil ecosystem services. Accepted by *Agriculture, Ecosystem & Environment*.

Autres

22. **Masse D.**, Floret C., Pontanier R., Seiny Boukar L. (1993). Amélioration du régime hydrique des vertisols dégradés du Nord Cameroun en vue de leur réhabilitation. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, volume 28 n°2.
23. Donfack P., **Masse D.**, Seiny Boukar L. (1993). Réhabilitation d'un sol hardé d'origine vertisolique. In *Les terres Hardé. Caractérisation et réhabilitation dans le bassin du lac Tchad. Cahiers scientifiques n°11, supplément de Bois et Forêts des Tropiques. Mémoires et Travaux de l'IRA n°6*, 65-70.
24. **Masse D.**, Cadet P., Chotte J-L., Diatta M., Floret C., N'Diaye-Faye N., Pate E., Pontanier R., Thioulouse J., Villenave C. (1998). L'exploitation des jachères naturelles : un facteur compromettant son influence sur la restauration de la fertilité du milieu semi-aride au Sénégal. *Agriculture et Développement*, n°18 :31-38.
25. Cadet P., Bois J.F., Chotte J.L. Duponnois R., N'Diaye-Faye N., Floret C., Fould S, Manlay R., **Masse D.**, Mateille T., Normand P., Pate E., Plenchette C., Thioulouse J., Villenave C., Fardoux J. (2000). Recherche de méthodes de gestion des peuplements de nématodes phytoparasites par les facteurs du sol en zone soudano-sahélienne au Sénégal. *Etude et Gestion des Sols*, 7 (4) : 261-270.
26. Akpo L.E., **Masse D.**, Grouzis M. (2002). Durée de jachère et valeur pastorale de la végétation herbacée en zone soudanienne au Sénégal. *Revue Elev. Méd. Vét. Pays trop.*, 55(4) :275-283
27. Nacro H. B., **Masse D.**, Abbadie L. (2006). Effect of fallowing on soil organic matter pools and associated microbial activities in a humid savannah (Mandogara, Burkina Faso). *World Journal of Agricultural Sciences* 2:180-184.

28. Youl S., Barbier B., Moulin C-H., Manlay R.J., Botoni E., **Masse D.**, Hien V, Feller C. (in press). Modélisation empirique des principaux déterminants socio-économiques de la gestion des exploitations agricoles au sud-ouest du Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*

6.1.2 Livres ou chapitres de livre

29. Bilgo A., Serpantié G, **Masse D.**, Fournier J., Hien V. (2006) Carbon, nitrogen and fine particles removed by water erosion on crops, fallows and mixed plots in Sudanese savannas (Burkina Faso). In *Soil erosion and carbon dynamics*, E. Roose, Barthes B., R. Lal, C. Feller & B. Stewart (Eds). *Advances in Soil Science*, CRC Press (Boca Raton, Floride, USA).

6.1.3 Publications dans des actes de séminaire à comité de lecture

30. **Masse D.**, Donfack P., Floret C., Pontanier R., Seiny Boukar L. (1995). Réhabilitation de vertisols dégradés (sols « hardés ») au Nord Cameroun. In "L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait?", R.Pontanier, A. M'Hiri, N. Akrimi, J. Aronson, E. LeFloc'h. John Libbey Eurotext, Paris, p.127-137.
31. **Masse D.**, Dembélé F., LeFloc'h E., Yossi H. (1997). Impact de la gestion des feux de brousse sur la qualité des sols des jachères de courtes durées dans les régions soudaniennes du Mali. In « Soil fertility management in West African land use systems », Eds G. Renard, A. Neef, K. Becker, M. von Oppen, Margraf Verlag, Germany. p115-122.
32. Bernhard-Reversat F., **Masse D.**, Harmand J.M. (2000). Qualité des litières et décomposition en jachères naturelles ou plantées. p194-203 In : Floret, C., Pontanier, R. (Eds), *La jachère en Afrique tropicale. Rôles, aménagements, alternatives (vol I)*. Actes du séminaire international, Dakar, Sénégal, 13-16 avril 1999. John Libbey, Paris, 777p.
33. **Masse D.**, Da Conceição Silva K., Diatta M., Madinan I. (2000). Végétation des jachères de courtes durées et rendement du mil après défriche au Sénégal. p127-134 In : Floret, C., Pontanier, R. (Eds), *La jachère en Afrique tropicale. Rôles, aménagements, alternatives (vol I)*. Actes du séminaire international, Dakar, Sénégal, 13-16 avril 1999. John Libbey, Paris, 777p.
34. Akpo L.E., **Masse D.**, Grouzis M., (2000). Valeur pastorale de la végétation herbacée de jachères soudaniennes en Haute Casamance (Sud-Sénégal). p493-502 In : Floret, C., Pontanier, R. (Eds), *La jachère en Afrique tropicale. Rôles, aménagements, alternatives (vol I)*. Actes du séminaire international, Dakar, Sénégal, 13-16 avril 1999. John Libbey, Paris, 777p.
35. Manlay R., Cambier C., Ickowicz A., **Masse D.** (2000). Modélisation de la dynamique du statut organique d'un terroir ouest-africain par un système multi-agents (Sénégal). p111-126 In : Floret, C., Pontanier, R. (Eds), *La jachère en Afrique tropicale. Rôles, aménagements, alternatives (vol I)*. Actes du séminaire international, Dakar, Sénégal, 13-16 avril 1999. John Libbey, Paris, 777p.
36. Faye EH., Diatta M., **Masse D.**, Chotte JL. (2000). Le bois et la gestion des jachères soudaniennes du bassin arachidier. p451-459 In : Floret, C., Pontanier, R. (Eds), *La jachère en Afrique tropicale. Rôles, aménagements, alternatives (vol I)*. Actes du séminaire international, Dakar, Sénégal, 13-16 avril 1999. John Libbey, Paris, 777p.
37. Faye E.H., **Masse D.**, Diatta M. (2003). Systèmes de culture, facteurs socio-économiques et végétation ligneuse d'un terroir soudanien au Sénégal. In : Dugué P., Jouve Ph., (éds.), 2003. *Organisation spatiale et gestion des ressources et des territoires ruraux*. Actes du colloque international, 25-27 février 2003, Montpellier, France. Umr Sagert, Cnarc.
38. Manlay R.J., Ickowicz A., **Masse D.**, Floret C., Richard D., Feller C., (2004). Bilans spatialisés de carbone, d'azote et de phosphore d'un terroir de savane Ouest-Africaine – I. Stocks d'éléments et structure d'un système agropastoral. p178-191 In Roose E, De Noni G., Prat C., Ganry F., Bourgeon G. (Eds), *Bulletin Réseau Erosion n°23*, Montpellier, France.
39. Manlay R.J., Ickowicz A., **Masse D.**, Feller C., Richard D., (2004). Bilans spatialisés de carbone, d'azote et de phosphore d'un terroir de savane Ouest-Africaine – II. Flux

- d'éléments et fonctionnement d'un système agro-pastoral. p192-206 In Roose E, De Noni G., Prat C., Ganry F., Bourgeon G. (Eds), Bulletin Réseau Erosion n°23, Montpellier, France.
40. Bilgo A., Hien V., Serpantié G., **Masse D.**, Chotte J.L., Fournier J., Zahonero P. (2004). Matière organique et éléments minéraux déplacés par le ruissellement et l'érosion sur des parcelles expérimentales en savane soudanienne. p208-222, In Roose E, De Noni G., Prat C., Ganry F., Bourgeon G. (Eds), Bulletin Réseau Erosion n°22, Montpellier, France.

6.1.4 Mémoires, Thèse, Rapports

41. **Masse D.** (1992). Amélioration du régime hydrique des sols dégradés en vue de leur réhabilitation. Cas des vertisols du Nord Cameroun. Thèse Doct. Ing., Inst. Polytech. de Toulouse. 187p.
42. Donfack P., Floret C., Mainam F., **Masse D.**, Moukouri-Kuoh H., Oumar H., Pontanier R., Seiny Boukar L., Velche J.P. (1993). Réhabilitation et utilisation des terres marginales au Nord Cameroun. Rapport final contrat TS2007M(CD) CCE. Institut de la Recherche Agronomique, Cameroun - Orstom, France, 116p.
43. **Masse D.**, (1998). Importance de divers groupes fonctionnels sur le fonctionnement de jachères courtes, p163-201. In Raccourcissement du temps de jachère, biodiversité et développement durable en Afrique centrale (Cameroun) et en Afrique de l'ouest (Mali, Sénégal). Rapport final UE n°TS3-CT93-0220 (DG12HSMU). Union Européenne, IRD, Sénégal.
44. Manlay R., **Masse D.** (1998). Dynamique du carbone dans le cycle culture-jachère en Afrique de l'ouest, p91-104. In Raccourcissement du temps de jachère, biodiversité et développement durable en Afrique centrale (Cameroun) et en Afrique de l'ouest (Mali, Sénégal). Rapport final UE n°TS3-CT93-0220 (DG12HSMU). Union Européenne, IRD, Sénégal.
45. Derouard L., Villenave C., Lavelle P., **Masse D.** (1998). Evolution de la macrofaune du sol au cours d'un hivernage dans les jachères d'âges différents au Sénégal, p139-145 In Raccourcissement du temps de jachère, biodiversité et développement durable en Afrique centrale (Cameroun) et en Afrique de l'ouest (Mali, Sénégal). Rapport final UE n°TS3-CT93-0220 (DG12HSMU). Union Européenne, IRD, Sénégal.
46. Lepage M., David F., Laguemvare T., Trouillier A. & **Masse D.** (2003). Diversité et structure de la végétation de parcelles aménagées en zaï forestier ; 2 - Modification des propriétés biologiques et chimiques des sols aménagés en zaï agricole ; 3 - Répartition et importance des structures biogéniques de termites dans des parcelles de zaï forestier. Rapport Jachères, phase II, 6 p.
47. **Masse D.**, (2004). Synthèse des travaux menés au Burkina Faso en 2003 pour le projet Jachère phase II. Projet UE-CORAF n°7ACP RPR 269). 54p.
48. Hien V., Lepage M., Bilgo A., **Masse D.**, Traore K., Kambire L., Sangare S., (2004) Recherche sur les technologies de lutte contre la désertification au Sahel : mise au point des techniques de lutte contre la désertification et études de leurs incidences socio-économiques (Projet LCD 083). Séminaire de restitution des projets CSFD, Montpellier, 29 p.
49. Lepage M., **Masse D.**, (2004). Mise au point d'indicateurs de dégradation et de fonctionnement des milieux arides dégradés. In Evaluation, suivi et conservation de la biodiversité et maintien de la fertilité à long terme des sols sur une base sous-régionale, en Afrique de l'Ouest (Burkina Faso et Sénégal). Rapport d'activités (2003-2004). Programme des zones en marges du désert (DMP). Fonds Mondial de l'Environnement. PNUE. IRD, Ouagadougou. 71p.

6.1.5 Divers communications, posters, conférence, cours.

50. **Masse D.**, Manlay R. (1994). Influence du temps de jachère sur des paramètres physico-chimiques du sol et sur la biomasse racinaire dans les régions semi-arides du Sénégal. Séminaire International Agroforesterie, Septembre 1994, ISRA/DRPF. Dakar, Sénégal

51. Dembélé F., **Masse D.**, Yossi H. (1997). Rôle des feux de brousse sur la dynamique des adventices et sur la qualité des sols au cours des premières années de jachère, dans les régions soudaniennes du Mali. Atelier "Jachère et maintien de la fertilité des sols", 1-4 octobre 1997, Bamako, Mali, Programme Régional Jachère CORAF-FED.
52. Manlay R., **Masse D.**, Diatta M., Kaire M. (1997). Ressources organiques et gestion de la fertilité du sol sur un terroir agro-pastoral de Casamance (Sénégal). Atelier "Jachère et maintien de la fertilité des sols", 1-4 octobre 1997, Bamako, Mali, Programme Régional Jachère CORAF-FED.
53. **Masse D.**, Manlay R., Derouard L., Diatta M., Cadet P., Chotte J.L., Floret C., Pontanier R. (1998). Influence du temps de jachère sur les propriétés du sol dans les régions semi-arides du Sénégal. Identification d'indicateurs de fertilité des sols. Poster, actes du congrès mondial de science du sol, 20-26 août 1998, Montpellier, France.
54. **Masse D.**, Agniel D., Da Conceição Silva K., Faye E.H., Sogoba S., Pinabei T., Yossi H. (2000). Biomasse racinaire des ligneux dans des jachères naturelles et agro-forestières au Mali et au Sénégal. In : Floret, C., Pontanier, R. (Eds), La jachère en Afrique tropicale. Rôles, aménagements, alternatives (poster). Actes du séminaire international, Dakar, Senegal, 13-16 avril 1999. IRD, Dakar.
55. Manlay R.J., Ickowicz A., **Masse D.**, Floret C., Richard D., Feller C., (2002). Bilans spatialisés de carbone, d'azote et de phosphore d'un terroir de savane Ouest-Africaine – I. Stocks d'éléments et structure d'un système agropastoral. Communication Colloque International "Influences de la gestion de la biomasse sur l'érosion et la séquestration du carbone", Agropolis, Montpellier, 23-28 septembre 2002.
56. **Masse D.**, Chotte J-L., Pontanier R. (2002). Bio-indicators of land quality in the tropics : an attempt to integrate soil and vegetation approaches. Oral communication 17th World Congress of Soil Science, Thailand
57. Manlay R.J., Ickowicz A., **Masse D.**, Feller C., Richard D., (2002). Bilans spatialisés de carbone, d'azote et de phosphore d'un terroir de savane Ouest-Africaine – II. Flux d'éléments et fonctionnement d'un système agro-pastoral. Communication Colloque International "Influences de la gestion de la biomasse sur l'érosion et la séquestration du carbone", Agropolis, Montpellier, 23-28 septembre 2002.
58. Bilgo A., Hien V., Serpantié G., **Masse D.**, Chotte J.L., Fournier J., Zahonero P. (2002). Matière organique et éléments minéraux déplacés par le ruissellement et l'érosion sur des parcelles expérimentales en savane soudanienne. Poster Colloque International "Influences de la gestion de la biomasse sur l'érosion et la séquestration du carbone", Agropolis, Montpellier, 23-28 septembre 2002.
59. Assigbetsé K, Duponnois R., Thioulouse, J. , **Masse D.** & Chotte, J.L. (2002). La gestion de la symbiose mycorhizienne associée à des essences ligneuses: un outil pour optimiser les processus de réhabilitation des sols dégradés en milieu tropical. Les VIIIèmes Journées Scientifiques du Réseau "Biotechnologies, Amélioration des Plantes et Sécurité Alimentaire". 9-14 octobre, Marrakech, Maroc.
60. **Masse D.**, Cambier C, Brauman A, Sall S, Chotte JL (2004). Mior : simulation des processus microbiens de la décomposition des matières organiques par un système multi-agents. Atelier PNBC 26-27 février 2004 « Modélisation de la décomposition de la matière organique des sols ». Ecole Normale Supérieure, Paris.
61. **Masse D.**, Bilgo A., Chotte J-L., Diatta M., Hien V, Manlay R.J. (2005). Activités Biologiques et Matières Organiques dans les Sols des Cycles Culture-Jachère en Afrique de l'Ouest. Communication orale Séminaire International « Territoires et aridité au Nord et au Sud du Sahara. La lutte contre la dégradation des terres, bilan des acquis et nouvelles perspectives de recherche », 13 Juin 2005, Tunis, Tunisie.
62. **Masse D.** (2005). Modélisation en Agronomie et Ecologie. Conférence CRESA Niamey. Mars 2005.

63. **Masse D.** (2005). Changement d'usage des terres. Défis pour l'agriculture et la gestion des ressources naturelles. Conférence Centre Culturel Français. Exposition Sciences au Sud. 27 Septembre 2005
64. Nacro H.B., **Masse D.**, Abbadie L. (2005). Effect of fallowing on carbon sequestration in a humid tropical sandy soil (Mangodara, Burkina Faso). Proceedings of the International Congress "Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture. A Holistic Approach for Sustainable Development of Problem Soils in the Tropics", 27th November – 2nd December 2005, Khon Kaen, Thailand, FAO publication, Bangkok, pp282-285.
65. Blanchart E., Albrecht A., Bernoux M., Brauman A., Chotte J.L., Feller C., Ganry F., Hien E., Manlay R., **Masse D.**, Sall S. & Villenave C. (2007) Organic matter and biofunctioning in tropical sandy soils and implications for its management. Proceedings of the International Congress "Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture. A Holistic Approach for Sustainable Development of Problem Soils in the Tropics", 27th November – 2nd December 2005, Khon Kaen, Thailand, FAO publication, Bangkok, pp 224-241.
66. **Masse D.**, Cambier C., Brauman A., Sall S., Assigbetsé K., Chotte J-L. (2006). Modèle individu-centré des processus microbiens de la minéralisation des matières organiques dans un espace à 3 dimensions. Poster. Colloque « Les Matières organiques en France. Etat de l'art et perspectives ». INRA-CNRS-INSU-IUSS. 22-24 Janvier 2006, Carqueiranne.
67. **Masse D.** (2006). Recyclage des déchets urbains solides dans les zones agricoles péri-urbaines de Ouagadougou Bio-indicateurs de qualité des sols et compostage des résidus organiques. Communication à l'atelier de lancement du projet FSP « Recyclage des déchets urbains comme fertilisants en agriculture urbaine et péri-urbaine », INERA-IDR-Paris VI, MAE France. 18-19 Avril Ouagadougou.
68. Bernoux M., **Masse D.**, Pansu M., Manlay R., Chotte J-L. (2006). Carbon Sequestration and Soil Bio-Functioning (UR SeqBio, IRD). Modelling C & N cycles at different scales. Poster. COST 631. Prague, 20th-22nd April 2006.
69. Diagabaté A., **Masse D.**, Kaboré T., Barry M. (2006). Déterminants de la qualité de la fumure organique utilisée dans la zone soudano-sahélienne : cas du terroir de Ziga dans la Province de Yatenga au Burkina Faso. FRSIT 2006 « Valorisation et vulgarisation des résultats de la recherche, des inventions et des innovations au profit des populations ». Atelier Scientifique, 20-24 Novembre 2006. Ouagadougou, Burkina Faso.
70. Kaboré W.T., **Masse D.**, Hien E., Dugué P., Lepage M. (2007). Organic inputs and water conservation practices in Yatenga, Burkina Faso. Keys of the sustainable development of farming systems? International Conference Agricultural Innovation in Dryland Africa (AIDA) : What are the key drivers for success ? Accra (Ghana), 22 – 24 January 2007.

6.2 Travaux encadrés et co-encadrés

6.2.1 Thèses

- Dembélé Fadiala 1996. Influence du feu et du pâturage sur la végétation et la biodiversité dans les jachères nord soudanienne. Cas des jeunes jachères du terroir de Missira (cercle de Kolokani). Thèse Université Aix-Marseille. (Participation à 20%).
- Koïta Bothié 1998 Végétation postculturale en zone soudanienne du Sénégal. Thèse de Doctorat Université de Corse, Corte. (Participation à 40%).
- Sarr Makhfouss 1999. Étude écologique des peuplements de termites dans les jachères et dans les cultures en zone soudano-sahélienne au Sénégal. Thèse 3^{ème} cycle. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal. (Participation à 50%).
- Kairé Maguette 1999. La production ligneuse des jachères et son utilisation par l'homme au Sénégal. Thèse Doctorat Université Aix Marseille. (Participation à 20%).
- Manlay Raphaël 2000. Organic matter dynamics in mixed-farming systems of the West African savanna: a village case study from south Senegal. Thèse de Doctorat, ENGREF, Paris. (Participation à 30%).

- Sall Saïdou 2004. Importance des relations "Résidus végétaux-Communautés microbienne" sur les processus de décomposition dans un sol ferrugineux tropical (Sénégal). Thèse de doctorat, Université Paris XII. (Participation à 20%).
- Bilgo Ablassé 2005. Statut organo-minéral et biologique des sols dans les systèmes culture jachère naturelle de courte durée ou améliorée à *Andropogon gayanus* Kunth. Cas de Bondoukuy en zone sud soudanienne du Burkina Faso. Université de Ouagadougou, Burkina Faso. (Participation à 80%).
- Sansan Youl. Dynamique du carbone d'un terroir de savane d'Afrique de l'Ouest : approche par la modélisation multi-agent. Université Montpellier. Soutenance prévue en 2007. (Participation à 20%).
- Kaboré Théodore. Valorisation des déchets urbains dans les systèmes de production agricole au Burkina Faso. Relation entre la qualité biochimique des composts et leur utilisation en agriculture. Université de Ouagadougou, Burkina Faso. Soutenance prévue en 2009. (Participation à 100%).
- Falinirina Virginie. Valorisation agricole des déchets urbains. Qualité des matières organiques et services écosystémiques des sols. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo. Soutenance prévue en 2009. (Participation 100%)

6.2.2 DEA, DESS, Ingénieur, Licence

- Niang Abdoulaye 1995. Caractérisation pédologique des sols de jachères expérimentales dans le Sine Saloum et en Haute Casamance. Ingénieur de l'Institut des Sciences de la Terre, Université Cheik Anta Diop, Dakar, Sénégal.
- Diao Oumou 1995. Comportement des systèmes racinaires des ligneux durant le cycle culture-jachère en Afrique soudanienne. Etude sur un terroir de la région de Kolda, Haute Casamance, Sénégal. Ingénieur Ecole Nationale des Cadres Ruraux, Bambey, Sénégal.
- Diallo Mame Tacko 1995. Importance des ligneux dans des jachères naturelles et améliorées en Basse Casamance. Structure, biomasse et fertilité induite. Ingénieur Ecole Nationale des Cadres Ruraux, Bambey, Sénégal.
- Rippert Géraldine 1996. Approche de la biodiversité de la végétation de jachères expérimentales en zone soudano-guinéenne au Sénégal. DESS « Gestion des espaces agro sylvo-pastoraux en zones tropicales. Université Paris XII.
- Ndéne Simon, 1996. Jachère expérimentale et comportement hydrique du sol. Ingénieur Ecole Nationale des Cadres Ruraux, Bambey, Sénégal.
- Uguen Katell 1996. Effet de litières d'espèces ligneuses naturelles et introduites de jachère sur la disponibilité de l'azote du sol pour les plantes. DEA Ecologie Végétale, Université Paris VI, Paris.
- Niang Massamba, 1998. Jachères de courte durée et production ligneuse dans les zones soudanienne et soudano-sahélienne du Sénégal. Ingénieur Ecole Nationale des Cadres Ruraux, Bambey, Sénégal.
- Parrain Guillaume 1998. Dynamique annuelle de l'azote minéral sur des jachères de courte durée. Ingénieur ISTOM, Cergy Pontoise.
- Madinan Ida 1999. Dynamique de la matière organique au moment de la défriche de jachères de courte durée. Ingénieur ISTOM, Cergy Pontoise.
- Faye ElHadj 2000. Dynamique des souches dans le cycle culture jachère. Ingénieur Institut du Développement Rural, Bobo Dioulasso.
- Frosio Carl 2000. Appréciation paysanne de la fertilité des sols dans les systèmes agraires du Nord Cameroun. DEA Université Paris VI.
- Bassonon Sandrine 2002. Comparaison des caractéristiques biologiques et physico chimiques entre différents modes de gestion des jachères de courtes durées à Bondoukuy. Ingénieur Institut du Développement Rural, Bobo Dioulasso.

- Belem Mahamadou 2003. Modélisation informatique de systèmes complexes : le modèle MIROT de flux de carbone à l'échelle d'un terroir agricole. Ingénieur Ecole Supérieure d'Informatique de Bobo Dioulasso.
- Massa Alioune Badara 2003. Modélisation informatique de systèmes complexes : le modèle MIOR des processus microbiens de la dynamique des matières organiques dans les sols. Ingénieur Ecole Supérieure d'Informatique de Bobo Dioulasso.
- Ouédraogo Maxime 2003. Impact des herbacées sur le fonctionnement microbien du sol. Ingénieur Institut du Développement Rural, Bobo Dioulasso.
- Kaboré Théodore 2004. Evaluation des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols amendés par des déchets urbains solides. Ingénieur Institut du Développement Rural, Bobo Dioulasso.
- Barnier Christophe 2004. Impact environnemental de l'épandage des déchets urbains solides sur les cultures céréalières de la zone péri-urbaine de Ouagadougou. Licence IUP Génie de l'Environnement, Université de Metz.
- Kaboré Théodore, 2006. Usage des fumures organiques dans les systèmes de culture et viabilité des agro-systèmes en zone soudano-sahélienne : cas du zaï à Ziga dans le Yatenga (Burkina Faso). Mastère CNEARC
- Diabagaté Amadou, 2006. Déterminants de la qualité agronomique des fumures organiques utilisées en zone soudano-sahélienne. DESS, CRESA Niamey.
- Grégoire Freschet 2006. Effet résiduel de la pratique de parcage sur des services écosystémiques d'un sol tropical (Burkina Faso). Master II Fenec, AgroM Montpellier.

6.3 Animation et gestion de projet

- Projet CEE N°TS3-CT93-0220 (DG 12 HSMU) 1994-1998. Raccourcissement du temps de jachère. Biodiversité et développement durable en Afrique Centrale (Cameroun) et en Afrique de l'Ouest (Mali, Sénégal). Budget 300k€ (Adjoint du responsable du projet).
- Projet UE 7^eFED/DG VIII 1994-2001. Recherche sur l'amélioration et la gestion de la jachère en Afrique de l'Ouest. Budget 3M€. (Adjoint du responsable de projet).
- PNSE-ACI 2001-2003. Simulation (multi-agents) du fonctionnement microbiologique des sols. Application à la dynamique des matières organiques. (01-PNSE-23). Budget 36k€ Euros. (Responsable du projet).
- ANR-ECCO 2005-2007. Recyclage des déchets urbains solides dans les zones agricoles péri-urbaines (Ouagadougou, Burkina Faso) : bio-indicateurs de qualité des sols et compostage des résidus organiques. Projet n°11. Budget 37k€. (Responsable du projet).
- CORUS2 2007-2010. Valorisation agricole des déchets urbains ou industriels : impact sur la qualité des sols et amélioration des pratiques culturales de fertilisation organique. Burkina Faso et Madagascar. Projet n°6049. Budget 61000 €. (Co-responsable du projet)

7 Références citées

- Abbadie, L., Mariotti, A. & Menaut, J.C. 1992. Independence of savanna grasses from soil organic matter for their nitrogen supply. *Ecology*, 73, 608-613.
- Angers, D.A. & Recous, S. 1997. Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size. *Plant and Soil*, 189, 197-203.
- Assigbetsé, K., Gueye, M., Thioulouse, J. & Duponnois, R. 2005. Soil bacterial diversity responses to root colonization by an ectomycorrhizal fungus are not root-growth-dependent. *Microbial Ecology*, 50, 350-359.
- Barnier, C. 2004. *Impact environnemental de l'épandage des déchets urbains solides sur les cultures céréalières de la zone périurbaine de Ouagadougou*. Licence, Université de Metz, Metz.
- Bending, G.D. & Turner, M.K. 1999. Interaction of biochemical quality and particle size of crop residues and its effect on the microbial biomass and nitrogen dynamics following incorporation into soil. *Biology and Fertility of Soils*, 29, 319-327.
- Bilgo, A. 2005. *Statut organo-minéral et biologique des sols dans les systèmes culture-jachère naturelle de courte durée ou améliorée à *Andropogon gayanus* Kunth. Cas de Bondoukuy en zone sud soudanienne du Burkina Faso*, Université de Ouagadougou, Ouagadougou.
- Bilgo, A., Masse, D., Sall, S., Serpantié, G., Chotte, J.-L. & Hien, V. 2006. Chemical and microbial properties of semiarid tropical soils of short-term fallows in Burkina Faso, West Africa. *Biology and Fertility of Soils*, 1-8.
- Bousquet, F. & Le Page, C. 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling*, 176, 313-332.
- Brussaard, L. 1998. Soil fauna, guilds, functional groups, and ecosystem processes. *Applied Soil Ecology*, 9, 123-135.
- Brussaard, L. & Ferrera-Cerrato, R. 1997. *Soil ecology in sustainable agricultural systems*. CRC Press LLC, Boca Raton New York.
- Cadet, P., Bois, J.-F., Chotte, J.L., Duponnois, R., N'Diaye-Faye, N., Floret, C., Fould, S., Manlay, R., Masse, D., Mateille, T., Normand, P., Pate, E., Planchette, C., Thioulouse, J., Villenave, C. & Fardoux, J. 2000a. Recherche de méthodes de gestion des peuplements de nématodes phytoparasites par les facteurs du sol en zone soudano sahélienne au Sénégal. *Etude et Gestion des Sols*, 7.
- Cadet, P., Bois, J.-F., Pate, E., N'Diaye-Faye, N. & Floret, C. 2000b. Diversité des nématodes phytoparasites et durabilité du système culture-jachère au Sénégal. In: *La jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives* (eds C. Floret & R. Pontanier), pp. 268-282. John Libbey Eurotext, Paris.
- Cadet, P. & Floret, C. 1995. An initial study of fallow periods on the nematode community in the Soudanese-Sahelian zone of Senegal. *Acta Oecologica*, 16, 77-88.
- Cadet, P., Masse, D. & Thioulouse, J. 2005. Relationships between plant-parasitic nematode community, fallow duration and soil factors in the Sudano-Sahelian area of Senegal. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 108, 302-317.
- Carvalho, L.M., Correia, P.M., Ryel, R.J. & Martins-Loução, A. 2003. Spatial variability of arbuscular mycorrhizal fungal spores in two natural plant communities. *Plant and Soil*, 251, 227-236.
- Cheng, W., Johnson, D.W. & Fuc, S. 2003. Rhizosphere Effects on Decomposition. Controls of Plant Species, Phenology, and Fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67, 1418-1427.
- Chenu, C. & Stotzky, G. 2002. Interactions between microorganisms and soil particles: an overview. In: *Interactions between Soil Particles and Microorganisms* (eds P.M. Huang, J.-M. Bollag & N. Senesi), pp. 3-40. Wiley, New York.
- Chotte, J.-L., Duponnois, R., Cadet, P., Adiko, C., Villenave, C., Agboba, A. & Brauman, A. 2000. Jachère et biologie du sol en Afrique tropicale. In: *La Jachère en Afrique tropicale. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances* (eds C. Floret & R. Pontanier), pp. 95-121. John Libbey Eurotext, Paris.
- Chotte, J.L., Ladd, J.N. & Amato, M. 1997. Sites of microbial assimilation, and turnover of soluble and particulate ¹⁴C-labelled substrates decomposing in a clay soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 30, 205-218.
- Corre, M.D., Schnabel, R.R. & Stout, W.L. 2002. Spatial and seasonal variation of gross nitrogen transformations and microbial biomass in a Northeastern US grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 445-457.

- Degens, B.P. & Harris, J.A. 1997. Development of a physiological approach to measuring the catabolic diversity of soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 29, 1309-1320.
- Dembélé, F. 1996. *Influence du feu et du pâturage sur la végétation et la biodiversité dans les jachères en zone soudanienne-nord du Mali: Cas des jeunes jachères du terroir de Missira (Cercle de Kolokani)*, Aix-Marseille III, Aix-Marseille.
- Dilly, O., Bloem, J., Vos, A. & Munch, J.C. 2004. Bacterial diversity in agricultural soils during litter decomposition. *Applied and Environmental Microbiology*, 70, 468-474.
- Dixon, J., Gulliver, A. & Gibbon, D. 2001. *Farming Systems and Poverty : Improving Farmers' Livelihoods in a Changing World*. FAO, Rome, Italie.
- Donnison, L.M., Griffith, G.S. & Bardgett, R.D. 2000. Determinants of fungal growth and activity in botanically diverse hay meadows: effects of litter type and fertilizer additions. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 289-294.
- Ettema, C.H. & Wardle, D.A. 2002. Spatial soil ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 17, 177-183.
- Fall, F., Sarr, M., Rouland, C., Agboba, A. & Brauman, A. 2000. Effet de l'âge de la jachère et de la saison sur la densité et la diversité des termites (Haute-Casamance, Sénégal). In: *La jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives*. (eds C. Floret & R. Pontanier), pp. 259-267. John Libbey Eurotext, Paris.
- Fall, S., Nazaret, S., Chotte, J.L. & Brauman, A. 2004. Bacterial Density and Community Structure Associated with Aggregate Size Fractions of Soil-Feeding Termite Mounds. *Microbial Ecology*, 48, 191-199.
- FAO. 1998. World reference base for soil resources. World Soil Resources Reports 84, Food and Agricultural Organisation, Rome.
- Feller, C., Balesdent, J., Nicolardot, B. & Cerri, C.C. 2000. Approaching "functional" soil organic matter pools through particle-size fractionation. Examples for tropical soils. In: *Assessment methods for soil carbon* (eds R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett & B.A. Stewart), pp. 53-67. Lewis Publisher, Boca Raton.
- Feller, C. & Beare, M.H. 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79, 69-116.
- Floret, C. & Pontanier, R. 2000a. *La Jachère en Afrique tropicale. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances*. John Libbey Eurotext, Paris.
- Floret, C. & Pontanier, R. 2000b. *La Jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives*. John Libbey Eurotext, Paris.
- Floret, C., Pontanier, R. & Serpantié, G. 1993. La jachère en Afrique Tropicale. Pages 86 in Unesco, editor. Dossier MAB-Unesco, Paris.
- Founoune, H., Duponnois, R., Bâ, A.M., Sall, S., Branget, I., Lorquin, J., Neyra, M. & Chotte, J.-L. 2002. Mycorrhiza helper bacteria stimulate ectomycorrhizal symbiosis of *Acacia holosericea* with *Pisolithus alba*. *New Phytologist*, 153, 81-89.
- Fournier, A., Floret, C. & Gnahoua, G.M. 2000. Végétation des jachères et succession post-culturelle en Afrique tropicale. In: *La jachère en Afrique tropicale. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances* (eds C. Floret & R. Pontanier), pp. 123-168. John Libbey Eurotext, Paris.
- Francou, C. 2003. *Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains : Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - Recherche d'indicateurs pertinents*, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, Grignon.
- Franklin, R.B. & Mills, A.L. 2003. Multi-scale variation in spatial heterogeneity for microbial community structure in an eastern Virginia agricultural field. *FEMS Microbiology Ecology*, 44, 335-346.
- Freschet, G. 2006. *Effet résiduel de la pratique de parage sur des services écosystémiques d'un sol tropical (Burkina Faso)*. Master, Université de Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.
- Freschet, G., Masse, D., Hien, E., Sall, S.N. & Chotte, J.-L. in press. Long-term evolution of organic matter from manuring practice in a tropical cultivated soil and its consequences on soil ecosystem services. *Agriculture, Ecosystem and Environment*.
- Frontier, S. & Pichod-Viale, D. 1998. *Ecosystèmes. Structure, fonctionnement, évolution*. Dunod, Paris.
- Gaillard, V., Chenu, C. & Recous, S. 2003. Carbon mineralisation in soil adjacent to plant residues of contrasting biochemical quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 93-99.
- Gignoux, J., House, J., Hall, D., Masse, D., Nacro, H.B. & Abbadie, L. 2001. Design and test of a generic cohort model of soil organic matter decomposition: the SOMKO model. *Global Ecology & Biogeography*, 10, 639-660.

- Giller, K.E., Rowe, E.C., de Ridder, N. & van Keulen, H. 2006. Resource use dynamics and interactions in the tropics: Scaling up in space and time. *Agricultural Systems*, 88, 8-27.
- Ginot, V., Le Page, C. & Souissi, S. 2002. A multi-agents architecture to enhance end-user individual-based modelling. *Ecological Modelling*, 157, 23-41.
- Goovaerts, P. & Chiang, C.N. 1992. Spatial and temporal relationships between potentially mineralizable N and selected soil properties in a small fallow plot. *Pedologie*, XLII, 21-37.
- Goreaud, F., Loreau, M. & Millier, C. 2002. Spatial structure and the survival of an inferior competitor: a theoretical model of neighbourhood competition in plants. *Ecological Modelling*, 158, 1-19.
- Griffith, D.A. & Peres-Neto, P.R. 2006. Spatial modeling in ecology: The flexibility of eigenfunction spatial analyses. *Ecology*, 87, 2603-2613.
- Grundmann, G.L. & Debouzie, D. 2000. Geostatistical analysis of the distribution of NH₄⁺ and NO₂⁻ oxidizing bacteria and serotypes at the millimeter scale along a soil transect. *FEMS Microbiology Ecology*, 34, 57-62.
- Grundmann, G.L., Dechesne, A., Bartoli, F., Flandrois, J.P., Chasse, J.L. & Kizungu, R. 2001. Spatial modeling of nitrifier microhabitats in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 1709-1716.
- Grundmann, L.G. & Gourbiere, F. 1999. A micro-sampling approach to improve the inventory of bacterial diversity in soil. *Applied Soil Ecology*, 13, 123-126.
- Han, G., Zhou, G., Xu, Z., Yang, Y., Liu, J. & Shi, K. 2007. Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 418-425.
- He, C., Malcolm, S.B., Dahlberg, K.A. & Fu, B. 2000. A conceptual framework for integrating hydrological and biological indicators into watershed management. *Landscape and Urban Planning*, 49, 25-34.
- Houot, S., Muller, H., Chenu, C., Linères, M., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Arrouays, D., Balesdent, J., Leclerc, B., Mellet, J., Kallassy, M., Poitrenaud, M. & Pierre, N. 2004. Bilans environnementaux de la gestion biologique des déchets: Effet sur le sol et le stockage du carbone des apports de matières organiques issues de déchets. Rapport final du marché ADEME n° 0375C0062.
- Kaboré, W.-T. 2005. *Usage des fumures organiques dans les systèmes de culture et viabilité des agro-systèmes en zone soudano-sabélienne : cas du zaï à Ziga dans le Yatenga (Burkina Faso)*, CNEARC, Montpellier.
- Kaboré, W.-T.T. 2004. *Impacts de l'apport des déchets urbains solides non triés sur les potentialités agronomiques des sols : cas de l'agriculture péri-urbaine de Ouagadougou*. Mémoire Fin d'Etudes, IDR, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.
- Kowal, J.M. & Kassam, A.H. 1978. *Agricultural Ecology of Savanna. A study of West Africa*. Clarendon Press, Oxford.
- Kreft, J.-U., Booth, G. & Wimpenny, J.W.T. 1998. BacSim, a simulator for individual-based modelling of bacterial colony growth. *Microbiology-UK*, 144, 3275-3287.
- Kuzyakov, Y. 2002. Review: Factors affecting rhizosphere priming effects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde*, 165, 382-396.
- Lavelle, P. 1997. Faunal activities and soil processes : adaptative strategies that determine ecosystem function. *Advances in Ecological Research*, 27, 93-132.
- Lavelle, P., Barros, E., Blanchart, E., Brown, G., Desjardins, T., Mariani, L. & Rossi, J.-P. 2001. SOM management in the tropics: Why feeding the soil macrofauna? *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 53-61.
- Lavelle, P., Blanchart, E., Martin, A., Martin, S., Spain, A., Toutain, F., Barois, I. & Schaefer, R. 1993. A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems : application to soils of the humid tropics. *Biotropica*, 25, 130-150.
- Lavelle, P., Lattaud, C., Trigo, D. & Barois, I. 1995. Mutualism and biodiversity in soils. In: *The significance and regulation of soil biodiversity* (eds H.P. Collins, G.P. Robertson & M.J. Klug), pp. 23-33. Kluwer Academics, The Netherlands.
- Lavelle, P., Villenave, C., Rouland, C. & Derouard, L. 2000. Dynamique des peuplements de macro-invertébrés du sol aux diverses étapes de la Jachère en Afrique Tropicale. In: *La Jachère en Afrique Tropicale. Rôles, Aménagement, Alternatives* (eds C. Floret & R. Pontanier), pp. 236-241. John Libbey Eurotext, Paris.
- Legendre, P. & Fortin, M.-J. 1989. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetation*, 80, 107-138.
- Loreau, M. & Holt, R.D. 2004. Spatial Flows and the Regulation of Ecosystems. *The American Naturalist*, 163.

- Mäder, P., Fliebach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P. & Niggli, U. 2002. Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming. *Science*, 296, 1694-1697.
- Manlay, R.J. 2000. *Organic matter dynamics in mixed-farming systems of the West African savanna: a village case study from south Senegal*, ENGREF, Paris.
- Manlay, R.J., Chotte, J.-L., Masse, D., Laurent, J.-Y. & Feller, C. 2002a. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna; III. Plant and soil components under continuous cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, 249-269.
- Manlay, R.J., Ickowicz, A., Masse, D., Feller, C. & Richard, D. 2004a. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savanna--II. Element flows and functioning of a mixed-farming system. *Agricultural Systems*, 79, 83-107.
- Manlay, R.J., Ickowicz, A., Masse, D., Floret, C., Richard, D. & Feller, C. 2004b. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget of a village in the West African savanna--I. Element pools and structure of a mixed-farming system. *Agricultural Systems*, 79, 55-81.
- Manlay, R.J., Kaire, M., Masse, D., Chotte, J.-L., Ciornei, G. & Floret, C. 2002b. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna: I. The plant component under semi-permanent cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, 215-232.
- Manlay, R.J., Masse, D., Chotte, J.-L., Feller, C., Kaire, M., Fardoux, J. & Pontanier, R. 2002c. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna; II. The soil component under semi-permanent cultivation. *Agriculture, Ecosystem and Environnement*, 88, 233-248.
- Marschner, P. & Timonen, S. 2005. Interactions between plant species and mycorrhizal colonization on the bacterial community composition in the rhizosphere. *Applied Soil Ecology*, 28, 23-36.
- Masse, D., Cadet, P., Chotte, J.-L., Diatta, M., Floret, C., N'Diaye-Faye, N., Pate, E., Pontanier, R., Thioulouse, J. & Villenave, C. 1998. Jachères naturelles et restauration des propriétés des sols en zone semi-aride. Cas du Sénégal. *Agriculture et Développement*, 18, 31-38.
- Masse, D., Dembélé, F., LeFloc'h, E. & Yossi, H. 1997. Impact de la gestion des feux de brousse sur la qualité des sols des jachères de courtes durées dans les régions soudaniennes du Mali. In: *Soil fertility management in West African land use systems* (eds G. Renard, A. Neef, K. Becker & M. von Oppen), pp. 115-122. Margraf Verlag, Germany.
- Masse, D., Manlay, R.J., Diatta, M., Pontanier, R. & Chotte, J.-L. 2004. Soil organic matter dynamic and nutrients balance in a short-term fallows with different types of vegetation experiments in Senegal. *Soil Use and Management*, 20, 92-95.
- Masse, D., Silva Da Conceicao, K., Diatta, M. & Madinan, I. 2000. Végétation des jachères de courte durée et rendement du mil après défriche au Sénégal. In: *La Jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives* (eds C. Floret & R. Pontanier), pp. 127-134. John Libbey Eurotext, Paris.
- Menaut, J.C., Lepage, M. & Abbadie, L. 1995. Savannas, woodlands and dry forests in Africa. In: *Seasonally dry tropical forests* (eds S.H. Bullock, H.A. Mooney & E. Medina), pp. 64-92. Cambridge University Press, Cambridge.
- Mordelet, P., Barot, S. & Abbadie, L. 1996. Root foraging strategies and soil patchiness in a humid savanna. *Plant and Soil*, 182, 171-176.
- Morel, R. 1989. *Les sols cultivés*. Lavoisier, Paris.
- Ndienor, M. 2006. *Analyse des modes de gestion de la fertilisation dans les systèmes maraîchers de l'agglomération d'Antananarivo (Madagascar). Etude de l'intérêt agronomique de l'utilisation de déchets urbains dans ces systèmes*, INAPG, Paris.
- Ndour, N.Y., Chotte, J.L., Pate, E., Masse, D. & Rouland, C. 2001. Natural and improved fallows in tropical semi-arid zone (Sénégal) : variations in soil enzyme activities. *Applied Soil Ecology*, 18, 229-238.
- N'Dour, Y.B., Fardoux, J. & Chotte, J.-L. 2000. Statut organique et microbiologique de sols ferrugineux tropicaux en jachère naturelle (Sénégal). In: *La Jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives* (eds C. Floret & R. Pontanier), pp. 354-360. John Libbey Eurotext, Paris.
- Nunan, N., Ritz, K., Crabb, D., Harris, K., Wu, K., Crawford, J.W. & Young, I.M. 2001. Quantification of the in situ distribution of soil bacteria by large-scale imaging of thin sections of undisturbed soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 37, 67-77.
- Nunan, N., Wu, K., Young, I.M., Crawford, J.W. & Ritz, K. 2002. In situ spatial patterns of soil bacterial populations, mapped at multiple scales, in an arable soil. *Microbial Ecology*, 44, 296-305.
- Nye, P.H. & Greenland, D.J. 1960. *The soil under shifting cultivation*. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal.

- Ouattara, B., Serpantié, G., Ouattara, K., Hien, V., Lompo, T. & Bilgo, A. 1997. Etats physico-chimiques des sols cultivables en zone cotonnière du Burkina Faso. Effets de l'histoire culturale et du type de milieu. In: *Jachère et maintien de la fertilité* (eds C. Floret & R. Pontanier), pp. 17-32. IER-ORSTOM, Bamako, Mali.
- Paul, E.A. & Clark, F.E. 1996. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, San Diego, USA.
- Perry, D.A., Amaranthus, M.P., Borchers, J.G., Borchers, S.L. & Brainerd, R.E. 1989. Bootstrapping in Ecosystems. Internal interactions largely determine productivity and stability in biological systems with strong positive feedback. *BioScience*, 39, 230-237.
- Perry, G.L.W., Miller, B.P. & Enright, N.J. 2006. A comparison of methods for the statistical analysis of spatial point patterns in plant ecology. *Plant Ecology*, 187, 59-82.
- Personeni, E., Luscher, A. & Loiseau, P. 2005. Rhizosphere activity, grass species and N availability effects on the soil C and N cycles. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 819-827.
- Pieri, C. 1989. *Fertilité des Terres de Savanes*. Ministère de la Coopération - CIRAD, Paris.
- Powell, J.M., Fernandez-Rivera, S., Hiernaux, P. & Turner, M.D. 1996. Nutrient cycling in integrated rangeland/cropland systems of the sahel. *Agricultural Systems*, 52, 143-170.
- Ranjard, L., Brothier, E. & Nazaret, S. 2000. Sequencing bands of ribosomal intergenic spacer analysis fingerprints for characterization and microscale distribution of soil bacterium populations responding to mercury spiking. *Applied and Environmental Microbiology*, 66, 5334-5339.
- Roose, E. & Barthes, B. 2001. Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa: a contribution from Francophone research. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 159-170.
- Rowe, E.C., van Wijk, M.T., de Ridder, N. & Giller, K.E. 2006. Nutrient allocation strategies across a simplified heterogeneous African smallholder farm. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116, 60-71.
- Roy, S. & Singh, J.S. 1995. Seasonal and spatial dynamics of plant-available N and P pools and N-mineralization in relation to fine roots in a dry tropical forest habitat. *Soil Biol. Biochem.*, 27, 33-40.
- Sall, S.N. 2004. *Importance des relations "Résidus végétaux-Communautés microbiennes" sur les processus de décomposition dans un sol ferrugineux tropical (Sénégal) : effet de la disponibilité de l'azote*, Université Paris XII, Paris.
- Sall, S.N., Masse, D., Bernhard-Reversat, F., Guisse, A. & Chotte, J.-L. 2003. Microbial activities during the early stage of laboratory decomposition in tropical leaf litters: the effect of interactions between litter quality and exogenous inorganic nitrogen. *Biology & Fertility of Soil*, 39, 103-111.
- Sall, S.N., Masse, D., Ndour, N.Y.B. & Chotte, J.-L. 2006. Does cropping modify the decomposition function and the diversity of the soil microbial community of tropical fallow soil? *Applied Soil Ecology*, 31, 211-219.
- Samake, O., Smaling, E.M.A., Kropff, M.J., Stomph, T.J. & Kodio, A. 2005. Effects of cultivation practices on spatial variation of soil fertility and millet yields in the Sahel of Mali. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 109, 335-345.
- Sarr, M., Agboba, A. & Russel-Smith, A. 2000. Abondance et diversité des termites dans les jachères sahéliennes. Effets des termites et autres macrofaunes du sol sur l'infiltration de l'eau. In: *La jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives*. (eds C. Floret & R. Pontanier), pp. 242-249. John Libbey Eurotext, Paris.
- Sarr, M., Agbogba, C. & Russell-Smith, A. 1998. The effects of length of fallow and cultivation on termite abundance and diversity in the sahelian zone of Senegal : A preliminary note. *Pedobiologia*, 42, 56-62.
- Schimel, J.P. & Bennett, J. 2004. Nitrogen mineralization: Challenges of a changing paradigm. *Ecology*, 85, 591-602.
- Shepherd, K.D., Palm, C.A., Gachengo, C.N. & Vanlauwe, B. 2003. Rapid Characterization of Organic Resource Quality for Soil and Livestock Management in Tropical Agroecosystems Using Near-Infrared Spectroscopy. *Agronomy Journal*, 95, 1314-1322.
- Shepherd, K.D. & Walsh, M.G. 2007. Infrared spectroscopy—enabling an evidence-based diagnostic surveillance approach to agricultural and environmental management in developing countries. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 15, 1-20.
- Sierra, J. 1996. Nitrogen mineralisation and its error of estimation under field conditions related to the light-fraction soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research*, 34, 755-767.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. & Denef, K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79, 7-31.

- Six, J., Elliott, E.T. & Paustian, K. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 2099-2103.
- Söderström, B., Baath, E. & Lundgren, B. 1983. Decrease in soil microbial activity and biomasses owing to nitrogen amendments. *Canadian Journal of Microbiology*, 29, 1500-1506.
- Stark, C.H.E., Condrón, L.M., Stewart, A., Di, H.J. & O'Callaghan, M. 2004. Small-scale spatial variability of selected soil biological properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 601-608.
- Swift, M.J. 1998. L'intégration de la société, des systèmes et des sols. in 16ème Congrès mondial de science du sol, Montpellier, France.
- Tiessen, H., Cuevas, E. & Chacon, N. 1994. The role of organic matter in sustaining soil fertility. *Nature*, 371, 783-785.
- Tilman, D. 1998. The greening of the green revolution. *Nature*, 396, 211-212.
- Tilman, D. & Downing, J.A. 1994. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 367, 363-365.
- Tisdall, J.M. & Oades, J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- Tittonell, P., Leffelaar, P.A., Vanlauwe, B., van Wijk, M.T. & Giller, K.E. 2006. Exploring diversity of crop and soil management within smallholder African farms: A dynamic model for simulation of N balances and use efficiencies at field scale. *Agricultural Systems*, 91, 71-101.
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., de Ridder, N. & Giller, K.E. In press. Heterogeneity of crop productivity and resource use efficiency within smallholder Kenyan farms: Soil fertility gradients or management intensity gradients? *Agricultural Systems*, doi:10.1016/j.agsy.2006.10.012.
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P.A., Rowe, E.C. & Giller, K.E. 2005a. 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.
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P.A., Shepherd, K.D. & Giller, K.E. 2005b. Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya: II. Within-farm variability in resource allocation, nutrient flows and soil fertility status. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 110, 166-184.
- Treves, D.S., Xia, B.C., Zhou, J. & Tiedje, J.M. 2003. A two-species test of the hypothesis that spatial isolation influences microbial diversity in soil. *Microbial Ecology*, 45, 20-28.
- Vargas, R. & Hattori, T. 1986. Protozoan predation of bacterial cells in soil aggregates. *FEMS Microbial Ecology*, 38, 233-242.
- Vieublé-Gonod, L., Chenu, C. & Soulas, G. 2003. Spatial variability of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) mineralisation potential at a millimetre scale in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 373-382.
- Villenave, C. & Cadet, P. 2000. Rôle particulier de *Heliconthylenchus dihystera* au sein des peuplements de nématodes phytoparasites (Sénégal). In: *La Jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives* (eds C. Floret & R. Pontanier), pp. 291-299. John Libbey Eurotext, Paris.
- Vogel, J., Normand, P., Thioulouse, J., Nesme, X. & Grundmann, G. 2003. Relationship between spatial and genetic distance in *Agrobacterium* spp. in 1 cubic centimeter of soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 69, 1482-1487.
- Wijesinghe, D.K. & Hutchings, M.J. 1999. The effects of environmental heterogeneity on the performance of *Glechoma hederacea*: the interactions between patch contrast and patch scale. *Journal of Ecology*, 87, 860-872.
- Wijesinghe, D.K., John, E.A. & Hutchings, M.J. 2005. Does pattern of soil resource heterogeneity determine plant community structure? An experimental investigation. *Journal of Ecology*, 93, 99-112.
- Woomer, P.L. & Swift, M.J. 1994. *The biological management of tropical soil fertility*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Young, I.M. & Crawford, J.W. 2004. Interactions and self-organization in the soil-microbe complex. *Science*, 304, 1634-1637.