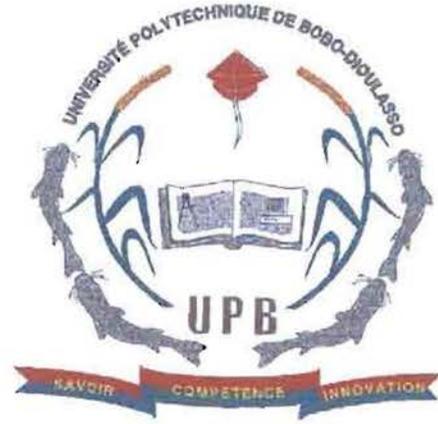




Institut du
Développement
Rural (IDR)



Université Polytechnique
de Bobo-Dioulasso (UPB)

THESE

Pour obtenir le diplôme de Doctorat Unique

DYNAMIQUE ET MODELISATION DE LA DYNAMIQUE DU CARBONE DANS UN AGROSYSTEME DE SAVANE DE L'OUEST DU BURKINA FASO :

Par
Sansan YOUL

Soutenu le devant le jury composé de :

M.	Président
M.	Directeur de thèse
M.	Rapporteur
M.	Rapporteur
M.	Rapporteur
M.	Examineur

REMERCIEMENTS

Il n'est pas rare d'entendre dire, parlant de thèse ou de la vie de thésards, que chaque thèse a son histoire. Oui, je réalise aujourd'hui, combien cette assertion, qui, à certains moments, ne me paraissait pas si évidente. C'est pourquoi, je pense que, au lieu de la raconter, l'histoire de ma thèse, il serait judicieux pour moi d'aller droit au but, oui, droit au but, sans que cela ne soit mal perçu ni mal compris, pour témoigner ma reconnaissance, ma gratitude et dire merci. Merci à tous ceux qui, se reconnaîtront dans cette thèse, parce qu'ils la verraient se réaliser, parce qu'ils seront informés de l'aboutissement de celle-ci ou même ne seront informés ou à l'extrême, parce qu'ils ne pourront plus le savoir, que finalement, ma thèse a été défendue.

Si je devais citer des noms, la liste serait très longue, car ils sont nombreux, ceux qui directement ou indirectement ont contribué à construire cette thèse, à la soutenir pour qu'elle se réalise aujourd'hui. Cette thèse, c'est le fruit de multiples synergies entre institutions de recherche, entre elles et en leur sein avec des personnes physiques aussi entre elles et ces institutions. Ces personnes et ces institutions sont aussi bien en France, au Burkina Faso, ailleurs..... Je veux témoigner ma gratitude à ces institutions, en France (IRD-DSF, IRD-SeqCBio, CIRAD, ENGREF), au Burkina Faso (INERA, l'UPB, Université de Ouaga, IFDC...).... A travers ces institutions ce sont des personnes physiques dans ces espaces géographiques précités. Ces personnes sont en France ; Christian Feller, Jean Luc Chotte, Dominique Masse ; Francis Ganry, Serge Guillobez, Christophe Le Page Pierre Bommel, Raphaël Manlay, Mahamadou Belem et leurs collègues... Au Burkina Faso, je me limiterai à Pr. Michel P. Sedogo, Pr. Victor Hien, Pr. Edmond Hien, sachant que toute l'équipe du laboratoire SEP, GRN de l'INERA, se reconnaîtra dans ce travail, cette équipe, dans laquelle j'ai été moulé. A l'université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Pr. Antoine Somé et bien d'autres enseignants (Pr. Bernard Bacye et Pr. Hassan Nacro Bismarck), à toutes ces personnes qui ont cru au projet et m'ont fait confiance, merci du fond du cœur. Beaucoup d'autres personnes dans ces institutions et en dehors de celles-ci ont cru en moi, m'ont soutenu et donc ont contribué à la réalisation de cette thèse. Enfin, j'exprime ma gratitude aux nombreux amis et collègues, aux InfraRouges et Assimilés dans leur combat quotidien pour des lendemains meilleurs. A mes amis, à mes frères et sœurs de Loropéni, aux militants et sympathisants de l'ADL, de Fasosavoires, de la SSSBF, à mes collègues de l'IFDC.

A mes frères et sœurs (Djounèhierèna, Thèlarè, Préhinèna, Makité, Kapouré, ...), cousins, neveux, nièces,... je souhaite qu'ils se reconnaissent dans cette œuvre, eux qui, pendant si longtemps ont attendu de voir ce jour. Mon épouse bien sûr, Fononami et mes enfants Sylvie, Siébou, Pascaline, Caroline pour qui j'aimerais qu'ils retiennent de cette thèse, un seul message : **le temps ne s'épuise jamais**. Et à mon Tonton Joanny, sans le quel, le lycée ne serait point une réalité pour moi, encore moins l'université, que vais-je dire à son endroit? Et les autres? Finalement à Tous, que vais vous dire? Seulement un petit merci, et enfin pour les autres à quoi aura servi cette thèse, pour ceux qui m'ont donné naissance, m'ont vu grandir, eux dont certains ne sont plus de ce monde, eux qui, dans la misère, ne se diront pas, enfin il l'a eu, ils ne se diront pas il a eu sa thèse, su tenter que l'on trouva du réconfort ou une quelconque satisfaction après une soutenance de thèse. Et précisément pour ceux qui ne sont plus de ce monde, que veut dire « il a eu sa thèse », s'ils l'apprennent, s'ils peuvent le voir, se demanderont peut-être, mais sa thèse, pourquoi? Pour faire quoi? Oui, pour faire quoi une thèse? Et ils auront raison, oui, quel égoïsme! Oui, ce sentiment m'abrite par moment, à cause de tout, oui, tout l'espoir qu'ils ont porté en moi et moi finalement qui ne peut leur retourner qu'un parchemin, oui, rien qu'un parchemin et encore, un parchemin à titre posthume, pour quoi faire? Oui, je vous offre cette thèse à titre posthume, précisément parce que c'est aussi à cause d'elle, que nous n'avons eu assez de temps ensemble, du temps pour nous voir et nous dire au revoir, ni même adieu. Car vous êtes nombreux, qui êtes partis, partis depuis des temps, partis depuis le temps que je vais à l'école, partis depuis le temps que j'apprends et que j'apprends toujours, partis depuis le temps que je cherche et que je cherche encore, et bien à vous tous, oui, à tous ces anonymes, c'est à vous tous, oui, c'est à vous que je dédie cette thèse.

Résumé

En dépit de leur polyvalence, les ressources organiques sont en voie de raréfaction dans les zones de savanes d'Afrique de l'Ouest, en partie due aux activités humaines mais aussi sous l'effet de facteurs biophysiques dont singulièrement les facteurs climatiques. La viabilité de ces agro écosystèmes est ainsi mise en cause. Pourtant, il est possible à l'aide de la simulation informatique de reproduire la dynamique des ressources organiques quel que soit l'échelle d'observation et pour ce qui concerne les terroirs villageois, les Systèmes Multi-Agents (SMA) sont particulièrement adaptés et permettent de comprendre les états futurs d'une ressource donnée en fonction de différents scénarios de gestion. Il devient alors possible de prédire la dynamique des ressources organiques à cette échelle et de disposer de la faculté d'anticiper la dégradation, la baisse, la disparition ou toute évolution quelconque de celles-ci en mettant en œuvre des recommandations de modes de gestion plus adaptés. Pour cela, le SMA, MIROT a été conçu, testé et en cours de validation. Il associe deux approches, une approche statistique et la programmation informatique, cette dernière utilisant les données de la première. La programmation informatique de MIROT a été faite avec la plate-forme CORMAS. C'est un SMA spatial conçu à l'image d'un terroir de savane d'Afrique de l'Ouest. L'objectif de MIROT, c'est de simuler la dynamique du C à l'échelle terroir. Son but ultime c'est d'analyser la viabilité des terroirs agro-sylvo-pastoraux des savanes d'Afrique de l'Ouest. Pendant les simulations, les exploitants agricoles, pour mettre en œuvre leurs activités de production, défrichent la forêt, qui est la situation initiale par hypothèse. Les exploitants sont explicites sur la carte d'occupation du terroir générée au cours de la simulation grâce à un couplage du SMA avec un fond de carte du terroir réalisé dans un système d'information géographique, Arcview. Les résultats du modèle suggèrent que les systèmes de production ont un impact limité sur la matière organique des sols. En revanche leur impact est plus important sur la biomasse végétale et donc sur les ressources organiques et en définitive sur les stocks de carbone. La démographie s'est révélée être le principal moteur du changement de gestion des terres. Elle conditionne fortement la variation de ces ressources. Trois taux de croissance démographique (2,5 ; 5 et 10 %) testés montrent qu'une croissance de 10 % n'est pas supportable, autrement dit entraînerait la disparition du système. La croissance de 5 % an⁻¹ épuise deux fois plus vite les ressources par rapport à un taux de croissance de 2,5%, qui lui est beaucoup plus supportable. Une baisse de 10 mm par an de la pluviométrie annuelle a pour effet d'accélérer la baisse des ressources. Une tendance inverse au contraire a un effet inverse. La sensibilité de la version actuelle du modèle aux besoins socio-économiques est faible. En effet, les variations du besoin en argent par exploitation par an n'ont pas un effet net sur la dynamique des ressources, cependant celui-ci est affecté par certains modes de gestion des terres, notamment les productions d'anacardiers. Ainsi il a été mis en évidence l'impact d'un changement d'usage des terres donnant une satisfaction économique aux producteurs et qui pourrait répondre à des intérêts environnementalistes, de stockage de C dans la biomasse végétale dans une approche de séquestration de C en vue d'une optique d'intégration dans le marché de carbone. MIROT est outil d'investigation et de recherche qui pourra être adapté comme jeu de rôle (JdR) pour servir de support à la concertation et à la négociation entre acteurs et gestionnaires des ressources de cette nature et dans une perspective à long terme comme outil d'aide à la décision.

Mots clés : Ressources organiques, carbone, terroir, SMA, MIROT, modélisation, simulation, exploitation agricole, savane, Burkina Faso, Afrique.

Abstract

In spite of their versatility, organic resources are in a rarefaction process in West Africa savannas zones, partly due to the human activities. These agro-ecosystems viability is thus matter of discussion. However it is possible to simulate organic resources dynamic at a village territory level with multi-agents systems (MAS) thus making possible to understand resources future states according to various management scenarios. It then becomes possible to predict the dynamics of the resources on this scale and to anticipate the degradation of those by the recommendation of more adapted management options. For that, multi-agents system (SMA) MIROT was programmed and implemented. It associates two approaches, a statistical approach and the data-processing programming the latter using the data of the first. MIROT was programmed with platform CORMAS. It is a spatial SMA programmed as a West Africa savannah village territory. The objective of MIROT is to simulate C dynamics in order to study West African agro-sylvo-pastoral territory viability.

During simulations farmers clear the forest to implement their activities. The owners and their herd are explicit on the soil map occupation generated during simulations. The results of the model suggest that farming systems have a limited impact on soil organic matter. On the other hand their impact is more important on plant biomass. Demography is the principal driving force of the change in soil management. It strongly determines resources state. Three demographic growth rates (2, 5; 5 and 10 %) tested show that a growth of 10 % is not supportable. The growth of 5 % year⁻¹ exhausts twice more quickly the resources compared to a growth rate of 2, 5%. A fall of 10 mm per annual rainfall accelerates resource fall. A reverse tendency on the contrary increases resource. The sensitivity of the model to farmer's needs is low. Indeed the variations of the cash requirement by exploitation per year do not have a Net effect on resources dynamics. MIROT is an investigation and research tool which could be adapted like play game to be used as support to dialogue and negotiation between stakeholders and resource managers and from a long terms point of view like decision tools.

Key words: Organic resources, carbon, soil, SMA, MIROT, modelling, simulation, farm, savannah, Burkina Faso, Africa

TABLES DES MATIERES

DYNAMIQUE ET MODELISATION DE LA DYANMIQUE DU CARBONE DANS UN AGROSYSTEME DE SAVANE DE L'OUEST DU BURKINA FASO :.....0

INTRODUCTION GENERALE.....10

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE10

1.1. IMPORTANCE ENVIRONNEMENTALE ET AGRO ÉCOLOGIQUE DU CARBONE..... 10

1.2. PROBLÉMATIQUE..... 15

1.3. POURQUOI LE SMA?..... 17

1.4. OBJECTIFS DE LA THÈSE..... 18

1.4.1. Objectif global..... 18

1.4.2. Hypothèses générales : 18

1.5. ORGANISATION DE LA THÈSE..... 18

SITE D'ETUDE ET METHODOLOGIE GENERALE.....20

2. SITE D'ETUDE ET METHODOLOGIE GENERALE21

2.1. POURQUOI UNE ÉTUDE A L'ECHELLE DU TERROIR'?..... 21

2.2. SITE D'ÉTUDE 21

2.2.1. Critères de choix du site..... 21

2.2.2. Description 22

2.2.2.1. Localisation et climat..... 22

2.2.2.2. Végétation et sols..... 24

2.2.2.3. Systèmes de production 24

2.2.2.4. Population 26

3.	DÉTERMINANTS NATURELS ET ANTHROPIQUES DES STOCKS DE CARBONE DANS LES SOLS.....	28
3.1.	INTRODUCTION	28
3.2.	MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	29
3.2.1.	Site d'étude.....	29
3.2.2.	Echantillonnage des parcelles paysannes.....	30
3.2.3.	Echantillonnage des sols	31
3.2.4.	Analyses physico-chimiques	32
3.2.5.	Calculs des stocks de carbone	32
3.2.6.	Analyses des données.....	32
3.2.7.	Dynamique du C dans les sols des systèmes de production.....	33
3.3.	RÉSULTATS.....	33
3.3.1.	Densité apparente (Da).....	33
3.3.2.	Taux d'éléments fins (Ag+Lf%) et teneurs de C des parcelles.....	35
3.3.3.	Modélisation de la teneur de C dans les fosses pédologiques.....	35
3.3.4.	Modélisation de la teneur de C dans les 20 premiers cm des parcelles.....	37
3.3.5.	Stocks de C dans les fosses pédologiques.....	39
3.3.6.	Stocks de C dans les parcelles.....	40
3.3.7.	Modélisation des stocks de C des parcelles en fonction des indices culturaux.....	40
3.4.	DISCUSSION	42
3.4.1.	Etat des stocks de C dans les sols.....	42
3.4.2.	Impacts des déterminants naturels.....	42
3.4.3.	Effets anthropiques.....	42
3.5.	CONCLUSION	44
4.	DÉTERMINANTS NATURELS ET ANTHROPIQUES DES STOCKS DE CARBONE DANS LA BIOMASSE VÉGÉTALE	46

4.1.	INTRODUCTION	46
4.2.	MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	48
4.2.1.	Description du site et des systèmes de production	48
4.2.2.	Dispositif d'échantillonnage	48
4.2.3.	Méthodes de mesure de la biomasse	49
4.2.4.	Biomasse racinaire	49
4.2.5.	Teneur de C dans la biomasse végétale.....	50
4.2.6.	Modélisation des stocks de C dans la biomasse végétale.....	50
4.2.7.	Définition d'indices culturaux pour la modélisation	51
4.3.	RÉSULTATS.....	52
4.3.1.	Espèces et biomasse ligneuse dans les systèmes de production.....	52
4.3.2.	Modélisation du stockage de C dans la biomasse végétale	58
4.4.	DISCUSSION	60
4.5.	CONCLUSION	61
5.	DÉTERMINANTS SOCIO-ÉCONOMIQUES DE LA GESTION DES RESSOURCES ORGANIQUES DANS LES EXPLOITATIONS AGRICOLES.....	64
5.1.	INTRODUCTION	64
5.2.	PROBLÉMATIQUE	64
5.3.	DISPOSITIF, MÉTHODES D'ENQUÊTES ET DE MODÉLISATION	67
5.3.1.	Dispositif et méthodes.....	67
5.3.2.	Approche de modélisation statistique.....	68
5.4.	RÉSULTATS	68
5.4.1.	Règles de décision.....	69
5.4.2.	Besoins socio-économiques et leurs déterminants	71

5.5.	DISCUSSION	78
5.6.	CONCLUSION.....	80
6.	STRUCTURE DU MODÈLE MULTI-AGENTS POUR LA SIMULATION DE LA DYNAMIQUE DU CARBONE	83
6.1.	INTRODUCTION	83
6.2.	TERROIR ET LES EXPLOITATIONS AGRICOLES.....	85
6.3.	LE MODÈLE MIROT.....	86
6.3.1.	La structure du modèle MIROT	86
6.3.1.1.	La structure fonctionnelle.....	86
6.3.1.2.	La structure spatiale	88
6.3.1.3.	Couplage Gams-Mirot.....	89
6.3.2.	Paramètres du modèle	89
6.3.3.	Dynamique du modèle	91
6.3.4.	Variables de sorties	96
6.4.	DISCUSSION	97
6.4.1.	Approche SMA et la gestion des ressources renouvelables	97
6.4.2.	Adéquation SMA et terroir.....	97
6.5.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	97
7.	ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DU CARBONE DANS UN TERROIR AGRO-SYLVO-PASTORAL PAR MODÉLISATION MULTI-AGENTS.....	103
7.1.	INTRODUCTION	103
7.2.	PROBLÉMATIQUE.....	103
7.3.	MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	104
7.3.1.	Terroir d'étude et systèmes de production	104

7.3.2.	Version du modèle MIROT utilisé.....	104
7.3.3.	Description des scénarios simulés.....	105
7.4.	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	106
7.4.1.	CARTE D'OCCUPATION DU TERROIR	106
7.4.2.	Evolution des ressources du terroir sous l'effet des systèmes de productions	107
7.4.3.	Impact de la démographie sur les ressources naturelles.....	110
7.4.4.	Impact des plantations d'anacardiers	114
7.4.5.	Effets des besoins monétaires.....	117
7.4.6.	Impact des aléas climatiques	118
7.4.7.	DISCUSSION	118
7.5.	CONCLUSIONS	120
	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	122
8.	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	123

INTRODUCTION GENERALE

1. INTRODUCTION GENERALE

1.1. IMPORTANCE ENVIRONNEMENTALE ET AGRO ECOLOGIQUE DU CARBONE

Le carbone est le principal composant des matières organiques. Le symbole chimique du carbone est C. C'est le sixième élément du tableau de classification périodique des éléments de D. Mendeleïev. Il est doté de propriétés de première importance pour la chimie organique et les systèmes vivants. Les stocks mondiaux de C sont importants. Environ 45 Téra tonnes de carbone sont impliquées dans les cycles géochimiques : atmosphère : 750 GTC ; biomasse végétale 470-655 GTC ; sol : 1500-2000 GTC ; océans : 38000 GTC et couches géologiques : 65500000 GTC selon IPCC¹ (2001). Le carbone minéral des roches et des sédiments est le plus important mais participe peu au cycle biogéochimique. Les végétaux par la synthèse chlorophyllienne fixent le carbone de l'air (CO₂). Ce carbone fixé se retrouve dans tous les organes végétaux (architecture, constituants...). L'atome de carbone est aussi impliqué dans les réactions microscopiques (biologiques et physiologiques) de production et d'échanges d'énergie dans tous les tissus animaux et végétaux. Le C est donc présent dans toutes les structures organiques. Il constitue entre 45 et 50 % de la matière sèche des tissus vivants (Locatelli, 1996). Dans les sols, le carbone organique du sol (COS) représente deux fois la quantité de C de l'atmosphère et deux fois et demi la quantité de carbone de la biomasse végétale (Tieszen, 2000). Le COS résulte de l'équilibre entre la part de la production photosynthétique retournée au sol (exsudation, restitutions par les litières) et la respiration de la flore et de la faune du sol. Cet équilibre est déterminé par le contexte biophysique et anthropique (Feller, 1995). En cela la matière organique constitue un continuum allant des formes vivantes (animaux, végétaux) aux formes de matières organiques décomposées voir minérales. La matière organique est la principale composante des ressources organiques, c'est une ressource polyvalente en raison de ces fonctions agro écologique et environnementale.

En effet d'un point de vue écologique la matière organique est importante pour le fonctionnement des agro écosystèmes à plusieurs échelles. Dans le sol, la matière organique affecte favorablement les propriétés physiques, chimiques, thermiques des sols ainsi que l'activité biologique (Batjes, 2001). Dans les sols de savane tropicale en raison de la nature du matériau parental, de la faible teneur et de la nature des argiles (illites) à faible capacité d'échange, la matière organique du sol (MOS) contrôle fortement certaines propriétés indicatrices de la fertilité chimique (capacité d'échange cationique, nutriments disponibles), physique (stabilité, agrégation, porosité) et biologique (énergie assimilable disponible) des sols (Jones et Wild, 1975).

A l'échelle de l'agro système, la matière organique joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des systèmes traditionnels de production généralement mixtes (agriculture, élevage) d'Afrique de l'Ouest (Ruthenberg, 1971a ; Kowal et Kassam, 1978). Ainsi (1) les besoins alimentaires des populations sont satisfaits par les productions vivrières (autosuffisance encore forte) ; (2) l'alimentation des animaux est traditionnellement assurée par les productions fourragères locales (fourrages naturels des parcours, résidus de récoltes) ; (3) le bois couvre 90 % des besoins en énergie domestique (Breman et Kessler,

¹ IPCC : International Panel on Climate Change, équivalent de GIEC : Groupe Intergouvernemental pour l'Etude des Changements Climatiques

1995), 80 à 95 % des besoins en énergie dans les pays sahéliens (Jorez, 1991 ; Benjaminsen, 1996).

A l'échelle de l'écosystème, dans les savanes soudaniennes ou soudano sahéliennes, la succession écologique normale permet une accumulation de biomasse au cours du temps. Celle-ci croit, arrive à maturation et plafonne à la charge biotique maximale. La biomasse ainsi organisée peut se maintenir très longtemps en circuit fermé (Frontier et Pichod-Viale, 1998). Cependant la biomasse ainsi accumulée doit résister à l'effet des facteurs d'ordre variés (biophysique, environnementaux...) de part sa capacité naturelle à retrouver son équilibre, c'est sa résilience.

Les agro systèmes sont donc déstructurés par rapport aux systèmes naturels. L'action humaine (agriculture, élevage, industrie) agit à contre courant de l'évolution spontanée. Mieux dans les zones de savanes la production est fortement affectée par les feux annuels (Cesar, 1992).

Et d'un point de vue environnemental, la matière organique intervient dans le cycle du carbone comme forme de stockage et de séquestration de C. Ainsi stocker du carbone dans les sols permet de compenser les pertes de gaz carbonique, gaz à effet de serre (GES) que sont le CO₂, le CH₄, le N₂O, le SF₆, les HFC et les PFC, qui interviennent dans le changement climatique dont il est question de nos jours. La matière organique est donc une ressource polyvalente à la fois un bien de consommation (nourriture), un moyen de production (fertilité des sols, entretien du bétail) ou de service environnemental (séquestration du C). Elle rentre également en ligne de compte dans les indicateurs de durabilité des écosystèmes qu'ils soient naturels ou cultivés (Feller, 1995). Le statut organique d'un terroir², bilan entre disponibilité et usage des ressources organiques, peut alors être considéré comme un indicateur de viabilité³ du système (Manlay, 2000a). Par exemple pour les agricultures des zones de savane l'objectif immédiat du paysan (production de céréales, tubercules et légumineuses) passeraient donc par une augmentation de la circulation du carbone et un recyclage plus efficace sur son exploitation. A plus long terme, l'exploitant doit rechercher aussi l'amélioration des stocks de carbone sur son exploitation pour maintenir la capacité du système à produire (Manlay, 2000).

Dans les zones de savanes ouest africaines (ZSOA) les terroirs agricoles sont composés de différentes parties : zones habitées, cultivées, non cultivées, parcours, mise en défends... entre lesquelles les habitants ont établi des relations qui peuvent se définir sous l'angle des circulations des matières organiques. En savane soudano sahélienne, le schéma classique est une organisation en auréoles concentriques avec un gradient positif d'intensification et de production alimentaire depuis la savane vers le village. Trois auréoles sont ainsi distinguées (Prudencio, 1993) ; (Serpantié *et al.*, 1985 ; Sedogo, 1993 ; Manlay, 2000a) : (1) l'auréole de savane, non approprié mais faisant office de terre de parcours, (2) l'auréole des champs de brousse, soumise à l'agriculture semi continue, (3) l'auréole des champs de case, en culture continue grâce à la fumure organique (ordures ménagères, fumier) et minérale (cendre, engrais chimique). Toutefois dans certaines conditions (zones forestières et savanes arborées) l'organisation est plutôt mitée (« campements » ou « hameaux de culture »). Le campement ou hameaux de culture, éloigné du village est alors incrusté dans

² Terroir : Espace approprié, géré et exploité par une communauté

³ Viabilité d'un système : aptitude à fournir des productions (grains, fourrage, viande, bois...) et des moyens de production (force de traction animale, engrais organique, qualité du sol) dans un intervalle de valeur défini, pour un état initial et durant une période donnée

la brousse. Plus tard lorsque celui-ci se développe, il se crée un village et on retrouve la même organisation concentrique. Cette organisation correspond au fonctionnement du terroir en termes de flux et stocks de C. Il existe donc des espaces de production de matière organique par la biomasse (parcelle cultivée, cultures fourragères, jachère, savane) d'où partent des flux vers des espaces de consommation et de concentration de MO (habitat, parcs à animaux, espaces fumés) (Tonneau *et al.*, 2002) (Figure 1). Des flux organo-minéraux à la fois horizontaux (transfert) et verticaux (fertilisation, jachère) sont ainsi engendrés par l'homme et les animaux qui modifient ceux engendrés par les phénomènes naturels (photosynthèse, érosion hydrique et éolienne) (Dugué, 1998). Le terroir peut être ainsi conceptualisé comme un système généralement fermé ou ouvert (Figure 1). Si le système était fermé, les entrées de matières et d'énergie sont maintenues. Il y aurait donc accumulation de biomasse. Si l'équilibre entre production et consommation de matières organiques à l'échelle du terroir est un gage de viabilité du système, alors dans un système ouvert, il est nécessaire de compenser des sorties du terroir soit en terme d'augmentation de la production par une augmentation de la productivité des sols cultivés à partir de changements de pratiques agricoles (par exemple par l'apport de fertilisants, l'introduction d'espèces ou variétés végétales plus performantes) soit en terme de diminution de la consommation (par des migrations, ou des apports financiers permettant l'achat à l'extérieur de nourritures) (Figure 1).

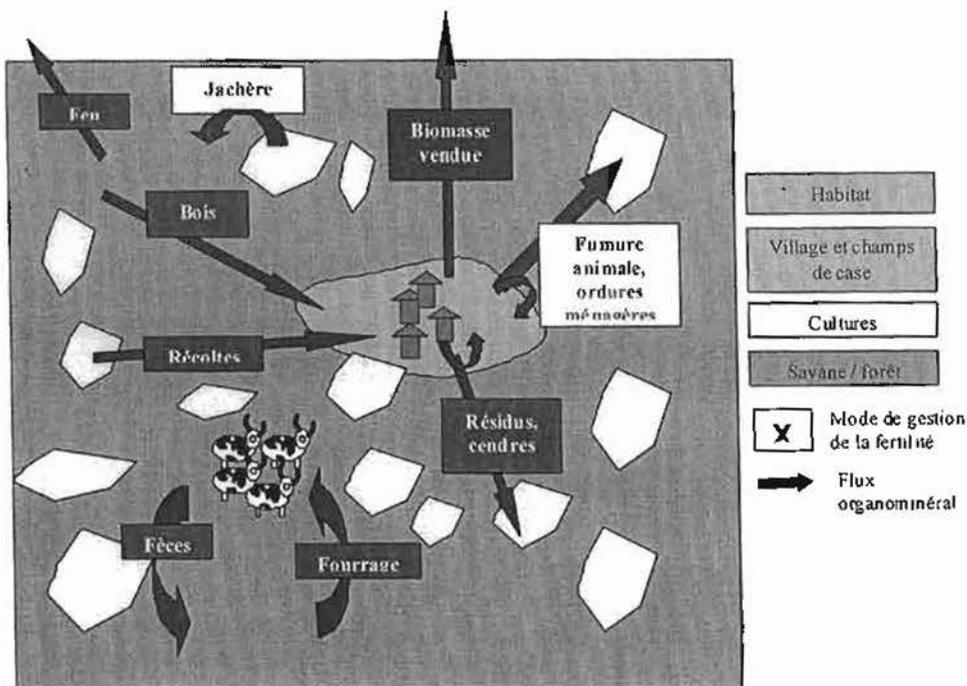


Figure 1: Flux de matières à l'échelle des agro-écosystèmes de savanes (Manlay, 2000a)

La démographie a toujours été indexée comme un facteur déterminant de l'évolution des agro-systèmes. Ainsi la relation entre démographie et environnement a été largement discutée. Plusieurs auteurs y voient la cause de la baisse des ressources. En particulier la pauvreté rurale est responsable de la déforestation et de la diminution de la forêt tropicale (Geist et Lambin, 2003) mais aussi le caractère libre de l'accès à ces ressources qui entraîne des dégradations irréversibles (Bertrand, 1993). Deux théories s'affrontent sur

cette problématique de la liaison entre population et environnement. La théorie du pasteur Malthus et celle issue des travaux de Boserup (Jouve, 2004). La théorie de Malthus soutient que l'augmentation de la population serait responsable de la pression sur les ressources. Il s'en suit les famines et l'exode rural quand la population augmente de façon incontrôlée. La théorie de Boserup quant à elle soutient que l'augmentation de la population rurale serait un facteur favorable à l'intensification agricole. Ces deux thèses semblent se compléter (Locatelli *et al.*, 2004), particulièrement en Afrique subsaharienne où la démographie peut être un frein ou au contraire une opportunité pour l'intensification agricole (Jouve, 2004). La dynamique de la population interagit avec les changements climatiques. La dynamique des ressources organiques dans les ZSOA est en relation avec le changement global⁴.

En effet, il est admis maintenant que la température du globe a augmenté de quelques degrés Celsius ces 100 dernières années entraînant la modification du climat à la surface de la terre, c'est le changement climatique. La quantification du changement climatique au cours des 100 à 140 dernières années, conduit à un réchauffement de la température du globe terrestre en moyenne de $0,6 \pm 0,2$ °C (IPCC, 2001). Même si le début de la période de réchauffement global est un sujet à controverse (depuis plus de 1000 ans selon Ruddiman cité par Crowley (2003), environ un siècle par le chimiste Suédois Arrhenius (Hairiah *et al.*, 2001a), aujourd'hui tous les experts s'accordent sur la réalité du réchauffement planétaire. Le changement climatique englobe l'augmentation de la température, l'augmentation du niveau de la mer, la modification des précipitations, les sécheresses et les inondations (IPCC, 2000).

Le changement du climat a plusieurs causes. Certaines sont d'origine naturelle liée aux variations du flux énergétique du système solaire, d'autres sont d'origine anthropiques telle que l'augmentation des GES liée à la combustion massive des énergies fossiles (IPCC, 2001). Les causes anthropiques sont les plus importantes. Le défrichage (coupe et brûlage) de la forêt tropicale rejetant des quantités significatives de CO₂ dans l'atmosphère serait une source également d'augmentation des GES (Detwiler, 1986).

Les conséquences prévisibles du changement seront désastreuses pour toutes les régions. Au niveau mondial, l'ampleur et l'importance écologique, économique et sociale des conséquences possibles ont conduit à considérer le changement climatique comme le problème environnemental le plus important pour le XXI^e siècle (Malezieux, 2004). Ces modifications du climat ont motivé l'organisation de négociations internationales depuis 1979 (Malezieux, 2004).

Le protocole de Kyoto⁵ ouvre la voie à des recherches de solutions pour freiner ou arrêter le réchauffement climatique. Dès 1979 la communauté scientifique avait mis l'accent sur l'effet de serre (Schwartz et Namri, 2002). Plusieurs étapes ont été franchies, Montréal, Marrakech et Bohn pour en arriver à la signature du protocole de Kyoto (Malezieux, 2004). L'aboutissement de cette prise de conscience est la mise en route d'un cycle de négociations. Ces négociations visent la réduction des GES dans l'atmosphère (Noble et Scholes, 2001). Le protocole de Kyoto (1997) fixe comme objectif une réduction de 5% des émissions pendant la première période d'engagement 2008-2012 par rapport au niveau des émissions de 1990 pour les pays industrialisés et les pays en transition vers une

⁴ Changement global : sous ce vocable on additionne à la fois changement des usages des terres et changement climatique.

⁵ Protocole de Kyoto : Cycle de négociations initiées en 1997 à Kyoto au Japon, avec des objectifs quantifiés de réduction des émissions des GES. Il a été ouvert à la signature en mars le 16 mars 1998 et est entré en vigueur le 16 février 2005

économie de marché tous regroupés sous l'appellation pays de l'annexe I (Locatelli et Loisel, 2002).

Dans le cadre de Kyoto plusieurs options de réduction des GES sont envisagées. Les options de réduction des GES de l'atmosphère passent en premier lieu par la réduction et l'amélioration de l'usage des combustibles fossiles. La possibilité d'augmenter le stock de C dans les sols et la végétation (séquestration du carbone) est également très étudiée. Les puits gérés ou naturels (forêt), les changements d'usage des terres, le boisement et le déboisement sont aussi d'autres options pour juguler la concentration atmosphérique de CO₂, principal GES.

Toujours dans le cadre du protocole de Kyoto plusieurs mécanismes de flexibilité sont prévus pour impliquer l'ensemble des pays y compris ceux en développement. Pendant la première phase d'engagement les pays de l'Annexe I ont des engagements chiffrés (Annexe B du protocole de Kyoto) pour la limitation des sources d'émission des combustibles fossiles et les puits de carbone gérés ou naturels. Pour atteindre ces objectifs quantifiés en impliquant les pays du sud trois mécanismes ont été définis dont le plus significatif pour les zones de savanes est le Mécanisme de Développement Propre (MDP) (article 12 du protocole). L'objet du MDP est d'aider les parties ne figurant pas à l'annexe I, à parvenir à un développement durable en contribuant à l'objectif ultime du protocole, en leur permettant de mettre en oeuvre des activités ou projets se traduisant par des réductions d'émissions certifiées. Les deux autres mécanismes concernent surtout les pays de l'annexe I entre eux. Il s'agit de la mise en oeuvre conjointe et des permis ou quotas d'émissions de GES. A terme, un marché du C avec des bourses d'échanges de C est en vue.

Les ZSOA ont un rôle dans les émissions de GES. Le sol est un puits naturel important pour le carbone rejeté dans l'atmosphère par les combustibles fossiles. Ceci du fait des quantités importantes contenu dans le sol et du long temps de séjour du carbone organique du sol (Batjes, 2004). Les changements apportés dans la gestion des écosystèmes induisent le plus souvent une diminution de la quantité stockée de carbone et son rejet dans l'atmosphère. Même à l'échelle locale, la dynamique de l'occupation des terres influence significativement les changements du couvert végétal et donc le changement global (Hansen et Reenberg, 1997 ; Reenberg et Lund, 1997). Les zones de savanes sont donc concernées. Le rôle des zones de savanes dans la problématique des GES est alors en débat. Il est à craindre que ces milieux tropicaux soient une source nette de CO₂ plutôt qu'un puits de carbone (Serpantié *et al.*, 2002). En général les écosystèmes tropicaux sont considérés comme source plutôt que puits de CO₂ depuis que la savane est cultivée et le bois prélevé pour l'énergie et la production de charbon (Touré *et al.*, 2003). La séquestration du carbone dans les sols des zones semi arides de l'ouest africain peut pourtant s'avérer une stratégie de réhabilitation des terres dégradées en raison des nombreux avantages (amélioration fertilité des sols, des production agricoles, sécurisation alimentaires, réduction de la pauvreté et la contribution au stockage de C dans les sols en vue de la réduction globale devenant ainsi une stratégie gagnant gagnant (Tschakert et Tappan, 2004). Les changements de gestion de l'espace en savane d'Afrique de l'Ouest font-ils des agro écosystèmes des sources nettes de carbone ? En raison notamment d'une faible consommation de carbone fossile (Izac, 1997), l'agriculture et les changements d'usage de l'espace rural sont responsables d'une large part des émissions de GES dans la région (40% au Sénégal par exemple, Sokona (1995)). Les émissions des systèmes de production agricoles y restent cependant relativement faibles ; c'est en partie pourquoi les pays concernés n'ont joué qu'un rôle secondaire dans les projets internationaux centrés sur la lutte contre le réchauffement global, alors que la région sera sans doute l'une des plus sensibles et vulnérables au réchauffement climatique (Tieszen, 2000 ; Sokona et Denton, 2001).

La séquestration dans les sols serait une stratégie doublement gagnante pour ces zones quoiqu'il subsiste un dilemme entre stocker du carbone dans l'optique de réduction des GES et la minéralisation permettant de bénéficier de nutriments pour les plantes cultivées dont un épuisement de la mo (Janzen, 2006). Des options pour augmenter le stockage du carbone donc la séquestration de C sont fournies pour les sols tropicaux et sub tropicaux (Batjes et Sombroek, 1997) et pour les sols Ouest africains (Batjes, 2001). Des options techniques sont aussi préconisées pour cette zone même pour la réhabilitation des sols dégradés (Tieszen, 2000). Des recommandations sont aussi données pour une meilleure utilisation des parcours dans les écosystèmes tropicaux et pour réduire les émissions des principaux GES (Reid *et al.*, 2004). Enfin des priorités de recherches sont suggérées visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'agriculture tropicale (Wassmann et Vlek, 2004).

Les ressources organiques, en tant que forme de stockage d'énergie, de carbone et de nutriments, font donc l'objet d'un double enjeu dans les zones de savanes. La question est de savoir comment tirer profit de la séquestration tout en bénéficiant des effets agronomiques suite à la minéralisation donc la disparition de la ressource organique. Les principales limites à une gestion conservatoire du carbone dans ces zones dans l'optique de la séquestration de carbone serait l'utilisation des terres à des fins agricoles surtout que le bénéfice tiré de la séquestration du carbone dans les sols par l'agriculteur n'a pas un caractère immédiat (Izac, 1997 ; Ringius, 2002).

1.2. PROBLEMATIQUE

La disponibilité des ressources organiques, et donc en carbone, des terroirs d'Afrique de l'Ouest diminue (Pieri, 1992 ; Ker, 1995 ; Reenberg, 1996). (Serpantié *et al.*, 1985; Serpantié *et al.*, 1988; Serpantié, 2003). Cette raréfaction s'explique par plusieurs facteurs aussi bien naturels (climatiques) qu'anthropiques (activités humaines, démographie) (Figure 2). Deux sécheresses importantes (1972-1973 et 1983-1984) ont marqué la zone de savane en particulier le Sahel ces trente dernières années (Bremner et Kessler, 1995). Cette baisse de la pluviosité réduit la productivité végétale et limite le maintien de formations ligneuses denses dans la zone de savanes. Cependant, les causes anthropiques sont prépondérantes dans la baisse des ressources organiques. Les activités humaines (brûlage, défriches agricoles, urbanisation et coupe de bois) et animales (pâturage) affectent le couvert végétal. Les surfaces cultivées augmentent au dépend des jachères et de leur durée pour produire plus et satisfaire la demande d'une population sans cesse croissante. L'extension des cultures de rente, généralement exportatrices nettes de matière organique par l'absence de restitutions accentuent également les diminutions de ressources organiques dans les agro-systèmes (Figure 2).

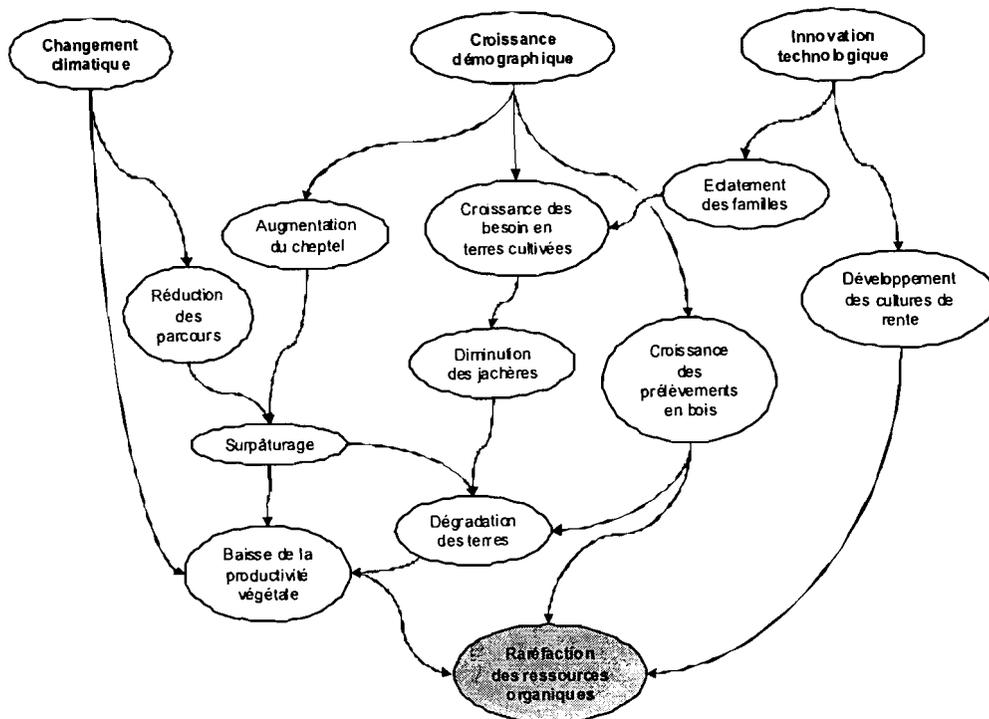


Figure 2: Problématique de la dynamique des ressources organiques en zone de savane d'Afrique de l'Ouest

Dans une perspective agro écologique locale, alors il est nécessaire de proposer aux producteurs des stratégies durables de gestion, en mettant en adéquation prélèvement et renouvellement de la ressource organique, au besoin par des pratiques intensifiées ou innovantes.

Par ailleurs dans une perspective environnementale globale et en réponse au probable développement d'un marché rémunérateur des actions de séquestration de carbone (Olsson et Ardo, 2002), il s'agit d'identifier les pratiques qui séquestrent le C dans les agro écosystèmes de savane et les déterminants de leur adoption par les paysans (Brown et Lugo, 1990).

Peu de travaux en Afrique de l'Ouest fournissent des recommandations de gestion permettant de concilier ces deux niveaux d'enjeux. Il apparaît dans le discours que la compensation de la concentration atmosphérique des GES par la séquestration du carbone dans les sols Ouest africains doit être associée à d'autres défis pressants de la zone (combattre la dégradation des terres, améliorer leur qualité et leur productivité et préserver la biodiversité) (Batjes, 2001). Du coup un défi majeur pour ces zones consiste à s'impliquer dans la mise au point des projets attractifs du Mécanisme de Développement Propre (MDP) (FCCC, 1997), impliquant chercheurs et décideurs politiques. Apparaît alors une forte demande en modèles de simulation et les outils d'aide à la décision dans le domaine de la gestion des terres (Detwiler, 1986) utilisés ou espérés (Hansen et Reenberg, 1997) (Detwiler, 1986 ; Hansen et Reenberg, 1997). Des modèles classiques existent mais ont des limites (échelle parcellaire, non adaptés) ou ne sont pas calibrés pour la zone de savane (Woomer, 1993) (Coleman et Jenkinson, 1995 ; Parton, 1995) (Pansu *et al.*, 1996). Des approches dynamiques se développent mais sont également insuffisantes (caractère non explicites et absence de coordination) (Stéphenne et Lambin, 2001), (Barbier *et al.*, 2002). Les systèmes multi-agents (SMA) sont une voie possible dans l'approche prédictive de la gestion des ressources naturelles. Les SMA dans un tel contexte présentent des

avantages parce qu'ils prennent en compte les échelles individuelles et collectives, mais aussi la dimension spatio-temporelle (Verburg *et al.*, 1999). Le SMA MIROT permet de simuler la dynamique du C à l'échelle terroir en fonction des scénarios de gestion. C'est un outil d'investigation et de recherche. Il a été conçu, et testé à partir des données de trois campagnes de mesures sur le terroir étudié, Torokoro, dans le sud-ouest du Burkina Faso.

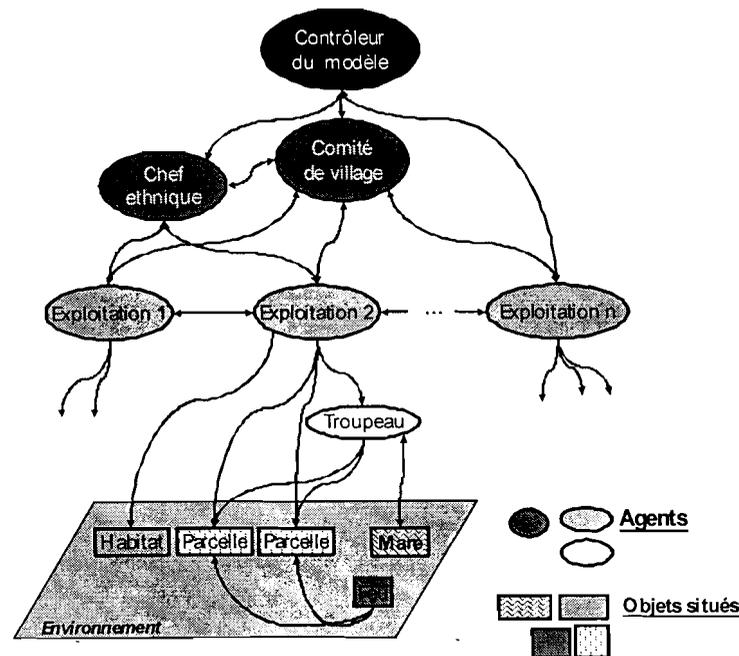


Figure 3: SMA appliqué au terroir, tiré de Manlay, 2002

1.3. POURQUOI LE SMA ?

Il y'a un intérêt grandissant de la modélisation pour l'étude des systèmes complexes (Swift, 1998). Il y'a nécessité de mettre au point ces modèles dynamiques pour comprendre l'évolution de l'occupation de l'espace (Stéphenne et Lambin, 2001). Les modèles permettent l'exploration du changement futur de l'usage des terres sous différents scénarios (Verburg *et al.*, 2004) et simulent le comportement des acteurs dans les processus de décisions (Tschakert, 2004). L'intérêt grandissant pour les SMA provient aussi de leur facilité d'adaptation à la simulation de la gestion des ressources naturelles.

Des exemples de modélisation ont été développés pour l'étude des relations populations environnement avec cependant une absence de dynamique spatiale (Barbier *et al.*, 2002). Aucun modèle à ce jour n'a pu intégrer variables démographiques, socio-économiques et biophysiques dans le contexte africain (Henry *et al.*, 2003). Il manque encore des modèles synthétiques pour permettre d'anticiper de manière satisfaisante le devenir des systèmes agraires (Barbier *et al.*, 2002). Une des solutions serait d'intégrer les différents types de modèles (Lambin *et al.*, 2000).

Dans l'étude des changements d'usage des terres, le SMA pourrait aider à explorer les échelles de dépendances en mettant en liaison l'état d'un individu à l'état d'un groupe d'individus (Verburg *et al.*, 2004). La plate forme « Common Pools Ressources

Management and Simulation » (CORMAS) a été utilisée pour cette modélisation. Celle-ci a été utilisée en raison de son adaptation pour la simulation des ressources naturelles. CORMAS a été choisi pour concevoir et mettre en œuvre le SMA MIROT⁶. Celui-ci simule la dynamique du carbone dans cette zone d'Afrique à l'échelle terroir. MIROT intègre les échelles parcelles et exploitations agricoles, tout en prenant en compte les acteurs individuels ou collectifs et formule des recommandations de gestion durables des ressources (Figure 3).

1.4. OBJECTIFS DE LA THESE

1.4.1. Objectif global

L'étude vise à comprendre la dynamique du carbone dans un terroir agro-pastoral du Sud-ouest burkinabé présentant deux systèmes de production, et, partant, à prédire (1) sa viabilité en fonction de différents scénarii sociaux et techniques, (2) et son bilan en carbone avec l'atmosphère.

1.4.2. Hypothèses générales :

H1 : Les systèmes de production agricole génèrent des flux et stocks spécifiques de matières organiques dans le système sol-plante.

H2 : la disponibilité et l'usage des ressources organiques (carbone et nutriments associés) appréhendée à l'échelle du terroir est un indicateur robuste de la viabilité des systèmes de production dans les savanes en Afrique de l'Ouest (SPSAO).

Objectifs spécifiques

La thèse vise précisément, pour un terroir du Sud-ouest Burkinabé, à :

- Analyser les déterminants biophysiques et socio-économiques (1) des flux et stocks de carbone organique à l'échelle du terroir et des systèmes de production, (2) et les conditions de sa viabilité évaluée par la disponibilité de l'offre en ressources carbonées et l'usage de celles-ci,
- Calibrer un modèle multi-agents simulant les flux de C à l'échelle d'un terroir permettant de tester des scénarios d'évolution
- Simuler et analyser des scénarios d'évolution.

1.5. ORGANISATION DE LA THESE

Ce mémoire de thèse comprend huit chapitres. L'introduction générale fait l'état de l'art sur l'importance agro écologique et environnementale du C et des ressources organiques en général. La problématique de recherche y est développée à partir des hypothèses émises. Les objectifs y ont été présentés.

Le chapitre 1 décrit le terroir d'étude. Les méthodologies, les échelles d'étude et leur justification.

Les chapitres 2 et 3 traitent respectivement des compartiments sol et plante à l'échelle parcelle. Des modèles parcellaires de stockage de C ont été développés dans chacun de ces chapitres.

⁶ Modélisation Intégrée de la dynamique de Ressources Organiques et analyse de viabilité des les Terroirs agro-sylvo-pastoraux de savane d'Afrique de l'Ouest

Les déterminants socio-économiques de la dynamique des ressources organiques ont été étudiés au chapitre 4. Des modèles socio-économiques empiriques décrivant les besoins des exploitations en terme de surface à cultiver, de céréales, d'argent et de bois d'énergie ont été développés à partir des données d'enquêtes de terrain (données quantitatives appuyées de données qualitatives).

Le modèle multi agents est décrit dans le chapitre 5. Les données de terrain collectées (voir chapitres 2, 3 et 4) sont utilisées pour calibrer le modèle. Ce chapitre 5, intègre plusieurs échelles d'étude (parcelle, exploitation agricole et terroir) et décrit le système complexe MIROT.

Enfin dans le chapitre six, les simulations de divers scénarios par le modèle SMA sont présentées avant de conclure et d'émettre les perspectives de travail suite à ces travaux.

La structure adoptée est une thèse à articles, rendant autonome chaque chapitre. En raison de cette organisation en chapitres autonomes, des redondances inhérentes à ce type de présentation ont pu être commises. Elles sont minimisées autant que possible.

SITE D'ETUDE ET METHODOLOGIE GENERALE

2. SITE D'ETUDE ET METHODOLOGIE GENERALE

2.1. POURQUOI UNE ETUDE A L'ECHELLE DU TERROIR'?

La notion de terroir est controversée. Plusieurs définitions du terroir ont été proposées (Rabot, 1990), (Bonnet, 1990), Toulmin, 1994 cité par Guèye (1999). En fonction de la discipline (géographie, agronomie et sociologie...), le concept de terroir a des nuances (Jouve, 1996). La définition retenue ici est celle qui désigne le terroir comme étant le territoire du village, approprié par ses habitants qui le gère. Cette définition permet une adéquation entre gestion et décision collective commune, prenant en compte les principales composantes et caractéristiques du terroir ainsi que les groupes sociaux qui y sont établis. Le terroir ainsi défini a plusieurs propriétés, une diversité d'acteurs, des échelles individuelles et collectives et des interactions agro-écologiques et socio-économiques. On pourrait ainsi lui plaquer une représentation simplifiée (Figure 3). Les relations entre la prise de décision et la gestion des ressources naturelles (terroir : décisions communautaires pour la répartition des eaux, sols, végétation et parcours) ont été décrites et relèvent de ce niveau en zone de savane (Swift, 1998). Une autre propriété du terroir, qu'il faut prendre en compte, c'est le caractère dynamique de son espace géographique. Ceci est particulièrement vrai dans le contexte des zones de savanes Ouest africaines, en particulier au Burkina Faso. Par exemple, la création d'un village autonome crée du coup un terroir à ce dernier ce qui réduit l'espace géographique du terroir initial. Le terroir villageois a été retenu en raison donc de toutes ces propriétés. La complexité de celui-ci ne peut être appréhendée que par des systèmes complexes tels que les SMA.

2.2. SITE D'ETUDE

2.2.1. Critères de choix du site

L'objectif était de prendre un terroir :

- dont les systèmes de production étaient décrits et un certain nombre de connaissances déjà acquises ;
- qui présentait des systèmes de production variés sur un même type d'environnement morpho pédologique et climatique ;
- qui subissait des rapides évolutions dans le temps susceptibles d'être encore dans la mémoire des occupants ;

Pour atteindre ces objectifs nous avons choisi un terroir dans la zone de front pionnier présentant des problématiques inhérentes à cet état de fait, dans le domaine de la gestion de ressources communes.

Plusieurs raisons ont conduit au choix du terroir de Torokoro comme site d'étude. C'est une zone de front pionnier de migration. La zone accueille des migrants depuis une vingtaine d'années. Le terroir est situé dans la province de la Comoé qui elle-même est située dans la partie sud du pays. L'indice de dégradation du couvert forestier est faible (Bationo, 1993). Les potentialités de la zone du Sud –Ouest attirent vers elle les populations des zones défavorisées fuyant la surpopulation et les mauvaises conditions climatiques (Henry *et al.*, 2003) ; (Barbier *et al.*, 2002). La zone de front pionnier de

migration actuelle constitue la dernière zone à haute potentialité en ressources agricoles, pastorales et environnementales au Burkina Faso.

La protection de cette zone de front pionnier constitue donc un enjeu d'intérêt national (GRN/SP, 1998). C'est pourquoi le programme FAC⁷ a financé un projet intitulé « Front pionnier de migration (FP) » dont l'objectif était d'étudier l'impact du phénomène migratoire sur les ressources. Un des axes de recherche du programme était l'élaboration d'outils d'aide à la décision et d'outils de sensibilisation sur la gestion des ressources naturelles (GRN/SP, 1998). Une deuxième phase a été proposée pour élaborer des modèles de gestion optimale des ressources naturelles en vue d'un développement durable des systèmes de production (GRN/SP, 1998). Un autre programme (GEPRENAF, 1997-2001), subventionné par le Fonds pour l'Environnement Mondial (FEM) et la Belgique (Lompo/Djarra, 1998) et administré par la Banque mondiale, visait la gestion participative des ressources naturelles et de la faune. Il couvrait une zone de savane arborée contiguë sur deux pays (Burkina Faso et Côte d'Ivoire). Les objectifs du programme étaient : (1) d'augmenter le revenu des ménages (2) d'augmenter le niveau d'instruction par l'alphabétisation des adultes et la scolarisation des enfants (3) d'améliorer des conditions sanitaires et l'hygiène des populations.

Les potentiels de données obtenues dans ces différents projets et études faisaient de ce terroir une zone idéale pour notre étude.

2.2.2. Description

2.2.2.1. Localisation et climat

Le terroir de Torokoro est situé dans le département de Mangodara (4°20' - 4°30' de longitude Ouest et 9°59' - 10°05' de latitude Nord) (Figure 4). Le terroir se situe dans la zone sud soudanienne. Le climat y est du type tropical, chaud et sec avec des températures moyennes de 27-28 °C. Deux grandes saisons subdivisent l'année. La saison humide (pluvieuse) qui va de mai à octobre, c'est une saison uni-modale avec le maximum des précipitations en août. Les hauteurs moyennes de précipitation varient de 900 à 1200 mm par an. La saison sèche s'étale du 15 octobre au 15 mai et se subdivise en deux périodes : sèche et froide du 15 octobre au 15 février, sèche et chaude du 15 février au 15 mai. La pluviométrie du site de Mangodara (16 km de Torokoro) sur ces 15 dernières années est présentée dans le Tableau 1.

⁷ Fonds d'Aide et de Coopération ministère français de la coopération

Tableau 1: Pluviométrie mesurée sur la station météorologique de Mangodara (15 km de Torokoro)

Années	Hauteur de pluie (mm)	Nombre de jours de pluies/an
1987	1143,7	55
1988	1014,9	66
1989	1255,4	59
1990	1005,2	50
1991	934,7	72
1992	723,3	51
1993	1234,4	81
1994	1431,1	87
1995	1078,2	76
1996	982,1	68
1997	1220,6	76
1998	1111,1	88
1999	1257,7	97
2000	921,5	67
2001	1111,1	61
2002	991	62
2003	1185	65
2004	1214	77
Moyenne	1101	70

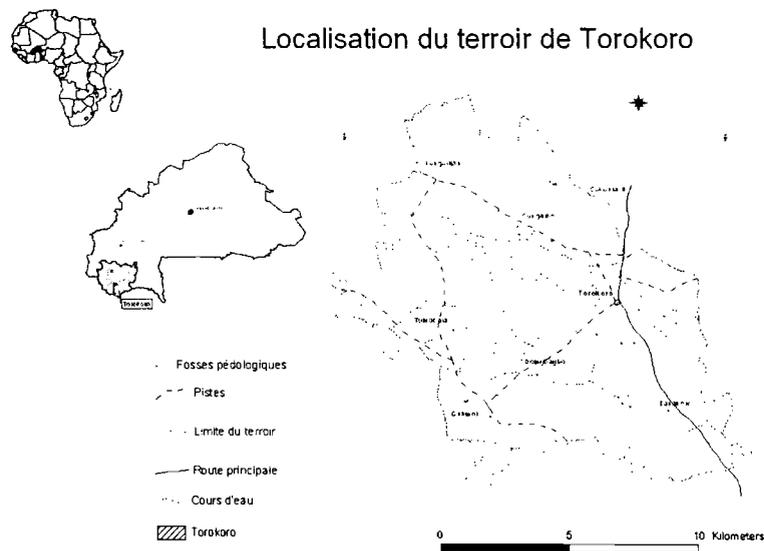


Figure 4: Localisation du terroir de Torokoro et des parcelles échantillonnées

2.2.2.2. Végétation et sols

Une classification de la végétation inspirée par des travaux antérieurs, essentiellement basée sur la hauteur, la morphologie et le recouvrement du couvert ligneux a été proposée par Botoni (2003). Elle montre que les couverts végétaux de la zone relèvent de formations mixtes forestières et graminéennes comprenant des savanes et des forêts claires. L'occupation de 1998 montrait : (1) une prédominance de la savane arborée sur 6579 ha soit 54 % du terroir ; (2) une occupation par les cultures de 2587 ha soit 21 % du terroir ; (3) une prédominance de forêt claire sur 1683 ha soit 14 % du terroir ; (4) une savane arborée claire 912 ha soit 7 % ; (5) d'autres diverses formations minoritaires, de forêt sèche, de formations ripicoles, de savanes herbeuses ou de plantations.

La géomorphologie et les sols de l'Ouest du Burkina Faso ont été décrits par plusieurs travaux (Boulet, 1976 ; Rieffel et Moreau, 1968 ; Rieffel et Moreau, 1969). Des cartes de sols ont été réalisées à l'échelle 1/500000, soit une précision assez limitée. Plus récemment, une description de la géomorphologie du terroir a été réalisée par l'INERA dans le cadre du programme Front Pionnier. Le Bureau National des Sols (BUNASOLS), dans le cadre de la cartographie systématique des provinces de la Comoé et de la Léraba a couvert le terroir à l'échelle de 1/100000. Une carte morphopédologique a été dressée à l'échelle du 1/ 50000 à partir de ces études.

Il ressort des ces études cinq unités géomorphologiques dans le terroir: (1) les buttes cuirassées faisant partie des reliefs résiduels et occupant 2 % du terroir ; (2) les glacis de raccordement subdivisés en trois : (glacis pente supérieure 4 % du terroir, glacis pente moyenne 83 % du terroir) ; (3) les ensembles fluviaux alluviaux, (4) les Bas-fonds, vallons et levées alluviales représentant 11 % du terroir.

Les sols décrits sont surtout de type ferrugineux tropical lessivé (lixisol) sur les versants, quelques sols hydromorphes à pseudogley d'ensemble sont observés dans les interfluves tandis que les sommets de ceux-ci sont occupés par des lithosols (lixisols).

2.2.2.3. Systèmes de production

Dans ce terroir, deux systèmes de production prédominent (Augusseau (2000b) ; (Gazel, 2002)) : (Figure 5).

Le système de production basé sur la production de l'igname (*Discorea sp*) est une culture semi permanente voire itinérante (Ruthenberg, 1971b). La succession culturale décrite dure 5 à 6 ans. Elle est pratiquée par les populations autochtones (Doghossé). Ceux-ci seraient arrivés à Torokoro au début du 20^{ème} siècle. Ils représentent 40 % des 311 exploitations recensées (Augusseau, 2000a). Ils disposent des plus grands domaines dans la partie Ouest du terroir. Ils sont les propriétaires des terres. A l'intérieur de la communauté, l'héritage est le principal mode de transmission de la terre. Des prêts de terre existent et concernent toutes les communautés. Les populations autochtones Doghossé donnent, prêtent ou « vendent » de la terre aux migrants (Bonkougou, 2004). Dans la suite du texte ce système sera appelé système itinérant ou système autochtone en abrégé, SCI.

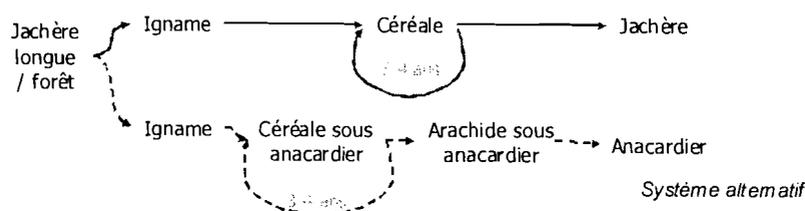
Le système de production à base de la culture de coton (*Gossipium sp*) est une rotation triennale coton/maïs/coton; ou maïs/coton/maïs. En troisième année une céréale est le plus souvent cultivée, mais la rotation a des variantes en fonction de chaque exploitant. C'est un système de culture quasi-permanent. Ce système est pratiqué par les exploitants migrants. Dans la suite du texte nous l'appellerons système permanent (SCP). Les origines des migrants sont variés, ils représentent une quinzaine d'ethnie (Botoni, 2003) induisant des variations sociales d'une exploitation à l'autre. Cependant la majorité des migrants, environ 40 % de ceux-ci sont du groupe ethnique Mossi, (Augusseau, 2000b) ayant donc

des pratiques relativement homogènes. Le reste 60 % des migrants est reparti en quatorze ethnies (Lobi, Dagara, Gouin, Turka, Karaboro, Peulhs, Samo, Bobo, Dafing...).

Les itinéraires techniques, combinaisons logiques et ordonnées des techniques culturales ont été décrits dans des études et rapports de façon détaillée pour les principales cultures (Djarra, 1998 ; Ye, 2002 ; N'Dali, 2004 et Palé, 2004). Les productions agricoles sont : igname, coton, anacardier associé avec des manguier, maïs, sorgho, riz, niébé, arachide, sésame. L'igname et le coton sont principalement destinés à la vente. Le maïs et le sorgho se vendent très bien mais le maïs est prioritairement réservé pour l'alimentation familiale. Les autochtones et les migrants (toutes ethnies confondues) plantent les anacardiers (*Anacardium occidentale*) introduits vers 1990 par le projet anacarde. Son amande (noix de cajou) est destinée à la vente. L'engouement pour cet arbre répond à des stratégies variées selon les types d'exploitations (appropriation de la terre, marquage du domaine) mais pour tous, l'apport économique que procure la vente de la noix de cajou et subsidiairement le rôle alimentaire de l'anacardier (le faux fruit est mangé) justifient ces plantations. Le risque à terme est une concurrence entre cet arbre et les céréales, voire une compétition avec les populations, pour l'occupation de l'espace. L'augmentation des surfaces plantées pourrait induire un risque pour la sécurité alimentaire. Actuellement 60 % des exploitations plantent l'anacardier (Augusseau, 2000a) et environ 50 % du domaine de certains migrants est planté (Bonkoungou, 2004).

Le système d'élevage est caractérisé par un important cheptel. En raison de sa situation dans une zone soudano-guinéenne, dans la zone de front pionnier, le terroir dispose d'un fort potentiel en biomasse ligneuse et herbacée qui attire les éleveurs nomades (pasteurs Peulhs) et leur troupeau. Il existe un élevage traditionnel extensif et un cheptel de trait en développement. Au total, c'est donc un cheptel important qui est entretenu dans ce terroir. Nebie (2000) y a dénombré 1553 bovins et 1596 petits ruminants (Nebie, 2000).

a) Système de production autochtone traditionnel et alternatif



b) Système de production migrant conventionnel et alternatif

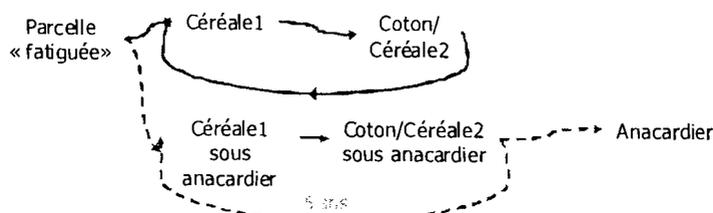


Figure 5: Succession culturale dans les deux principaux systèmes de production

D'autres effectifs ont été mesurés, par exemple Augusseau (2003) dénombrait 2100 têtes de bovins et 43 troupeaux dont 2/3 appartient aux peuls. Une typologie de l'élevage met en évidence trois systèmes d'élevage correspondant aux trois groupes sociaux existant sur le terroir (Botoni, 2003). Les agro-pasteurs autochtones, les agro-pasteurs migrants et les pasteurs peuls. Hormis les animaux de trait, l'élevage est contemplatif. L'éleveur vise principalement l'augmentation du nombre de têtes mais ne valorise pas toujours les produits animaux. Le petit élevage est peu développé. Il assure la fonction d'épargne (stock vivant) pour les exploitations. Ceux-ci en prélèvent pour vendre et satisfaire les besoins ponctuels (financiers, matériels). La zone accueille en saison sèche quelques transhumants mais le nombre est en baisse (Botoni, 2003). En dépit de cette diversité d'élevage celui-ci est faiblement intégré à l'agriculture. Les transferts sont également limités en raison d'un contrôle plus ou moins strict de l'accès aux espaces pâturables.

2.2.2.4. Population

Le dynamisme démographique du terroir de Torokoro est évident lorsqu'on regarde l'évolution très rapide de la population. La densité de la population du département de Mangodara était de 7 hab. au km² en 1998, en 2002 elle est passée à 25 hab. au km² (Lompo/Djarra, 1998). La population du terroir de Torokoro était de 790 habitants en 1985, elle a atteint 2700 habitants en 2002 (Augusseau *et al.*, 2004). Le fort dynamisme démographique de Torokoro et les risques induits sur les ressources, fragilisent le milieu et l'environnement et sont en partie responsables de la baisse des ressources organiques de ce terroir.

Le taux de croissance de la population rurale au Burkina Faso est de 2,5% (Drabo *et al.*, 2003), soit un doublement de la population en 30 ans (Hansen et Reenberg, 1997). Ce taux est estimé à 6% dans certaines zones rurales (Serpantié, 2003). Il est augmenté par les migrations qui sont un fait historique au Burkina Faso. En effet les migrations interprovinciales au Burkina Faso sont plus importantes que dans les pays voisins (Henry *et al.*, 2003).

Les causes des migrations sont variées. Généralement, la baisse de la productivité induit une tendance au déplacement vers les zones les moins peuplées où des ressources peuvent encore être exploitées (Barbier *et al.*, 2002). Parmi les facteurs explicatifs les variables démographiques (population, sexe) et socio-économiques (activité économique) sont plus importantes que les variables environnementales (changement biophysique dans l'environnement) même si celles-ci ont tout de même un effet sur ces migrations (Henry *et al.*, 2003). La conséquence est que dans les zones de départ on assiste à une perte de force de travail et dans les zones d'arrivée on assiste à une insuffisance des infrastructures d'accueil et à des conflits entre les populations migrantes et celles autochtones.

Chapitre 3 : Déterminants naturels et anthropiques des stocks de carbone dans les sols.

3. DETERMINANTS NATURELS ET ANTHROPIQUES DES STOCKS DE CARBONE DANS LES SOLS

3.1. INTRODUCTION

D'un point de vue agro-écologique la matière organique évaluée et mesurée par son principal constituant, le carbone (C), joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des agro écosystèmes. En effet elle affecte favorablement les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Batjes, 2001). La matière organique est un réservoir d'éléments nutritifs disponibles après minéralisation pour les plantes (Smith *et al.*, 2000). Elle favorise la structure du sol (Zech *et al.*, 1997) améliorant ainsi la circulation et le stockage de l'eau, l'aération et la respiration des racines (Detwiler, 1986). Enfin elle stimule l'activité biologique des sols. La quantité de matière organique dans un sol résulte de l'équilibre entre la part de la production primaire retournée au sol (exsudation, restitutions par les litières, végétaux morts) et la respiration de la flore et de la faune du sol.

Du point de vue environnemental, le sol est un élément du cycle global du C. Tout changement de sa gestion tendant à diminuer les pertes du carbone provenant du sol ou à augmenter les quantités de carbone dans les sols est donc un moyen de contre-balancer l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère. On dit alors que le sol est un puits de carbone (GIECC, 1997).

Compte tenu de son importance dans l'écosystème, la matière organique du sol constitue une ressource importante qu'il convient de gérer au mieux dans le contexte d'enjeux agronomiques et environnementaux majeurs à l'échelle de la planète.

Le déterminisme de la matière organique du sol est relativement bien connu. En effet de nombreux auteurs ont montré l'importance à la fois de la structure et de la texture des sols sur la disponibilité et la dynamique de la matière organique des sols. Il est connu que le statut organique des sols est déterminé par leur texture, notamment la teneur en éléments fins correspondants à l'argile et aux limons fins et que la dynamique de la matière organique du sol apparaît sous l'influence de processus biologiques largement influencés par les caractéristiques texturales.

Pour discuter des modalités de gestion du carbone organique du sol (COS), Ingram (2001) distingue trois types de stock de carbone dans le sol :

- Le stock potentiel, défini par les propriétés physico-chimiques intrinsèques du sol généralement liées à la pédogenèse (minéralogie, profondeur de sol, texture, porosité), elle-même déterminée par le climat ;
- Le stock réalisable, défini par le niveau des entrées de carbone dans le sol donc par la production primaire et sa répartition, ainsi que par le climat qui influence directement ou indirectement la production primaire ;
- Le stock réel, mesuré à un instant donné. Il est généralement inférieur au stock potentiel et réalisable en raison des pertes de C dues à l'érosion, ou à l'accélération de la minéralisation due au travail du sol, voire un prélèvement des résidus organiques.

Selon Ingram (2001) la gestion de la MOS doit viser à réduire l'écart entre stocks réel et réalisable. Ne pouvant agir sur la pédogenèse ou le climat pour augmenter le stock potentiel, la solution pour réduire cet écart consiste à augmenter les entrées par la production primaire, ou à réduire les pertes principalement au niveau des prélèvements par

l'homme et ses pratiques ou de l'érosion qui peut entraîner de grandes quantités de carbone organique.

Dans les savanes d'Afrique de l'Ouest, la pratique agricole traditionnelle était fortement liée à une alternance de courte période de culture et de longue période de jachère (Jouve, 2000 ; Serpantié et Ouattara, 2000). Avec l'augmentation de la population et des besoins en terre, ces dernières décennies ont vu des transformations des systèmes de production avec l'introduction de culture de rente entraînant une mise en culture permanente des terres, (Serpantié, 2003). Il apparaît intéressant de pouvoir évaluer l'influence de ce changement de gestion des terres sur les différences de stock de carbone organique dans le système sol-plante à l'échelle d'un terroir.

Au Burkina Faso, la zone dite du front pionnier fait cohabiter sur un même espace deux systèmes de production. Le premier système pratiqué par les populations autochtones est un système itinérant basé traditionnellement sur la défriche de jachère de longue durée et de culture de l'igname pendant une année et de quelques années de céréales avant un retour à la jachère. Le deuxième système est pratiqué par des populations migrantes et est basé sur la culture permanente d'une rotation coton-céréales (Augusseau, 2000b).

L'objectif de ce travail est de comparer l'évolution des teneurs et des stocks en carbone des sols entre les deux systèmes de production avec culture itinérante (SCI) et en culture permanente (SCP). Ce travail comporte deux objectifs complémentaires : (1) cognitif : il s'agit d'identifier et hiérarchiser les déterminants naturels et anthropiques des stocks de carbone du sol dans deux systèmes de culture itinérante, (2) méthodologique, à savoir la production de modèles déterministes de prédiction des stocks de carbone du sol pour son intégration dans un modèle complexe à l'échelle du terroir.

Les hypothèses sous-tendant l'étude sont qu'en milieu de savane (1) un système de culture permanent préserve moins bien le carbone du sol qu'un système itinérant à rotation culture jachère, et (2) que le stock de carbone du sol peut être modélisé comme une fonction des conditions naturelles et anthropiques locales.

3.2. MATERIEL ET METHODES

3.2.1. Site d'étude

Le terroir de Torokoro (4°20'-4°30' et 9°59'-10°05') dans le département de Mangodara, dans la région Ouest du Burkina Faso couvre une superficie de 15000 ha. Il est situé en zone sud-soudanienne (Figure 6). Les températures moyennes varient entre 27 et 28 °C. Le climat est à deux saisons contrastées une saison pluvieuse qui s'étend de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril. La pluviosité moyenne varie de 900 à 1200 mm par an. La végétation naturelle est une savane arborée dont les principales espèces sont *Vitellaria paradoxa*, *Terminalia laxiflora* et *Parkia biglobosa*. *Isobertia doka* auquel est associé *Isobertia dalzielli*, présent dans les forêts claires. Le tapis herbacé est dominé par des Andropogonées vivaces : *Andropogon ascinodis*, *Schizachyrium sanguineum*, *Hyparrhenia spp.* Les sols sont des ferrugineux tropicaux lessivés indurés profonds à peu profonds et les sols ferrugineux à tâches et concrétions (CPCS, 1967).

Deux systèmes de production dominant dans le terroir ;

- Un système de production à base d'igname qui est le fait des exploitants autochtones. Dans ce système, la mise en culture débute sur une défriche de formation naturelle sur laquelle va être cultivé successivement l'igname, le maïs, le sorgho pendant deux à trois ans avant la mise en jachère ou une plantation.

- Le système de production à base d'une rotation triennale (céréale/coton/céréale) des exploitants migrants. Ce système se développe sur des terres déjà cultivées (jachères fatiguées) obtenues des propriétaires (Augusseau, 2000b), (Gazel, 2002).

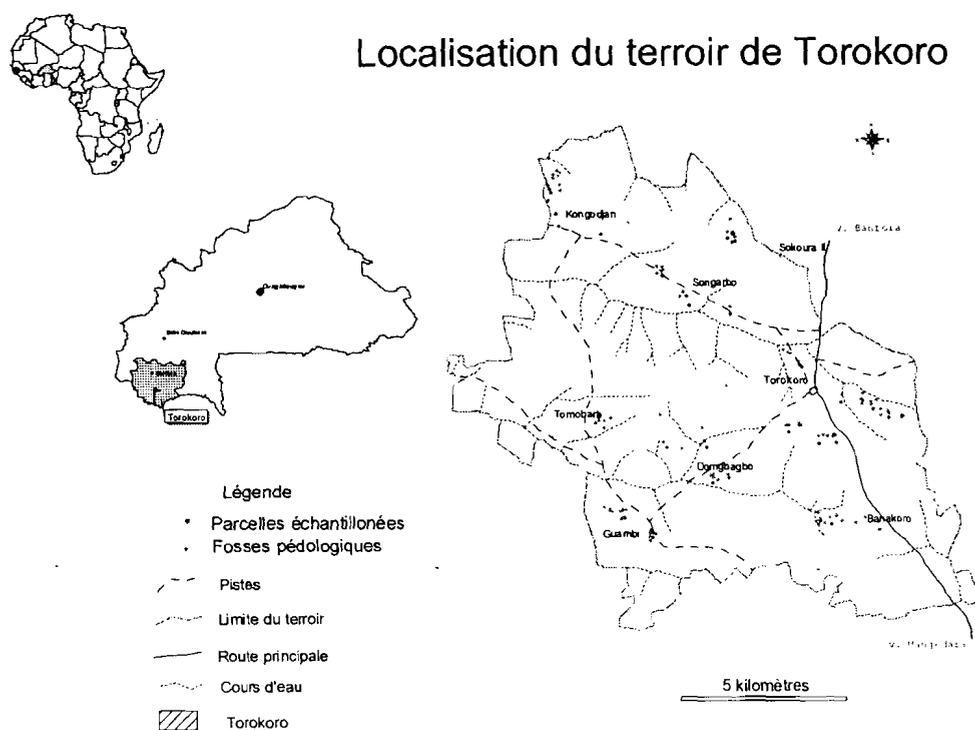


Figure 6 : Localisation du terroir de Torokoro et des parcelles échantillonnées

3.2.2. Echantillonnage des parcelles paysannes

Par des enquêtes auprès des producteurs, cent quinze parcelles ont été identifiées sur l'ensemble du terroir prenant en compte les deux systèmes de production, le système de culture itinérante (SCI) (78 parcelles) et le système de culture permanente (SCP) (33 parcelles). Quatre parcelles dans la forêt de Koflandé, adjacente au terroir ont également été repérées. Les parcelles sélectionnées représentent les différents stades dans les deux systèmes de culture (Tableau 2). Plusieurs parcelles par usages ou occupation actuelle ont été identifiées et considérée comme des répétitions. Le Tableau 2 résume les caractéristiques des parcelles échantillonnées.

Tableau 2: Nombre de parcelles échantillonnées par occupation de sol et système d'exploitation

Usages	SCI non cultivé	SCI cultivé	SCP non cultivé	SCP cultivé	Forêt
Anac+Céréale 3ans		9			
Anacarde 10	5				
Anacarde 6		2			
Anacarde 8	1				
Coton 1				3	
Coton 10				2	
Coton 2				3	
Coton 3				1	
Coton 5				2	
Coton 6				2	
Formation naturelle	10				
Foret					4
Igname		10			
Jachere 1	8				
Jachere 10	9		5		
Jachere 5	7				
Mais 1				3	
Mais 10				3	
Mais 2		7		1	
Mais 3				1	
Mais 5				2	
Mil 4		1			
Sorgho 10				2	
Sorgho 2				1	
Sorgho 3		5			
Sorgho 4		2		1	
Sorgho 5		2		1	

SCI: Système de Culture Itinérant

SCP: Système de Culture Permanent

Dans les domaines sous culture itinérante, 78 parcelles ont été échantillonnées dont 40 non cultivées et 38 cultivées. En domaine en culture permanente 33 parcelles ont été échantillonnées dont 5 non cultivées et 28 cultivées. Enfin les quatre parcelles en forêt ont été échantillonnées.

3.2.3. Echantillonnage des sols

Deux niveaux d'échantillonnage ont été réalisés il s'agit des échantillonnages dans les parcelles et de ceux dans les fosses pédologiques.

Dans les profils pédologiques des prélèvements ont été réalisés selon les horizons pédogénétiques ainsi que par niveau de profondeur par rapport à la surface (0-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-100, 100-150 cm); la profondeur de prélèvement variant selon la profondeur du profil.

Dans les parcelles un dispositif d'échantillonnage adapté de Hairiah (2001b) a été mis en place (Figure 7). Tous les quatre mètres le long d'un transect de 40 mètres, le sol sur 0-10 cm et 10-20 cm a été prélevé. L'igname étant cultivé en buttes, on a considéré que le sol de

la butte était l'horizon 0-10 cm et le sol sous la butte l'horizon 10-20 cm. Les dix prélèvements ont été mélangés en un seul composite pour chacune des profondeurs.

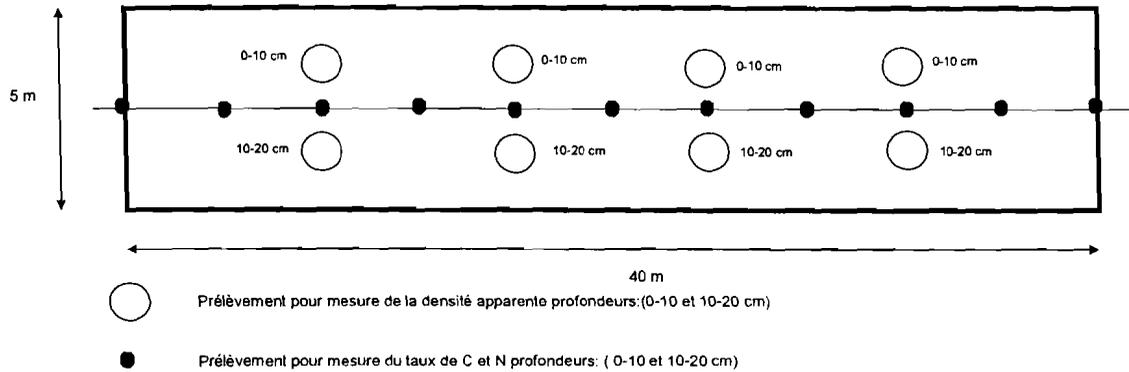


Figure 7: Dispositif d'échantillonnage dans les parcelles

3.2.4. Analyses physico-chimiques

L'ensemble des échantillons de sols a été séché à l'air libre, tamisé à 2 mm et conservé à température ambiante avant analyse.

Les densités apparentes ont été mesurées à partir d'un prélèvement d'échantillon de sol non remanié (100 cm³) sur un échantillon représentatif des sols et d'échantillons dans les profils pédologiques. La masse volumique de sol est pesée après séchage à 105 °C pendant 24 heures.

Les teneurs en C total du sol ont été déterminées par combustion en microanalyse élémentaire CHN (Carlo Erba NA 2000, Fisons Instrument).

Pour des diverses raisons, certains paramètres sur plusieurs parcelles n'ont pu être mesurés. L'estimation des données manquantes ont été faites à partir de fonction de pédotransfert, c'est-à-dire de relations entre deux paramètres édaphiques.

3.2.5. Calculs des stocks de carbone

Les stocks de C du sol ont été évalués à partir de la mesure de la teneur en C et de la densité apparente selon la formule :

$$\text{Stock C (Mg.ha}^{-1}\text{)} = \text{DA (g.cm}^{-3}\text{)} \times \text{Teneur C (mg.g}^{-1}\text{)} \times e \text{ (cm)} \times 0.1$$

Le stock de carbone d'un profil a été évalué par la formule :

$$\text{Stock C (Mg.ha}^{-1}\text{)} = \sum_e (\text{DA (g.cm}^{-3}\text{)} \times \text{Teneur C (mg.g}^{-1}\text{)} \times e \text{ (cm)} \times 0.1)$$

3.2.6. Analyses des données

Analyse de la distribution verticale des stocks de carbone dans les profils pédologiques

L'objectif c'est d'établir une relation entre les stocks de C dans les horizons supérieurs avec ceux mesurés sur l'ensemble du profil. Ceci nous permettra d'estimer le stock de C sur les profondeurs au delà de 20 cm sur l'ensemble des parcelles échantillonnées. Ces relations sont établies par régression non linéaire. Le meilleur modèle mathématique mettant en relation les teneurs de C et la profondeur du sol était le modèle exponentiel. Ce modèle exponentiel a été testé:

$$Y = ae^{-bp}$$

où Y est la teneur en carbone g kg⁻¹ sol, a et b sont les paramètres à estimer ; p est la profondeur moyenne de l'horizon en cm. Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel Statistica (StatSoft, 1995).

En raison du déterminisme de la matière organique des sols les facteurs pris en compte sont l'occupation de la parcelle (Cultivé, Non cultivé), le système de production (SCI, SCP) et la profondeur du sol (Sols profonds, Sols moyennement et peu profonds). Les différents paramètres mesurés seront comparés entre les modalités de ces facteurs.

3.2.7. Dynamique du C dans les sols des systèmes de production

Pour étudier la dynamique du C dans le système en culture permanente (SCP), on a utilisé un indice d'intensité culturale (IC), qui correspond au nombre d'année au cours d'une période donnée où la parcelle est cultivée. A partir d'enquêtes sur l'histoire des parcelles couvrant les dix années qui ont précédé l'échantillonnage, on a donc calculé l'indice IC selon la formule :

$$IC = \text{Nombre d'année de culture} / 10$$

Pour les systèmes de production itinérante (SCI), on a classé les parcelles par rapport à une succession théorique définissant ainsi une position dans la succession culturale (Posisucc). Par convention, les forêts classées ont été classées à 0 dans la succession culturale, les positions suivantes s'échelonnent de 1 à 5 correspondant au nombre d'année de culture après jachère, puis de 6 à 15 correspondant à la durée de jachère en année après abandon de la culture.

Différents modèles linéaires ont été testés.

Dans un premier temps, on a testé le modèle

$$Y = a (\text{Argile+Limon fin}) + \alpha (\text{Système de production}) + \varepsilon$$

Puis, dans chaque système de production, on a testé le modèle :

$$Y = a (\text{Argile+Limon fin}) + b (IC) + \varepsilon \text{ pour le système de culture permanente ;}$$

$$Y = a (\text{Argile+Limon fin}) + \alpha (\text{Posisucc}) + \varepsilon \text{ pour le système de culture itinérante.}$$

Les calculs ont été réalisés à l'aide du module GLM du logiciel SPSS.

3.3. RESULTATS

3.3.1. Densité apparente (Da)

La Figure 8 représente la densité apparente en fonction du sol. On peut distinguer 2 groupes de points :

- Un premier groupe d'échantillons prélevés entre 0 et 40 cm et qui présentent une variabilité importante de la DA de 0,6 à 1,5 g cm⁻³.
- Un deuxième groupe d'échantillons en dessous des 40 premiers cm qui se sépare en deux sous groupes de DA de valeurs différentes les unes autour de 1 g cm⁻³ et les autres qui s'établissent autour de 1,5 g cm⁻³

L'étude de la densité apparente en fonction des horizons pédologiques (A, B et Bmcs) a été faite (Figure 8). La Da ne varie pas significativement dans les horizons A et B du sol. Pour l'horizon A l'occupation du sol (mode de gestion) affecte significativement la Da (F=4,095 ; p=0,053). La Da moyenne en zone cultivée est de 1,392 contre 1,202 en zone non cultivée dans l'horizon A. L'évolution de la Da dans le profil montre que entre 0-40 cm de profondeur les Da moyennes des horizons A égale 1,23 et celui de l'horizon B égale 1,335

ne sont pas significativement différentes. Le type de sol (<60 cm et > 60 cm) affecte significativement la Da ($F=14,491$; $p=0,000$). La Da présente de faibles variations pour les horizons B en dessous de 50 cm et les horizons Bmcs.

Sur les parcelles échantillonnées, la DA moyenne des horizons 0-10 et 10-20 cm est respectivement de $1,14 \text{ g cm}^{-3}$ et de $1,24 \text{ g cm}^{-3}$ dans les domaines en système de culture itinérante et de $1,07 \text{ g cm}^{-3}$ et $1,19 \text{ g cm}^{-3}$ dans les domaines en système de culture permanente (Figure 8). Dans les deux cas la Da est sensiblement plus élevée dans l'horizon 0-10 cm ($F=7,101$; $p=0,009$). En revanche cette Da ne varie pas significativement entre parcelle cultivée et non cultivée ni entre parcelle en domaine en culture itinérante et permanente.

Estimation des données manquantes de DA

Sur certaines parcelles, les densités apparentes n'ont pu être mesurées. Pour estimer leur valeur, nous avons cherché la meilleure relation entre les DA et les autres caractéristiques mesurées (teneurs en argile, en limon, teneur en C.....). La variable explicative retenue est le taux d'argile. La fonction définie est la densité apparente est fonction du taux d'argile augmenté d'une constante :

$Da = 1,5 - 0,031 * (txarg)$; ($n = 86$, $r^2 = 0,49$, $r^2 = 0,24$) avec Da= densité apparente en g cm^{-3} ; txarg= taux d'argile en pourcentage.

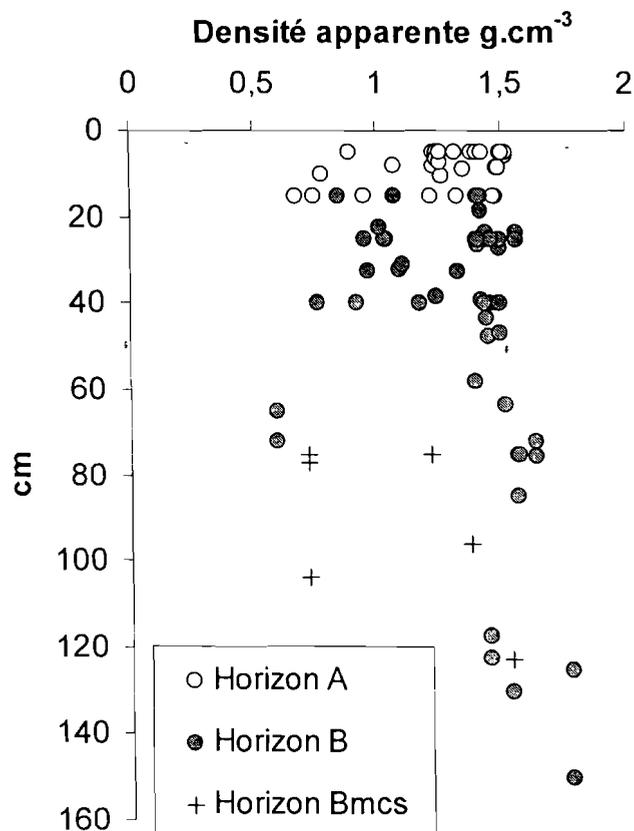


Figure 8 : Densité apparente en fonction de la profondeur du sol

3.3.2. Taux d'éléments fins (Ag+Lf%) et teneurs de C des parcelles

Le taux moyen d'éléments fins est de 14 % et 17 % respectivement dans les horizons 0-10 et 10-20 cm (Tableau 4). Il ne diffère pas significativement entre zones cultivées et zones non cultivées. L'horizon 0-10 cm est significativement moins riche en éléments fins que l'horizon 10-20cm ($F=11,01$; $p=0,001$). Le taux d'éléments fins ne diffère pas significativement entre les deux systèmes de culture et le témoin (forêt) (Tableau 3).

Tableau 3: Taux d'éléments fins dans les deux premiers horizons

Taux d'éléments fins (Argiles+limons fins) en % (0-10 cm)				
Peuplement	Etat cultural	N	TxElFin	
Forêt	Non	4	13,02	± 1,37
Forêt	Moyenne	4	13,02	± 1,37
Migrant	Non	5	13,96	± 2,39
Migrant	Oui	28	13,86	± 0,73
Migrant	Moyenne	33	13,87	± 0,68
Autochtone	Non	35	14,12	± 0,69
Autochtone	Oui	36	14,10	± 0,65
Autochtone	Moyenne	71	14,11	± 0,47
Moyenne	Non	44	14,00	± 0,60
Moyenne	Oui	64	13,99	± 0,48
Moyenne	Moyenne	108	14,00	± 0,37

n = nombre de mesures

TxEIFin = Taux d'éléments fins (Argiles+Limons fins en %)

Taux d'éléments fins (Argiles+limons fins) en % (10-20cm)				
Peuplement	Etat cultural	N	TxElFin	
Migrant	Oui	12	15,86	± 1,66
Migrant	Moyenne	12	15,86	± 1,66
Autochtone	Non	24	17,49	± 1,84
Autochtone	Oui	23	17,23	± 1,46
Autochtone	Moyenne	47	17,36	± 1,14
Moyenne	Non	24	17,49	± 1,80
Moyenne	Oui	35	16,76	± 1,08
Moyenne	Moyenne	59	17,06	± 0,96

n = nombre de mesures

TxEIFin = Taux d'éléments fins (Argiles+Limons fins en %)

3.3.3. Modélisation de la teneur de C dans les fosses pédologiques

Dans les fosses pédologiques les teneurs de C baissent significativement des horizons de surface vers les horizons de profondeur C ($F=33,42$; $p=0,000$), quelque soit le type de sol classé selon la profondeur d'apparition de la cuirasse (Figure 9). Par contre ces teneurs ne varient pas significativement en profondeur entre parcelles cultivées et non cultivées. Pour un même horizon les teneurs de C ne diffèrent pas significativement entre les parcelles cultivées et les parcelles non cultivées.

Le Tableau 4 présente les paramètres des modèles non linéaires établissant la relation de la teneur de C en fonction de la profondeur. Ce qui permet de déduire les différentes équations décrivant la distribution verticale de C.

Pour les sols profonds l'équation est la suivante :

$y = (7,62) \cdot \exp(-0,13 \cdot x)$; (y= teneur en carbone en g kg⁻¹ de sol ; x= profondeur moyenne en cm).

L'allure de la courbe est la même pour les sols moyennement profonds et peu profonds.

Son équation est :

$y = (8,65) \cdot \exp(-0,016 \cdot x)$; (y= carbone en g kg⁻¹ ; x= profondeur en cm).

On peut cependant retenir une équation englobant les deux types de sols. L'équation est alors :

$y = (8,39) \cdot \exp(-0,16 \cdot x)$; (y= carbone en g kg⁻¹ ; x= profondeur en cm) sauf pour les parcelles cultivées et non cultivées on n'a pas la même équation.

Tableau 4: Estimation des paramètres d'une régression des teneurs en C du sol en fonction de la profondeur du sol de 14 profils pédologiques

Paramètres des modèles de distribution du carbone par type de sol

Sous compartiment	n	a	b	r
Tous les sols (1)	91	8,39**	0,16**	75
Sols profonds (1)	50	7,62**	0,13*	72
Sols moyennement et peu profonds (1)	41	8,65**	0,21**	75

(1) Equation $C = a \cdot \exp(-b \cdot p)$

C teneur en carbone g kg⁻¹ p = la profondeur de l'horizon en (cm)

n= le nombre de mesures

a,b sont les paramètres estimés

** : significatif au seuil de $P < 0,001$

* : significatif au seuil de $P < 0,05$

r = est le coefficient de régression n.s : non significatif

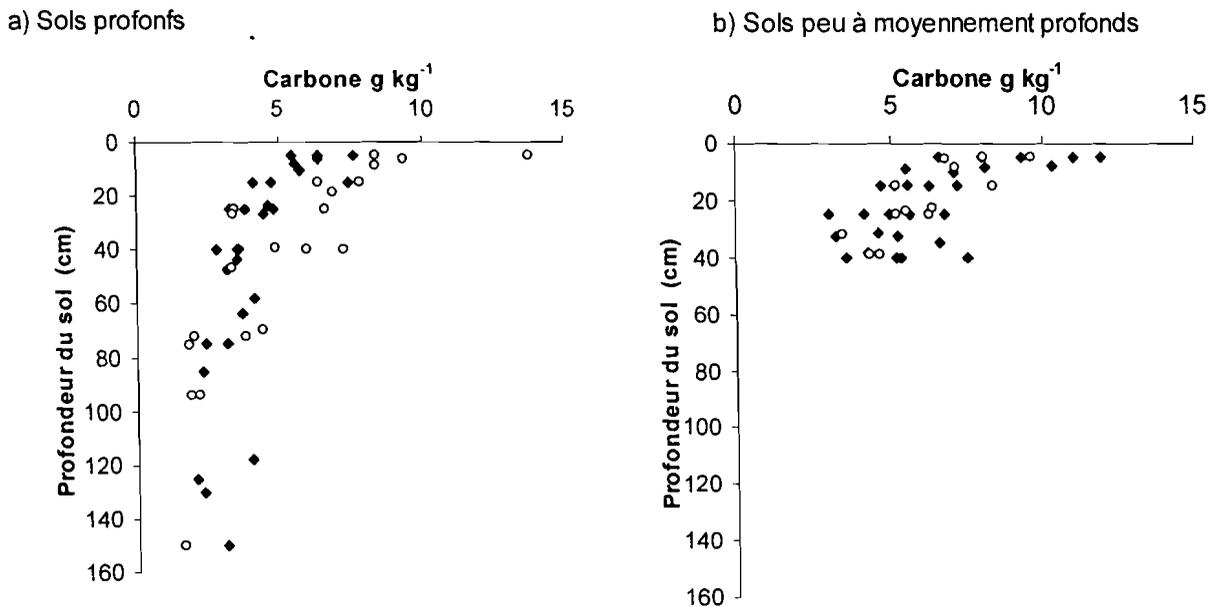


Figure 9: Distribution en profondeur de C par type de sols cultivés ou non cultivés

3.3.4. Modélisation de la teneur de C dans les 20 premiers cm des parcelles

Les teneurs de l'horizon 0-10 cm sont significativement supérieures à ceux de l'horizon 10-20 cm. On peut établir une bonne corrélation entre les teneurs en C de l'horizon 0-10 cm et celui de l'horizon 10-20 cm (Figure 10). Cette relation nous permettra d'estimer des valeurs manquantes dans les horizons. La meilleure estimation de la teneur de C total dans les sols est obtenue en associant les variables explicatives suivantes : le taux d'éléments fins, le système de production, le statut cultivé ou non cultivé... Le tableau 4 présente les meilleurs modèles retenus pour l'horizon 0-10 cm, ($F=377$; $p=0,000$; $r^2= 0,94$) et pour l'horizon 10-20 cm, ($F=164$; $p=0,000$; $r^2= 0,91$) (Tableau 5). Dans les deux cas, la teneur en C total du sol est déterminée par le taux d'éléments fins. De même, la teneur en C est liée aux systèmes de production (itinérante ou permanente). L'état cultural (cultivé, non cultivé) des parcelles n'a pas d'effet significatif.

Tableau 5: Estimation des paramètres d'une régression des teneurs de C du sol sur 115 parcelles sur les 0-10 et 10-20 cm

Modélisation de la teneur en carbone des sols (g/kg) (0-10 cm)

Variabes explicatives	Paramètres	Statistique de Student	Signification
Taux d'éléments fins	0,488	9,028	***
Système permanent	2,184	2,632	*
F =	377***		
R ² =	0,94		

*, ** et *** : significatif respectivement au seuil de 5 %, 1% et 0,1%

Modélisation de la teneur en carbone des sols (g/kg) (10-20 cm)

Variabes explicatives	Paramètres	Statistique de Student	Signification
Taux d'éléments fins	0,154	4,266	***
Système itinérant	2,936	4,149	***
Système permanent	3,676	4,455	***
F =	164***		
R ² =	0,91		

*, ** et *** : significatif respectivement au seuil de 5 %, 1% et 0,1%

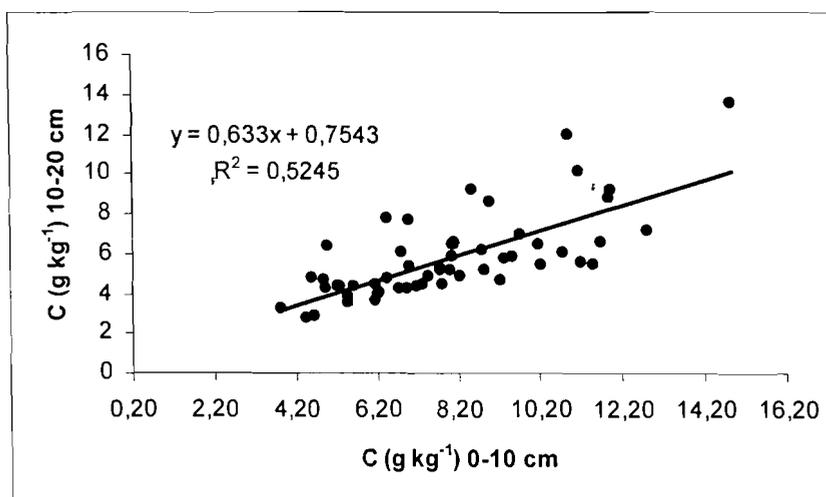


Figure 10: Teneurs en C de l'horizon 10-20 en fonction de celles de l'horizon 0-10 cm

3.3.5. Stocks de C dans les fosses pédologiques

Les stocks de C baissent en fonction de la profondeur du sol (Tableau 6). Le stock de C entre 0 et 50 cm de profondeur est corrélé avec les stocks calculés entre 0 et 10 cm, 10 et 20 cm et 20 et 30 cm. Les stocks entre 10 et 30 cm déterminent le plus le stock de la couche 0-50 cm ($r^2=0,73$) (Figure 11).

Tableau 6: Stocks moyens et cumulés de C par classe de profondeurs dans les fosses

Numéro de classe de profondeur	Classe de profondeur (cm)	Nombre d'échantillons	Stock C(kg ha ⁻¹) moyen	Stock C(kg ha ⁻¹) cumulé
1	0-10	23	13,09 ± 0,843	18,96 ± 3,15
2	10-20	13	7,38 ± 0,798	21,46 ± 2,54
3	20-30	18	8,69 ± 1,0	31,63 ± 3,41
4	30-50	20	12,43 ± 1,111	41,64 ± 3,99
5	50-100	16	15,02 ± 2,278	54,78 ± 2,59
6	100-150	10	10,54 ± 3,657	60,96 ± 5,67

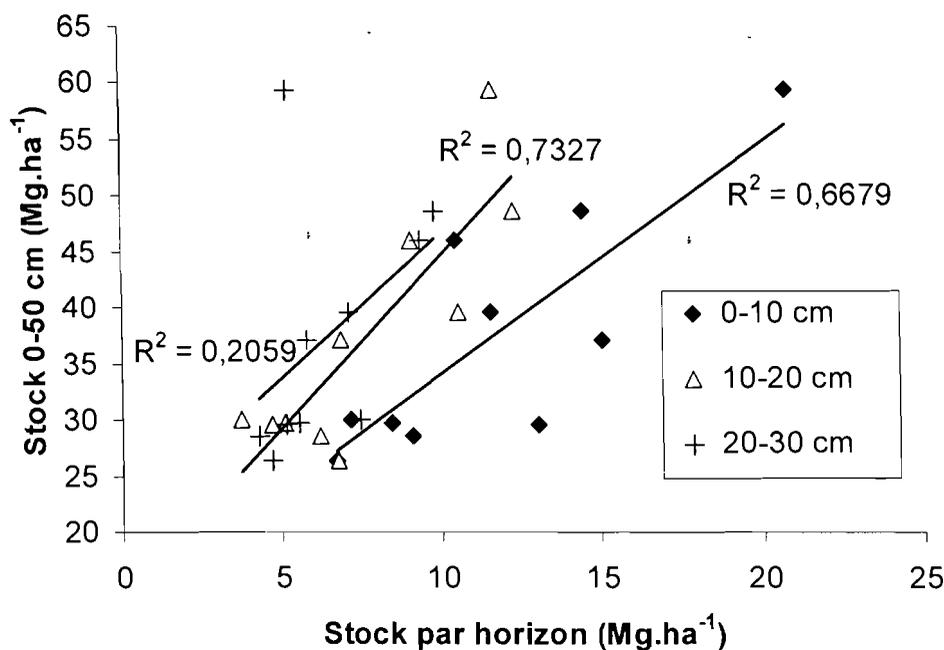


Figure 11: Relation entre les stocks des horizons 0-10, 10-20 et 20-30 cm avec le stock total de l'horizon 0-50 cm

3.3.6. Stocks de C dans les parcelles

Dans les domaines en SCP les stocks moyens de carbone sont supérieurs à ceux en SCI que se soit dans les espaces cultivés $10,84 \text{ tCha}^{-1}$ et $6,83 \text{ tCha}^{-1}$ respectivement pour les horizons 0-10 et 10-20 cm, ou que ce soit dans les espaces non cultivés $11,61 \text{ tCha}^{-1}$ et $5,84 \text{ tCha}^{-1}$ pour l'horizon 0-10 cm et 10-20 cm (Tableau 7). Les stocks moyens de C obtenus ont été examinés par système de production (itinérant, permanent), par horizon et l'état cultural de la parcelle. Les stocks moyens obtenus quelque soit le type de parcelle sont de $10,96 \text{ tCha}^{-1}$ pour l'horizon 0-10 cm et de $6,75 \text{ tCha}^{-1}$ pour l'horizon 10-20 cm, soit $17,71 \text{ tCha}^{-1}$ pour les 20 premiers centimètres.

Dans les domaines en culture itinérante les stocks moyens de carbone mesurés dans les espaces cultivés ($8,29$ et $6,13 \text{ tCha}^{-1}$ respectivement pour 0-10 et 10-20 cm) ne sont pas significativement différents des stocks mesurés dans les espaces non cultivés ($8,62$ et $5,88 \text{ tCha}^{-1}$ respectivement pour 0-10 et 10-20 cm) (Tableau 7)

Tableau 7: Stocks de C dans les deux systèmes de culture en parcelles cultivées ou non (moyenne et erreur standard)

Système	Cultivé	Horizon (cm)	n	C (t ha^{-1})
itinérant	Oui	0-10	33	$8,29 \pm 0,40$
	Oui	10-20	21	$6,13 \pm 0,46$
	Non	0-10	33	$8,62 \pm 0,37$
	Non	10-20	26	$5,88 \pm 0,40$
	total	0-10	66	$8,45 \pm 0,27$
	total	10-20	47	$5,99 \pm 0,29$
permanent	Oui	0-10	28	$10,84 \pm 0,82$
	Oui	10-20	11	$6,83 \pm 0,18$
	Non	0-10	5	$11,61 \pm 1,97$
	Non	10-20	1	$5,84 \pm -$
	total	0-10	33	$10,96 \pm 0,80$
	total	10-20	12	$6,75 \pm 0,19$

3.3.7. Modélisation des stocks de C des parcelles en fonction des indices culturaux

Quelque soit les systèmes de production et les indices culturaux, intensité culturale pour les SCP, ou la position culturale pour les SCI, les stocks de C organique n'évoluent pas selon un modèle particulier. Le modèle à considérer pour 0-10 cm est une droite parallèle à l'axe des x (Figure 13). On en déduit que la position culturale ne détermine pas de modèle particulier quant au stock de C. La même relation peut être faite dans les parcelles permanentes où aucune relation entre intensité culturale et stock de C n'est observée.

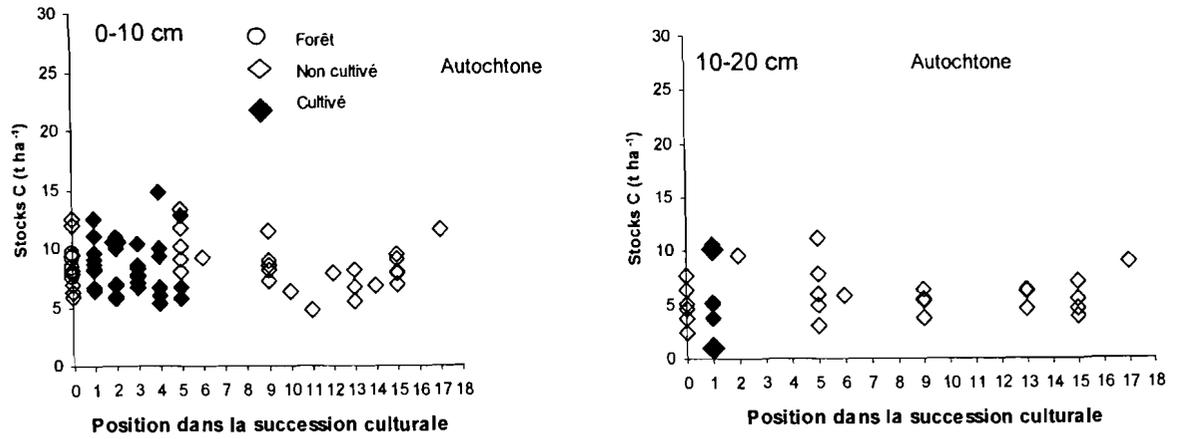


Figure 12: Influence de la position dans la succession culturale sur les stocks de C dans le système de culture itinérant

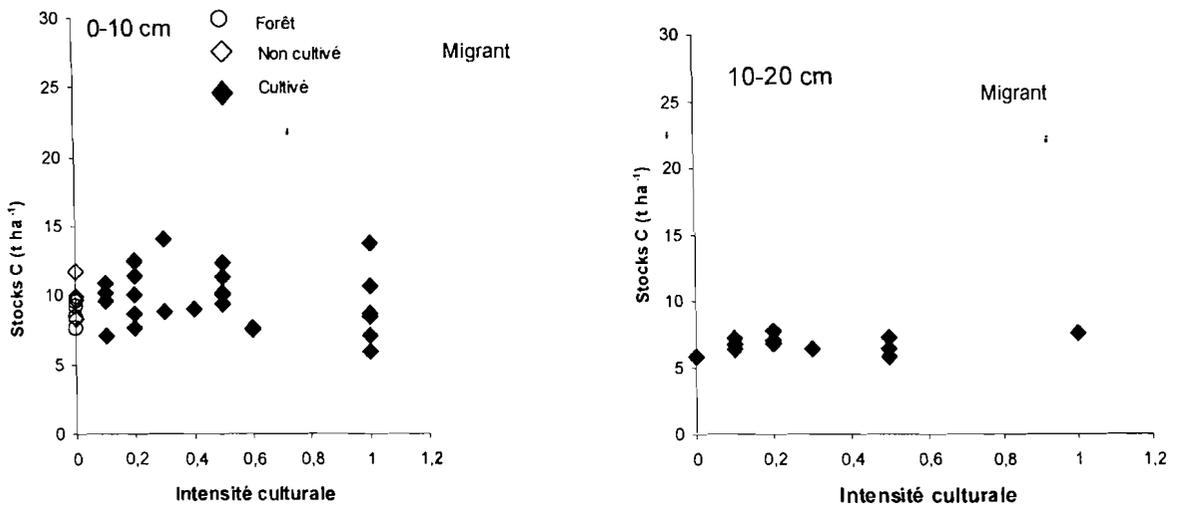


Figure 13: Influence de l'intensité culturale sur les stocks de C dans les sols en système de culture permanent

3.4. DISCUSSION

3.4.1. Etat des stocks de C dans les sols

Dans ce terroir les stocks moyens de C varient entre 8 et 11 tCha⁻¹ pour l'horizon 0-10 cm et entre 6 et 7 tCha⁻¹ pour l'horizon 10-20 cm. Le stock moyen des 20 premiers centimètres varie entre 14 et 18 tCha⁻¹. Les stocks moyens de carbone estimés dans ce terroir sont proches des valeurs généralement observées dans ces agro écosystèmes de savane. En effet au Sénégal, des stocks de 12,2 et 22,3 tCha⁻¹ pour le C ont été estimés respectivement pour les horizons 0-20 cm et 0-40 cm (Manlay *et al.*, 2002b). Des estimations de stocks au Sénégal montrent que dans les 20 premiers centimètres les stocks varient entre 4,3 et 21,3 tCha⁻¹ et de 2,8 à 29,8 tCha⁻¹ entre 20-40 cm (Tschakert, 2004). Tschakert (2004) indique aussi que les stocks estimés par Ringus (2002); Tiessen *et al.* (1998) au Sénégal varient entre 4,5-18 tCha⁻¹ pour les 20 premiers centimètres.

3.4.2. Impacts des déterminants naturels

Les stocks de C des 10 premiers centimètres des sols sont en étroite relation avec le taux d'éléments fins. Ces sols de type ferrugineux tropicaux possèdent des argiles de nature kaolinique (Jones, 1973); (Feller, 1979). La nature minéralogie de ces argiles leur confère des propriétés peu réactives vis-à-vis de leur structure et notamment de la formation d'agrégats stables qui interviennent dans la dynamique des matières organiques des sols (Feller *et Beare*, 1997).

La texture du sol est donc considéré comme le premier facteur déterminant de la teneur en matière organique (Feller *et al.*, 1991). La relation entre la texture et le carbone du sol est plus forte dans l'horizon 0-10 cm. En zone de savane d'Afrique de l'Ouest la majorité des sols sont des ferrugineux et ferralitiques hors ceux ci ont des textures sableuses et sablo-argileuses (0-2µm<20%) (Feller *et al.*, 1991). Ces textures grossières limitent le stock potentiel de C que peut atteindre ces sols (Ingram, 2001). Pour des mêmes teneurs en Ag+limon fins, les sols entre 10-20cm présentent des teneurs en C moins élevées ceci parce qu'ils sont moins alimentées par les litières et les racines donc atteignent des teneurs en C moins importantes. On peut supposer alors que les horizons se situant sous les horizons de surface (>10 cm) soient les plus enclins à augmenter leur stock de carbone organique. Des pratiques qui favoriseront une entrée organique dans ces horizons inférieurs seraient donc plus efficaces d'un point de vue de la séquestration du carbone.

3.4.3. Effets anthropiques

La matière organique des sols ferrugineux tropicaux lessivés baisse lorsque ceux-ci sont mis en culture (Sedogo, 1993). Dans les sols ferralitiques également rencontrés dans la zone de savane l'évolution rapide du sol sous culture concerne principalement la matière organique (Hien, 1990). Cette baisse est liée au mode de gestion, pratiques culturales induisant des pertes et favorisant l'érosion (Feller *et Beare*, 1997). La mise en culture diminue le carbone par plusieurs mécanismes (érosion, décapage des couches de surface, action mécanique défrichage et l'oxydation de la matière organique, c'est surtout ce dernier mécanisme qui affecte le CO₂ de l'atmosphère (Detwiler, 1986). La mise en culture diminue de 30 à 40 % les stocks de matières organiques des sols par rapport aux sols non cultivés entre 3 et 10 ans de culture en fonction de la texture des sols (Feller *et al.*, 1991). La conversion des écosystèmes naturels en écosystème cultivés provoque une baisse du COS des zones tropicales (Lal, 2004). Ces pertes de carbone sont fonction de l'usage de la

terre (40 % dans les terres agricoles, 18-27 % culture sur brûlis et 20% pâture), elles affectent la teneur en carbone sur une profondeur d'environ 40 cm (35-80% de la matière organique) sous 60 cm il n'y a pas d'indication d'effet de mise en culture (Detwiler, 1986). Les stocks de C dans les sols des parcelles du système à culture permanente (SCP) sont supérieurs aux stocks observés dans ceux du système à culture itinérante. Les stocks de C observés sur terres cultivées et non cultivées ne sont pas significativement différents dans les deux principaux systèmes de production du terroir. Les stocks de carbone seraient donc plus le reflet non pas d'un état de la parcelle à un instant donné (cultivé ou non cultivé) mais de l'appartenance à un système de production qui englobent non seulement des pratiques culturales mais également des itinéraires culturels, et des systèmes de culture bien particuliers.

Plusieurs hypothèses pourraient expliquer les différences de réserves en carbone organique du sol entre les systèmes de production SCP et SCI :

Hypothèse 1 : La succession culturale dans le système de culture à base d'igname dure 5-6 ans au maximum. Les formations naturelles, qui servent de réservoir en terre cultivable notamment pour l'igname sont d'accès libre pour le pâturage et les divers prélèvements de bois ou d'activité de cueillette. De plus, ces formations subissent les feux de brousse systématiquement chaque année détruisant et réduisant les restitutions organiques dans ces milieux vers le sol. Ces restitutions organiques seraient alors potentiellement proches de celle rencontrées dans les parcelles cultivées. Ainsi, les quantités de carbone organique mesurées dans les forêts classées et non cultivées ne sont pas significativement supérieures à l'ensemble des autres parcelles. Le seul moyen de recyclage de la matière organique dans les domaines en culture itinérante étant la pratique de la jachère dont la durée se raccourcit de plus en plus. Sous ce mode de gestion la majorité des augmentations de stocks organiques après jachère serait due aux débris végétaux du sol (fraction 20-2000) dans les sols sableux (Feller *et al.*, 1991).

Hypothèse 2 : Les pratiques culturales diffèrent entre les deux types de systèmes de production. En effet les jachères situées dans les domaines en culture permanente sont gérées comme des réserves de pâturage pour les animaux de trait pendant la saison des cultures, ces jachères sont conservées pour la pâture des animaux en saison sèche et ne sont brûlées que rarement. Ces sols recevraient donc plus de restitutions organiques maintenant globalement un niveau plus élevé : les stocks organiques aériens (arbustes, litières et herbacées), et surtout racinaires s'ajouteraient aux transferts par les animaux. De plus dans les espaces cultivés des domaines migrants les pratiques culturales seraient responsables du stockage plus important. Les parcelles des systèmes de culture permanente sont généralement celles qui reçoivent plus de fertilisants minéraux et qui présentent ainsi des productions végétales les plus élevées. Il est admis qu'un sol fertilisé avec une forte production végétale pourra voir sa teneur en matière organique augmenter, du fait de restitutions plus importantes notamment à travers le système racinaire (Pieri, 1989). Enfin, à l'opposé, les pratiques de défriche et les itinéraires culturels propres aux systèmes de production itinérant pourraient favoriser les pertes organiques. Le recours au feu comme moyen de défriche sur des parcelles à forte production de biomasse limite d'autant plus les restitutions organiques. De plus, la pratique de l'igname et les façons culturales propre à cette culture qui nécessitent un important buttage pourrait favoriser une sur minéralisation des matières organiques du sol. On assisterait alors à une diminution progressive du stock réel de la matière organique dans ces sols, ou à un maintien à un niveau relativement peu élevé.

Hypothèse 3 : Il existe un niveau potentiel de stockage du carbone dans ces agro-systèmes qui est fonction de facteurs biophysiques (minéralogie des argiles, profondeur de sols, aération, densité apparente, textures) qui ne peut être atteint en raison de déterminants climatiques (production primaire nette, pluviosité) limitant ce stockage (Ingram et Fernandes, 2001). Globalement pour les sols du terroir, le potentiel de stockage est faible en raison de facteurs naturels (minéralogie, climat) mais aussi en raison des modes de gestion de ces terres (faible production et recyclage de la matière organique).

Le stockage de C dans les sols du terroir en relation avec le changement global reste un sujet à débat. Le sol peut être à la fois source et puits de carbone, c'est-à-dire son bilan entrée/sortie de C peut-être positif (puits) ou négatif (source) (Falloon *et al.*, 1999). Il est à craindre que les savanes tropicales soit des sources (Serpantié *et al.*, 2002). Pourtant le potentiel de séquestration des sols a argile à faible réactivité est de 23 t C ha⁻¹ (Feller *et al.*, 2001). La séquestration du carbone a été estimée et varie entre 0 et 150 kg C ha⁻¹ an⁻¹ dans les régions chaudes et fonction de la texture, des caractéristiques du profil et du climat (Lal, 2004) et de 100 à 200 kg C ha⁻¹ an⁻¹ dans les régions Ouest africaines (Batjes, 2001). Pour une valeur moyenne de 100 kg C ha⁻¹, le terroir de Torokoro pourrait donc par an séquestrer 1500 t an⁻¹. Dans l'étude des stocks de carbone des sols de Torokoro, il n'apparaît pas que ce sont les systèmes de production agricoles à culture permanente qui puissent permettre de maintenir des stocks de carbone dans les horizons supérieurs au dessus d'une ligne de base représentée par les stocks organiques des sols des forêts contrôlés. On peut bien entendu s'interroger sur le niveau de base des réserves en matière organique de ces sols de forêt. Se pose alors la question de la ligne de base à laquelle comparée des systèmes de culture ou des systèmes de production quant à leur capacité à induire une séquestration de carbone dans les sols.

3.5. CONCLUSION

En conclusion, la densité apparente dans les deux systèmes de production n'est pas significativement différente ni entre parcelles cultivées ni entre celles non cultivées. La Da ne varie pas significativement entre les deux horizons 0-10 et 10-20 cm. Les types d'usages n'affectent pas significativement la Da.

Le taux d'éléments fins (Ag+Lf en %) de l'horizon 0-10 cm est inférieur à celui de l'horizon 10-20 cm. Le taux d'éléments fins n'est pas affecté dans les champs et dans les jachères. Il n'est pas affecté par les systèmes de production. Il détermine le stockage de C de l'horizon 0-10 cm. Les types d'usages n'affectent pas significativement le taux d'éléments fins.

Les stocks varient significativement entre les deux systèmes de production pour l'horizon 0-10 cm. Les stocks (C) dans l'horizon de surface 0-10 cm sont supérieurs aux stocks de l'horizon 10-20 cm. La mise ne culture n'affecte pas significativement les stocks du sol dans les 20 premiers cm du sol ainsi que les horizons de profondeur.

Les hypothèses à savoir que le système de culture permanent préserverait moins bien le carbone du sol que le système à rotation culture jachère ne sont pas vérifiées.

Chapitre 4 : Déterminants naturels et anthropiques des stocks de carbone dans la biomasse végétale.

4. DETERMINANTS NATURELS ET ANTHROPIQUES DES STOCKS DE CARBONE DANS LA BIOMASSE VEGETALE

4.1. INTRODUCTION

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet des systèmes de production agricole sur la production ligneuse en zone soudanienne au Burkina Faso. Dans les systèmes mixtes d'agriculture et d'élevage des zones de savanes d'Afrique de l'Ouest, la ressource organique est à la fois un bien de consommation (alimentation, construction, chauffage) mais aussi un bien de production (entretien des animaux et de la qualité des sols). C'est pour cela qu'elle joue donc un rôle essentiel dans la viabilité⁸ de ces systèmes (Manlay, 2000b). La dynamique des ressources organiques dans les zones de savanes d'Afrique de l'Ouest a aussi des implications dans le questionnement environnemental actuel relatif aux gaz à effet de serre (GES) (CO₂, CH₄, N₂O ; HFCs, HCF). Les ressources organiques sont en baisse dans les zones de savanes du fait du changement de facteurs naturels (climatique) mais aussi et surtout de facteurs anthropiques (démographie, migration).

D'un point de vue écologique, les écosystèmes tropicaux de savanes sont généralement considérés comme sources de gaz à effets de serre, plutôt que comme puits de CO₂. Ceci est particulièrement vrai dans le cas où les terres défrichées et mises en culture augmentent pour la mise en culture, mais également avec l'augmentation de l'exploitation des ressources forestières pour la production de bois et de charbon (Touré *et al.*, 2003). Dans ces zones l'expansion des terres cultivées ainsi que les changements d'occupation influencent l'environnement à la fois à l'échelle locale et globale (Reenberg et Lund, 1997). L'agriculture itinérante sur brûlis pratiquée par des dizaines de millions de petits agriculteurs dans le monde, représente environ 60 % du déboisement tropical (Malezieux, 2004). En raison de ce nombre important, l'effet global n'est pas négligeable, en termes d'émission de CO₂ dans l'atmosphère puisque une des conséquences environnementales de la pratique de l'agriculture sur brûlis est la perte du carbone dans l'écosystème forestier (Kotto-Same *et al.*, 1997).

Le carbone de la biomasse végétale résulte de l'activité photosynthétique (fixation CO₂) qui est à la base de la croissance des végétaux (production primaire) (Locatelli, 1996). La biomasse pourrait donc être importante dans le cadre des préoccupations mondiales actuellement sur les GES qui ont conduit au protocole de Kyoto⁹ (article 3.3 et 3.4) en vue de réduire le CO₂ atmosphérique (IPCC, 2000). Pour répondre à l'application des options techniques de séquestration de carbone dans la biomasse végétale proposée dans le cadre du protocole de Kyoto (articles 3.3 et 3.4), il est nécessaire de connaître les stocks actuels dans la biomasse végétale dans les différents pays.

La production primaire pour un écosystème donné est déterminée par plusieurs facteurs. Les conditions climatiques (pluviométrie), la composition, la structure, l'âge des espèces, la nature des sols, les perturbations naturelles et les modes de gestion ou de la consommation, sont les principaux facteurs. La température optimale de photosynthèse est de 30 °C. Celle-ci est

⁸ Viabilité d'un système : aptitude de celui-ci à fournir des productions (grains, fourrage, viande, bois...) et des moyens de production (force de traction animale, engrais organique, qualité du sol) dans un intervalle de valeur défini, pour un état initial et durant une période donnée

⁹ Cycle de négociations initié en décembre 1997 à Kyoto au Japon en vue de réduction des GES et contribuer à réduire le réchauffement du climat mondial

inhibée en dessous de 0 °C (Frontier et Pichod-Viale, 1998). Les disponibilités de l'eau et des éléments nutritifs dans les sols sont deux facteurs prépondérants. En savane, la biomasse (masse de matière végétale en place) est fonction du climat et de la répartition saisonnière des pluies (Cesar, 1992).

Les effets anthropiques déterminent fortement la production de biomasse. Les principaux facteurs sont surtout de nature sociale, économique et politique (Brown, 1997). Plusieurs auteurs ont décrit la relation entre la baisse des ressources et l'évolution de la population. La relation population et environnement est très débattue, car elle n'est pas de type linéaire ou mécaniste (Raynaut, 2001). Les ressources naturelles diminuent jusqu'à un seuil critique à 60 habitants par km² sous la pression des défricheurs. Au delà de ce seuil, le développement et l'adoption de techniques régénèrent les ressources permettant l'accumulation de celles-ci (Barbier *et al.*, 2002).

Plusieurs méthodes sont utilisées pour les mesures de la production primaire nette (PPN), (Brown, 1997), (Jenkinson *et al.*, 1999). Ces méthodes sont directes ou indirectes (inventaires forestiers, utilisations de relations allométriques, utilisation de données satellitaires, (indice de végétation), mesures des émissions de CO₂ dégagé par la respiration. L'échelle d'étude est importante pour le choix de la méthode (directe ou indirecte). A l'échelle d'une parcelle l'inventaire forestier est une méthode adaptée pour l'estimation de la PPN. A l'échelle régionale les outils de spatialisation (modélisation, extrapolation) sont utilisés.

Dans la zone de savanes d'Afrique de l'Ouest, quelques travaux font état de la production des ligneux (ou production primaire ; PN) (Bazile, 1998). La production de biomasse végétale des savanes est en baisse. Dans ces zones de savane, la production est rythmée par l'alternance de la saison humide et de la saison sèche et les feux de brousses (Cesar, 1992). La croissance démographique accentue la pression sur les ressources locales et se traduit par l'augmentation des surfaces cultivées au dépend des jachères et de leur durée. Les activités humaines (brûlage, pâture, défriches agricoles et coupe de bois) quant à elles sont des formes d'exploitation des plantes ligneuses qui contribuent à la diminution de ces ressources.

L'impact du changement de systèmes de production sur la production ligneuse est moins connu. Cette étude a été menée en zone de savane dans un espace biophysique disposant encore d'un potentiel important en biomasse végétale, et où différentes pratiques de gestion des espaces ruraux sont mises en œuvre en même temps par deux types de populations : une population autochtone qui pratique une culture itinérante sur brûlis à base d'igname et une population migrante qui pratique une rotation triennale base de coton dans un système permanent. Un inventaire forestier à partir de méthodes non destructives associées à des méthodes destructives ont été utilisés pour estimer la biomasse végétale (quantification des stocks in situ) en fonction des modes de gestion.

L'étude vise précisément à : 1) établir des modèles de stockage de C dans cette biomasse végétale en fonction des principaux déterminants naturels (essentiellement la nature des sols) et anthropiques (des différences de systèmes de production) à l'échelle de la parcelle et 2) à estimer les stocks de biomasse végétale en fonction des modes de gestion.

Les hypothèses testées sont les suivantes

H1 : les systèmes de production et l'usage des ressources organiques d'origine végétale agissent significativement sur la disponibilité des ressources organiques dans les savanes en Afrique de l'Ouest,

H2 : le système traditionnel d'exploitation des ressources ligneuses est conservateur de ces ressources.

4.2. MATERIEL ET METHODES

4.2.1. Description du site et des systèmes de production

Le terroir d'étude (Torokoro) se situe dans le sud-ouest du Burkina Faso. Il se localise entre 4°20'-4°30' longitude Ouest et entre 9°59'-10°05' latitude Nord en zone sud-soudanienne. Les précipitations annuelles varient entre 900-1200 mm. La température moyenne annuelle oscille entre 27 et 38 °C. Le couvert végétal en 1998 comprenant 60 % de savane arboré, 14 % de forêt claire et 21 % de zones cultivées et pour le reste quelques formations secondaires (ripicole, habitation, verger...) (Botoni, 2003).

Les systèmes de production ont été étudiés mettant en évidence deux systèmes de production (Augusseau, 2000b) ; (Gazel, 2002). Le système de production à base d'igname (*Discorea sp.*). C'est un système de culture semi-permanente. Il est pratiqué par les populations autochtones. La mise en culture d'une parcelle dure 5 à 6 ans avant la mise en jachère. Il n'y a pas de fertilisation organo-minérale dans ce système. Il sera considéré comme système itinérant. Un autre système de production basée sur la culture du coton (*Gossipium sp.*) et de céréales est pratiqué par les exploitants immigrés. Dans ce système, la rotation des cultures est triennale (coton/maïs/Coton ; ou Maïs/coton/Maïs), et l'usage des fertilisants minéraux chimiques sur les cultures est répandu. Récemment, dans les deux systèmes d'exploitation, une nouvelle spéculation est apparue avec la plantation de vergers d'anacardiens.

4.2.2. Dispositif d'échantillonnage

Soixante six parcelles parmi les 115 parcelles qui sont l'objet de l'étude des sols (voir chapitre précédent) ont été retenues. Dans le système en culture itinérante 37 parcelles ont été échantillonnées. Dans les domaines en culture permanente, 25 parcelles. Des parcelles témoin ont été inventoriées à titre de comparaison, il s'agit de 4 parcelles de forêt (domaine étatique), (Tableau 8). Les parcelles sélectionnées et échantillonnées sont réparties sur le terroir (15000 ha) pour prendre en compte la diversité des pratiques paysannes mais aussi la variabilité des sols. Elles tiennent compte de l'âge du type d'usage au moment de l'inventaire. Les autres critères pris en compte sont les systèmes de culture, l'itinéraire technique, la succession culturale, la position topographique, le type sol.

Tableau 8: Nombre de parcelles inventoriées par occupation du sol dans les deux systèmes de production

Système	Occupation	Nombre de parcelles
Culture itinérante	anacarde	3
	champ de cereales	9
	formation naturelle	6
	igname	6
	jachère 1 an	4
	jachère 10 ans et +	6
	jachère 5 ans	3
Forêt	Forêt	4
Culture permanente	champ de cereales	12
	coton	10
	jachère 10 ans et +	3

4.2.3. Méthodes de mesure de la biomasse

Le dispositif utilisé pour la mesure de biomasse ligneuse épigée a été adapté de Hairiah (2001b). L'unité d'échantillonnage sur chaque parcelle est une placette 20x100 m soit 2000 m² (Bayala, 2003). Sur chaque parcelle une placette de mesure est délimitée. Dans la placette chaque individu ligneux a été identifié. Le diamètre à hauteur de poitrine (DBH), la hauteur et l'espèce ont été enregistrés.

Les ligneux de diamètre supérieur à 5 cm ont été inventoriés à l'intérieur du dispositif de 2000 m² (Bayala, 2003). La biomasse ligneuse est définie comme la masse hypogée des arbres et des arbustes vivants ou non (tronc, écorce, branches, brindilles). Les individus de diamètre inférieur à 5 cm sont considérés comme faisant partie de la régénération. La biomasse de ceux-ci a été mesurée dans le cadran de 5 x 40 m² par la méthode destructrice. Tous les arbustes morts et vivants ont été coupés et pesés.

Des tarifs de biomasse (relations mathématiques qui lient la masse d'un arbre à ses caractéristiques mesurables (hauteur, diamètre, âge) ont été établis. Les biomasses des arbres de diamètre ($\varnothing > 5$ cm) ont été estimées par différentes relations allométriques. Des tarifs spécifiques mis au point en zone de savane d'Afrique de l'Ouest ont été utilisés (Kaïré, 1999, Alexandre et Kaïré, 2000). Celles-ci concernent surtout les espèces *Piliostigma thonningii* et *Terminalia macroptera*. Pour les autres espèces inventoriées, il n'existe pas de tarif établi, un tarif commun a été appliqué. Le tarif de biomasse utilisé combine ceux établis par Manlay (2002a) dérivé de Kaïré (1999) établis dans une zone agro-écologique semblable à la zone de Torokoro et ceux établis par Brown, 1997 (Tableau 9).

Tableau 9: Tarifs de biomasse pour l'estimation de la matière sèche des arbres

Source	Espèces	Tarif
Brown, 1997	Toutes	$y=0,139X^{2,32}$
Kaïré, 1999, Manlay, 2002	<i>Piliostigma thonningii</i>	$y=0,157X^{2,27}$
Kaïré, 1999, Manlay, 2002	<i>Terminalia macroptera</i>	$y=0,0979X^{2,4}$
Kaïré, 1999, Manlay, 2002	Toutes	$y=0,172X^{2,39}$

y= biomasse en t MS par arbre

X=diamètre en centimètres

4.2.4. Biomasse racinaire

Nous avons distingué deux tailles de racines. Celle appelées racines épaisses dont le diamètre est supérieure à 2 mm et les racines fines dont le diamètre est inférieure à 2 mm. Les biomasses ligneuses des racines épaisses, sont celles dont les racines ont un diamètre supérieur à deux millimètres. Cette biomasse racinaire, a été estimée par excavation de 2 fosses de 1 x 0,5 x 0,4 m (Bayala, 2003). La biomasse des racines épaisses ont été estimées par la méthode adéquate (Hairiah *et al.*, 2001b) (Figure 14).

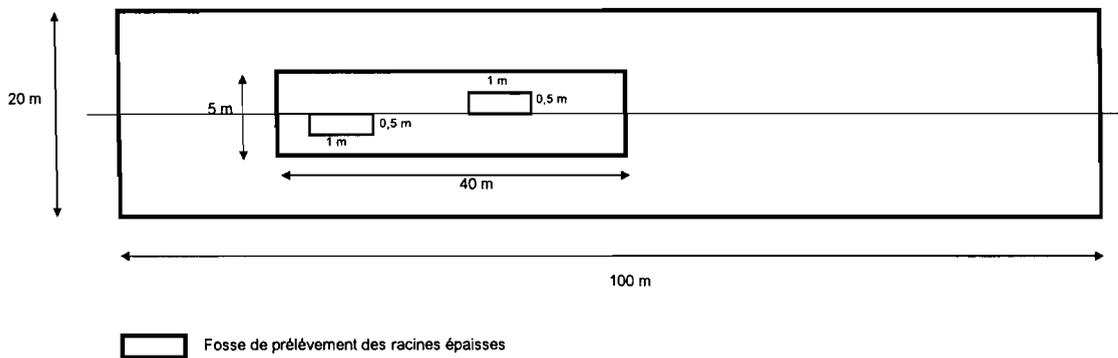


Figure 14: Plan d'échantillonnage des racines épaisses dans les parcelles

4.2.5. Teneur de C dans la biomasse végétale

L'estimation des stocks de C a été faite à partir des mesures des teneurs en C des compartiments végétaux réalisés par Manlay (2002a) au Sénégal dans une zone semblable (Tableau 10). Les stocks totaux de carbone dans la biomasse végétale des parcelles sont les sommes des stocks des sous compartiments végétaux (arbres, arbustes, racines épaisses).

Tableau 10: Teneur moyennes en C des principaux compartiments végétaux

Partie	C (%)
Tige	37,51
Rameaux	37,23
Feuilles	37,28
Arbustes*	37,34
Souches	37,00
Racines épaisses	36,60
Racines fines	34,30
Plante entière**	36,65
litière	33,10
Herbacées	34,40

* Moyenne de tige, feuilles, rameaux et souche

** Biomasse moyenne arbre

Sources : Manlay (2002) dérivé de Kaïré (1999)

4.2.6. Modélisation des stocks de C dans la biomasse végétale

Une courbe de croissance logistique modifiée, qui rend compte d'une croissance maximale possible dès la première année de jachère en raison des rejets de souches déjà installées, a été utilisée avec succès dans le cas des jachères au Sénégal (Manlay *et al.*, 2002a). Cette équation a été testée et ajustée dans le cas de Torokoro. La formule mathématique est la suivante :

$$S(t) = \frac{aK}{1 + \frac{(K - S_0)}{S_0} \cdot e^{-rt}} + b$$

Où $S(t)$ est le stock de biomasse à l'instant t (années). S_0 est le stock initial ($t \text{ C ha}^{-1}$) ; $t = \text{âge}$ de la jachère (nombre d'années) ; K est la charge biotique maximale et r le taux instantané d'accroissement naturel ou potentiel biotique ou encore paramètre de Malthus (Dajoz, 1982). Manlay (2002a) a proposé d'ajouter à ce modèle logistique une variable additionnelle b de correction. Les paramètres à déterminer sont donc : a , r , K et b .

Les variables à expliquer sont les différentes composantes des biomasses. Il s'agit des biomasses mesurées in situ (arbres, arbustes, racines, C).

Pour comparer les deux systèmes de production l'intensité culturale (IC) et la Position sur la succession culturale (Posisuc) ont été utilisés. IC est, pour une durée donnée, le nombre d'année de culture rapporté à la durée de cette période (Figure 15). IC a été définie par Ruthenberg (1971a). Il correspond aussi au passage des systèmes de culture à jachères forestières ou à jachères arbustives à des systèmes de cultures annuelles.

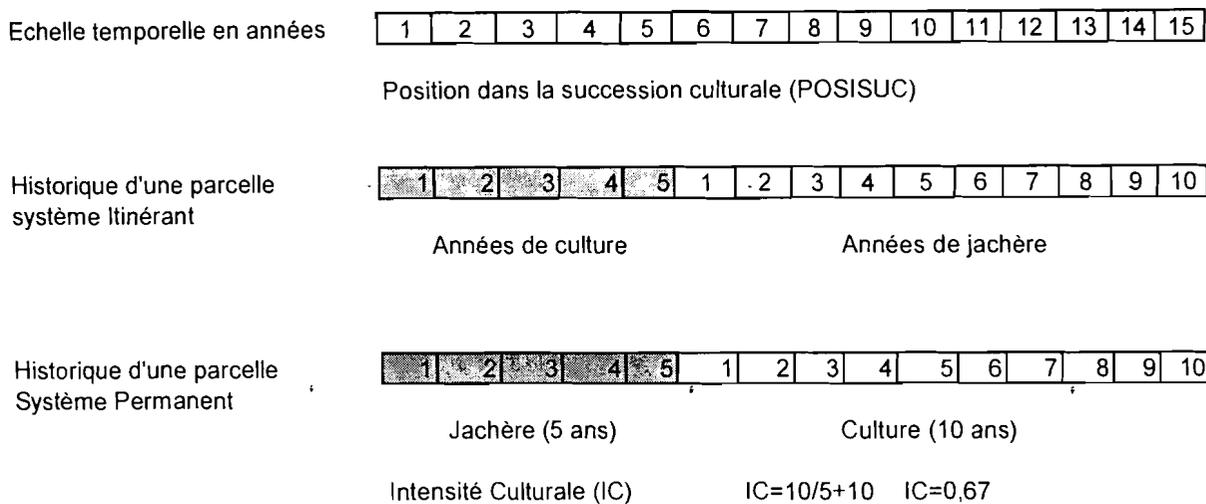


Figure 15: Description de la succession culturale dans les deux principaux systèmes de production du terroir

4.2.7. Définition d'indices cultureux pour la modélisation

On distinguera dans un premier temps les parcelles cultivées et non cultivées de chacun des systèmes en comparaison avec les parcelles en forêt en raison de la particularité de chacun de ces milieux.

Pour les systèmes en culture itinérante l'évolution après quelques années de culture et surtout l'évolution de la production de biomasse au cours du temps de jachère sera privilégiée. En effet dans ce système, le paysan commence sur une très vieille jachère ou une formation naturelle (>40 ans), ce qui correspond à la position zéro, et chaque année on incrémente de un (Figure 15). Au bout de cinq ans la parcelle est mise en jachère la position six égale la première année de jachère. Pour cela chaque parcelle a été définie dans une position culturale à partir des vieilles jachères ou des forêts. Celle-ci correspond à une numérotation à partir de zéro avec incrément de un chaque année (Figure 15).

Pour le système en culture permanente, on s'attachera à déterminer l'importance de l'histoire culturale des parcelles généralement toutes cultivées. L'indice d'intensité culturale (IC) définie sera utilisé. Le modèle développé permettra d'estimer une évolution de la biomasse au cours du temps de culture en fonction d'IC. La formule de calcul est : $IC = \frac{a}{a+j}$; $a =$

nombre d'années de mise en culture ; $j =$ temps de mise en jachère (années). Il est introduit dans le modèle pour rendre compte de cette pression dans les systèmes de production permanent en lieu et place de l'âge de la jachère (t).

Dans les espaces cultivés la biomasse suit une autre évolution. C'est ainsi que en systèmes de cultures permanente ou itinérante dans les espaces cultivés, la biomasse pérenne a été ajustée à des modèles de décroissance pour rendre compte de la diminution de celle-ci au fil des années. Une cinétique de premier ordre a été testée dans ce cas. Cette évolution de la biomasse ligneuse a été modélisée suivant des fonctions exponentielles de la forme $Y=ae^{-bt}+c$, où $Y=$ biomasse ligneuse ($t \text{ MS ha}^{-1}$) ou de $C (t \text{ ha}^{-1})$; $t=$ temps (années) ici Intensité culturale (IC) où la Position sur la succession culturale (Posisuc), $a=$ stock de biomasse initiale ($t \text{ MS ha}^{-1}$), de $C (t \text{ ha}^{-1})$; b est la vitesse de diminution de la biomasse et c est la biomasse minimale à l'infini. Les paramètres à estimer sont (a, b et c).

4.3. RESULTATS

4.3.1. Espèces et biomasse ligneuse dans les systèmes de production

L'inventaire forestier a recensé au total 49 espèces ligneuses. Elles sont réparties en 21 familles botaniques. Les plus représentées de ces familles sont : *Caesalpinaceae*, *Combretaceae* et *Mimosaceae*. L'anacarde représente 25 % des espèces. Sans cette espèce *Vitalleria paradoxa* représente 30 % des espèces suivie de *Isoberlinia doka* 15%, ensuite viennent *Terminalia avicennoides*, *M polyandra* et *C. collinum* respectivement 8% et 5 %. La répartition des espèces ligneuses par famille botanique est présentée dans Annexe 4.

Le nombre d'espèces à l'hectare est significativement affecté par les systèmes de production ($F=6,83$; $P=0,004$). Le nombre d'espèces à l'hectare tous usages confondus est en moyenne de 29 ± 4 espèces en système itinérant et de 12 ± 2 dans le système permanent, contre 33 ± 12 en forêt. Les plantations ont le plus faible nombre d'espèces. Les formations naturelles contiennent plus d'espèces que toutes les autres formations. Le nombre d'espèces augmente avec l'âge de la jachère (Figure 16). Le nombre d'espèces moyen à l'hectare en milieu non cultivé (34 ± 4) est significativement différent de celui en milieu cultivé (15 ± 2) ($F=20,265$; $p=0,000$). Le nombre d'espèces varie en fonction des usages dans chaque système d'exploitation. Dans le système itinérant on observe une baisse du nombre d'espèces lorsqu'on passe de la formation naturelle à la mise en culture. Le nombre d'espèces augmente de nouveau quand la parcelle est mise en jachère (Figure 16).

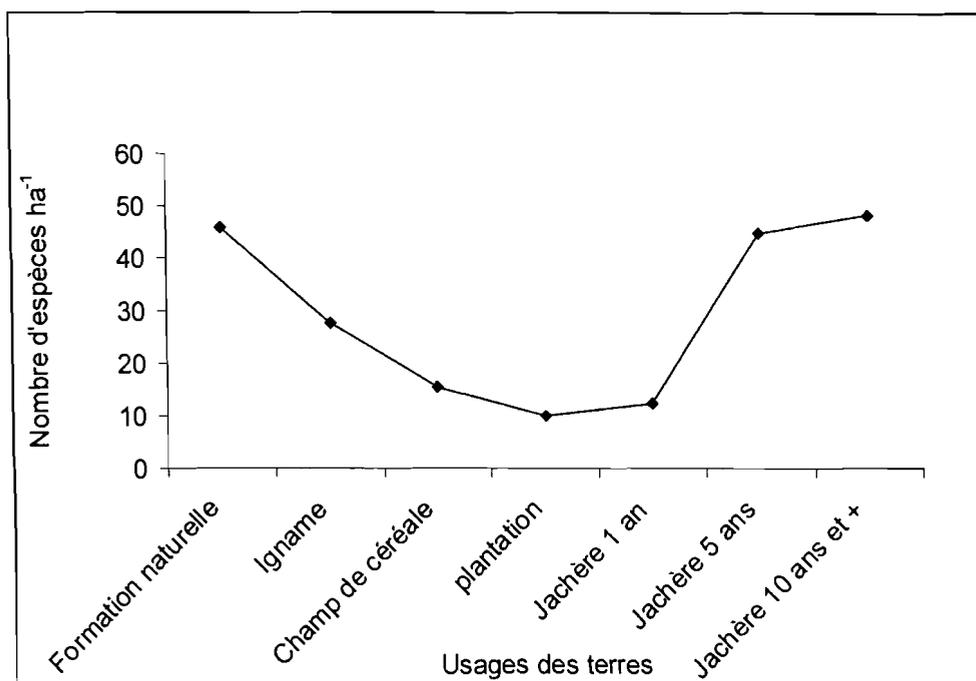


Figure 16: Impact des types d'usages des terres sur le nombre d'espèce en SCI

Dans le SCP le nombre d'espèces par type d'usages de terre ne présente pas de différence significative.

La densité des arbres (nombre d'arbres à l'hectare) est significativement supérieure ($F=6$; $p=0,004$) en SCI que en SCP ou on a 169 ± 31 individus ha^{-1} contre 40 ± 4 individus ha^{-1} (Tableau 11). La densité des arbres dans les milieux non cultivés (187 ± 35) et cultivé (69 ± 17) met en évidence de différences significatives ($F=10,807$; $p=0,002$). La densité des arbres varie dans chaque système de production en fonction des usages des terres en SCI ($F=11,071$; $p=0,000$) et en SCP ($F=3,06$; $p=0,067$). La densité des arbres est la plus élevée dans les formations naturelles, la forêt et les jachères. En forêt, la densité relevée est de 162 ± 78 individus à l'hectare et dans les champs d'igname 136 individus ha^{-1} . Les densités moyennes dans les champs de céréales est inférieure à 50 pieds ha^{-1} ; pour les champs de coton 35 individus à l'hectare. Les plantations d'anacardiens représentent la formation la plus dense avec environ un pied tous les $20 m^2$.

Tableau 11: Densités des individus, dendrométrie et biomasse ligneuses dans les systèmes de production

Système	Occupation	Nombre de parcelles	Nombre d'espèces	Densité moyenne des arbres (ha)	Hauteur moyenne des arbres (m)	Diamètre moyen des arbres (cm)	Biomasse moyenne par arbre (kg MS)	Biomasse moyenne (kg MS ha ⁻¹)
Culture itinérante	formation naturelle	6	34	198	8,45	18,81	208	41277
	igname	6	21	136	6,19	14,18	112	15264
	champ de cereales	9	12	48	7,41	20,34	244	11800
	jachère 1 an	4	7	38	7,02	18,79	179	6709
	jachère 5 ans	3	19	167	4,89	9,24	45	7548
	jachère 10 ans et +	6	30	211	5,53	11,49	73	15300
	anacardiens	3	3	493	5,41	11,17	53	33205
Foret	forêt	4	18	163	6,09	13,49	91	14811
Culture permanente	champ de cereales	12	13	38	9,86	29,67	475	18200
	coton	10	11	35	8,21	24,29	291	10031
	jachère 10 ans et +	3	9	62	7,80	20,43	215	13259

L'estimation de la production ligneuse se fait à partir de la mesure des paramètres dendrométriques (hauteur, diamètre).

La hauteur moyenne des arbres dans les systèmes de production en culture permanente ($8,9 \pm 0,27$ m) est significativement supérieure à la hauteur moyenne des arbres ($6,25 \pm 0,09$ m) dans les domaines de production en culture itinérante au seuil de 0,1% ($F=62,528$; $p=0,000$) et dans la forêt ($6,08 \pm 0,25$ m). Les hauteurs moyennes dans les espaces non cultivés ($6,40 \pm 0,09$ m) et cultivés ($6,912 \pm 0,16$ m) sont différentes au seuil de 1% ($F=8,67$; $p=0,003$). En fonction des différents usages des terres les hauteurs moyennes des arbres varient dans chaque système d'exploitation. Dans le système itinérant on distingue quatre classes de hauteurs significativement différentes ($F=40,14$; $p=0,000$). Les hauteurs les plus élevées sont observées dans les formations naturelles, puis viennent les hauteurs observées dans les champs de céréales et dans la jachère d'un an. Le reste des usages sont répartis dans les deux derniers groupes de hauteur moyenne inférieure ou égale à 6 m. Dans les systèmes en culture permanente, les hauteurs moyennes varient également en fonction des usages ($F=5,723$; $p=0,004$). On y distingue deux groupes, d'une part les hauteurs moyennes les plus élevées sont dans les champs de céréales et le second groupe dans les champs de coton et dans les jachères de 10 ans et plus.

Le diamètre moyen des arbres dans le système de production en culture permanente ($26 \pm 0,85$ cm) est le double des diamètres moyens des arbres ($13,75 \pm 0,25$ cm) dans le système de production en culture itinérante. Cette différence est significative au seuil de 0,1 % ($F=149$; $p=0,000$). Les diamètres moyens dans les espaces non cultivés ($13,76 \pm 0,27$ cm) et dans les milieux cultivés ($18,307 \pm 0,52$) sont également significativement différents ($F=72,60$; $P=0,000$). Le diamètre moyen des arbres est variable selon les usages des terres dans chaque système de production. Dans le système itinérant ($F=39,743$; $p=0,000$), trois groupes de diamètres se distinguent. Les diamètres les plus faibles (9-11 cm) (jachères de 5, 10 ans et anacardiens), les diamètres moyens dans les champs d'igname (14 cm) et les diamètres les plus élevés dans les champs de céréales, les jachères d'un an et les formations naturelles (> 18 cm). Dans le système permanent deux groupes de diamètres se distinguent ($F=9,638$; $p=0,000$) soit les diamètres les plus élevés dans les champs de céréales (environ 30 cm) et le second groupe de diamètres compris entre 20-24 cm.

Les biomasses moyennes par arbre calculées à partir des formules dendrométriques varient significativement selon les usages dans chaque système d'exploitation. Dans le système itinérant ($F=24,42$; $p=0,000$), on distingue deux classes de biomasse moyenne. D'une part

(jachère 1 an, formations naturelles et champs de céréales) et d'autre part (jachère 5 ans, 10 ans, plantation, igname). Dans le système permanent, on distingue deux groupes de biomasse (jachère 10 ans et plus et coton d'une part et d'autre part champ de céréales). Les biomasses moyennes par arbre sont statistiquement différentes dans les systèmes de productions ($F=92,757$; $p=0,000$) 109 ± 6 dans le système itinérant, 362 ± 31 dans le système permanent et 91 ± 10 dans la forêt. Dans les espaces non cultivés ($107\pm 6,33$ kg MS par arbre) ou cultivés ($205,29\pm 14,57$ kg MS par arbre) sont significativement différents ($F=51,490$; $p=0,000$). Les biomasses arborées par hectare varient dans chaque système de production en fonction des usages des terres. Dans le système itinérant ($F=5,440$; $p=0,001$), la biomasse végétale baisse dès la mise en culture (Figure 17), la plantation fait apparaître une augmentation de cette biomasse.

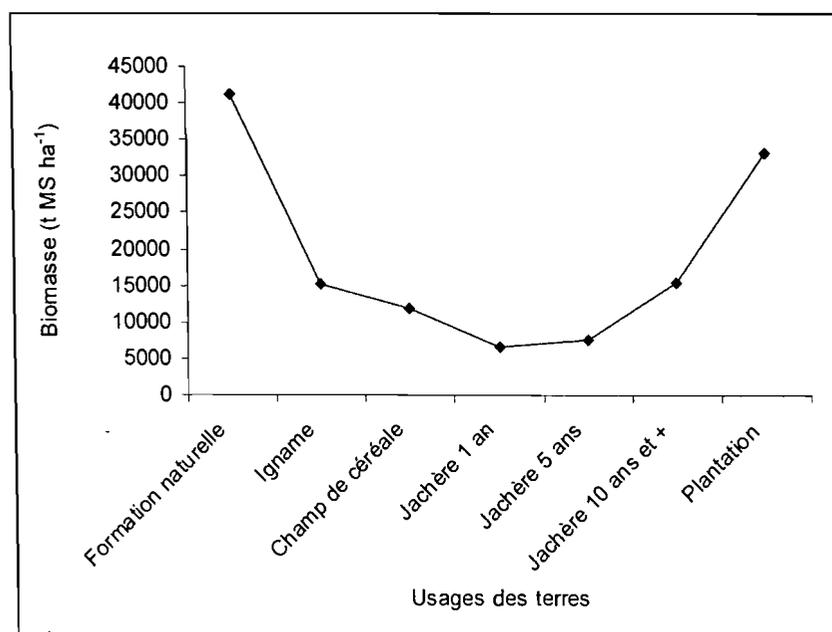


Figure 17: Diminution de la biomasse dans le SCI en fonction des usages des terres

Dans le SCP ($F=1,64$; $p=0,217$), l'évolution est moins nette. La biomasse moyenne à l'hectare n'est pas significativement affectée par le système de production lorsqu'on considère tous les types d'usages des terres ($F=0,679$; $p=0,511$). Les biomasses moyennes obtenues sont (18550 ± 2738 t MS ha⁻¹) dans le système itinérant, et (16728 ± 1758 t MS ha⁻¹) en forêt. La biomasse moyenne par hectare sur les deux types de milieux non cultivé (20112 ± 3338 t MS ha⁻¹) et cultivé (14235 ± 1746 t MS ha⁻¹) et en forêt (16728 ± 1758 t MS ha⁻¹) ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ($F=2,804$; $p=0,099$).

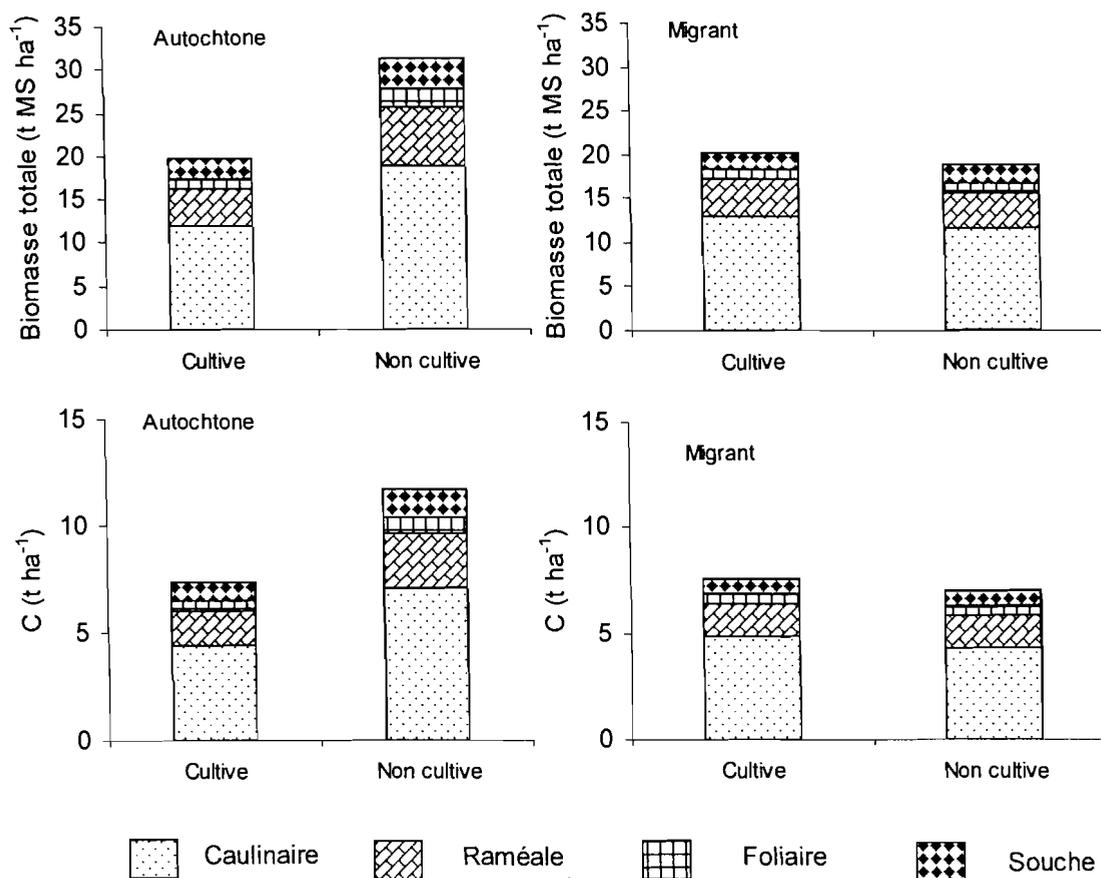


Figure 18: Biomasse et stocks de C dans les sous compartiments arborés en zone cultivée ou non cultivée

Dans le SCI, les biomasses moyennes calculées sont (14339 ± 2173 t MS ha⁻¹). Les stocks estimés dans les zones non cultivées sont très importants et dépassent ceux estimés en forêt. Les stocks des domaines cultivés sont assez importants sinon équivalents à ceux de la forêt. En revanche les stocks (zones cultivées ou non cultivées) dans les domaines migrants restent inférieurs à ceux de la forêt. La répartition par sous compartiment montre une prédominance de la biomasse caulinare (Figure 18).

Les stocks de C estimés dans les arbustes sont faibles. Ils sont inférieurs à 1 t MS ha⁻¹ que ce soit dans les domaines itinérants cultivés ou non, ou que ce soit dans les domaines permanents cultivés ou non.

Dans les domaines en culture itinérante ces stocks sont respectivement en zone cultivée (0,06 t C ha⁻¹) et non cultivée (0,17 t C ha⁻¹). Dans les domaines en culture permanente les stocks sont équivalents à (0,01 t C ha⁻¹) et (0,10 t C ha⁻¹), quant à la forêt la biomasse arbustive estimée est de 0,93 t MS ha⁻¹ soit 0,35 t C ha⁻¹. Par ordre de grandeur, c'est en forêt que l'on observe les stocks les plus élevés de biomasse et donc de C, suivis des stocks des zones non cultivées et enfin viennent ceux des zones cultivées.

Les stocks de biomasse des racines épaisses sont respectivement en milieu cultivé et non cultivé équivalents à 2 t MS ha⁻¹ et 1,68 t MS ha⁻¹ dans les domaines en culture itinérante soit 0,733 t C ha⁻¹ et 0,615 t C ha⁻¹. Ces biomasses sont égales à 1,67 et 5,28 t MS ha⁻¹ dans les domaines en culture permanente soit 0,612 t C ha⁻¹ en milieu cultivé et 1,932 t C ha⁻¹. Quant à la forêt la biomasse estimée dans les racines épaisses est de 2,2 t MS ha⁻¹ soit 0,806 t C ha⁻¹. Dans les domaines en culture itinérante les biomasses des racines épaisses varient peu en zone cultivée et non cultivée et sont proches de celle observées en forêt. En revanche dans les

domaines en culture itinérante même si la biomasse des racines épaisses des zones cultivées reste proche de celle de la forêt, les biomasses en zone non cultivée sont supérieures dépassant 5 t MS ha⁻¹.

La biomasse végétale totale par sous compartiment a été sommée pour obtenir les stocks totaux par parcelle. Il en est de même du C. Le compartiment arboré aérien constitue l'essentiel des stocks (Figure 19), vient ensuite les stocks racinaires (racines épaisses) puis les stocks des arbustes. La biomasse végétale totale dans les différents domaines met en évidence un stock plus important dans les domaines en culture itinérante (Figure 19).

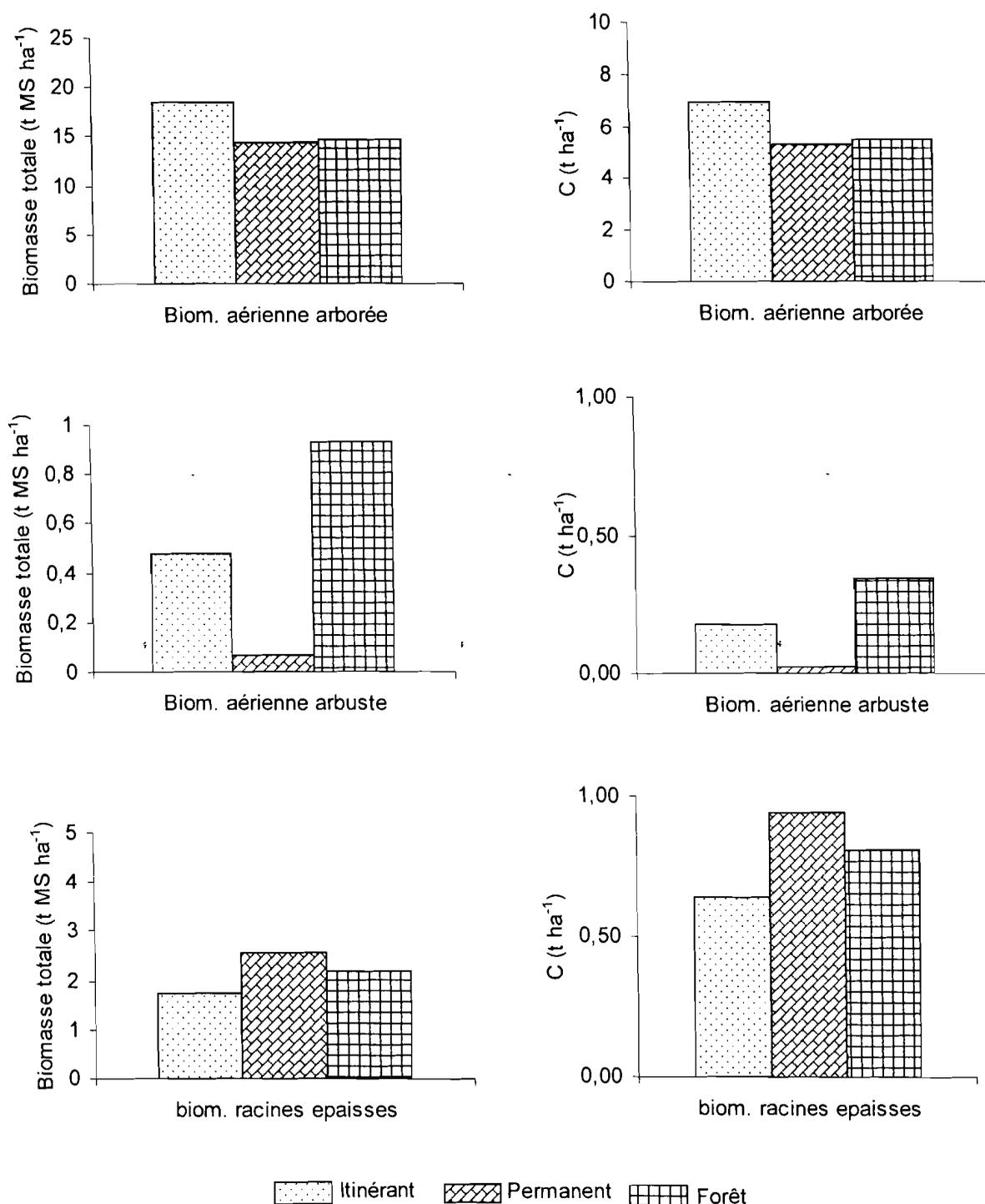


Figure 19: Stocks totaux de biomasse, C dans les différents domaines comparés à la forêt

4.3.2. Modélisation du stockage de C dans la biomasse végétale

La modélisation du stockage de la biomasse, de C a été faite en fonction des indices qui ont été définis : la position sur la succession culturale (Posisuc) (Tableau 12) pour les espaces non cultivés (croissance logistique), dans les espaces cultivés (Tableau 13) pour le système itinérant ont été utilisés. Dans le système permanent la modélisation a été faite en fonction de l'intensité culturale (IC) (Tableau 14). Dans le système itinérant cette croissance s'ajuste à une courbe de type logistique.

Dans le système permanent, en raison du faible nombre de situations non cultivées le stockage de C dans la biomasse végétale n'a pas pu être modélisé par une fonction mathématique mise à part la biomasse produite dans les champs. Le stockage de C dans la biomasse des arbres dans les champs suit une loi de décroissance exponentielle.

Tableau 12: Estimation des paramètres des régressions dans les espaces non cultivés en système de culture itinérante

Elément	Equation	Compartiment	Pamètres				R	F	Fprob	n
			K	S0	r	b				
MS (t ha ⁻¹)	1	Arbres*	46524	0,3	1,2		56	14,56	***	21
	1	Caulinaire	819565	0,1	1,4		57	14,16	***	21
	1	Rameaux	91880	0,13	1,9		56	14,9	***	21
	1	Feuilles	2,41*	0,0008	2,68			16,86	**	28
	1	Souches	6,00E-04	4,80E-04	-0,66			16,85	**	28
	1	Arbustes	0,44*	0,04	1,41			11,95	**	39
	2	Arbustes	0,42	0,0025	1,31	0,04				19

Expression mathématique des modèles :

(1) $S(t) = K / (1 + ((K - S_0) / S_0) * \exp(-r * \text{sqrt}(t)))$

(2) $S(t) = K / (1 + ((K - S_0) / S_0) * \exp(-r * t)) + b$

Arbres* : moyenne

t = position dans la succession culturale (années)

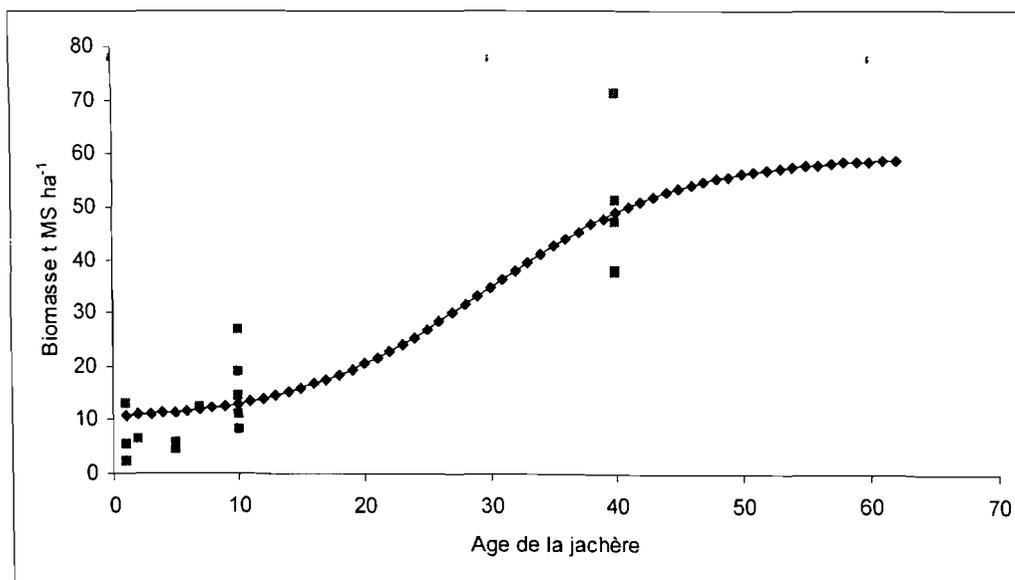


Figure 20: Stockage de la biomasse dans les jachères en système itinérant

Tableau 13: Estimation des paramètres des régressions dans les espaces cultivés en système de culture itinérant

Elément	Equation	Compartiment	Paramètres			F	Fprob
			a	b	c		
MS (t ha ⁻¹)	1 Arbres*		17,73	0,16		11,39	**
	1 Caulinaire		14,98	0,14		11,4	**
	1 Rameaux		5,61	0,18		11,33	**
	1 Feuilles		1,74	0,22		11,16	**
	1 Souches		3,11	0,25		11,03	**
	1 Arbustes		0,25*	0,21		17,27	***
	2 Racines Epaises		3,83	0,32	0,27	5,26	*
	1 Racines Epaises		3,95	0,27		9,2	*
C (t ha ⁻¹)	1 Arbres*		6,5	0,16		11,39	**
	1 Caulinaire		5,62	0,14		11,4	**
	1 Rameaux		2,09	0,19		11,33	**
	1 Feuilles		0,65	0,22		11,16	**
	1 Souches		1,15	0,25		11,03	**
	1 Arbustes		0,09*	0,2		17,27	***
	2 Racines Epaises		1,4	0,32	0,09	5,26	*
	1 Racines Epaises		1,45	0,27		9,2	*

Expression mathématique des modèles: (1) $S(t)=a*EXP(-b*t)$ (2) $S(t)=(1)+c$ * Moyenne arborée
 t= position dans la succession culturale est égale à l'âge de la jachère moins 5 ans * P< 0,05 ; ** P<0,001 ; *** p< 0,0001

Tableau 14: Estimation des paramètres des régressions dans les espaces cultivés en système de culture permanent

Elément	Compartiment	Paramètres			F	Fprob
		a	b	c		
MS (t ha ⁻¹)	Arbres*	16,98***	1,17		23,78	***
	Caulinaire	15,13***	1,21		22,76	***
	Rameaux	5,02***	1,12		25,19	***
	Feuilles	1,34***	1,03		28,37	***
	Souches	2,22***	0,97		30,27	***
	Arbustes	0,086*	2,78		8,950	**
	Racines Epaises	2,84	1,04		3,36	ns
C (t ha ⁻¹)	Arbres*	6,22***	1,17		23,78	***
	Tiges	5,68***	1,21		22,76	***
	Rameaux	1,87***	1,12		25,19	***
	Feuilles	0,5***	1,02		28,37	***
	Souches	0,82***	0,97		30,27	***
	Arbustes	0,03*	2,78		8,95	**
	Racines Epaises	1,04	1,04		3,36	ns

Expression mathématique des modèles: $S(t)=a*EXP(-b*t)$ * Moyenne arborée
 t= intensité culturale (années); * P< 0,05 ; ** P<0,001 ; *** p< 0,0001

En domaine à culture itinérante, le modèle de stockage dans les espaces non cultivés montre une augmentation des stocks de biomasse, et de C en fonction de la position sur la succession culturale (Tableau 12). Dans les domaines cultivés, les stocks de biomasse, C des racines épaisses dans les parcelles, diminuent avec l'augmentation de la position sur la succession

culturelle. Dans les domaines en système permanent on observe également une baisse du stockage dans la biomasse racinaire et de C en fonction de l'intensité culturelle.

4.4. DISCUSSION

Le compartiment arboré aérien est le principal compartiment de stockage dans la végétation. La productivité de la biomasse arbustive est faible à Torokoro tout comme le stockage dans les racines épaisses. Une sous estimation de la biomasse racinaire est possible en raison de la profondeur d'excavation de la terre qui a été limitée à 40 cm. Dans les espaces non cultivés, l'accumulation de biomasse, donc de C, se réalise dans les différents compartiments végétaux (arboré, arbustes, racines épaisses). La pression de prélèvement exercée sur le sous-compartiment arbustes explique une faible accumulation des stocks. Dans les espaces cultivés on observe pour tous les systèmes de production confondus, une baisse des stocks dans la biomasse végétale au cours de la succession culturelle.

Le modèle de stockage de la biomasse du peuplement arboré dans les espaces non cultivés s'accorde avec un modèle mathématique de croissance logistique (Ramade, 1991), (Pavé, 1994). Malgré les prélèvements par l'homme ou les animaux dans les jachères et les formations naturelles, le stockage de carbone par la biomasse du compartiment arboré aérien présente une tendance générale à l'accumulation au fil des années. En effet en agriculture basée sur la culture sur brûlis, les perturbations du couvert végétal liés aux prélèvements ont un effet limité sur les stocks de biomasse végétale (Kotto-Same *et al.*, 1997).

La décroissance des stocks de la strate arborée dans les espaces cultivés présente également une courbe de type logistique quel que soit le système de production. Les stocks de biomasse C arboré sont à leur maximum en début de succession culturelle. La coupe et le brûlis, puis les cultures successives et les sarclages répétés vont progressivement au fil des années réduire ce stock. Cependant il y'a une conservation d'un stocks minimal de nature ligneuse du fait de la protection d'espèces utiles dans les champs cultivés (Botoni, 2003).

La strate arbustive, qui présente des stocks relativement faibles, constitue une source d'accumulation de biomasse dans les espaces non cultivés. Les ajustements du stockage de la biomasse dans les arbustes en zone non cultivée suivent également une croissance logistique à l'image de la strate arborée.

La biomasse des racines épaisses semblent ne pas présenter une tendance à l'accumulation au cours du temps dans les espaces cultivés ou non. La méthode d'échantillonnage pourrait avoir eu un effet sur l'évaluation de ces stocks, notamment une sous-estimation. On observe une tendance à la baisse au cours du temps dans les espaces cultivés. Ceci serait lié à la disparition aux cours des cycles culturels successifs des arbustes, mais également à leur décomposition régulière avec la défriche des jachères (Manlay *et al.*, 2004).

La biomasse végétale mesurée dans ce terroir est essentiellement issue du compartiment aérien arboré. Les moyennes obtenues varient entre 15 et 25 t MS ha⁻¹. Les biomasses obtenues sont proches de la biomasse mesurée dans les savanes dégradées du Burkina Faso qui est de 20 t MS ha⁻¹ (Brown, 1997). Au Sénégal, dans des zones bioclimatiques identiques à notre site d'étude, la biomasse végétale dans des jachères de durée allant de 1 à 27 ans a été estimée entre 3 et 44 t MS ha⁻¹ (Kairé, 1999). De même, dans la même zone au Sénégal des biomasses aériennes ont été estimées sous champ d'arachide à 3,3 t MS ha⁻¹ (Manlay *et al.*, 2002a).

La biomasse des arbustes dans cette strate est faible d'une manière générale dans tous les agro-systèmes du terroir. Hormis la forêt où la biomasse arbustive est estimée à environ 1 t MS ha⁻¹, soit 0,35 t C ha⁻¹, les autres biomasses arbustives sont inférieures à 0,5 t MS ha⁻¹

aussi bien en milieu cultivé que non cultivé et dans tous les systèmes de production. Le compartiment arbuste a été défini sur la base de sujets de diamètre < 5 cm. Il est donc différent de la classification arbustes basée sur la hauteur (2-8 m) (Botoni, 2003). Ceci expliquerait les faibles stocks dans ce compartiment particulièrement dans les espaces cultivés par rapport aux études sur le même terroir de ces auteurs. Les arbustes sont soumis au broutage par les animaux, ainsi qu'aux feux de brousse annuels, qui, en fonction de l'intensité du feu va détruire une plus ou moins grande partie de la biomasse aérienne. Les arbustes constituent donc un sous compartiment particulièrement exploité.

Dans la forêt classée située à 20 km de Torokoro, les stocks de biomasse estimés sont équivalents aux stocks dans le système permanent et itinérant cultivés mais inférieurs à la biomasse disponible dans les formations naturelles, qui sont les réserves de terre des premiers occupants (autochtones). En effet certaines formations naturelles sont aussi denses en termes d'arbres sinon plus dense que la forêt classée. On peut alors se poser la question sur la réalité de la protection face aux perturbations notamment humaines de ces forêts classées.

Dans le système itinérant ou autochtone, les pratiques de défriche brûlis entraînent une consommation des ressources (sols, forêt, jachères). Dans ce système de production à base d'igname, (Kotto-Same *et al.*, 1997), on observe une baisse rapide des stocks de biomasse. Mais, la conservation de surface importante en jachères ou formations naturelles permet de conserver des stocks de biomasse relativement élevée. Dans le système permanent où est mis en œuvre le système de production à base de coton, les stocks initiaux faibles diminuent rapidement après la mise en culture. Cependant, la conservation d'arbres utiles permet de conserver une biomasse aérienne non négligeable.

4.5. CONCLUSION

Le compartiment arboré aérien semble constituer l'essentiel des stocks organiques de la biomasse végétale dans les agro-écosystèmes étudiés. Les systèmes de production ont un impact sur les paramètres dendrométriques (hauteur, diamètre), le peuplement végétal et en définitive sur la biomasse ligneuse. Ainsi les activités humaines sont responsables de la raréfaction des ressources organiques particulièrement pour le compartiment arbustes, racines et dans une certaine mesure des arbres. Il s'ensuit une baisse des stocks de biomasse, de C. En effet la défriche en vue des cultures, diminue la biomasse végétale. Conformément à nos hypothèses de départ les systèmes de production et l'usage des ressources organiques d'origine végétale agissent sur la disponibilité des ressources organiques dans les savanes en Afrique de l'Ouest. Des études anciennes montrent que, jadis le système traditionnel permettait une conservation des ressources en raison des faibles densités démographique (environ 5 habitants au km²). Dans le contexte démographique actuel les systèmes traditionnels sont aussi responsables de cette raréfaction au même titre que les systèmes de production actuels. L'étude montre que la biomasse ligneuse en système permanent est aussi élevée que la biomasse ligneuse en système itinérant et en forêt. Ceci en raison de la conservation des gros arbres, le compartiment essentiel de la biomasse ligneuse.

Les systèmes traditionnels à base d'igname en raison de leur coexistence avec de faibles densités de population (< 5 habitants au km²) arrivent avec la jachère de longue durée à régénérer le compartiment arboré. A l'opposé les systèmes modernes en dépit de la diminution rapide de la densité des ligneux maintiennent des stocks grâce à des individus de taille et diamètre élevés, d'où l'importance des arbres dans les systèmes cultivés et la nécessité des les maintenir. Cependant, les capacités de régénération des ces systèmes arborés en système cultivé sont certainement moins importantes que celles que l'on rencontre dans les jachères ou les formations naturelles. Il y a donc un risque important qu'avec la durée de mise en culture, les arbres dans les champs cultivés finissent par disparaître. Le problème est que

cette disparition se situe sur des durées allant au-delà d'une génération humaine, et qu'elle n'est donc pas perceptible par les usagers. Il est donc nécessaire de prévoir leur régénération avant que la disparition progressive des grands arbres n'atteint un seuil où cette biomasse végétale ne joue plus un rôle dans le cycle du carbone des systèmes de culture permanent.

- Chapitre 5 : Déterminants socio-économiques de la gestion des ressources organiques dans les exploitations agricoles au sud-ouest du Burkina Faso

5. DETERMINANTS SOCIO-ECONOMIQUES DE LA GESTION DES RESSOURCES ORGANIQUES DANS LES EXPLOITATIONS AGRICOLES

5.1. INTRODUCTION

Les zones de front pionnier se caractérisent par leur colonisation récente par des populations migrantes. Souvent sous-peuplées à l'origine, on observe dans ces zones une dynamique démographique liée aux naissances mais surtout aux migrants. Cette dynamique entraîne une croissance de la population. La croissance de la population accentue la pression sur les ressources naturelles. Le sud-ouest du Burkina Faso est une zone d'accueil de migrants venant d'horizons divers. Dans cette zone arrivent des populations migrantes venant du sahel, de la zone soudanienne mais aussi de l'extérieur du pays. Ces migrants sont en quête de nouvelles terres pour les cultures et de pâturages pour leurs troupeaux. Les potentialités en ressources naturelles du Sud -Ouest du Burkina Faso attirent vers elle les populations des zones défavorisées fuyant la surpopulation et les mauvaises conditions climatiques (Henry *et al.*, 2003) ; (Barbier *et al.*, 2002). Ces migrants se côtoient avec les populations autochtones (premiers occupants). Des conflits fréquents naissent pour l'appropriation et la gestion des terres (Hagberg, 2001).

Dans ce chapitre nous allons évaluer les déterminants socio-économiques de deux systèmes de production dans un même milieu biophysique, sur l'évolution des ressources naturelles.

La première partie du chapitre expose la problématique, la deuxième partie expose la méthode employée, les troisième et quatrième partie présentent les résultats obtenus qui seront discutés et dans la partie cinq avant la conclusion.

5.2. PROBLEMATIQUE

La matière organique joue un rôle important dans les écosystèmes des zones de savanes d'Afrique de l'Ouest (ZSAO). Le taux du carbone du sol est un bon indicateur de la qualité biologique et minérale des sols. Par ailleurs la biomasse produite sur un sol détermine l'ampleur des processus productifs des populations rurales. Or ces quantités de ressources carbonées baissent dans les terroirs des zones de savane (Pieri, 1992 ; Ker, 1995 ; Reenberg, 1996).

Les facteurs qui expliquent cette raréfaction sont de plus en plus considérés comme étant d'origine anthropique, comme le changement climatique et les changements d'usage des terres. L'impact de la baisse de la pluviosité explique en partie la baisse des ressources carbonées. Deux sécheresses importantes ((1972-1973) et 1983-1984)) ont marqué la zone de savane en particulier le Sahel, ces trente dernières années (Bremner et Kessler, 1995). La baisse de la pluviosité et la variabilité climatique réduisent la productivité végétale et ainsi l'étendue et la densité du couvert végétal de cette zone. Les activités humaines (défriches agricoles, coupe de bois, élevage, pâturage et feux de brousse) contribuent à la diminution de ces ressources. Pour satisfaire leurs besoins en terres à cultiver, les populations rurales défrichent les savanes arborées et arbustives pour y produire des cultures annuelles. Les céréales produites étaient jusqu'à récemment destinées à couvrir les besoins alimentaires.

De plus en plus les productions agricoles sont vendues pour satisfaire les besoins en argent¹⁰. Les produits d'élevage contribuent à la satisfaction des besoins en argent. La consommation de bois ; (90% des besoins d'énergie dans les pays en développement) (Bremner et Kessler, 1995), 93-97% des besoins en énergie de la population rurale (Benjaminsen, 1996), quant à elle, est satisfaite par les prélèvements dans la forêt ou la brousse dans bien des cas.

Il est donc nécessaire de comprendre comment ces populations rurales déterminent leurs besoins (surface à cultiver, quantité de céréales à produire) ou leurs besoins en argent¹¹ (quantité d'argent nécessaire) et les quantités de bois de chauffe dont elles ont besoin en vue d'une planification pour une gestion durable des ressources naturelles.

A l'échelle des exploitations agricoles la programmation linéaire (procédure mathématique) a été largement utilisée pour optimiser l'allocation des ressources dans les exploitations (Barbier et Bergeron, 1999 ; Bontkes et van Keulen, 2003). Des modèles bioéconomiques (économique et biophysique) ont été utilisés dans le but de prévoir la dynamique des ressources. Cependant ceux-ci présentent des insuffisances notamment l'absence d'interactions et de dynamique sociale (Barbier et Bergeron, 1999). Pour prendre en compte l'aspect dynamique et prédictif en particulier dans la gestion des ressources naturelles et suivre les changements d'usage des terres, c'est des modèles dynamiques de simulation spatialement explicites qu'il faut (Stéphanne et Lambin, 2001 ; Verburg et Veldkamp, 2001) ou, mieux, il faut intégrer les modèles dynamiques spatialement explicites et des modèles d'optimisation (Verburg *et al.*, 1999 ; Lambin *et al.*, 2000). Ces relations mathématiques peuvent être couplées avec d'autres modèles biophysiques (modèles de stocks parcellaires de C dans les sols et la végétation) pour calibrer un système multi-agents le modèle MIROT¹² à cet objectif.

Cette étude vise à identifier les règles de gestion des exploitations agricoles (surfaces cultivées, type de culture, rotation culturale) en fonction de déterminants sociaux (origine exploitant, nombre actifs) et économiques (besoins en nourriture, en argent).

Le terroir d'étude se situe dans la zone de front pionnier de migration au sud-ouest du Burkina Faso en zone sud-soudanienne (Figure 21). La superficie du terroir est environ 15000 ha (Augusseau *et al.*, 2000). L'année est subdivisée en deux saisons. Une saison de pluie avec des hauteurs d'eau annuelle de 900 à 1200 mm. Elle s'étale de mi-mai à mi-octobre et une saison sèche pendant laquelle souffle généralement un vent chaud et sec, l'harmattan. Une typologie des systèmes de production¹³ dans le terroir a été faite (Augusseau, 2000b) puis actualisée (Gazel, 2002). Deux systèmes de production coexistent dans ce terroir (un système de culture semi permanent pratiqué par les autochtones (AU) et le système de culture à rotation triennale pratiquée par les migrants (MI). Les principales cultures sont l'igname (*Discorea sp*), le maïs (*Zea mays*), le sorgho (*Sorghum bicolor*), les plantations d'anacardiers (*Anacardium occidentale*) et le coton (*Gossypium sp*) introduit depuis moins de 10 ans. L'igname, le coton et l'anacardier sont les principales productions

¹⁰ Besoin en argent : simplification du langage pour désigner l'argent espéré par l'exploitant. Il correspond à la notion d'utilité c'est-à-dire que l'exploitant, à partir d'un niveau de satisfaction de ses besoins, a tendance à limiter ses efforts

¹² MIROT : Modélisation Intégrée de la dynamique des Ressources Organiques et analyse de viabilité des Terroirs agro-sylvo-pastoraux de savanes ouest africaines

¹³ Système de production : combinaison dans l'espace et dans le temps des ressources disponibles de l'exploitation agricole et des productions animales et végétales.

de rente. Le maïs (*Zea mays*) est la base de l'alimentation mais il est aussi vendu tout comme le sorgho (*Sorghum bicolor*). Ce dernier est aussi destiné à la fabrication de la bière locale appelée « Dolo ». L'élevage en raison des épizooties fréquentes est faiblement développé et peu intégrée avec l'agriculture.

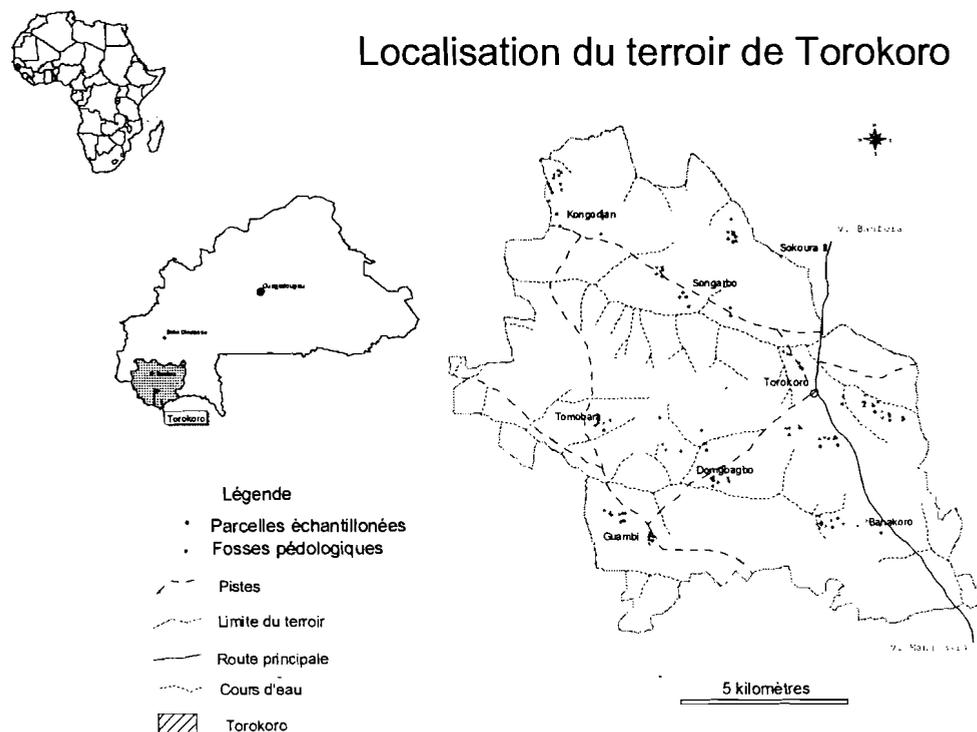


Figure 21 : Carte du terroir de Torokoro

Les déterminants socio-économiques ont été appréhendés à l'échelle de l'exploitation agricole. Celle-ci a été conceptualisée en terme de flux entrants et sortants et des stocks de C dans les différents compartiments (végétaux, animaux, stockage, cours de la concession¹⁴, recyclage) (van den Bosch *et al.*, 1998). L'exploitation agricole dispose de moyens de production (matériel, humain, terres, capital, cheptel) qu'elle combine pour obtenir des productions et des revenus (agricoles, financiers...). Les activités génèrent des flux de matières entrants et sortants de l'exploitation. Ces flux sont orientés des **espaces de production** de biomasse (parcelles) vers les **espaces de concentration** (stockage, habitat) ou vers le marché. **Les sorties de carbone** sont essentiellement dues aux prélèvements pour les usages domestiques (récoltes, bois de feu, bois d'oeuvre, produits ligneux). Elles sont constituées des prélèvements de fourrage par les animaux, les usages domestiques, des prélèvements de bois pour la vente et les productions agricoles (récoltes). **Les entrées de carbone** quant à elles sont constituées par les achats de nourriture (céréales et autres) et de bois de feu provenant du marché et les entrées par l'atmosphère. Les flux internes sont les ordures ménagères et les excréta humains et animaux Ils alimentent la matière organique du sol (Figure 22).

¹⁴ Concession : Habitat groupé correspondant au lieu de résidence de membres d'une exploitation agricole

Modèle exploitation

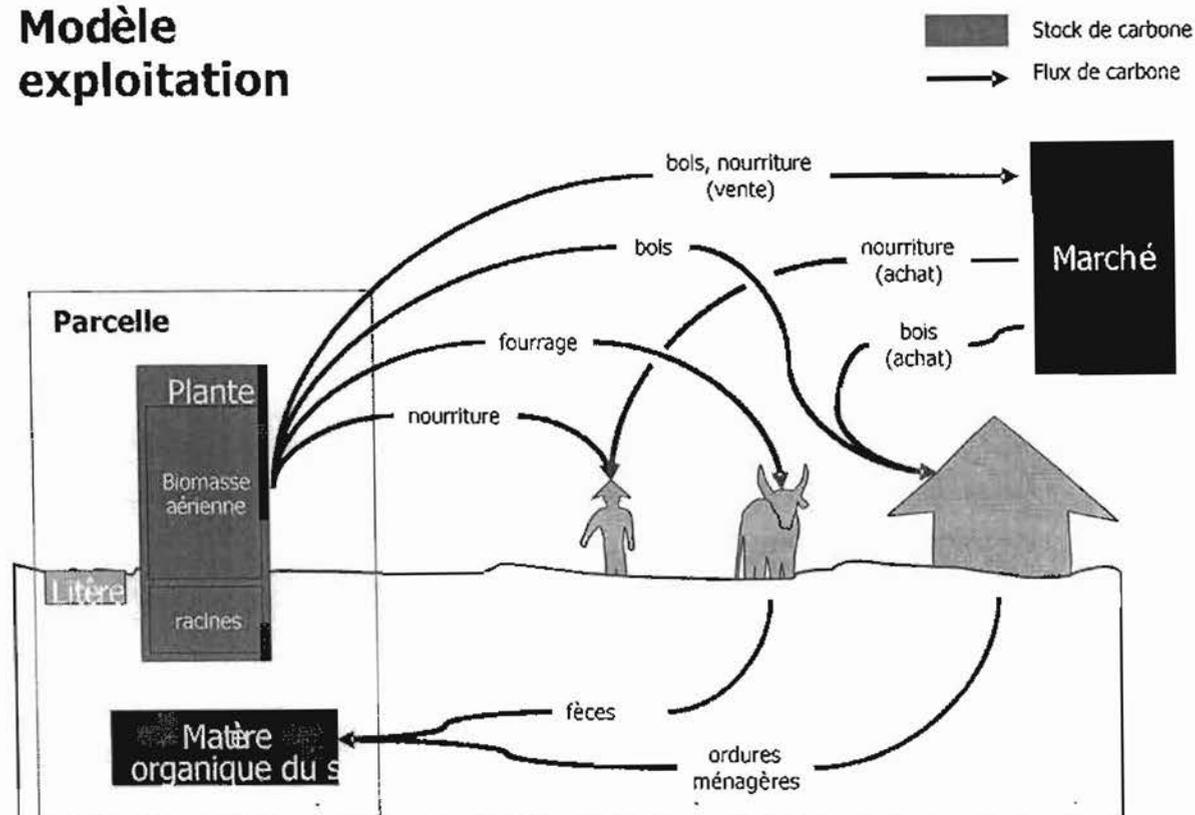


Figure 22: Modèle conceptuel simplifié des flux et stocks dans l'exploitation agricole

Les hypothèses qui sous-tendent cette démarche sont :

Les exploitations agricoles ont des règles de décisions. Celles-ci sont influencées par des facteurs propres à ceux-ci (endogènes) et des facteurs externes (exogènes).

Les exploitations agricoles prennent leurs décisions en début de chaque année et font des estimations ou des prévisions de leurs besoins (terre à cultiver, céréales à consommer et en argent).

Il est possible de quantifier par des modèles mathématiques empiriques les déterminants et les besoins des exploitations agricoles.

Pour cela les objectifs spécifiques suivants sont poursuivis :

- Identifier et décrire les règles de décision des exploitations agricoles.
- Décrire par des relations mathématiques les relations entre déterminants et besoins socio-économiques des exploitations agricoles

5.3. DISPOSITIF, METHODES D'ENQUETES ET DE MODELISATION

5.3.1. Dispositif et méthodes

Trois dispositifs d'enquêtes ont été mis en œuvre. Une première enquête à base de questionnaire a permis de recueillir les données quantitatives auprès d'un échantillon

raisonné de 100 exploitations (un tiers des exploitations et en fonction de la représentativité de chaque groupe). Un second dispositif d'enquête a permis de comprendre et identifier les règles de décision et de gestion collectives et individuelles des exploitants agricoles. Le troisième dispositif d'enquête a permis d'estimer la consommation de bois d'énergie en saison humide et en saison sèche. Les outils de la Méthode Active de Recherche Participative (MARP) ont été utilisés pour ces enquêtes collectives (classification préférentielle, Interview semi structuré, triangulation et restitution) (Gueye et Freudenberger, 1991). Pour les autres enquêtes des questionnaires préétablis et testés ont été utilisés.

5.3.2. Approche de modélisation statistique

L'identification et la description des règles individuelles et collectives ont permis dans une première phase de connaître les principaux déterminants des besoins. Dans une deuxième phase la modélisation utilisée permet de décrire des modèles statistiques empiriques. Pour cette modélisation des données d'enquêtes quantitatives ont été donc couplées avec des données d'enquêtes qualitatives.

La modélisation économétrique des données de l'enquête quantitative a été faite par une approche empirique. Pour cela l'enquête rurale rapide (ERR) a permis pour chaque type de besoin d'identifier les principaux déterminants à partir des règles de décision et de gestion des exploitants. Dans le système à base d'igname, par exemple le besoin en surface pour cultiver l'igname est fonction de la main d'œuvre familiale disponible mais aussi de la main d'œuvre salariée. Des hypothèses déduites de l'enquête socio-économique sur les déterminants des besoins et testées pour traduire en équation les relations entre ces différents besoins et ces déterminants.

Quelques hypothèses testées sont : c'est la force de travail dont dispose l'exploitation qui détermine la surface à emblaver.

Pour la consommation de céréales, l'hypothèse est que celle-ci est fonction de l'effectif de l'exploitation. Il en est de même de la consommation en bois.

Le besoin en argent quant à lui est fonction des surfaces des cultures rente ou à vendre. Des modèles linéaires mais aussi de décroissance exponentielle ont été définis et testés en se basant sur les données quantitatives de l'enquête à base de questionnaire.

Deux méthodes statistiques ont été utilisées pour la modélisation économétrique. Le modèle linéaire généralisé (GLM) a été utilisé pour l'établissement de modèles statistiques empiriques (Spss, 1999). L'algorithme de Levenberg-Marquardt (estimation par la méthode des moindres carrés) a été utilisé pour mettre au point les modèles non linéaires (StatSoft, 1995). La consommation de bois par personne est une fonction décroissante liée à l'effectif des concessions.

5.4. RESULTATS

Il existe une diversité d'acteurs et de décideurs dans le terroir. Les acteurs sont l'ensemble des individus, groupes et organisations œuvrant dans le terroir. Les décideurs par contre sont un cercle restreint de locaux (responsable administratif villageois (RAV), Chef de terre, chef de village, chef de quartier et extérieur (représentants de l'administration). Ils interviennent surtout dans les règles de gestion.

5.4.1. Règles de décision

Les décisions à l'échelle terroir incombent exclusivement aux premiers occupants (autochtones). Elles concernent la gestion des terres, les formes d'accès à la terre (héritage, le don, le prêt) (Tableau 15), la vente de terres, la gestion des points d'eau pour l'alimentation humaine et animale pendant la saison sèche. L'accès à la brousse est libre pour la pâture des animaux avec quelques réticences. L'accès au bois est libre pour tous dans tous les espaces. La cueillette (nééré, karité...) est codifiée.

Tableau 15: Principales règles de gestion commune des acteurs en fonction de leur rôle et des objectifs

Règles collectives	Acteurs	Rôles, Objectifs
Accès à la terre habitat champ	Chef de terres Exploitations agricoles	Dons, prêt, Vente, achat
Accès au Pâturage saison sèche saison humide transhumance	Chef de village Responsable administratif et villageois (RA) Agro pasteurs, pasteurs	Détermination des passages Règlement litiges
Accès au bois	Ménages agricoles artisans	accès
Accès à l'eau	Chef de village Responsable administratif et villageois (RA)	Détermination de l'accès Contribution financières

Pour ce qui concerne les relations entre exploitants, plusieurs niveaux de décisions et de gestion existent (individus, exploitation, communauté et terroir).

Il existe ainsi quatre niveaux de décision pour les règles de gestion collectives (Tableau 15). Au niveau terroir, les responsables locaux (coutumiers et religieux) décident pour l'ensemble des communautés en respect aux coutumes des premiers occupants (autochtones). Les chefs de quartier s'occupent de leurs communautés et règlent les conflits internes. L'administration s'occupe des relations qui dépassent la compétence des villageois et des communautés. Les relations entre exploitations sont de type privées.

Tableau 16: Objectifs des règles individuelles des exploitants agricoles

Règles individuelles	Objectifs
Production	
Détermination des surfaces	Détermination des assolements
Mise en œuvre itinéraire techniques	
Entretien des cultures	
Récolte	
Consommation	
Détermination des quantités à consommer	Détermination des quantités à stocker,
Décision d'achat de céréales	
Les produits à consommer, fréquence et nombre des repas	
Commercialisation	
Détermination des quantités à vendre	Détermination des produits à vendre
Période de ventes	
Destination des produits des ventes	
Relations, négociation diverses	Echange de travail, d'équipement, de fumier, de terres

Les règles individuelles sont prises à l'échelle de l'exploitation agricole. C'est le chef d'exploitation qui prend les décisions mais celles-ci s'appliquent à toute la concession. Ce schéma est valable dans tous les systèmes de production (autochtone, migrant). Les règles de décision dépendent de facteurs exogènes tels que le climat (pluies tardives, précoces, insuffisantes ou non) ou le marché (prix d'achat du coton, du maïs, des engrais). Ces facteurs sont indépendants de la volonté de l'exploitant, au contraire ils s'imposent à lui. Les règles dépendent également de facteurs internes à l'exploitant qu'il peut influencer. Ces décisions concernent tous les aspects de la production, de la consommation, de la commercialisation, de l'élevage et des activités extra agricoles. Ces règles de décision conduisent à la mise en œuvre de stratégies variées par les exploitants. L'analyse des règles de décision des exploitations agricoles prend en compte le présent mais aussi le futur. Par exemple pour l'igname, c'est en fin de saison des pluies que la décision est prise pour l'année suivante ; le choix de la parcelle, la détermination de la surface se fait à ce moment. Les éléments pris en compte pour estimer une surface donnée sont les déterminants (Tableau 16).

En règle générale les principaux déterminants identifiés sont le nombre de personnes de l'exploitation agricole (effectif), la prise en compte des imprévus (étrangers et naissance). Les faits sociaux (coutume et religion) sont aussi pris en compte. **L'effet mémoire** ou encore **l'expérience** du producteur eu égard à son vécu des années antérieures (souvenir et leçons tirés de sa situation alimentaire des années antérieures) est déterminant. En effet, par expérience ils mettent en relation les quantités de récoltes de l'année antérieure (n-1) et les surfaces des mêmes années. Ces souvenirs sont intégrés dans le raisonnement du producteur pour apprécier les quantités de récoltes nécessaires l'année en cours (n). Par principe le producteur stocke d'abord toutes les récoltes de maïs et de sorgho. La vente de l'excédent n'intervient qu'en milieu de saison quand les nouvelles récoltes espérées

s'annoncent prometteuses. Des ventes ponctuelles de sorgho sont opérées pour satisfaire des besoins précis.

L'analyse des comportements des exploitants révèle une logique de l'imitation des risques alimentaires. La quasi-totalité des exploitants mettent en culture le maximum de terres en début de saison (maximisation de la force de travail). Cette limitation du risque alimentaire est doublée de la recherche de revenus financiers par la vente de produits végétaux principalement des cultures de rente. D'office le maïs est cultivé en plus de l'igname (SCI) ou le coton en plus du maïs (CSP). Une partie du domaine est toujours plantée en anacardiens. Les exploitants ont les mêmes méthodes de gestion des stocks agricoles. L'effet mémoire liée à l'expérience de l'exploitant est souvent utilisé pour comparer les productions (surface, productions, consommation) et pour faire des prévisions. La gestion de l'argent des ventes est du ressort du chef de famille ou du chef de concession. L'utilisation des revenus de la vente des productions a quatre destinations principales : 1) la satisfaction des besoins matériels de la famille (habitation, déplacement, vêtements, soins) ; 2) la réalisation d'évènements et la satisfaction de besoins sociaux (mariages, baptêmes, pèlerinage, rites coutumier et religieux, achat d'aliments) ; 3) les besoins de production (achat de matériel de culture attelée, paiement de la main d'œuvre salariée), et 4) l'épargne (achat de ruminants, de bovins...).

Cette analyse permet également de se rendre compte que deux types de facteurs influencent les décisions des exploitants. Les comportements vis-à-vis de ces facteurs sont similaires dans les deux systèmes d'exploitation. Les facteurs exogènes s'imposent à tous. Ils sont surtout d'ordre climatique (pluies tardives, ou précoces, sécheresse ou trou de sécheresse, les prix des produits agricoles). Les facteurs climatiques influencent le calendrier cultural de sorte à imposer à l'exploitant l'adoption de stratégie adaptée. Les facteurs économiques, notamment les prix des produits agricoles en année n-1 influencent le comportement des agriculteurs dans les choix des cultures et les surfaces à emblaver en année n. Les facteurs endogènes sont ceux que le paysan peut influencer. Ils sont propres à chaque exploitant et liés aux conditions initiales de chacun (accès aux ressources ou la disponibilité des terres).

5.4.2. Besoins socio-économiques et leurs déterminants

Du point de vue des caractéristiques démographique, les deux systèmes sont proches (Tableau 17). Il s'agit de petites exploitations familiales avec une dizaine de bouches à nourrir, avec comme nombre d'actifs environ un demi de ces bouches à nourrir.

Tableau 17: Caractéristiques démographiques des exploitations enquêtées

Système	N	Nombre de bouches à nourrir	e.s.	Min	Max	Nombre d'actifs totaux	e.s.	Min	Max
Autochtone	27	10,33	1,1	4	29	4,00	0,34	2	10
Migrant	73	11,97	0,81	2	34	5,24	0,35	1	17
Total	100	11,53	0,67	2	34	4,90	0,28	1	17
N: Effectif	e.s: erreur standard		Min: Minimum		Max: Maximum				

La disponibilité des terres à cultiver n'est pas la même dans les deux systèmes de production. Les indicateurs de surface (surface disponible, surface cultivée, ratios surfaces disponibles/effectif des exploitations, surfaces cultivées/effectif des exploitations agricoles, surface céréalière/surface cultivée) des terres des exploitations agricoles mettent en

évidence des différences significatives entre les deux systèmes de production (Tableau 18). L'estimation de la surface disponible est de 31 ± 4 ha chez les autochtones contre 8 ± 1 ha chez les migrants. Les surfaces cultivées moyennes sont de $6,15 \pm 0,69$ ha et $4,67 \pm 0,34$ ha respectivement les AU et MI. Le ratio surface en céréale/surface cultivée est de 73% chez les AU contre 87 % chez les MI. La surface cultivée augmente avec l'effectif moyen de l'exploitation. Cependant la surface disponible n'est pas en relation avec la taille de la famille, du coup la superficie disponible par tête est plus élevée chez les AU que chez les MI. Le ratio surface cultivée par personne est sensiblement le même pourtant ($n=27$; $0,67 \pm 0,08$ ha par personne chez les AU contre $0,45 \pm 0,03$, $n=72$ chez les MI). Les résultats des enquêtes montrent que les surfaces cultivées par culture dans les deux systèmes sont variables (Tableau 19)

Tableau 19: Surfaces emblavées dans les deux systèmes de production (ha)

Statut de l'exploitation agricole	Culture	n	Surface	e.s.
Autochtone	Igname	19	1,84	0,32
Autochtone	Coton	0	.	.
Autochtone	Maïs	27	2,25	0,22
Autochtone	Sorgho	25	1,92	0,28
Autochtone	Arachide	13	0,88	0,18
Autochtone	Mil	7	0,86	0,09
Autochtone	Niébé	8	0,53	0,07
Autochtone	Riz	1	0,25	.
Autochtone	Anacarde	25	5,10	0,71
Autochtone	Mangue	1	3,00	.
Migrant	Igname	2	0,63	0,38
Migrant	Coton	7	2,64	0,32
Migrant	Maïs	72	2,26	0,18
Migrant	Sorgho	61	1,64	0,12
Migrant	Arachide	30	0,68	0,08
Migrant	Mil	20	0,53	0,09
Migrant	Niébé	29	0,47	0,04
Migrant	Riz	28	0,56	0,07
Migrant	Anacarde	60	3,47	0,39
Migrant	Mangue	14	1,18	0,18

n= effectif; moyenne en ha et e.s.= erreur standard

Tableau 18: Ratio surfaces agricoles dans les deux systèmes

Indicateurs	Autochtone			Migrant			F	p
	n	Moyenne par exploitation	e.s.	n	Moyenne par exploitation	e.s.		
Surface disponible	27	30,93	3,85	72	7,93	0,93	68,01	0,000
Surface cultivée	27	6,14	0,69	72	4,67	0,34	4,45	0,037
Surface cultivée/ Surface disponible	27	0,23	0,02	72	0,73	0,04	49,941	0,000
Surface cultivée/ Effectif	27	0,67	0,08	72	0,45	0,03	10,371	0,002

F= statistique de Fischer; P=probabilité de rejet de l'hypothèse nulle H_0 ; e.s.= erreur standard

Le rapport surface cultivée sur surface disponible est de 23% ; n=27 chez les AU contre 73% ; n=72 chez les MI. La surface céréalière par tête dans les deux systèmes n'est pas significativement différente ($0,40 \pm 0,02$; n=100), elle diminue quand augmente la taille de l'exploitation (Tableau 18). Par contre les surfaces moyennes par spéculation et par exploitation dans les deux groupes sont équivalentes.

Lorsque la terre est disponible (SCI) le principal facteur limitant est la force de travail. Après la défriche, c'est l'igname qui est cultivé, puis une succession culturale est entretenue sur la parcelle les années suivantes sous la responsabilité du chef d'exploitation qui tenant compte des facteurs aussi bien exogènes que endogènes (Figure 23). La surface en igname va conditionner l'ensemble des surfaces cultivées les années suivantes mais aussi l'assolement chaque année. Les assolements sont typiques. Il en est de même des successions culturales sur une parcelle donnée. La surface cultivée en igname est principalement fonction de la main d'œuvre disponible (familiale, salariée ou entraide) que peuvent mobiliser les exploitants. La surface du champ de maïs de l'année en cours (n) est égale à la surface du champ d'igname de l'année écoulée (n-1) si aucun facteur externe (pluie tardive) ou propre à la famille (réduction de la force de travail) n'affecte cette surface. La répartition des surfaces à cultiver entre le maïs et le sorgho se fait en fonction de l'état d'avancement du calendrier cultural. Dans ce système la jachère est le principal mode de recyclage de la fertilité des sols, elle intervient après 5 à 6 ans de mise en culture et peut durer 10 ans ou plus. Dans tous les cas les producteurs dans le système autochtones cherchent à valoriser le facteur rare à savoir la force de travail. Il en va de même de la superficie du champ de sorgho. La traction animale intervient pour augmenter la force de travail. Lorsque la parcelle est plantée, elle est cultivée pendant 4 à 5 ans, puis reste une plantation pure, jusqu'à 40 ans environ avant d'être défrichée.

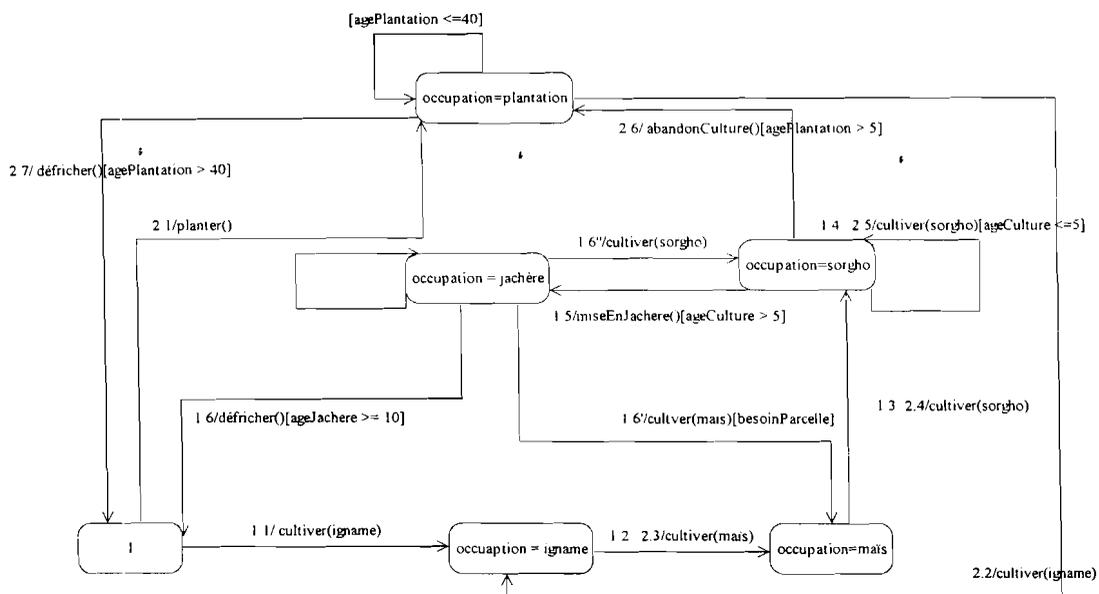


Figure 23: Succession de la mise en culture au cours des années des parcelles dans le SCI

Lorsque la disponibilité en terres est limitée (majorité des exploitants dans le système migrant), c'est le premier déterminant des surfaces cultivées, vient ensuite la force de travail disponible sur l'exploitation. Lorsque les deux conditions sont réunies les surfaces cultivées annuellement tiennent compte des surfaces déjà plantées en anacardiés.

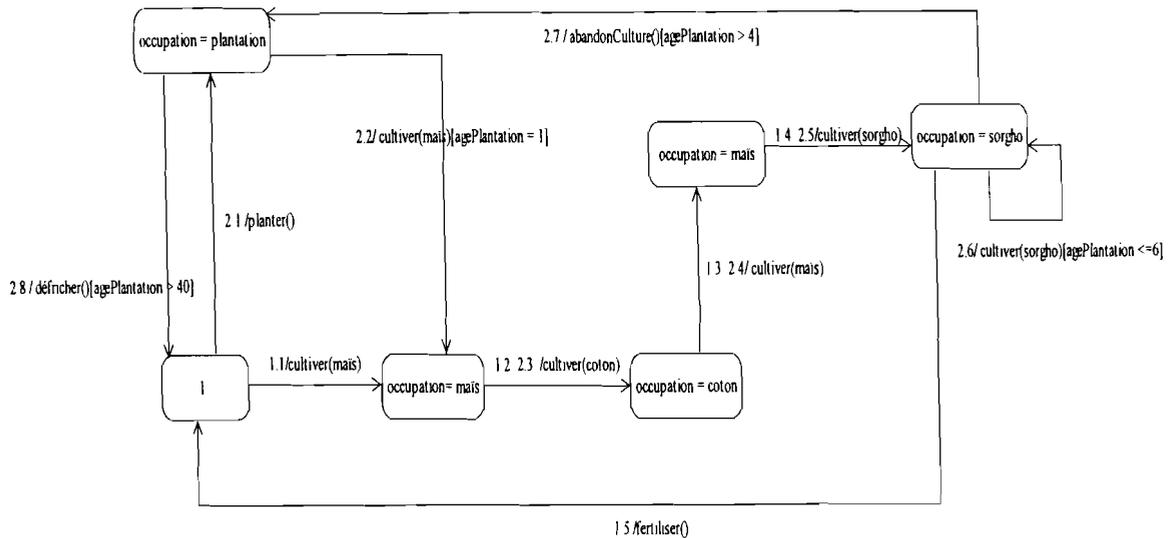


Figure 24: Succession de la mise en culture au cours des années dans le SCP

La primauté est donnée aux cultures de maïs et de sorgho, et une partie du champ est réservée pour le coton. La Figure 24 décrit la succession culturelle sur une parcelle. L'occupation des terres non plantées est raisonnée entre les cultures de maïs, sorgho, coton, arachide, niébé, sésame, riz. Une stratégie d'appropriation de la terre et de gain financier conduit à la plantation d'anacardiés. La plantation d'anacardiés occupe souvent la moitié des terres disponibles chez les migrants. Au fil des années la possibilité d'association de céréales avec les plantations détermine les surfaces restantes pour les autres cultures. La plantation demeure pure à partir de 4 à 5 ans pour une durée de 40 ans environ. En général une partie des terres est toujours réservée pour les cultures annuelles, la fertilisation minérale permettant des restitutions minérales aux sols pour compenser les prélèvements par les récoltes.

Dès les premières pluies les exploitants agricoles défrichent ou mettent en culture le maximum de terre. Les travaux de défrichage et de labour sont les plus difficiles pour eux. C'est donc la force de travail qui est limitant en début de campagne agricole. La force de travail disponible comprend la main d'œuvre familiale, salariée, la traction animale et les entraides. **L'effet mémoire** des producteurs regroupe toute la démarche et tous les critères intériorisés par ceux-ci et pris en compte lors des décisions par rapport aux surfaces à emblaver. En début de chaque année sur la base des proportions des différentes surfaces cultivées et des récoltes obtenues ainsi que le niveau de satisfaction de leur besoin en argent en année antérieure (n-1) les producteurs ajustent les surfaces à cultiver l'année en cours (n).

Lorsque la terre n'est pas limitante, différents modèles de besoins en terre à cultiver ont été définis. Les trois modèles de détermination de la surface à cultiver sont énoncés en hectare. Par exemple le besoin de surface (hectare) pour l'igname = $0,411 * \text{actifs totaux}$ ($r^2=0,73$).

Le besoin de surface pour le maïs = $0,345 \cdot \text{actifs totaux} + 1,06$ si l'exploitant à recours à la main d'œuvre extérieure ou alors besoin de surface pour le maïs = $0,345 \cdot \text{actifs totaux} - 0,216$ si l'exploitant n'a pas recours à la main d'œuvre extérieure ($F=11,12$; $p=0,003$). Quant au sorgho le besoin de surface = $0,812 \cdot \text{surface en maïs}$ ($r^2=0,73$; $F=65,211$; $p=0,000$).

Lorsque la terre est un facteur limitant, le deuxième facteur est la force de travail. Les trois modèles de détermination des surfaces à cultiver ont été définis. Le coton n'est cultivé que si l'exploitation agricole est équipée en traction animale. Les autres besoins s'expriment par des équations linéaires. Par exemple pour le maïs pour une exploitation équipée et ayant recours à la main d'œuvre extérieure, le besoin de surface pour le maïs = $0,125 \cdot \text{actifs totaux} + 0,098 \cdot \text{surface disponible} + 1,259$ ($r^2=0,89$). Si l'exploitation n'a pas recours à la main d'œuvre extérieure le besoin de surface pour le maïs = $0,125 \cdot \text{actifs totaux} + 0,098 \cdot \text{surface disponible} + 0,779$ ($r^2=0,89$). Le même principe est utilisé quand l'exploitation agricole n'est pas équipée.

La production agricole est principalement orientée vers l'alimentation familiale mise à part l'igname et le coton. L'alimentation des populations est à base de céréales. Le maïs est la principale céréale consommée. Ce constat est valable pour tous les exploitants. Le sorgho est cultivé pour la vente et peut être consommé. La gestion des stocks de céréales est quotidienne sous le contrôle du chef d'exploitation.

Tableau 20: Consommation des céréales dans les exploitations agricoles des deux systèmes de production

Indicateurs	Autochtone			Migrant			F	p
	N	Moyenne	e.s.	N	Moyenne	e.s.		
Consommation par exploitation	27	1970	266	73	1990	173	0	0,950
Consommation par tête	27	188	8	73	166	6	3,67	0,058

F= statistique de Fischer; P=probabilité de rejet de l'hypothèse nulle H_0 ; e.s.= erreur standard

La consommation céréalière dans les exploitations agricoles est fonction de la taille des exploitations agricoles (Figure 25). Plus la taille de la famille est grande, plus la quantité consommée est élevée. Ce constat est valable dans les deux principaux groupes sociaux. La consommation en céréale des exploitations agricoles a été estimée ($n=27$; 1970 ± 266 kg par an) chez les autochtones et ($n=73$, 1990 ± 173 kg par an) chez les migrants, soit une moyenne de 1985 ± 145 kg an moyenne par an pour l'échantillon de 100 exploitations. Le test statistique montre que la différence n'est pas significative entre les deux groupes ($F=0,004$; $p=0,950$). Les céréales nécessaires à la consommation sont déterminées par la comparaison de la récolte présente à la récolte passée (année n-1). Les quantités à stocker sont estimées par rapport aux quantités qui ont été mangées par les membres de la famille en année n-1. Une quantité additionnelle est ajoutée au stock pour les imprévus.

Le nombre de personnes nourries est un déterminant fondamental des besoins en céréales alimentaires.

Dans les familles autochtones et migrantes le modèle de consommation alimentaire est identique. Un seul modèle a été établi pour décrire la consommation céréalière dans les

exploitations agricoles de ce terroir villageois. La consommation de céréales en kilogramme par exploitation et par an est principalement fonction de la taille des exploitations agricoles. L'équation s'écrit : (Consommation céréalière = $176 * \text{effectif de l'exploitation agricole}$; $n=100$, $r^2=91$; $F=978$; $p=0,000$). La consommation moyenne par personne est constante.

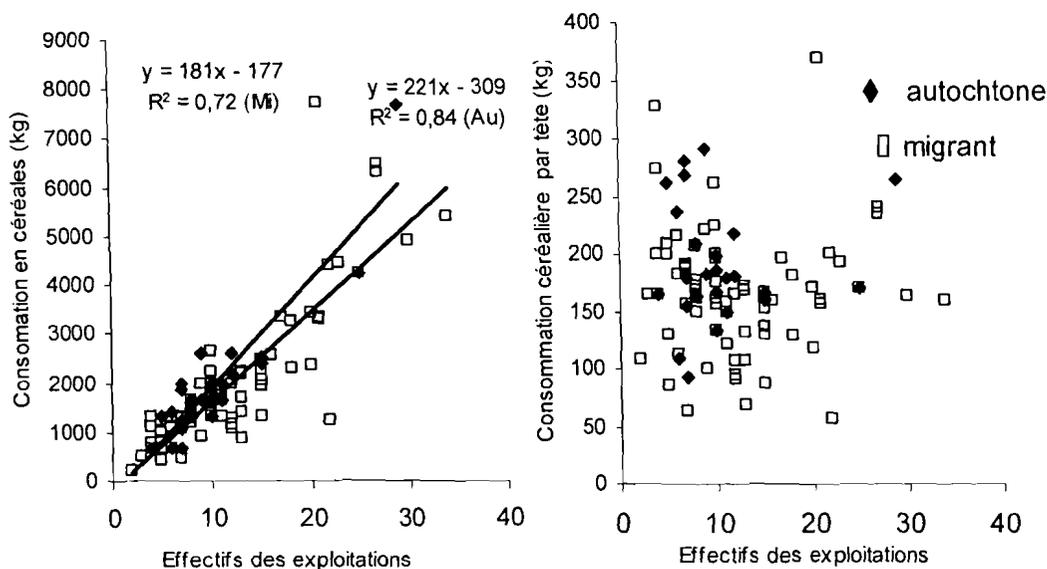


Figure 25: Consommation céréalière dans les deux types d'exploitations par tête et par an

La consommation céréalière des différents types d'exploitations est très proche aussi bien pour les moyennes par exploitation que pour la consommation ramenée par tête (Tableau 20). En moyenne par personne la consommation annuelle varie entre 166 ± 6 et 188 ± 8 kg respectivement chez les migrants et chez les autochtones. Ces moyennes ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 % ($F=3,671$; $p=0,058$). La moyenne globale obtenue est de 172 ± 5 kg de céréale par an par personne mais celle-ci cache des disparités entre exploitations. En effet la consommation par tête varie beaucoup entre 50 et 350 kg par personne voir plus (Figure 25).

Les sources d'argent pour les exploitations agricoles sont variées. Cependant elles proviennent essentiellement de la vente des produits agricoles (végétaux) et d'autres sources (animaux, artisanat). Chez les autochtones 47% provient des produits agricoles, 29 % des sources extérieures et 24 % de l'élevage. Chez les migrants 59 % provient de l'élevage, 26 % des cultures et 25 % des activités extra. Cependant dans les deux cas, les pourcentages liés à l'élevage sont surestimés en raison de la présence dans les deux groupes d'agro-pasteurs et de pasteurs Peulhs. Trois productions végétales sont essentiellement orientées vers le marché. Il s'agit de l'igname produite par les autochtones, du coton produit par les migrants et des amandes d'anacardières dans les deux groupes. En plus de ces cultures de rente, le sorgho, le maïs, le riz, l'arachide, le niébé et le sésame sont les autres produits agricoles vendus par les exploitants. L'examen des différents produits vendus et leur contribution sur les revenus agricoles montrent que chez les autochtones c'est principalement l'igname (50%) puis viennent l'anacardier 23%, le maïs (16%) et le

sorgho (9%). Par contre chez les migrants on observe une diversité de sources d'argent, anacarde 29% coton 21%, maïs 23%, sorgho 12% et arachide 8%, riz 4% et niébé 3%.

Tableau 21: Revenus monétaires par exploitations agricoles et par personne

Indicateurs	Autochtone			Migrant			F	p
	N	Moyenne	e.s.	N	Moyenne	e.s.		
Revenus exploitation	25	396856	140596	63	387834	82226	0,003	0,955
Revenus par tête	25	31883	6024	63	29847	6280	0,036	0,849

F= statistique de Fischer; P=probabilité de rejet de l'hypothèse nulle H_0 ; e.s.= erreur standard

Les apports du coton, de l'anacarde et du maïs sont proches dans le système migrant. Les sources animales sont principalement dues à la vente de bovins dans les deux cas. Le revenu moyen par actif est sensiblement le même dans les deux types d'exploitations. Les revenus monétaires par exploitation agricole autochtone est de 396856±140596 FCFA (605±214,34 euros¹⁵) contre 387834±82226 FCFA (591,25±125,35 euros) pour une exploitation de migrant et par tête respectivement pour les deux catégories 31883±6024 CFA (48.61±9.18 euros) et 29847±6280 FCFA (45.5±9,57 euros) (Tableau 21). Les revenus monétaires par exploitation (F=0,003 ; p=0,955) et par tête (F=0,036 ; p=0,849) ne sont pas statistiquement différentes dans les deux systèmes de productions du terroir. Le revenu moyen annuel pour une exploitation agricole est de 390398±70702 FCFA (595.16±107.78) soit par tête 30425±4793 FCFA (46.38±7.31 euros) indépendamment du statut.

Les déterminants des besoins en argent varient selon les groupes sociaux. Chez les producteurs d'igname c'est principalement la taille du champ d'igname qui est le principal déterminant. La surface en maïs, sorgho viennent ensuite ainsi que la surface de la plantation d'anacardières. Chez les producteurs de coton, les surfaces en maïs, sorgho, coton déterminent les besoins en argent. La surface des plantations est également déterminante pour certaines exploitations. La possession de bovins et des petits ruminants est un déterminant des besoins en argent. La vente des amendes d'anacardes ne viennent pas en tête des productions qui procurent les plus d'argent (sa vente est étalée dans le temps) contrairement aux céréales pour lesquelles la vente rapporte immédiatement de l'argent frais.

Deux modèles ont été établis correspondant à chaque type d'exploitation agricole (autochtone et migrante). Dans le système autochtone le besoin en argent est fonction de la surface en igname et de celle en sorgho. L'équation s'écrit, (besoins en FCFA), (surfaces en hectares) ; le Besoin en argent = 82025*surface en igname+69550*surface en sorgho ($r^2=0,83$). Dans le système migrant l'équation s'écrit : Besoin en argent = 129 869 *

¹⁵ 1 euro = 655,957 FCFA

surface en maïs + 129056 si l'exploitation dispose d'un attelage ou Besoin en argent = 129 869 * surface en maïs - 137926 si l'exploitation ne dispose pas d'attelage ($r^2=0,50$).

La disponibilité du bois est élevée dans ce terroir en raison de sa situation dans la zone à forte potentialité ligneuse du Burkina Faso. Les exploitations agricoles s'approvisionnent directement sur leurs champs et/ou dans la brousse. Elles utilisent du bois mort. Pendant la saison humide le bois est prélevé dans les champs et stocké tous les soirs par les femmes dans la cours des exploitations agricoles. Le stockage continue même si les besoins du moment sont satisfaits constituant ainsi un stock pour la période chaude et sèche. La consommation par tête est de $0,97 \pm 0,06$ kg par personne et par jour en saison sèche dans l'ensemble des exploitations car il n'y a pas de différence significative entre les deux systèmes ($f=1,739$; $p=0,192$). En saison humide la consommation par personne et par jour est de $1,36 \pm 0,12$ kg non statistiquement différent dans les deux principaux groupes sociaux ($F=0,032$; $p=0,860$).

L'effectif des exploitations agricoles est le principal déterminant des besoins en bois de chauffe. L'effectif de l'exploitation influe sur la consommation totale de bois. Le système (autochtone, migrant) n'a pas d'effet significatif sur la quantité de bois consommée. La consommation augmente avec l'effectif de l'exploitation. Cependant ramené par tête la consommation de bois en saison sèche et en saison humide montre une baisse de celle-ci quand augmente la taille du ménage (Figure 26).

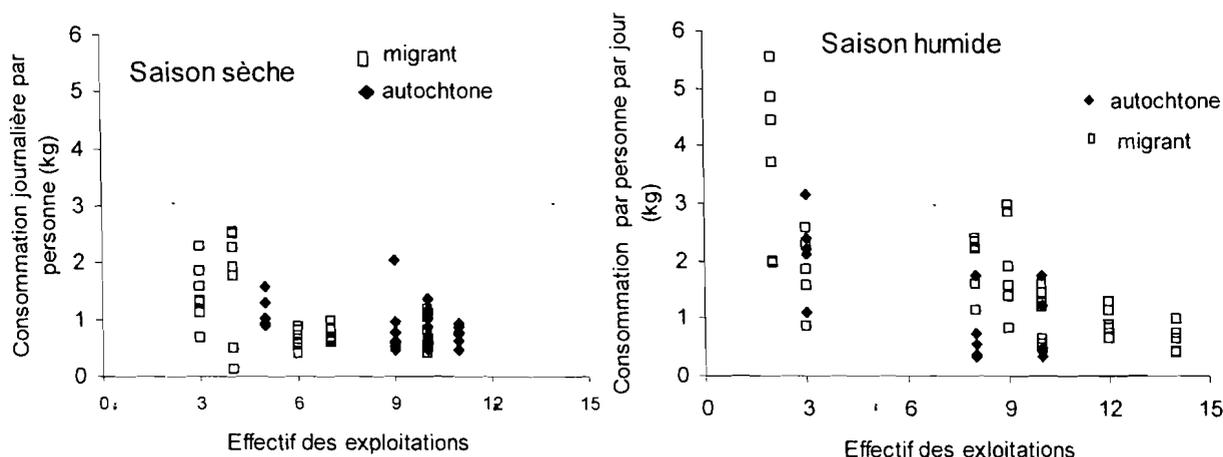


Figure 26: Consommation de bois par tête en saison sèche et en saison humide dans les deux types d'exploitation

Un modèle pour chaque saison (sèche, humide) a été décrit. En raison de la similitude du modèle de consommation, un seul modèle mathématique a été décrit par saison pour les deux groupes. Il s'agit d'un modèle de décroissance exponentielle en fonction de l'effectif des exploitations. En saison sèche la consommation ($\text{kg personne}^{-1} \text{ jour}^{-1}$) = $3,87 * \exp(-0,26 * \text{effectif}) + 0,76$; ($N=70$; $r^2=52$). En saison humide la consommation ($\text{kg personne}^{-1} \text{ jour}^{-1}$) = $3,49 * \exp(-0,47 * \text{effectif}) + 0,74$; ($N=81$; $r^2=27$). Le bois est donc principalement utilisé par les exploitations agricoles pour la cuisson des aliments. Les prélèvements domestiques (hangars, clôtures, case, artisanat divers) sont négligeables.

5.5. DISCUSSION

Ces modèles développés ne décrivent pas des relations de cause à effet mais mettent en évidence l'association entre les déterminants et la consommation des ressources. L'enquête est un moyen rapide de collecte des données. Elle est beaucoup utilisée. Mais une de ses

principales faiblesses réside dans le caractère déclaratif des données collectées. Pourtant les enquêtes s'adaptent bien à l'étude des exploitations agricoles. Pour mieux approcher la réalité du terrain et améliorer la fiabilité des résultats, l'échantillon a été judicieusement composé et suffisamment représentatif puisqu'il tient compte de la typologie des exploitations (Augusseau, 2000b). Des mesures ont été effectuées en plus des déclarations des exploitations (consommation de bois, consommation céréales). La validation des enquêtes qualitatives a été possible par l'utilisation d'outils et de méthodes appropriés des approches participatives pour la validation (Gueye et Freudenberger, 1991).

En dépit de la grande diversité des acteurs du terroir, les vrais tenants et gestionnaires des ressources sont les premiers occupants (autochtones). Toutes les ressources sont appropriées et gérées localement. Ce contrôle des ressources est sous une forte pression des migrants et pourrait évoluer (Ouédraogo, 2000). Les mécanismes d'accès à la terre sont variés (l'héritage, le prêt, le don, l'achat). Ils évoluent également. La terre devient un objet de transactions financières (Bonkougou, 2004). Cependant l'apparition récemment d'un acteur institutionnel pour la gestion du terroir (comité villageois de gestion des terroirs ; CVGT) peu faire basculer les rapports de force des populations autochtones et migrantes et promouvoir des formes collectives d'organisation et de gestion des ressources. Les règles individuelles relèvent du niveau exploitation agricole et couvrent tous les aspects (production, stockage, consommation, commercialisation). Il y'a une diversité de règles et de décisions individuelles, pourtant toutes cohérentes et répondant à des stratégies variées. Les règles ne sont pas figées. Elles évoluent d'une année à l'autre sous l'effet de facteurs propres aux exploitants mais aussi sous l'effet de facteurs exogènes. Elles ne peuvent être cernées que sur le cours terme car ce type d'agriculteurs a un horizon de planification qui n'excèdent pas 2-3 ans (Scoles *et al.*, 1994).

Les différences de surfaces cultivées entre exploitations agricoles sont avant tout la conséquence des différences de l'accès à la terre. Les propriétaires terriens (autochtones) ont plus de terres disponibles dans leur domaine (premiers occupants). Ils ne sont donc pas limités par la surface des terres. Malgré ces différences les surfaces emblavées sont sensiblement les mêmes dans les deux groupes. Ceci s'explique par le fait que le principal facteur limitant dans ces exploitations familiales est la force de travail disponible. La rotation culturale est classique dans le système de production à base d'igname tandis que le système à base de coton la surface de l'exploitation déjà plantée en anacarde est prise en considération pour la répartition des surfaces entre coton et céréale sur le reste de l'exploitation. La surface moyenne cultivée est de 0,5 ha par personne par an. Ceci correspond à un besoin de 5 ha pour une famille de 10 personnes (taille moyenne des exploitations agricoles ruraux).

Au Burkina Faso, les régimes alimentaires sont dominés par les produits céréaliers, ceux-ci fournissent 67% des calories consommées pour une consommation moyenne de 190 kg par personne et par an (Sadaoc, 1999). La consommation moyenne de céréales estimée par personne et par an est de 170 kg. Cependant cette moyenne cache des disparités, en effet la consommation par tête est très variable même à l'intérieur d'un même groupe. Ceci pourrait s'expliquer par les disparités entre famille du niveau de satisfaction des besoins alimentaires. La moyenne de 170 kg est inférieure aux normes FAO (300 kg par personne par an) (Stéphanne et Lambin, 2001). Elle est cependant proche de celle généralement estimée dans la zone par plusieurs sources. Elle est également comprise dans la fourchette de consommation utilisée (150-200 kg/personne/an) par les économistes (Ruas et Benoît-Cattin, 1991), (Barbier et Benoît-Cattin, 1997). De plus, en milieu rural comme c'est le cas dans cette zone du Burkina Faso, 1,8 à 2,9 repas sont consommés en moyenne par jour en fonction de la situation économique du moment et des stocks d'aliments (Lykke *et al.*,

2002). Dans ces milieux, les repas non comptabilisés (légumineuse, tubercules, repas divers, boissons) sont autant de compléments alimentaires pour les populations rurales, surtout ici où l'igname semble primordiale pour les populations autochtones. En raison de régimes alimentaires similaires (céréale essentiellement maïs), on n'a pas de différence entre les groupes pour le besoin en céréale alimentaire. Le principal déterminant de ce besoin est l'effectif de l'exploitation.

Les exploitants ont une diversité de sources d'argent. Le revenu monétaire moyen par personne et par an est d'environ de 30000 CFA (45,73 euros). Il est proche du salaire minimal interprofessionnel garanti (SMIG) (28811CFA), (43,92 euros). Les besoins en argent sont très proches entre autochtones et migrants mais les sources d'argent varient (vente igname pour les premiers et vente de coton et de maïs pour les seconds). Les besoins en argent sont clairement exprimés à travers les activités socio-économiques notamment les productions agricoles, l'élevage et les activités extra agricoles. Les déterminants et les modèles sont propres à chaque groupe.

L'estimation de la consommation de bois en saison sèche est proche de 1 kg (0,97) par personne par jour en saison sèche et de 1,36 kg par personne par jour en saison humide. Ces consommations sont proches de 1,13 et 1,49 kg consommation estimée dans cinq villages du Mali (Benjaminsen, 1996), ou proche de 1 kg/personne/jour estimé également dans deux villages du Mali, de 1,09 kg dans deux zones, soudanienne et guinéenne (Bertrand, 1979). Des estimations de consommation faites au Burkina Faso pendant la période 1960-1975 mettaient en évidence des consommations qui variaient de 1 à 1,5 kg/jour/personne en milieu rural et de 3 à 4 kg/personne/jour en milieu urbain (Bertrand, 1979). La FAO propose une moyenne journalière par personne de 1,69 kg (FAO, 1982). Des estimations de consommation ont été faites récemment au Mali, une moyenne de 0,75 kg/personne par jour a été estimée soit 275 kg/personne/an (Bazile, 1998). En milieu rural, il existe trois niveaux de consommation domestique liés au niveau de dégradation du couvert végétal, ainsi au Burkina Faso la consommation varie de 0,76 kg/personne/jour dans les zones à faible disponibilité à 1 kg/jour/personne dans les zones à moyenne disponibilité pour atteindre 1,2 kg/jour/personne dans les zones à grande disponibilité (Bationo, 1993). En effet la consommation augmente quand augmente la disponibilité du bois (Bazile, 1998). Les autres déterminants des consommations sont la taille de l'exploitation, le niveau de revenu, la disponibilité de la ressources et le prix des combustibles ligneux (Bationo, 1993). L'utilisation de foyers améliorés entraîne des économies pouvant aller de 30 à 40 % (Jorez, 1991). En plus de ces déterminants la structure des familles et les régimes alimentaires expliquent en partie le niveau de la consommation en bois (Bazile, 1998). Les populations migrants et les autochtones ont des consommations voisines pour trois raisons (disponibilité de la ressource, accès libre et us alimentaires très proches). Les variations entre la saison humide et la saison sèche sont principalement dues au taux d'humidité plus important pendant la saison humide. Le taux d'humidité en saison sèche a été estimé à 25 %. Le ratio bois consommé par tête semble plus économique dans les explications possibles à nombre élevé de leur effectif.

5.6. CONCLUSION

Les exploitations agricoles ont des règles de décision basées sur leur expérience. Les règles de décision couvrent les domaines traditionnels du fonctionnement des exploitations agricoles (production, consommation, commercialisation, migration, gestion du risque). Elles sont généralement dynamiques, individuelles ou collectives. Ces décisions sont relativement complexes mais peuvent être simplifiées. Elles sont aussi modulables en

fonction des changements de l'environnement immédiat naturel, économique ou familial. Les règles de décisions et de gestion ont été utilisées pour formaliser la collaboration et les interactions entre exploitants agricoles ainsi que les stratégies de gestions des exploitants. Elles ont servi à définir les paramètres pertinents pour la modélisation statistiques des besoins.

Contrairement aux hypothèses de départ et des idées répandues dans la littérature sur les besoins alimentaires, les besoins en terre, les besoins en argent et les besoins en bois de chauffe sont similaires dans les deux systèmes de production étudiés. Le niveau et l'intensité des activités à mettre en œuvre par les exploitations agricoles déterminent la consommation des ressources. Les déterminants socio-économiques étudiés dans les systèmes de productions de ce terroir sont imbriqués de façon cohérente. Par exemple les besoins en surface à cultiver sont liés aux besoins alimentaires ou aux besoins en argent. Les besoins en bois d'énergie par contre sont indépendants de ces trois premiers types de besoins exprimés. Ces modèles de besoins en surface à cultiver, en céréales alimentaires en argent et en bois de chauffe ont été traduits en relations mathématiques.

Il est alors possible en fonction des données socio-économiques (population, système de production) de prédire l'utilisation des ressources (terres, argent, bois) de définir de relations mathématiques prévoyants l'évolution des ressources à l'échelle des exploitations agricoles. En prenant en compte la population totale du terroir il est possible de simuler la production et l'utilisation des ressources de celui-ci et donc analyser la viabilité du terroir (rapport entre production et utilisation de la ressource).

Dans le futur, les transactions foncières (vente à 20000-25000 FCFA ha⁻¹ soit 30,49-38,11 euros ha⁻¹) pour une parcelle non plantée, (40000-50000 CFA ha⁻¹ soit 69,98-76,22 euros ha⁻¹), pour une parcelle plantée en anacardier, pourrait entraîner de profondes modifications dans l'accès au foncier. Cette perspective semble réaliste du fait de (1) la forte pression des demandeurs de parcelles à acheter (expatriés de Côte d'Ivoire), (2) des besoins d'argent des propriétaires de terres. Toutefois l'Etat reste le propriétaire du domaine foncier national et peut intervenir à tout moment pour régler ces transactions.

Chapitre 6 : Structure du modèle multi-agents pour la simulation de la dynamique de C à l'échelle du terroir villageois

6. STRUCTURE DU MODELE MULTI-AGENTS ¹⁶POUR LA SIMULATION DE LA DYNAMIQUE DU CARBONE

6.1. INTRODUCTION

La nécessité de simuler la gestion des ressources naturelles devient de plus en plus une réalité incontournable. Cela est particulièrement vrai pour les ressources communes car elles constituent des sources d'intérêts souvent opposés, conduisant à des conflits. De plus en raison du fait que ces ressources ne sont pas inépuisables et pas toujours renouvelables, les simulations de la gestion de celles-ci sont fort utiles pour la planification, l'anticipation, la conservation et la bonne gestion de celles-ci.

Pour la simulation de la gestion des ressources, des approches de modélisation existent et vise à prédire les changements d'usage des terres (Lambin *et al.*, 2000). Mais ceux-ci présentent souvent des limites. C'est le cas des modèles empiriques statistiques, stochastiques et d'optimisation. Cette dernière vise les solutions optimales alors qu'en réalité les paysans diversifient pour minimiser les risques. La programmation linéaire ne prend pas en compte l'interaction entre exploitants (Berger, 2001). Il en est de même des modèles bioéconomiques qui peuvent associer la programmation linéaire à des modèles biophysiques mais ne sont pas spatialement explicites (Barbier et Bergeron, 1999). Ceux-ci simulent le comportement de différents groupes d'acteurs qui gèrent dans un espace donné des stocks de ressources naturelles de manière plus ou moins durable. Cette dernière approche s'appuie sur l'agrégation des règles de décision des individus afin de comparer des stratégies (il n'y a pas de collaboration entre individus ou exploitations, les réactions aux facteurs endogènes et exogènes sont faibles). De plus, l'espace n'est pas explicitement représentée. Les modèles bioéconomiques sont donc moins adaptés à la résolution des problèmes où on s'intéresse à la coordination et la spatialisation de la gestion des ressources. Vient alors la modélisation avec les systèmes multi-agents (SMA). Celle-ci connaît un intérêt grandissant dans le domaine de la gestion des ressources naturelles.

Les modélisateurs, les chercheurs des disciplines thématiques (économie, écologie, agronomie, foresterie, élevage), les décideurs politiques, la communauté scientifique internationale mais aussi les utilisateurs (planificateurs, acteurs, négociateurs, consultants, paysans) sont de plus en plus attentifs à l'apport des SMA dans le domaine de la gestion des ressources communes et de l'aide à la décision. Les SMA sont adaptés à la modélisation des processus de décision sur la gestion des ressources naturelles (D'aquino *et al.* 2000.). Le SMA a été utilisé à l'échelle de la ferme agro-pastorale et s'adapte à la modélisation du fonctionnement de celle-ci (Hervé *et al.*, 2002). La modélisation multi-agents a été utilisée comme alternative aux modèles mathématiques classiques afin de prendre en compte les modes de coordination et les stratégies développées par les chasseurs pour préserver la ressource (Bakam, 2003).

Historiquement, les SMA sont issus de l'Intelligence Artificielle (IA), précisément de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) (Bousquet et Le Page, 2004). Les SMA est un ensemble d'agents en interaction dans un environnement qu'ils sont capables de percevoir et modifier pour atteindre leurs objectifs. Les SMA ont la capacité de modéliser un territoire dans toute sa complexité (Bonney *et al.*, 2000). Les systèmes multi-agents

¹⁶ SMA : mettre ici une définition simplifiée

(SMA), permettent de créer des sociétés virtuelles sur lesquelles on étudie les effets d'interactions entre différents comportements sur l'état de ressources (D'aquino *et al.* 2000). La modélisation multi-agents permet l'intégration des relations horizontales (configuration spatiale) et verticales (organisation socio-économique) (Mathevet *et al.*, 2003). Les SMA fournissent un nouvel outil pour modéliser la complexité et particulièrement la modélisation des décisions collectives (Bousquet *et al.*, 2000). Le concept multi-agents facilite la prise en compte des relations entre exploitations et l'espace. Les modèles multi-agents peuvent aider à explorer des échelles de dépendances plus en détails en mettant en liaisons les comportements individuels et collectifs (Verburg *et al.*, 2004). Le modèle multi-agents spatial en particulier, constitue une approche puissante pour bien comprendre les processus d'innovation et le changement de l'usage des ressources (Berger, 2001). Les SMA ont été expérimentés avec succès dans la gestion de ressources renouvelables (Bousquet *et al.*, 1994). Ils sont particulièrement adaptés pour la simulation de la gestion de ressources partagées (Toure, 2004). Ils peuvent être utilisés pour des processus d'apprentissage par la création de jeux de rôle centrés sur la gestion des ressources naturelles (Bousquet *et al.*, chercher), (Boissau *et al.*, 2004). Cette approche (SMA et jeu de rôle) permet de mettre les acteurs en situation de négociation. Le SMA permet la représentation d'interaction entre individus, espaces et leur environnement (Bonnefoy *et al.* 2001) et favorise ainsi l'étude simultanée de dynamiques sociales, techniques et écologiques (Bousquet et Le Page, 2004). En plus de leur caractère dynamique, les SMA sont spatialement explicites (Stéphanne et Lambin, 2001). Enfin, le SMA est adapté à l'échelle terroir qui est le niveau auquel se prennent les décisions pour ce qui concerne la gestion des ressources communes en zones de savanes d'Afrique de l'Ouest (ZSAO). Les SMA peuvent aider à explorer les échelles de dépendances plus en détails en mettant en liaison les comportements individuels et les comportements de groupes (Verburg *et al.*, 2004).

C'est pourquoi le SMA, MIROT : Modélisation Intégrée de la dynamique de ressources organiques et analyse de viabilité des terroirs agro-sylvo-pastoraux de savane Ouest africaine (MIROT) est construit pour simuler la dynamique des ressources organiques à l'échelle du terroir. En effet la matière organique est à la fois un bien de consommation et moyen de production dans les ZSAO (Manlay, 2001). C'est une ressource polyvalente pour les agricultures à faible niveau d'intrants dans les ZSAO. Dans ces zones le statut organique d'un terroir, bilan entre disponibilité et usage des ressources organiques, peut même être considéré comme un indicateur de viabilité¹⁷ du système (Manlay, 2000a). Pourtant ces ressources organiques se raréfient pour plusieurs raisons, naturelles (climatiques) ou anthropiques (changement d'usage et changement d'affection des terres, démographie). De plus dans la problématique globale de maîtrise de la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre (GES), les changements de gestion de l'espace en ZSAO font généralement des agro-écosystèmes des sources nettes de carbone. Un SMA peut rendre compte de cette dynamique et permettre une évaluation en terme de bilan (ressource consommée/ressource produite) à l'échelle terroir, telle est la problématique de cette recherche. Pour la mise au point de ce SMA, trois campagnes de terrain ont été menées pour collecter les données nécessaires. Des modèles statistiques empiriques de dynamique des ressources organiques en fonction des déterminants naturels et anthropiques et de déterminants socio-économiques ont été établis à la parcelle et à l'exploitation. Ces modèles parcellaires de stockage dans le système sol-plante du carbone ont été intégrés dans le SMA. D'importantes sources bibliographiques additionnelles

¹⁷ C'est à dire l'aptitude d'un système, pour un état initial et une durée donnés, à maintenir l'ensemble de ses propriétés dans un domaine de valeurs fixé

disponibles sur le terroir ont été également utilisées pour cette modélisation, (Augusseau *et al.*, 2000), (Botoni, 2003), (Augusseau *et al.*, 2004). Toutes ces données permettent d'améliorer le réalisme du modèle. De même, les règles de décision individuelles et collectives et de gestion des ressources du terroir ont été appréhendées. Les déterminants des besoins (terre, céréales, bois et argent) des exploitations agricoles ont été modélisés et intégrés dans le SMA. L'organisation et le fonctionnement du terroir ont été appréhendés à partir des enquêtes de terrain permettant de mieux structurer le SMA.

Objectifs de l'étude

Valider un SMA, le modèle MIROT pour simuler la dynamique du carbone à l'échelle d'un terroir de savane d'Afrique de l'Ouest,

De façon spécifique il s'agit de :

- Concevoir un modèle multi-agents pour simuler la dynamique du C dans un terroir de savane
- Programmer ce modèle en utilisant la plate forme CORMAS du CIRAD,
- Calibrer ce modèle à partir des données collectées pendant trois campagnes de terrain et d'autres données bibliographiques,
- Valider pour usage ou pour prédiction, le modèle à partir des données et connaissances acquises sur place ou ailleurs dans des zones similaires,
- Valider comme outil d'aide à la concertation entre les acteurs et gestionnaires des ressources du terroir le modèle.

Les hypothèses de recherche sont les suivantes :

H1 : Les décisions concernant la gestion des ressources organiques (carbone) se font à l'échelle du terroir parce qu'il s'agit de ressources communes, dans les zones de savanes en Afrique de l'Ouest (SPSAO).

H2 : Le SMA est adapté dans le domaine de la gestion des ressources naturelles et peut rendre compte par anticipation de la dynamique de celles-ci à l'échelle du terroir pour fournir des recommandations adaptées de gestion des terres.

6.2. TERROIR ET LES EXPLOITATIONS AGRICOLES

Le terroir de Torokoro est situé en zone de savane d'Afrique de l'Ouest 4°20' - 4°30' et 9°59' - 10°05'. Il couvre une superficie de 15000 ha. L'occupation du terroir en 1998 montrait que 15% de celui-ci était sous forêt claire, 61 % était occupé par la savane arborée, 21 % par des cultures et le reste par des faciès divers (plantation, habitats, formations ripicoles...) (Botoni, 2003). Ces domaines appartiennent aux exploitants agricoles. Ceux-ci sont soit des exploitants autochtones (premiers occupants) soit des exploitants migrants (14 ethnies différentes). Deux catégories d'exploitants agricoles ont été retenues : exploitations d'autochtones (AU), exploitations de migrants (MI). Celles-ci développent deux successions culturales différentes (Tableau 22). Le système de culture à base d'igname (*Discorea cayensis-rotundata* et *Discorea alata*, une variété introduite appelée Florido) est pratiqué dans le système de production à base d'igname. Dans ce système traditionnel, en première année c'est l'igname qui est cultivé après défriche de la savane ou, plus couramment, d'une vieille jachère. Après la culture d'igname, quelque année de céréale (maïs, sorgho) qui ne peut, sans intrant comme c'est généralement le cas, être maintenue que quatre à cinq ans, avant l'abandon, de la culture et remise en jachère (système autochtone traditionnel). La plantation d'anacardiens durant la phase de culture est une pratique récente de plus en plus répandue. La culture associée avec l'anacarde pendant quelques années est interrompue lorsque le couvert arboré est trop important (5-6 ans) (système traditionnel alternatif). Le système à base de coton est pratiqué par les migrants producteurs de coton. Lorsqu'ils obtiennent une vieille jachère ou des terres peu

fertiles sous forme de don ou de prêt, ils commencent une succession culturale de type maïs/coton/céréales. Des apports d'engrais minéraux (NPK, urée) compensent partiellement les exportations de nutriments par les récoltes. C'est un système de culture quasi-permanente (système migrant traditionnel). Il existe également un système migrant alternatif avec la mise en place des plantations d'anacardiens. Des agro-pasteurs nomades sont également présents sur le terroir.

Tableau 22: Principales successions culturales dans les deux systèmes de production

Nombre d'années	Système de production			
	Autochtone		Migrant	
	traditionnelle	alternative	traditionnelle	alternative
1	Igname	Igname+anacardier	Maïs+Sorgho	Maïs+Sorgho+anacardier
2	Maïs	Maïs+anacardier	Coton	Coton+anacardier
3	Sorgho	Sorgho+anacardier	maïs	maïs+anacardier
4	Sorgho+mil	Sorgho+Mil+anacardier	sorgho	sorgho+anacardier
5	Mil+arachide	Mil+arachide+anacardier	coton	coton+anacardier
6	Jachère	Anacardier	maïs+ sorgho	maïs+ sorgho+anacardier

6.3. LE MODELE MIROT

Cette approche SMA vise à représenter des entités abstraites ayant une existence matérielle (exploitant, parcelle, concession,) ou virtuelle (zone agro-écologique, terroir). Les concepts clé de cette approche sont l'objet et la classe¹⁸. La plate-forme de simulation utilisée est, *Cormas* (Common-Pool Ressources and Multi-Agents System) de l'équipe « Green » du CIRAD Montpellier (Bousquet *et al.*, 1998). *Cormas* a été développé avec le langage de programmation orienté objet SmallTalk sous VisualWork. C'est une plate-forme orientée vers l'étude de la dynamique de l'écosystème ou des problèmes de gestion de ressource. Le modèle SMA développé a été couplé avec un modèle bioéconomique implémenté sous Gams. Le modèle bioéconomique permet de représenter les règles de décision des exploitants pour la mise en culture et la vente de leur production.

6.3.1. La structure du modèle MIROT

6.3.1.1. La structure fonctionnelle

Deux types d'agents ont été définis dans la structure du modèle (Annexe 5) Mirot. Il s'agit de l'agent Exploitant et de l'agent Troupeau.

- L'agent Exploitant désigne une concession. Il représente une entité sociale ayant pour objectif la satisfaction des besoins alimentaires et monétaires. Son

¹⁸ L'objet est une entité élémentaire possédant une identité et un état (information) caractérisé par l'ensemble des valeurs prises par ses attributs ; champs descripteurs (caractéristiques de forme, couleur, poids, hauteur...). Il offre des services et/ou des opérations, des méthodes pour examiner/modifier son état (comportement). Un objet est une instance de la classe.

La classe est une abstraction d'un type de donnée, elle est caractérisée par un ensemble de propriétés communes à des objets qu'elle décrit.

comportement est régi par un ensemble de règles de décision lui permettant de prendre des décisions en fonction des contextes et atteindre ses objectifs. Il a la connaissance de l'existence des autres agents avec qui il peut interagir pour partager des ressources. L'agent Exploitant est caractérisé par l'effectif de sa concession, la main d'œuvre dont il dispose, ses équipements agricoles, son troupeau de bovins, son domaine, la quantité d'argent dont il dispose et son stock de nourriture.

- L'agent Troupeau est une entité réactive. Son comportement est régi par des contraintes spatiales. C'est un agent situé, capable de se déplacer. L'objectif principal du troupeau est la satisfaction de son besoin en fourrage et en eau.
- L'agent Climat : il représente la dynamique climatique du système qui influence en grande partie les autres dynamiques du système. Il décrit la pluviosité des douze mois de l'année,

En plus, des agents Exploitant et Troupeau, la structure du modèle Mirot comporte des objets permettant de décrire l'état du système et des agents. Ce sont particulièrement les objets:

- **Mois** décrit l'évolution des données en fonction du mois de l'année. Il est décrit par le nom du mois, la pluviosité moyenne du mois, le besoin en fourrage d'un UBT et du taux d'excrétion d'un UBT pendant ce mois.
- **Culture** permet de décrire les cultures utilisées dans le modèle. Une culture est caractérisée pour son nom, son prix de vente et d'achat, sa marge brute et directe et la fertilité requise pour sa mise en culture.
- **Système_Culture** décrit les systèmes de culture. Chaque système de culture est caractérisé pour son type et la succession culturale pratiquée. La succession culturale est une liste ordonnée des cultures pratiquées.
- **Stock** définit le stock disponible dans le grenier pour chaque type de production agricole. Il est décrit par le type de culture et la quantité en stock. L'objet stock intervient au moment du stockage des productions à la fin de la période hivernale.

L'organisation sociale du modèle de MIROT met en évidence plusieurs entités qui évoluent dans un même environnement. Ces entités sont en interaction. Elles utilisent les mêmes ressources et ne peuvent être traitées isolément. Pour cela il faut donner aux systèmes multi-agents une considération sociale. De ce fait, le formalisme statistiques (AGR) Ferber (1998) ; Parunak (2001) et Abrami (2004) ; cités par Belem (2005) a été utilisé pour décrire l'organisation sociale du modèle Mirot. AGR permet de mieux représenter l'organisation sociale d'un SMA. Dans le formalisme AGR, un agent est une entité active et communicante. Il peut prendre simultanément plusieurs rôles dans différents groupes. Un groupe est défini par un ensemble d'agents interagissant à travers leurs rôles. Un rôle définit la représentation abstraite de la fonction d'un agent dans un groupe. L'utilisation de ce formalisme permet d'augmenter la souplesse du modèle. En termes de programmation et de conception, cela permet d'augmenter l'expressivité et la modularité du système. La maintenance du modèle est également améliorée. A long terme il peut être adapté pour d'autres situations différentes de celle étudiée. De plus, l'agent ne communique qu'à travers les rôles, le traitement des messages est plus facile. Ceci évite une programmation rudimentaire contraignant pour définir chaque fois la liste des agents susceptibles de traiter le message envoyé par un agent. Ainsi, lorsqu'un agent envoie un message, seuls ceux qui ont en charge le rôle qu'implique le message, pourront le traiter. Par exemple, lorsqu'un éleveur envoie une demande de parcage, seuls les agents

agriculteurs pourront le traiter. Les groupes et les rôles suivants ont été créés dans le modèle MIROT.

Les groupes « **Grp_Autochtone** », et « **Grp_Migrant** » ont été définis en fonction de l'appartenance sociale de chaque exploitant. Un agent appartenant à l'un de deux groupes, le demeure définitivement. Par exemple, un autochtone ne peut pas devenir un migrant et vice versa. Les groupes « **Grp_Assolement_Igname** » et « **Grp_Assolement_Coton** » définissent l'ensemble des exploitants pratiquant l'un des deux types d'assolement. Le groupe « **Grp_Eleveur** » regroupe les exploitants pratiquant l'élevage.

Les rôles décrivent le comportement des agents et définissent leurs compétences. Les rôles « **Rôle_Cultivateur** », définissent le comportement d'un cultivateur, « **Rôle_Planteur** », celui d'un planteur, « **Rôle_Eleveur** » le comportement d'éleveur. L'attribution de parcelle n'incombe pas à tous les agents. Elle est sous la responsabilité d'un seul agent appartenant au groupe « **Grp_Autochtone** ». Celui-ci a le rôle « **Rôle_Attributaire** ». La vente et l'achat des parcelles constituent également des rôles (« **Rôle_Vendeur** » et « **Rôle_Acheteur** »).

Dans MIROT, les rôles sont des objets. Les rôles joués par un agent sont représentés par une collection de rôles. *Cormas* permet la création de groupe, mais ne prend pas en charge la notion de rôle. Les modules gérant les rôles ont été entièrement développés. L'organisation du modèle sous le formalisme AGR nécessite de décrire comment les agents sont repartis entre les différents groupes. Les premiers agents exploitants dont le nombre est défini par l'utilisateur sont repartis entre les différents groupes selon des proportions définies par l'utilisateur. Quant aux rôles, ils sont attribués en fonction de l'appartenance d'un agent à un groupe. Par exemple, un exploitant dans le groupe **Grp_Assolement_Coton** prend pour rôle **Role_Cultivateur**. Un exploitant peut aussi hériter des groupes et des rôles d'un autre exploitant. C'est le cas où une exploitation se divise en deux pour créer une nouvelle exploitation.

6.3.1.2. La structure spatiale

Le carbone est une ressource spatiale nécessitant de prendre en compte l'organisation spatiale dans la structure du modèle. Pour ce faire, trois niveaux d'organisation ont été développés pour représenter l'organisation spatiale du modèle Mirot. Le **premier niveau** correspond aux entités spatiales élémentaires que sont les cellules. Une cellule correspond à une parcelle. Le **deuxième niveau** est formé par des entités du premier niveau regroupées en fonction de leur occupation pour former les entités fonctionnelles c'est par exemple les forêts, les exploitations agricoles. Les entités de niveau 2 délimitent des unités de gestion écologique (UGE) par exemple la forêt ; ou des domaines d'activités par exemple l'exploitation agricole. Le **troisième niveau** est le paysage simulé. Il rassemble des entités de niveau 1 et des entités de niveau 2.

A travers cette organisation spatiale, l'espace de simulation a été reproduit grâce à une importation de données issues d'un système d'information géographique vers *Cormas*. Cette importation basée sur la carte morphopédologie de Torokoro vise à augmenter le réalisme du modèle et à tenir compte des contraintes spatiales sur le comportement des individus. Mais la simulation reste virtuelle, une carte étant représentée par des points, chaque point correspond à une cellule. Chaque cellule représente une parcelle dans le modèle. Elle est d'un hectare. Ainsi, en fonction des types de sol d'une parcelle, on définit son couvert végétal. Une fois le couvert végétal défini, les parcelles sont regroupées en lot de 25 parcelles au minimum pour former des exploitations.

Les agents Exploitant sont positionnés en fonction de leur appartenance sociale (migrante ou autochtone) conformément à la réalité de terrain.

6.3.1.3. Couplage Gams–Mirot

Le développement de Mirot a fait l'objet d'un couplage avec Gams, un logiciel d'optimisation économique (Belem, 2005). L'objectif était de comparer l'apport de ce couplage par rapport à un modèle SMA non couplé. Deux modèles ont été développés à cet effet. Le premier modèle permet de construire le plan de production en fonction des objectifs de l'exploitant et des ressources disponibles. Il prend en entrée les besoins alimentaires et financiers, les différents types de cultures pratiqués et leur rendement, la surface, la main d'œuvre disponible et le cash disponibles et fournit en sortie la surface à exploiter pour chaque culture. Le second modèle permet de construire un plan de vente en fonction de la production réalisée. Il prend en entrée la production totale (de chaque culture), les besoins alimentaires et financiers de l'exploitant et fournit en sortie un plan de vente. Le plan de vente définit pour chaque culture, la quantité à vendre et à stocker en fonction des objectifs initiaux et de la part de chaque culture dans la satisfaction des besoins alimentaires et monétaires.

Le couplage Gams-Mirot a été réalisé à travers l'utilisation d'une DLL (*Dynamic Link Library*) développée en C++. Une DLL contient du code ou des ressources qui sont alors rendus disponibles à d'autres applications. L'exécution du modèle mathématique est réalisée par chaque agent. La communication entre le système et les modèles Gams se fait à travers l'échange des paramètres et des résultats par des fichiers. Ainsi, à chaque appel, les données de l'agent appelant sont écrites dans un fichier pour servir de paramètres d'exécution. En retour, les résultats d'optimisation sont fournis dans un fichier texte.

6.3.2. Paramètres du modèle

Plusieurs types de paramètres sont utilisés. Ces paramètres sont appréhendés à différentes échelles. A l'échelle de l'individu, il s'agit des besoins individuels (bois d'énergie, alimentaire). A l'échelle de la parcelle il s'agit des caractéristiques biophysiques de celle-ci, son stock de carbone, dans le sol et dans la biomasse végétale. L'exploitation agricole est l'échelle à laquelle sont appréhendés les systèmes de culture, les besoins céréaliers, les besoins en bois, les besoins en argent et les besoins en terres des exploitations agricoles. Enfin à l'échelle terroir sont fournies les caractéristiques démographiques (population totale, le taux de croissance), la pluviométrie annuelle, les prix des produits et des intrants. Ces paramètres prennent en compte, tant les facteurs exogènes climatiques, socio-économiques, démographiques que des facteurs endogènes propres aux exploitants. Trois niveaux de paramétrage ou de variables d'entrées ont été décrits pour la mise en œuvre de MIROT (Tableau 23). Les paramètres généraux donnent la description et les caractéristiques des principaux objets et des agents du modèle. Les paramètres culturels décrivent les caractéristiques relatives aux cultures dans les deux systèmes de production. Les paramètres annuels quant à eux, fournissent les données annuelles et quelques constantes. Un jeu de données de ce tableau constitue un scénario de simulation.

Tableau 23: Paramètres de MIROT

Paramètres généraux et leurs caractéristiques dans le modèle MIROT				Paramètres des cultures et leurs caractéristiques dans le modèle			
Paramètre	effectif initial autochtone	Unités	Exemple fonctionnement actuel	Attributs	Description	Type	Unité
Concession				TypeCulture	Le type de la culture	C	
	Nombre de concessions à l'initialisation	Nombre	5	fertiliteRequise	La fertilité requise pour la mise en culture de la parcelle	R	
	Autochtones	%	60	Rendement	Le rendement de la culture par hectare	R	Tonne/ha
	Effectif initial autochtone	Nombre	0	valeurEnergetique	La valeur énergétique de la culture	R	
	Limite taille de la concession autochtone	Nombre	20	PrixDeVente	Le prix de vente	R	Million/FCFA
	Migrants	%	40	PrixAchat	Le prix d'achat de la culture	R	Million/FCFA
	Nombre d'années avant arrivée de migrants	Nombre	0	CoutEngrais	Le prix d'achat d'engrais destiné à la culture	R	Million/FCFA
	Taux de croissance de la population	%	2,5	R=Réel; C=Caractère			
Besoins d'un individu							
	Besoin céréalier	t an ⁻¹	0,25				
	Besoin en argent	FCFA an ⁻¹	55600				
	Besoin en bois	kg MS an ⁻¹	300				
	Bois coupé	%	10				
	Bois ramassé	%	90				
Troupeau							
	Taux de croissance de la population	an ⁻¹	2,5				
	Surface pâturée	ha animal ⁻¹	1,25				
	Prix de vente UBT	FCFA	80000				
	Prix d'achat UBT	FCFA	100000				
Parcelles				Paramètres annuels et leurs caractéristiques dans le modèle MIROT			
	Surface	ha	1	Nom	Description	Type	Unité
	Stock maxi d'herbes	kg MS	10000	NomMois	Le nom du mois	Entier	
	Croissance herbe	kg MS mois ⁻¹	800	Pluvisite	Quantité de pluie au cours du mois	Réel	mètre
	Stock maxi d'arbres	kg MS	50000	ExcretionUBT	Excrétion UBT au cours du mois	Réel	Tonne
Pluviosité				BesoinUBT	Besoin UBT dans le mois	Réel	Tonne
	Pluviosité	m an ⁻¹	1	CroissHerbeMaxi	Croissance herbacée maximale mois ⁻¹	Réel	réel
	Variabilité	%	20	Fichier de sortie	Résultats sous forme de fichier	Boleen	
Dimensions de l'espace				Système traditionnel	Fonctionnement sans plantation	Boleen	
	Nombre de lignes et colonnes	152 x 161		step	Pas de temps	Entier	mois

1FCFA= 0,00152449 euros

6.3.3. Dynamique du modèle

La dynamique du modèle Mirot concerne principalement la dynamique démographique, les règles de décisions des exploitants, la dynamique d'usage des terres, la production végétale et la dynamique climatique. Pour décrire ces différentes dynamiques, nous utilisons les digrammes d'activités et de séquences fournis par le formalisme UML (en anglais *Unified Modeling Language*, « langage de modélisation unifié ») qui est un langage graphique de modélisation .

La dynamique de la population

Le taux de croissance est dynamique, il évolue en fonction de la population totale et la charge du terroir. Il suit le modèle logistique de croissance de Verhulst (1838) cité par Belem (2005).

$$d\text{tauxCroiss}dt = \text{tauxCroissance}(1 - \text{effectifTerroir} / K)$$

Équation 1: Modèle de croissance de la population

Où *tauxCroissance* est le taux de croissance de la population, *effectifTerroir* est la population totale du terroir et *K*, la capacité de charge du terroir.

Ainsi le taux de croissance tend vers 0 lorsque la population tend vers la limite imposée par le terroir.

La croissance des animaux est limitée par la capacité de charge du terroir. Celle-ci varie avec l'accroissement du cheptel et l'augmentation des terres cultivables. Pour modéliser la croissance de la population animale le modèle logistique de Verhulst, (1838) cité par Belem (2005) a été utilisée. Il permet de définir la croissance d'une population en fonction de la capacité de charge.

$$dNdt = rN(1 - N / K)$$

Équation 2: Modèle de croissance des troupeaux

Où *N* est l'effectif de la population, *r* est le taux d'accroissement de la population et *K* la capacité de charge du milieu. *K* est évalué en fonction de la productivité des pâturages en fourrage au cours de l'année écoulée.

Les règles de décision des exploitants

L'objectif de l'exploitant est de satisfaire ses besoins alimentaires (Équation 3) et monétaires (Équation 4). Pour atteindre ses objectifs, il établit un plan de production optimal. Le plan de production définit pour chaque type de culture, la surface à cultiver pour atteindre les objectifs initiaux. Lorsque les ressources ne sont pas suffisantes (main d'œuvre, terres), l'exploitant les achète en fonction du cash disponible. Le plan de production est défini en fonction des rendements minimaux des 5 dernières années. Après, avoir défini le plan de production, les parcelles sont cultivées suivant le système de rotation de l'exploitant et le plan de production. Après la récolte, l'exploitant définit un plan de vente. Le plan de vente est défini en fonction des objectifs de l'exploitant. Il permet de définir pour chaque culture la quantité à vendre et à stocker pour satisfaire les besoins alimentaires et monétaires. La satisfaction des besoins est une condition de

stabilité des exploitants. Lorsque les besoins n'ont pas été satisfaits et le cash n'a pas été suffisant, les exploitants réagissent. Dans ce cas, une partie de la concession migre vers une nouvelle exploitation, ou quitte le terroir. Dans le cas contraire, une partie de l'argent obtenue est investie dans l'achat des animaux. La Figure 27 décrit les règles de décision de l'agent exploitant.

$$\text{besoinNourritureConcession} \leftarrow (\text{besoinNourriturePers} * \text{effectif})$$

Équation 4: Modèle d'évaluation du besoin alimentaire

$$\text{besoinArgent} \leftarrow (\text{besoinArgentPersonne} * \text{effectif})$$

Équation 5: Modèle d'évaluation du besoin monétaire

La dynamique d'usage des terres.

L'occupation initiale d'une parcelle est la forêt. Sa dynamique est fonction de son utilisation (culture, parc d'animaux, bâtie, plantation) (Figure 28). L'occupation des parcelles cultivées change en fonction de la technique culturale pratiquée. Une parcelle dont la fertilité est insuffisante pour une culture donnée est mise en jachère. Elle sera remise en culture lorsque sa fertilité sera suffisante.

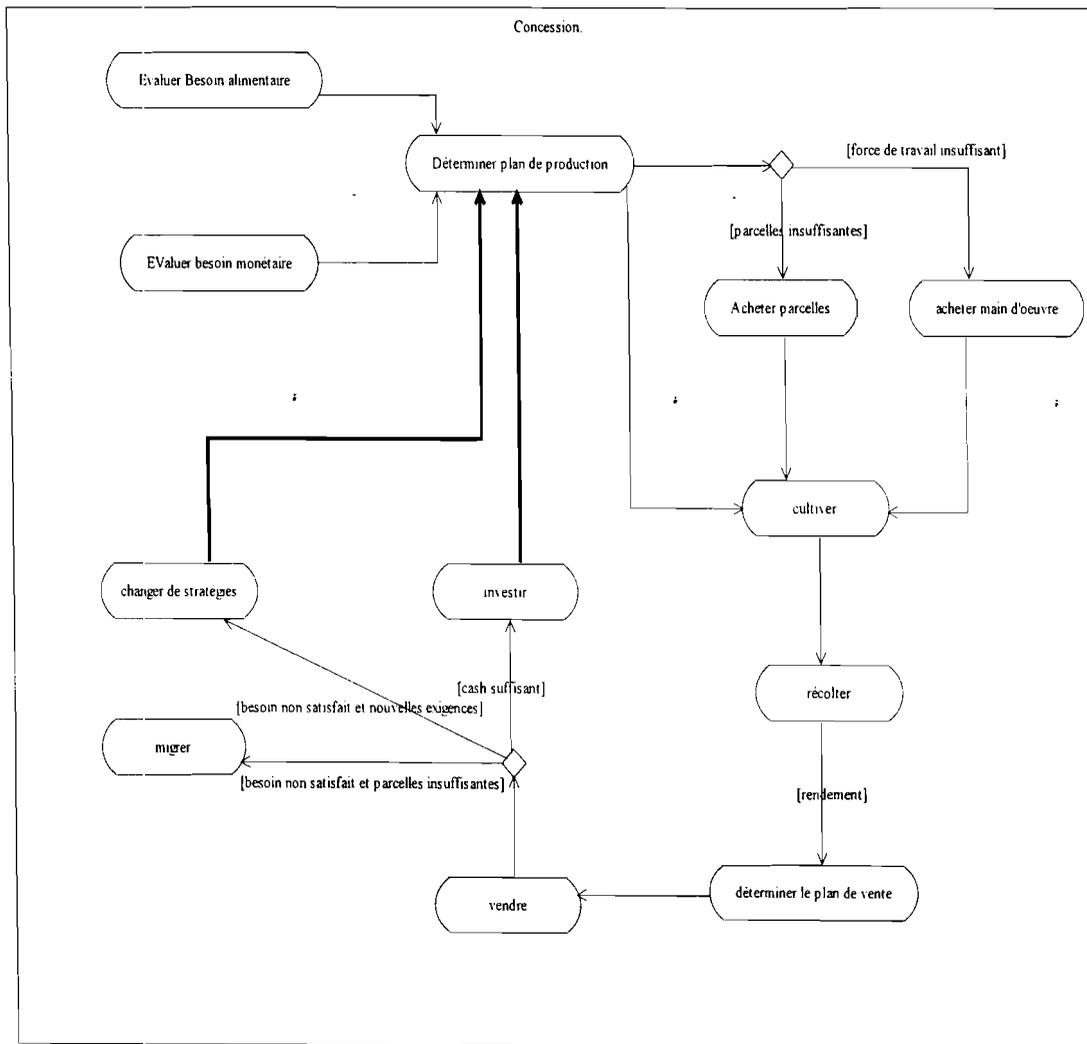


Figure 27: Diagramme d'activité d'une exploitation agricole

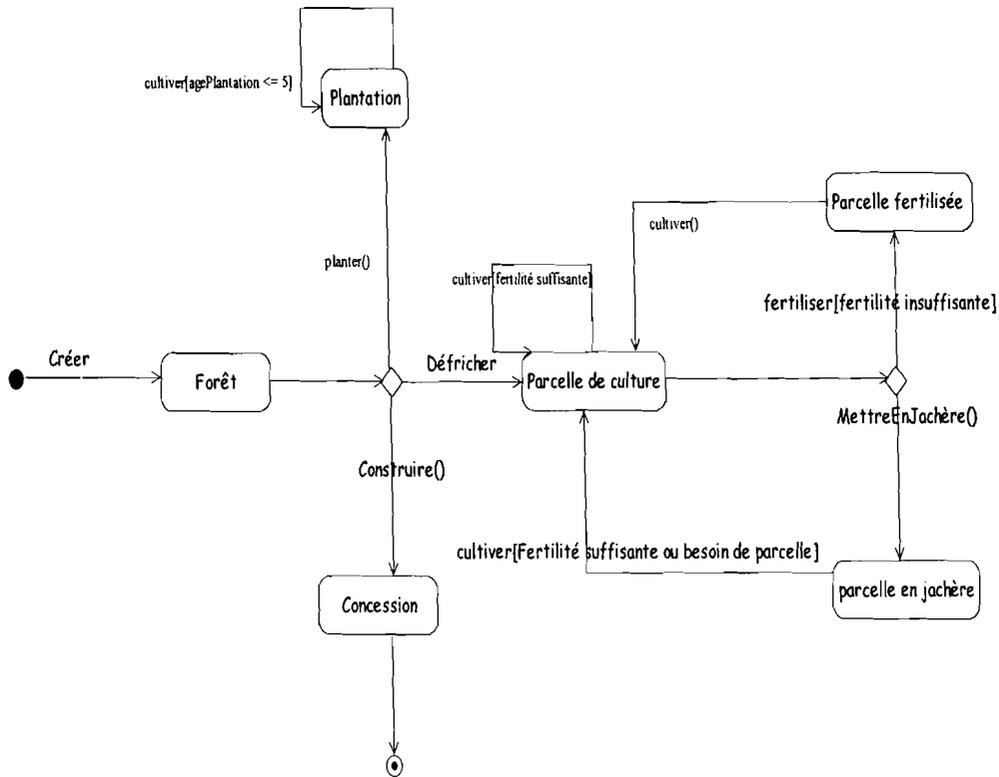


Figure 28: Etat de transition d'une parcelle au cours de la succession culturale

La dynamique des terres dans le système à base d'igname

Dans le système autochtone l'état initial est soit une forêt, soit une plantation de plus de 40 ou encore une jachère de plus de 10 ans. La parcelle est alors défrichée (itinéraire 1) pour recevoir l'igname en première année, le maïs en seconde année, le sorgho en troisième année et ceci jusqu'à la cinquième année ou elle est mise en jachère jusqu'à 10 ans avant la remise en culture ou alors devient une plantation (itinéraire 2) qui sera défrichée de nouveau après 40 ans et le cycle recommence (Figure 29).

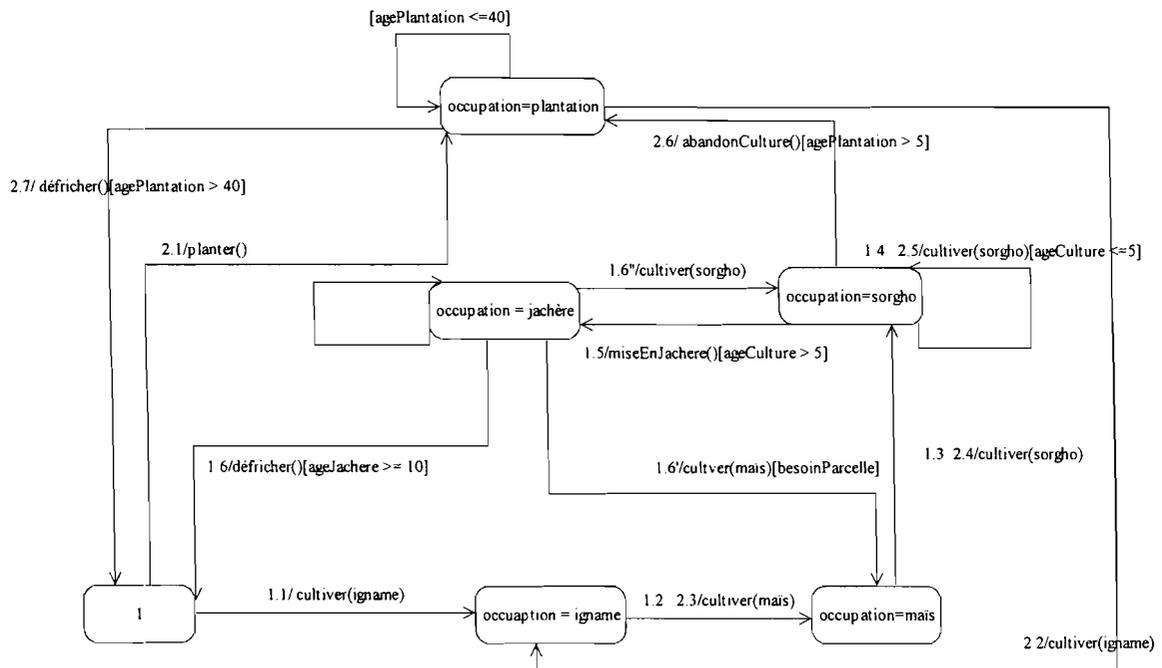


Figure 29: Règles de mise en culture d'une parcelle en système de culture itinérant

La dynamique d'usage des terres dans le système à base coton

L'état initial d'une parcelle est soit une parcelle en plantation de plus de 40 ans soit une parcelle plantée depuis moins de 6 ans. Celle-ci est alors cultivée (itinéraire 1) pour semer du maïs et du coton en rotation triennale. Le sorgho est cultivé en quatrième année et reste ainsi tant que l'âge de la plantation est inférieur à 6 ans. Elle peut être fertilisée pour recevoir du maïs, ou si la parcelle est plantée (itinéraire 2), les mêmes céréales sont associés tant que l'âge de la plantation est inférieur à 6 sinon elle reste plantation jusqu'à l'âge de 40 ans (Figure 30).

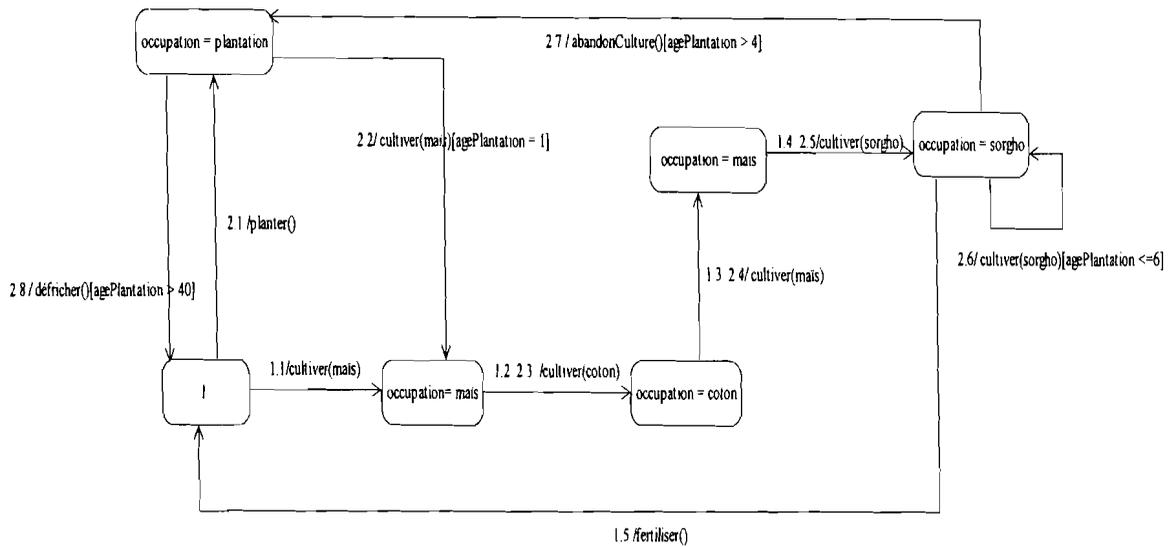


Figure 30: Règles de mise en culture des parcelles dans le système de culture permanente

La dynamique de la production végétale

La croissance des biomasses par compartiment est représentée dans le modèle : les strates arborées et arbustives, les herbacées, les racines et les résidus de récolte. Leur croissance varie en fonction de leur occupation et des prélèvements. Le stock de la biomasse végétale d'une parcelle cultivée (en dehors de la biomasse herbacée) est représenté par une fonction logistique croissante. Dans les parcelles cultivées, la croissance est une fonction exponentielle décroissante.

$$S(t) = k / (1 + (((k - S0) / S0) \times EXP(-r * t)))$$

Équation 6: modèle de stockage de la biomasse végétale sur les parcelles non cultivées

$$s(t) = EXP(-r * t)$$

Équation 7: modèle de déstockage de la biomasse végétale sur les parcelles cultivées

Où $S(t)$ est le stock au temps t , k est le stock maximal de la biomasse concernée, $S0$ est le stock initial à l'instant $t = 0$, t représente l'âge de la jachère ou de culture de la parcelle.

Pour prédire le stock de biomasse à un instant, t , il faut donc le calculer à partir du stock à $t-1$ et du prélèvement et de la croissance. Par conséquent, on déduit t en fonction du stock actuel. Une fois t défini, la biomasse au $t+1$ est évaluée selon les formules définies précédemment.

$$t = (\ln(((a \times k) - s) \times s0) / (s \times (k - s0))) / r)^2$$

Équation 8: Modèle d'évaluation de l'âge de la jachère d'une parcelle non cultivée

$$t = -\ln(s / a) / r$$

Équation 9: Modèle d'évaluation de la succession culturale d'une parcelle cultivée

Où s est la biomasse présente sur la parcelle à l'instant t .

La biomasse herbacée de la parcelle évolue non seulement en fonction de la biomasse arborée présente mais aussi de son occupation. Sa croissance est limitée par le stock de la biomasse arborée. Les parcelles cultivées sont considérées comme désherbées.

$$s(t + 1) = s(t) + (\text{croisHMax} * ((k - s(t))/k) * ((\text{stockArbMax} - \text{stock}) / \text{stockArbMax}))$$

Équation 10: Modèle de croissance de la biomasse herbacée

Où $croissHMax$ est la croissance herbacée maximale ; k le stock herbacé maximal ; s le stock à l'instant t ; $stockArbeMax$, le stock arboré maximal sur une parcelle ; $stock$, la biomasse arborée à l'instant t et $stockArbMax$, la biomasse arborée maximale.

Par convention une échelle de fertilité a été définie pour modéliser la fertilité des parcelles. La fertilité initiale d'une parcelle est de 25 points (fertilité d'une forêt). Elle varie en fonction de son occupation. Lorsque la parcelle est cultivée, la fertilité diminue de la fertilité requise par la culture concernée. Par exemple, lorsque la fertilité d'une parcelle est de 20, il est possible de cultiver de l'igname dont la fertilité requise est de 15. Après la récolte la fertilité de la parcelle sera de 5. Pour toute parcelle non cultivée, la fertilité augmente d'un point chaque année (tous les douze pas de temps). La fertilité minimale et maximale d'une parcelle est respectivement 0 et 25 points.

6.3.4. Variables de sorties

Un questionnement actuel important concerne la forme et le format de présentation des résultats des SMA ? (Bousquet et Le Page, 2004). Les variables de sortie ont été choisies pour suivre l'évolution des ressources du milieu (biomasse végétale, stocks de carbone, surface en forêt, pâturages, surface plantée, ressources en sols, surface cultivée). L'évolution des ressources humaines ainsi que l'état du milieu (population, saturation du terroir, capacité de charge, disponibilité d'autres ressources) sont aussi des variables résultats du modèle. D'autres variables sont d'ordre socio-économique (stocks d'argent, les productions végétales). Le Tableau 24 résume ces variables de sorties, leurs unités et la description de celles-ci. Les sorties sont sous forme de tableaux (Excel), de texte, graphiques ou des sorties spatialisées (cartes d'occupation du terroir). Il est possible d'obtenir des sorties spécifiques par système : (Autochtone vs Migrant). Il est possible d'extraire les variables de sortie pour une parcelle ou une exploitation agricole donnée.

Tableau 24: Les variables de sorties du Modèle MIROT

Attributs	Unités	Description
biomasseHerbacee	tonne	La somme des biomasses herbacées de toutes les parcelles
biomasseracineFine	tonne	La somme des biomasses racine fine de toutes les parcelles
biomasseArbre	tonne	La somme des biomasses ligneuse de toutes les parcelles
biomasseRacineEp	tonne	La somme des biomasses racine épaisse de toutes les parcelles
carbone	tonne	La somme du carbone provenant des biomasses et du carbone sol
carboneSol	tonne	La somme du carbone des parcelles
Concession	%	La proportion des parcelles bâties
culture	%	La proportion des parcelles cultivées
foret	%	La proportion du terroir sous forêt
fumure	tonne	La quantité de la fumure disponible dans le terroir
jachere	%	La proportion des parcelles en jachère
troupeau	Nombre de bêtes	L'effectif du cheptel
stockArgent	Million FCFA	La somme des stocks d'argent des concessions
migrant	Effectif des migrants	L'effectif des migrants
autochtone	Effectif des	L'effectif des autochtones
population	La population effective	Le niveau de la population
plantation	%	La proportion du terroir sous plantation
occupe	%	La proportion des parcelles occupées (appropriées)
niveauPluie	Mètre	La quantité de pluie tombée dans le mois niveauPluie := random (pluviositeNormale - (pluviositeNormale* variabilitePluviosite)) to: (pluviositeNormale + (pluviositeNormale* variabilitePluviosite)).

6.4. DISCUSSION

6.4.1. Approche SMA et la gestion des ressources renouvelables

Le domaine des SMA est toujours jeune dans la recherche (Bousquet et Le Page, 2004) et soulève quelques questions importantes, entre autres, la complexité du contenu des modèles, les difficultés liées à l'interprétation des résultats et enfin les problèmes de validation (Abrami, 2004). Trois types de plates formes pour la simulation sociale et écologique fournissent des programmes utilitaires pour simuler les écosystèmes et les problèmes de gestion, parmi ceux-ci, les plates formes Ecosim, Ascape, Repast, Cormas sont très ouvertes pour la mise en œuvre de dynamique sociale et les interactions avec la dynamique des ressources naturelles (Bousquet et Le Page, 2004). Cormas permet de créer facilement des systèmes multi-agents (Bommel *et al* 2000.). C'est est une plate forme de simulation Multi-Agents spécialement conçue pour la gestion des ressources renouvelables (Le Page *et al* 2001.). Le SMA, MIROT est spatial à l'échelle du territoire villageois. Il a été conçu à partir de la plate forme Cormas.

6.4.2. Adéquation SMA et terroir

La modélisation implique une simplification du réel. Malgré une adaptation SMA et gestion des ressources à l'échelle terroir, des simplifications ont été nécessaires. Le milieu d'étude est suffisamment complexe pour être pris en compte dans son entièreté du point de vue de l'organisation et de son fonctionnement. Plusieurs simplifications ont été opérées. Tout d'abord l'espace a été subdivisé en cellules ou parcelles. Chaque parcelle mesure un hectare, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Les systèmes de production ont été réduits aux deux principaux (AU, MI) rendant plus aisée la modélisation. Les exploitants agricoles disposent de 25 ha chacun et disposent aussi de troupeau. Dans la réalité la taille des exploitations n'est pas si homogène. La migration est déclenchée quand les besoins ne sont pas satisfaits et l'immigration n'est pas contrôlée. Enfin l'utilisation de l'échelle de fertilité par manque de mesures exhaustives et d'indicateurs pertinents de mesure de la fertilité des sols simplifie la modélisation. D'autres simplifications comme la limitation de la capacité de charge sont autant de simplifications. En dépit de ces simplifications, l'avantage majeur de l'utilisation du SMA MIROT, c'est qu'il permet d'expérimenter le terroir dans sa complexité et son fonctionnement. Les simulations avec les SMA jusque là concernaient l'organisation et le fonctionnement de l'exploitation agricole (Hervé *et al.*, 2002) ou une ressource partagée (Toure, 2004) ou encore une ressource groupée (forêts, zone de chasse, zone de pêche, plan d'eau). La modélisation du terroir avec une diversité d'unités de gestion écologiques et d'acteurs est une nouveauté dans ce domaine. Mieux les couplages avec le SIG et l'optimisation laissent entrevoir des améliorations futures dans la modélisation pour la simulation et la prédiction en écologie et environnement.

Cette simplification met en avant les déterminants principaux qui ont été dégagés de l'analyse des processus ou du fonctionnement du terroir.

6.5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le SMA intègre bien les échelles parcelles, exploitation agricole et terroir villageois. Le modèle multi-agents MIROT représente le terroir dans son ensemble. En effet l'environnement du terroir est intégré dans le modèle grâce au couplage avec le SIG. Ainsi les contraintes spatiales y sont matérialisées. Les systèmes sociaux et de production, les

cours d'eau, les types de sols, sont identifiés sur la carte du terroir. Sur ce fond de carte, les agents situés tels que les exploitations agricoles, le troupeau sont explicites. Les autres agents non situés (climat, temps) agissent sur les objets du terroir que sont les parcelles, les cultures, les stocks.

Du point de vue du fonctionnement, ces agents agissent et interagissent entre eux (messages, échanges, négociations). La description et le fonctionnement global du modèle mais aussi de certains agents, ont été présentés grâce au formalisme UML. La cohérence d'ensemble a permis la programmation informatique du modèle. Celui-ci intègre dans les différentes procédures (méthodes) les modèles parcellaires de stockage de C dans les sols et la végétation. Les agents agissent en fonction des règles de décisions et de gestion identifiés au cours des enquêtes de terrain. Le réalisme du SMA a été amélioré en y intégrant des modèles biophysiques et socio-économiques. Mais c'est de là que découle aussi sa complexité. La prise en compte d'un comportement optimisé des agents exploitants, la gestion du troupeau dans un environnement spatial contraint, tous ceux-ci rendent le modèle assez lourd. Ceci pose des problèmes de logistique informatique (matériel plus performant requis) d'où de nombreuses perspectives.

Quelles sont les perspectives qui s'ouvrent?

Du point de vue thématique, il est toujours possible d'améliorer le modèle par des connaissances nouvelles sur le terroir et son fonctionnement. Une meilleure connaissance des pratiques d'élevage et de l'intégration agriculture-élevage permettrait une meilleure gestion du fumier. La connaissance des performances des troupeaux améliorerait le modèle. Par exemple les échanges de travail, de services, d'équipement, et fumier ... entre exploitants pourraient être améliorés...

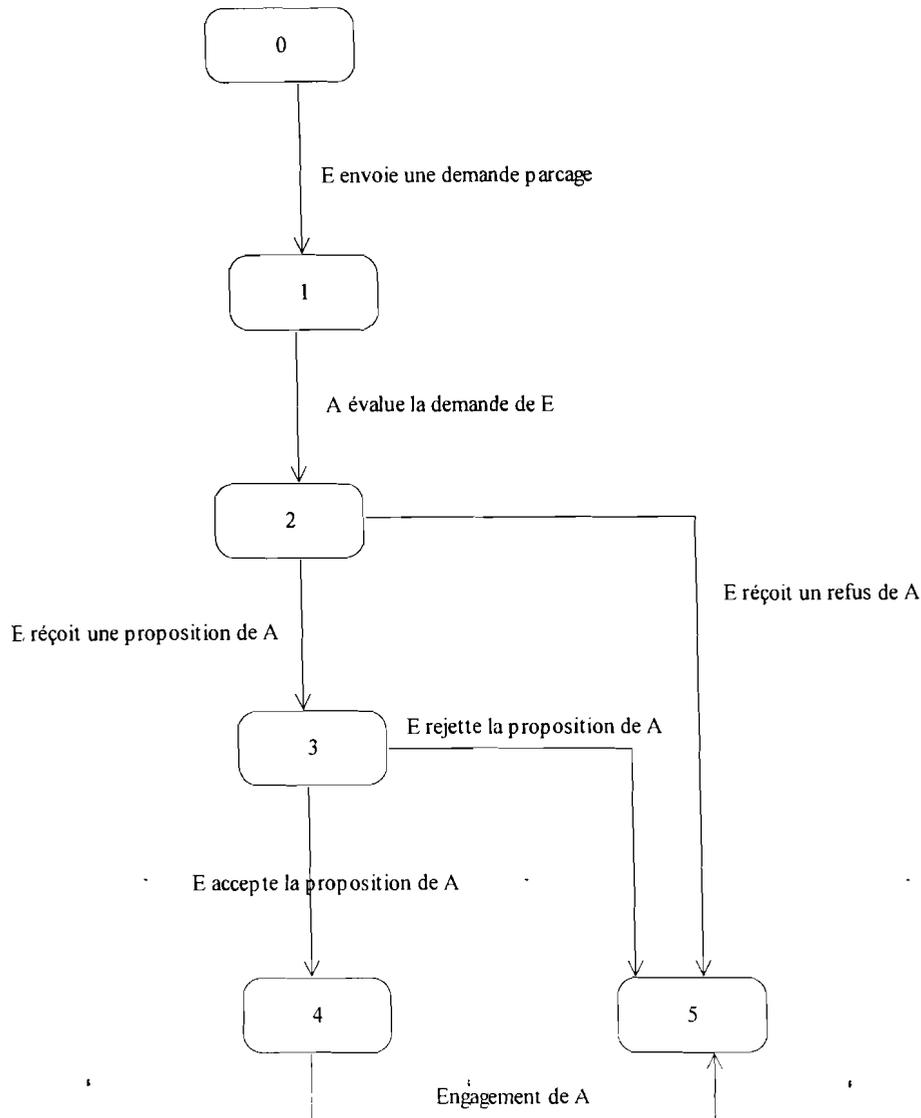


Figure 31: Diagramme de déroulement de la négociation entre deux exploitants agricoles

Le recours à la main d'œuvre extérieure pour les travaux champêtres est une pratique courante en raison du faible nombre d'actifs par famille dans les deux systèmes (respectivement 4 et 5 actifs chez les autochtones et chez les migrants). Les exploitations utilisent aussi des relations de complémentarité et de solidarité à travers des groupes d'entraides pour compléter leur besoin en force de travail. Le contrat agricole, c'est-à-dire l'emploi d'ouvriers agricoles rémunérés à la fin de l'année est une autre forme d'échange de travail. La force de travail est donc un objet d'échange entre exploitations agricoles dans ce terroir. Les prêts d'animaux de traction pendant les travaux champêtres entre éleveurs et agriculteurs sont des pratiques non courantes mais qui existent. En effet quelques fois, les éleveurs Peulhs confient des paires de bœufs à dresser aux agriculteurs pour la culture attelée, en retour le champ de ces derniers est labouré. C'est une forme d'échange.

Le parcage des animaux des éleveurs dans les champs d'agriculteurs est rare mais existe. C'est ainsi un échange de fumier contre des résidus de récoltes (espace de parcage), qui est

réalisé. Le prêt de parcelles (échange d'espace) à cultiver entre autochtones ou entre migrants ou encore entre deux exploitations agricoles quelconques est une autre forme d'échange. La pratique qui consiste à confier des animaux à un éleveur peuhls, ou encore à des bouviers est un mode d'échange payant. Dans le modèle les échanges font l'objet de négociations (Figure 31).

Il n'y a plus d'attribution gratuite de la terre. En revanche la vente des terres a été introduite dans le terroir. La vente des terres constitue un des phénomènes les plus marquants ces dernières années d'après le chef des migrants Mossi installé depuis plus de 15 ans dans le terroir. Le développement de la vente des terres entraînera une raréfaction des terres dans les deux ou trois années à venir poursuit-il. Ces transactions foncières (achat, ventes de terre) sont apparues récemment. Elles contribuent à restructurer et organiser le terroir affectant ainsi le fonctionnement de celui-ci. En effet l'afflux massif de rapatriés de Côte d'Ivoire a accéléré les transactions financières autour de la terre, même si celles-ci sont camouflées.

Les migrations qui peuplent le terroir et ses alentours sont issues de deux origines, une migration interne (Burkina Faso) et une migration externe (Côte d'Ivoire). Les nouveaux migrants du même groupe ethnique qui arrivent s'installent directement dans les campements à côté de leurs parents ou frères ou encore des ressortissants de la même région. En effet, par le passé, les nouveaux migrants étaient introduits auprès des responsables coutumiers locaux, par le chef de leur communauté ethnique résidant déjà dans le terroir. Ainsi ils étaient reconnus et pouvaient bénéficier d'un lopin de terre. Maintenant la plus part des arrivants va directement dans les campements. Il est toujours possible pour les migrants qui ont les moyens d'acheter la terre pour s'installer d'en trouver, dans le cas contraire, ils sont contraints de quitter le terroir. L'accroissement de la population est aussi l'un des phénomènes qui façonnent le terroir ces dernières années. Des départs de migrants du terroir ont été observés. Beaucoup d'éleveurs Peuhls ont quitté le terroir en direction du sud à la recherche de nouveaux pâturages pour leurs bovins (Côte d'Ivoire).

En perspective le coton apparaît comme une culture alternative à la production d'igname chez les producteurs autochtones. A cause de la disparition des nouvelles friches (terres d'ignames) et de la chute spectaculaire des rendements (perte de vigueur probable), l'igname pourrait être remplacée par le coton. Chez les producteurs migrants, la culture du coton prend de l'ampleur en dépit de la baisse des prix à l'achat. Deux raisons expliquent cela, le coton est une culture qui rapporte de l'argent frais, mais aussi par la culture du coton, l'engrais minéral est disponible pour le maïs (qui se vend par ailleurs très bien). L'anacardier persistera dans les deux systèmes, parce qu'il répond à une stratégie d'appropriation foncière. De plus il a une fonction économique. En effet le revenu tiré de la vente de noix de cajou est étalé sur quatre à cinq mois (Février à juin). Enfin des perspectives d'usinage sur place de la noix de cajou sont évoquées (rumeurs).

Du point de vue informatique il est possible d'améliorer la programmation pour adopter l'approche séquentielle de l'exécution des tâches par les agents. Ceci améliorerait la vitesse d'exécution. Quelques paramètres supplémentaires amélioreraient la convivialité à l'utilisation (automatisation de la sélection des variables de sortie, la sauvegarde de fichier en Excel, la sauvegarde de paramètres des simulations, sauvegarde de la description des scénarios). Une des contraintes est le nombre limité d'agents car l'environnement est limité en raison de la capacité de charge définie.

Il faut améliorer l'optimisation dans le SMA lui-même par une programmation dans celui-ci. Enfin une programmation du jeu de rôle adapté avec MIROT est nécessaire pour son utilisation.

Chapitre 7 : Analyse de la dynamique du carbone dans un terroir agro-sylvopastoral au Burkina Faso par modélisation multi-agents

7. ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DU CARBONE DANS UN TERROIR AGRO-SYLVO-PASTORAL PAR MODELISATION MULTI-AGENTS

7.1. INTRODUCTION

MIROT¹⁹ est un système multi-agent (SMA) conçu à l'image d'un terroir villageois de savane. Il a pour objectif de simuler la dynamique du carbone à l'échelle d'un terroir agro-sylvo-pastoral sous différents scénarios d'évolutions socio-économiques, techniques, ou démographiques. Il constitue ainsi un outil d'investigation et de recherche. A terme, l'objectif est de développer un outil d'aide à la concertation des acteurs et gestionnaires des ressources naturelles. Pour cela différentes étapes de calibration et validation ont été nécessaires.

7.2. PROBLEMATIQUE

Le projet MIROT est principalement dédié à l'analyse de la viabilité²⁰ de terroirs agro-pastoraux de savane ouest-africaine par une modélisation de la dynamique de leurs ressources organiques. En effet le statut organique des terroirs de savanes d'Afrique de l'Ouest, bilan entre disponibilité et usage des ressources organiques, peut être considéré comme un indicateur robuste de viabilité de ces systèmes (Manlay, 2000a). La matière organique est à la fois un bien de consommation (alimentation, construction, chauffage) mais aussi un bien de production (entretien des animaux et de la qualité des sols) et donc une ressource polyvalente dans ces zones (Manlay, 2000b). Pourtant ces ressources organiques sont en voie de raréfaction dans ces zones de savanes sous l'action de facteurs naturels (climatique) mais aussi et surtout de facteurs anthropiques (démographie, système de production). Pour anticiper la dégradation des terres consécutive à leur utilisation, les modèles de simulation ont longtemps été utilisés (Lambin *et al.*, 2000)(Barbier, 1993, Bontkes et van Keulen, 2003) (Verburg *et al.*, 1999), (Stéphenne et Lambin, 2001). Toutes ces approches ont montrées des insuffisances (absence de dynamique sociale, absence de collaboration, absence de dynamique spatiale et caractère non explicite). Actuellement la modélisation avec le SMA est plus apte en raison de ces potentialités (Bousquet et Le Page, 2004). Ils permettent à partir des comportements individuels de faire émerger un niveau d'organisation collective (Goldstone et Janssen, 2005). Le SMA est adapté pour l'étude de l'organisation et du fonctionnement de l'exploitation agricole (Hervé *et al.*, 2002). Mieux les couplages des modèles d'optimisation et des modèles SMA pourraient fournir la solution pour l'étude des changements d'usage des terres (Berger, 2001 ; Verburg *et al.*, 2004). Peu de travaux avec les SMA sont disponibles pour cette zone de savane africaine. C'est pourquoi la modélisation avec le SMA a été utilisée à des fins de simulation et de prédiction de la dynamique des ressources organiques d'un

¹⁹ MIROT : Modélisation intégrée de la dynamique des ressources organiques et analyse de viabilité des terroirs agro-sylvo-pastoraux de savanes Ouest Africaines

²⁰ *Viabilité d'un écosystème* : aptitude à fournir des productions (grains, fourrage, viande, bois...) et des moyens de production (force de traction animale, engrais organique, qualité du sol) dans un intervalle de valeur défini, pour un état initial et durant une période donnée

terroir de savane. Le SMA, MIROT a été conçu et mis en œuvre avec la plate forme CORMAS après trois campagnes de mesures de terrain ayant permis l'acquisition de connaissances sur le milieu. Le modèle simule la dynamique de C à l'échelle du terroir sous divers scénarios.

Objectifs de l'étude :

L'étude vise l'analyse par simulation informatique de l'impact de scénarios sociaux, économiques et techniques sur la dynamique du carbone à l'échelle du terroir et analyse du comportement de ce terroir comme puits ou source de carbone atmosphérique

Objectifs spécifiques :

De façon spécifique il s'agit de :

- de simuler la dynamique des stocks de C dans le système sol-plante par le SMA MIROT ;
- de tester l'impact de scénarios socio-économiques sur la dynamique de ces stocks par celui-ci ;

Les hypothèses qui sous-tendent cette analyse sont :

H1 : La croissance démographique a un impact sur la viabilité²¹ du terroir quelque soit le système de production

H2 : La croissance des besoins monétaires a un impact sur la viabilité des écosystèmes

H3 : Un changement climatique a un impact sur la viabilité des écosystèmes

7.3. MATERIEL ET METHODES

7.3.1. Terroir d'étude et systèmes de production

Le terroir de Torokoro est situé en zone de savane d'Afrique de l'Ouest (4°20' 4°30') longitude Ouest et (9°59'-10°05') latitude Nord. Il couvre une superficie de 15000 ha. Dans ce terroir deux systèmes de production prédominent. Le système de production basé sur l'igname (*Discorea sp*) en culture itinérante. La succession culturale décrite est pratiquée par les populations autochtones qui représentent 40 % des 311 exploitations recensées (Augusseau, 2000a). Le système de production à base de coton (*Gossipium sp*) est une rotation triennale (b) coton/maïs/coton ; ou maïs/coton/maïs (culture permanente), elle est le fait de populations migrantes. En troisième année une céréale est le plus souvent cultivée, mais la stratégie de culture est propre à chaque exploitant. Dans les deux systèmes la plantation d'anacardiens est récente (moins de 20 ans).

7.3.2. Version du modèle MIROT utilisé

La version 2 du modèle MIROT a été utilisée pour l'étude de la dynamique du C à l'échelle du terroir (Belem, 2005). L'environnement simulé est représenté par une carte du terroir exportée sous Cormas. Elle compte 24462 cellules ou parcelles. La taille des parcelles est uniforme. Une cellule a une superficie d'un hectare. Le couvert végétal initial d'une parcelle est la forêt. La version 2 du modèle a été calibrée et validée avec les données mesurées pendant les campagnes de terrain mais aussi avec des données bibliographiques (Botoni, 2003).

²¹ La viabilité se définit ici par la capacité d'un système à se maintenir durablement. Dans les systèmes de production agricole, il est fait l'hypothèse qu'un système qui assure un renouvellement de ces ressources organiques est un système viable et capable de maintenir sa population. On peut donc mesurer la viabilité d'un système de production à travers la dynamique des stocks de ressources organiques à l'échelle du terroir.

7.3.3. Description des scénarios simulés

Un plan d'expérimentation a été mis en œuvre pour simuler la dynamique de ressources organiques du terroir. Plusieurs séries de simulations ont été faites suivant quelques scénarios dont quelques uns sont présentés ici (Tableau 25).

Le **scénario 1** met en compétition les deux systèmes de production sur le terroir. Chaque système est mis en œuvre en présence de l'autre. Le nombre initial d'exploitations qui pratiquent l'un ou l'autre des deux systèmes est équivalent. Elles sont soumises à la même croissance démographique. Aucune arrivée de nouvelles populations n'est simulée. Les deux systèmes sont comparés avec et sans plantation d'anacardiens afin de mesurer l'impact des plantations sur la dynamique des ressources, sous trois taux de croissance démographique.

Le **scénario 2** teste la sensibilité du modèle à quatre niveaux de besoins croissants en terme de ressources monétaires pour mesurer l'impact de ceux-ci sur l'utilisation des ressources naturelles. Les niveaux de besoins suivants ont été testés successivement 65595 et 131190, soit respectivement 100 et 200 euros. Il s'agit du Smig (salaire minimum interprofessionnel garanti). Il est doublé à chaque fois. Les populations initiales dans les deux systèmes sont égales. Elles sont soumises au même taux de croissance soit 2,5%. Elles plantent les anacardiens. L'arrivée de nouveaux migrants est stoppée.

Le **scénario 3** teste la sensibilité du modèle à la baisse ou à l'augmentation de la pluviométrie annuelle permettant de mesurer l'impact du climat. Successivement une baisse puis une hausse de 10 % soit 100 mm par an sur la pluviométrie ont été testées. La pluie normale est de 1000 mm par an variant aléatoirement de 20 %. Les deux systèmes de production sont testés en même temps, sous le même taux de croissance de la population.

La plantation d'anacardiens a été retenue car c'est une cette pratique en cours dans le terroir et qui pourrait perdurer. Les exploitations sont soumises à une croissance de 2,5 %. Le scénario exclu la possibilité d'une arrivée de nouveaux migrants dans le terroir.

Les scénarios 2 et 3 sont dits scénarios simples. Ils permettent d'évaluer l'impact de revenus croissants et l'effet de variations climatiques sur la dynamique des ressources.

Le scénario 1 est complexe, c'est un scénario démographique permettant d'évaluer l'impact des systèmes de production, de la démographique elle-même et d'un changement d'usage, les plantations.

Tableau 25: Scénarios simulés

Numéro scénario	Description du scénario
1	Systèmes itinérant et permanent avec et sans plantation croisé avec croissance démographique de 2,5, 5 et 10 %
2	AU et MI croisé avec revenus croissants de 30000 60000 90000 et 120000 FCFA
3	AU et MI croisé avec pluie de -10 % et +10 %

Les fichiers de données issues des simulations ont été exportés dans le tableur Excel. Celui-ci a servi pour les analyses graphiques. En revanche les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Spss (1999). Le test d'homogénéité des variances de Levene (Spss, 1999) a été fait au cours de l'analyse de variance pour mettre en évidence les effets des facteurs humains et autres ayant un impact sur la dynamique des ressources. Les analyses de variance ont été faites et des tests statistiques ont été réalisés sur les données transformées (pour stabiliser la variance des données). Les variables analysées sont, la population, les surfaces occupées, les surfaces sous plantation, les surfaces sous forêt, les biomasses arborées aériennes, le stock de C des arbres, le carbone du sol et les stocks totaux de carbone du terroir. Des variables socio-économiques ont été également suivies (population totale et par système, les surfaces cultivées des principales cultures, les stocks d'argent...). Le test de comparaison multiple des moyennes (test de BONFERRONI) a été utilisé pour comparer les résultats des

différentes simulations. Ceux-ci sont présentés en fonction des différents facteurs qui les influencent, dans la section 7.4

7.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

7.4.1. CARTE D'OCCUPATION DU TERROIR

Les résultats des simulations sont des résultats spatialisés sur le fond de carte du terroir permettant de visualiser ainsi des cartes d'occupation sous différents scénarios. Celle-ci évolue au fur et à mesure de la simulation (Figure 32). Des points de vue permettent des observations aux échelles parcelles (couverture, type de sols) ou au niveau exploitations agricoles (autochtone, migrant). Ces sorties graphiques montrent bien la simulation de l'occupation progressive du terroir. L'existence simultanée des deux systèmes rend possible le maintien d'un stock minima de ressources organiques. Celui-ci ne change pas même sur de très longues périodes.

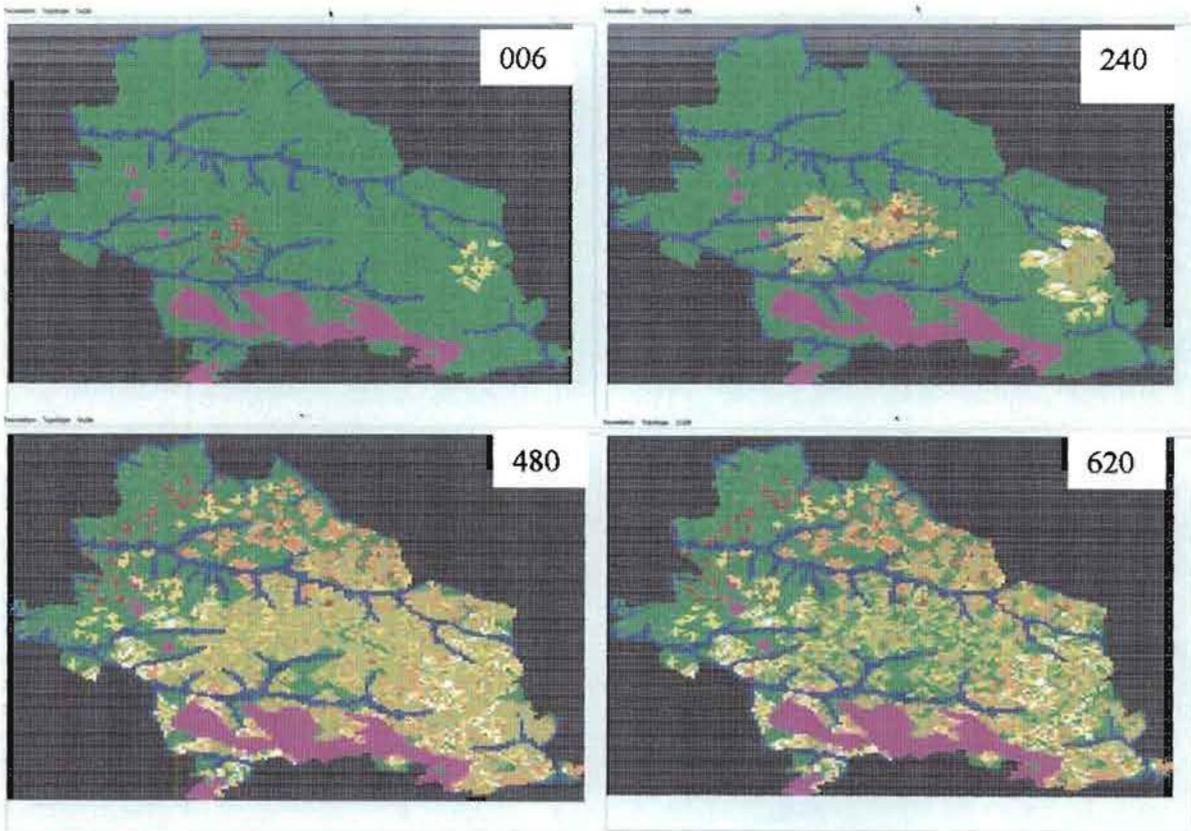


Figure 32: Cartes d'occupation du terroir pendant les simulations

7.4.2. Evolution des ressources du terroir sous l'effet des systèmes de productions

L'étude simultanée des deux systèmes de production a permis d'évaluer leur impact sur la dynamique des ressources du terroir. La population dans les deux systèmes de production lorsque les deux systèmes sont mis en compétition dans les mêmes conditions, évolue très rapidement pendant une première phase. Cette croissance atteint son maximum autour de 6000 habitants soit 4000 autochtones et 2700 migrants (Figure 33). La population maximale n'est pas statiquement différente dans les deux groupes pendant cette première phase jusqu'à 286 pas. A partir de ce stade, la population totale et donc les deux sous populations oscillent entre deux limites. La population totale oscille entre 3000 et 6000 habitants autour d'une moyenne de 4244 habitants. La population autochtone oscille entre 2000 et 4000 autour d'une moyenne de 2771 et la population migrante quant à elle oscille entre 750 et 1500 avec une moyenne de 1346 habitants. La diminution de la population s'explique par la saturation du terroir, c'est-à-dire l'absence de nouvelles parcelles pour une mise en culture. Le modèle répond alors par une diminution forcée des individus en relation avec sa capacité de charge. La proportion du terroir sous forêt diminue dès la mise en compétition des deux systèmes (Figure 34), ligne continue. Celle-ci baisse de façon irrégulière. La baisse est rapide dans un premier temps, puis se ralentit.

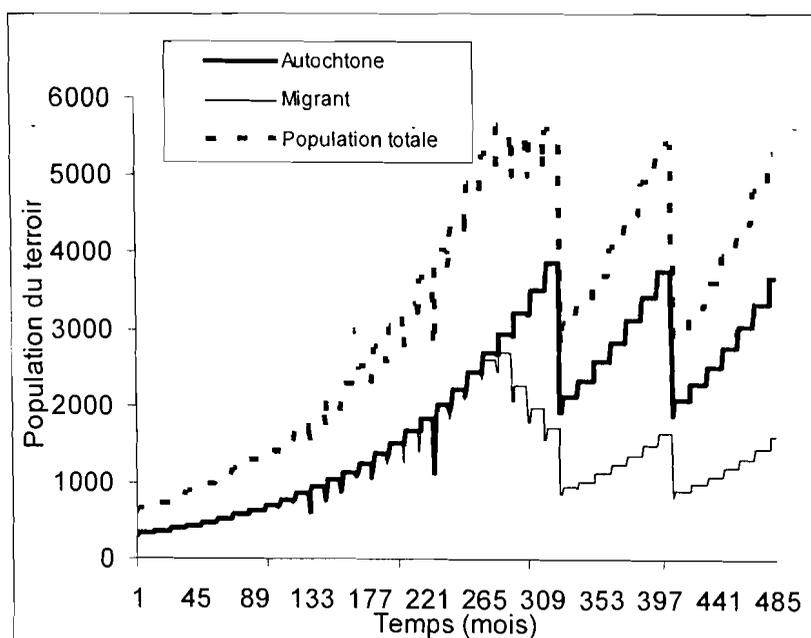


Figure 33 : Evolution des populations dans le terroir, scénario 1

La proportion du terroir sous forêt, c'est-à-dire les parcelles qui ne sont pas défrichées, diminue de 60% au bout d'une période de 270 pas avec un taux de 10% an. La proportion du terroir sous plantation augmente à l'opposé des surfaces en forêt mais dans une moindre mesure.

La proportion du terroir plantée atteint son maximum, 10 % après 352 pas (Figure 34). La biomasse arborée dans les zones non cultivées hors forêt, c'est-à-dire les jachères, augmente (Figure 35). La courbe présente une phase pendant laquelle la croissance est faible mais régulière. Une deuxième phase pendant laquelle on observe une forte croissance suivie d'un

palier. Après ce palier une décroissance rapide est observée. En domaine migrant la même courbe est observée mais avec une accélération plus tardive, et un niveau maximal atteint plus faible, que dans le cas de la dynamique du système autochtone.

La forte croissance (le pic) observée chez les autochtones s'expliquerait par l'importance de la jachère et des parcelles plantées. Dans le système autochtone la jachère de longue durée (>50 ans) permet une reconstitution de la biomasse arborée aérienne assez dense (formation naturelle) et proche de la forêt. La diminution observée après le pic s'expliquerait par la mise en culture des vieilles jachères qui ont un important stock en biomasse arborée. Le défrichage de ces vieilles jachères entraîne une importante perte de la biomasse arborée. Chez les migrants, le pic n'est pas important du fait que les jachères ne durent pas assez longtemps comme dans le système autochtone. Le palier observé dans les deux systèmes s'expliquerait par une stabilisation des surfaces cultivées et le fait que les jachères aient atteint le niveau maximum de biomasse.

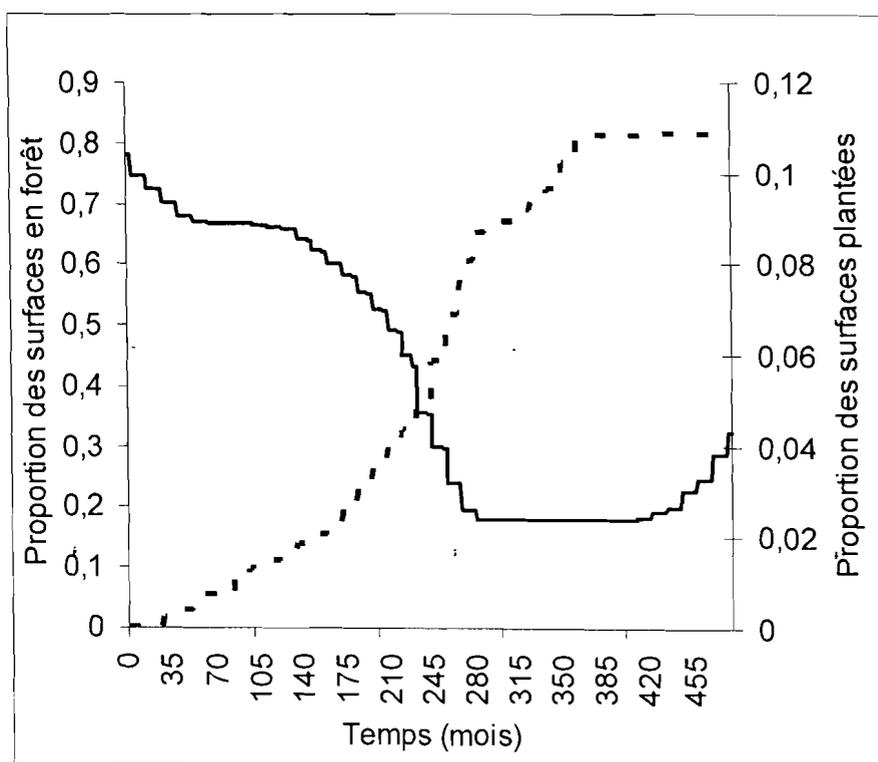


Figure 34: évolution des proportions du terroir sous forêt et sous plantation, scénario 1

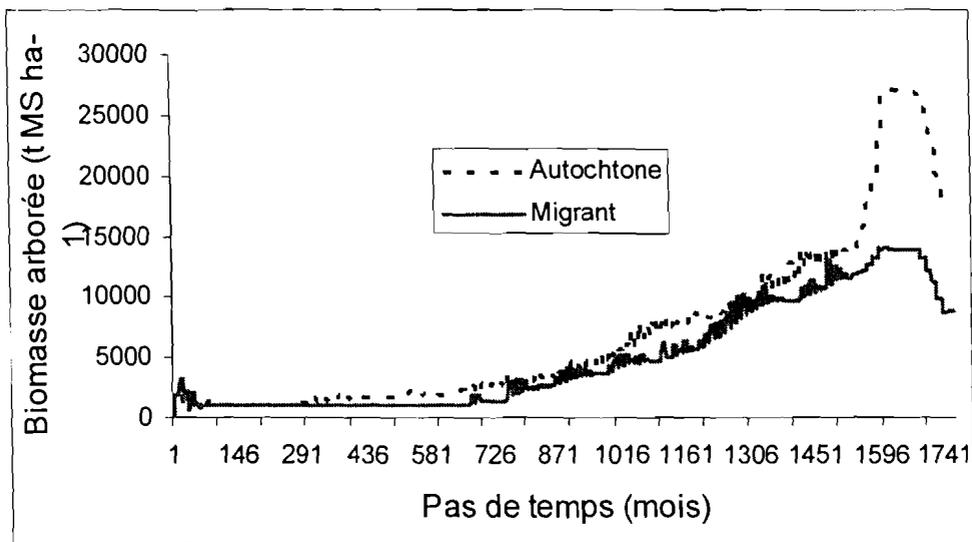


Figure 35: Dynamique de la biomasse arborée dans les espaces non cultivés dans les deux types de domaines, scénario 1

D'une manière générale pour l'ensemble du terroir, la biomasse arborée décroît en fonction du temps (Figure 36). Cette décroissance atteint 50 % des stocks initiaux plus ou moins rapidement en fonction du taux de croissance démographique. Les stocks de biomasse du terroir se stabilisent à la moitié de la valeur initiale au bout d'une période de 280 pas environ.

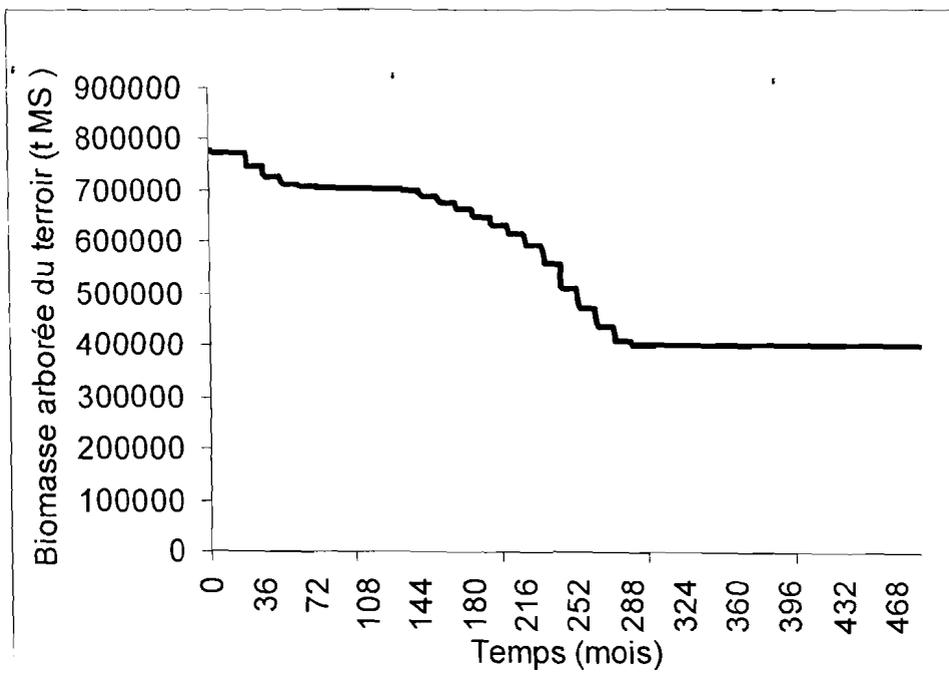


Figure 36 : Evolution de la biomasse végétale du terroir, scénario 1

Le carbone du compartiment végétal est principalement issu de la biomasse arborée aérienne. Celui-ci suit une évolution similaire à la biomasse arborée. Le carbone du sol est le plus important. Pour une profondeur de 1 m concerné, il varie très peu (Figure 37). Le carbone total du terroir baisse au fil du temps puis se stabilise.

Le carbone total du terroir est la somme du C des compartiments sol et plante. Le C du terroir baisse en fonction du temps dans les deux principaux compartiments (sol, végétation).

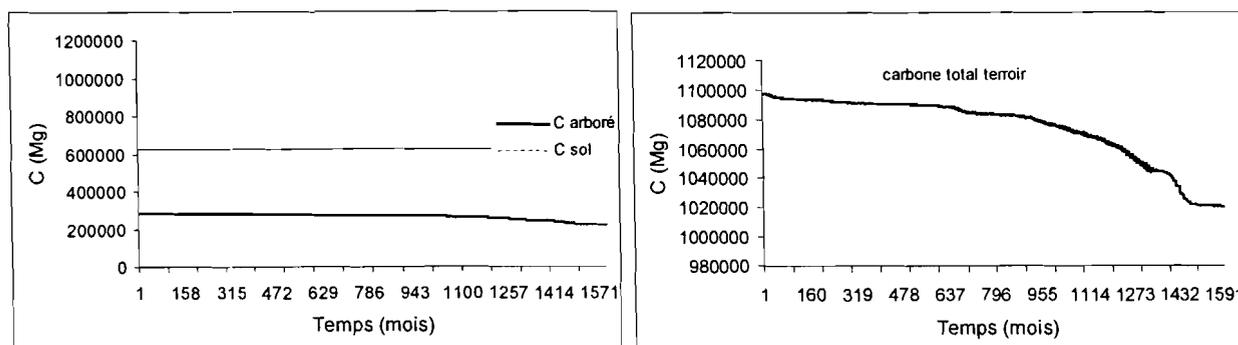


Figure 37: Carbone total des compartiments sol et plante et du terroir, scénario 1

7.4.3. Impact de la démographie sur les ressources naturelles

La croissance de la population est deux fois plus rapide quand le taux de croissance est doublé (2,5 à 5% an). La Figure 38 présente les phases de croissance de la population suivant trois taux 2,5 ; 5 et 10%. La densité la plus élevée (35 hab./km²) est obtenue deux fois plus vite quand le taux de croissance passe de 2,5 à 5 et de 5% à 10%. Avec un taux de croissance de 10%, la population totale du terroir diminue continuellement après une forte croissance qui atteint un pic contrairement au taux de croissance simulé de 2,5% et de 5%. Cette diminution s'explique par l'exploitation totale des ressources disponibles du terroir (Figure 38). Le terroir étant saturé, la population n'arrive plus à produire assez pour satisfaire les besoins entraînant un départ important d'une partie de la population.

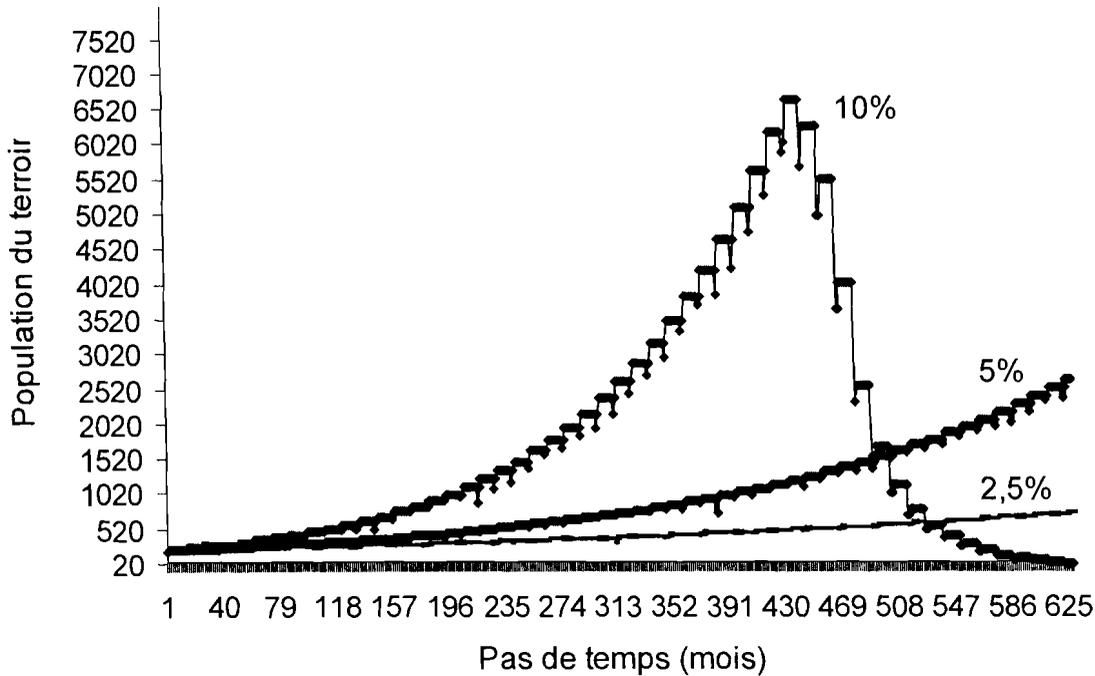


Figure 38: Croissance de la population suivant trois taux de croissance démographique, scénario 1

Tableau 26: Analyses statistiques sur quelques variables

Variable de sortie	Répétitions						Paramètres statistiques	
	1	e.s.	2	e.s.	3	e.s.	F	P
Stocks de biomasse (kg MS ha ⁻¹)	28868	164	27584	212	26757	239	26,38	0,000
stocks de carbone (kg ha ⁻¹)	38860	94	37965	111	37341	117	50,11	0,000
Surface en forêt (%)	0,48	0,01	0,33	0,01	0,23	0,01	155,31	0,000
Surface occupée (%)	0,77	0,01	0,83	0,01	0,88	0,01	73,61	0,000
e.s.: erreur standard	1: 2,5 %		2: 5 %		3: 10 %			

*** P< 0001; ** P<0,01; * P<0,05 ns: non significatif

Le Tableau 26 résume l'analyse de variance réalisée sur quatre variables pour les trois taux de croissance démographique. Dans tous les cas de figure le résultat montre que les différences observées pour les moyennes obtenues pour ces quatre variables pour les trois taux de croissance ne sont pas un effet du hasard au seuil de 0,001%. En d'autres termes les trois taux de croissance provoquent des impacts très hautement significatifs sur les variables mesurées. Le carbone du compartiment arboré est très significativement affecté par le taux de croissance démographique (Figure 39).

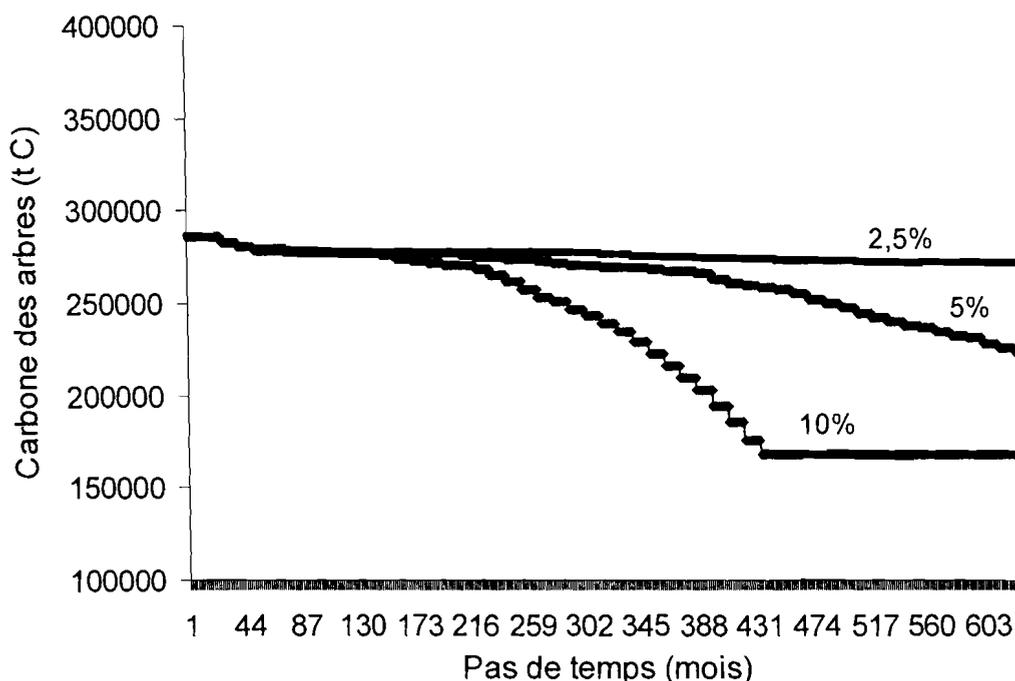


Figure 39: Impact de la démographie sur les stocks de carbone

L'évolution de la proportion du terroir sous forêt en relation avec l'évolution de la population sous le même scénario montre que la surface du terroir en forêt baisse quand augmente la densité de la population (Figure 40). Cette baisse de la surface forestière est de 75 % entre la densité initiale de 4 et 35 habitants au km². A l'opposé les surfaces boisées augmentent pour atteindre leur plafond (10% du terroir) quand la densité atteint 35 habitants au km².

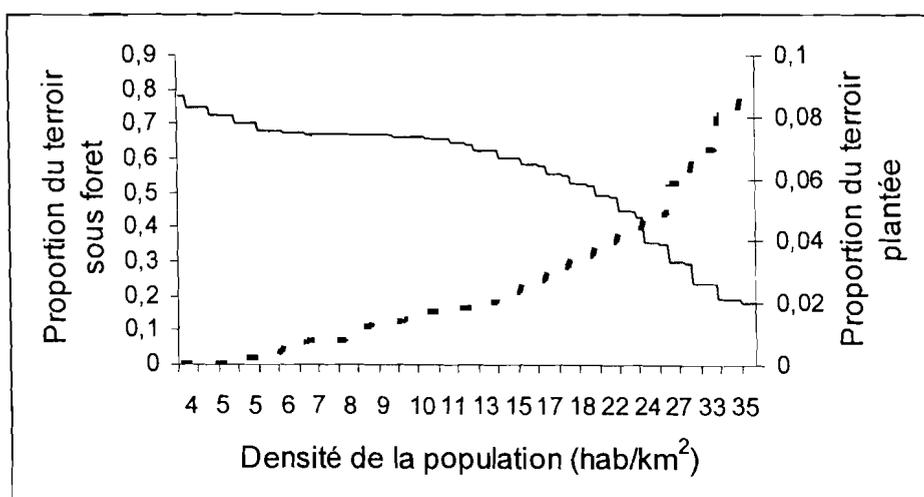


Figure 40: Relation démographie, surface en forêt et en plantation, scénario 1

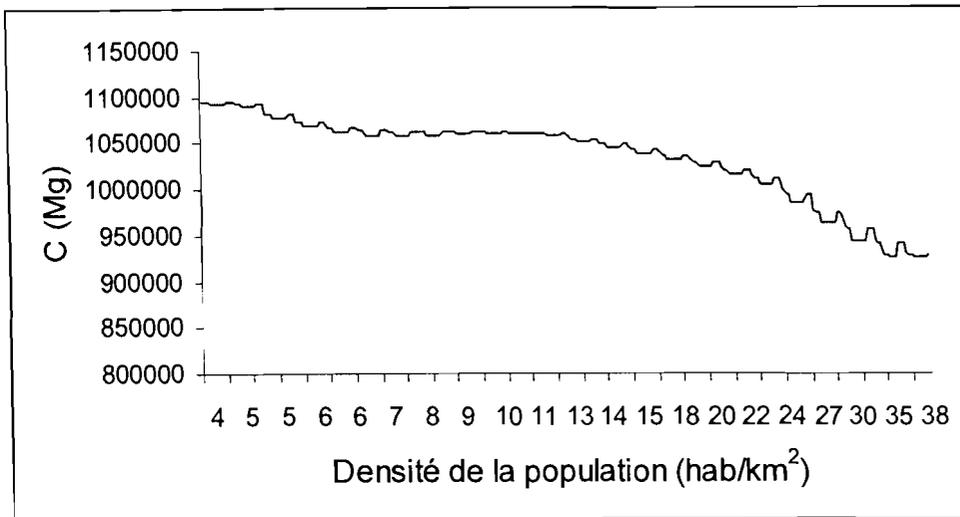


Figure 41: Relation carbone arboré et densité de la population

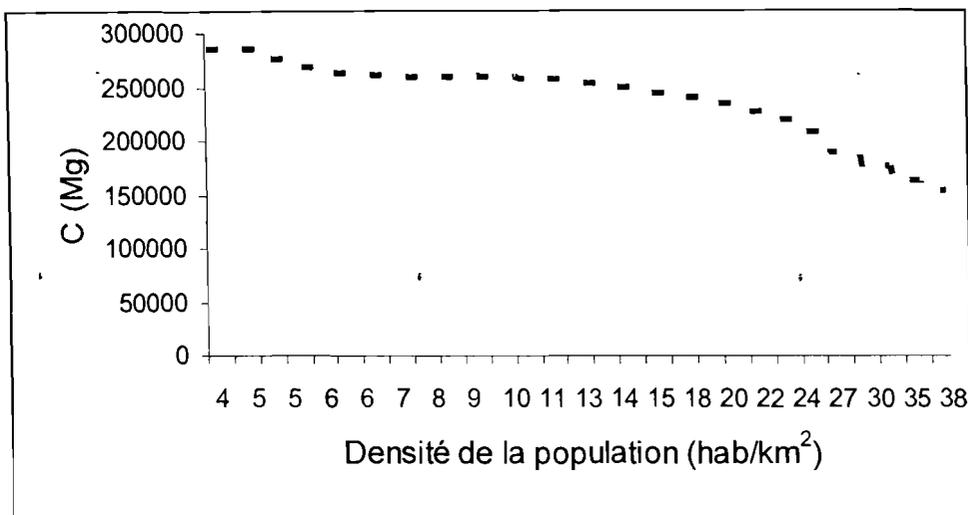


Figure 42: Carbone total du terroir en fonction de la densité de la population

Le C du compartiment arboré aérien décroît quand augmente la densité de la population du terroir (Figure 41). Le C arboré baisse de moitié et se stabilise quand la densité passe de 4 à 38 hab. au km². Le C du sol quant à lui reste constant (Figure 37). Globalement pour le terroir le C décroît (Figure 42).

Le stock global de C du terroir baisse et se stabilise autour de 80 % de sa valeur initiale quand la densité varie de 4 à 38 hab. au km².

Le carbone global du terroir baisse quand augmente la densité de la population. Cette baisse est pourtant inférieure à 50% de la valeur initiale quand la densité passe de 4 à 38 % soit une baisse de presque 10 fois la valeur initiale.

7.4.4. Impact des plantations d'anacardiers

Les plantations d'anacardiers ont un effet significatif sur la plus part des variables étudiées. Seule la variable biomasse en système permanent n'est pas significativement influencée par les plantations. Les faibles populations sont en relation avec l'existence des plantations d'anacardiers. Globalement pour le terroir la baisse de la population est de 18% quand des exploitants plantent l'anacardier, la population autochtone baisse de 21 % et celle de migrant de 24%, (Tableau 27). Les plantations d'anacardiers augmentent au dépend de la population. Les surfaces en igname, coton, maïs, en forêt ; jachère diminuent quand les exploitants agricoles plantent l'anacardier. En présence de plantation moins de 25 % du terroir est disponible pour les cultures, contre 30 % lorsqu'il n'y pas de plantation (Figure 43).

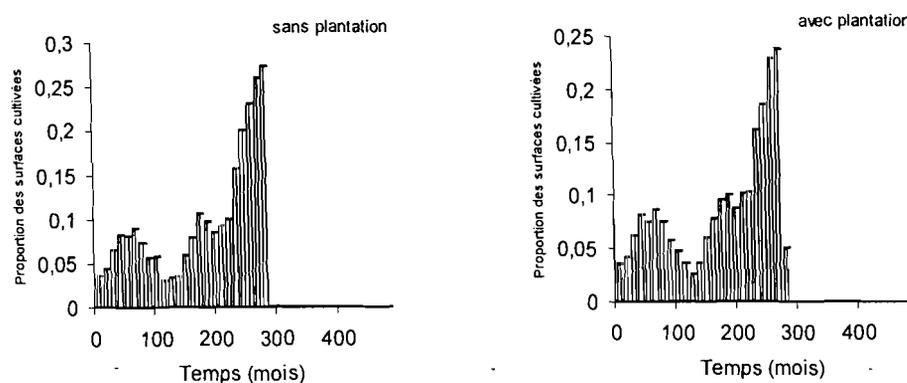


Figure 43: Impact des plantations d'anacardiers sur les surfaces cultivées, scénario 1

Tableau 27: Impact de l'effet des plantations d'anacardiers

Variable	Planté			Non planté		
	N	Moyenne	e.s.	N	Moyenne	e.s.
Autochtone (AU)	1596	193	4	1596	236	5
BAAU	1596	9043	220	1596	7152	172
BAMI	1596	4874	120	1596	5064	106
CAAU	1596	3368	81	1596	2625	63
CAMI	1596	1796	44	1596	1857	39
MOYEN AU	1596	8	0,07	1596	13	0,11
MOYEN MI	1596	17	0,19	1596	19	0,18
NBRMOYEN	1596	11	0,09	1596	15	0,12
Migrant (MI)	1596	198	4	1596	259	5
STOCAGAU	1596	7,46	0,23	1596	5,15	0,13
STOCAGMI	1596	1,50	0,06	1596	1,90	0,08

BA: Biomasse arborée aérienne CA: Carbone des arbres StocAg: stock d'argent
Autochtone (AU) Migrant (MI)
moyen: effectif moyen

La biomasse aérienne arborée et le carbone ne sont pas significativement influencés par les plantations en milieu migrant. La biomasse arborée des domaines autochtones est 2 fois supérieure à celle estimée sur les domaines migrants (Tableau 27). Les surfaces en coton, igname, maïs, sorgho, sont significativement affectées quand les exploitations agricoles

plantent l'anacardier (Figure 44 et Figure 45). Les sorties du modèle étant mensuelles, chaque mois le modèle calcule les surfaces cultivées, ainsi pour la saison sèche, les surfaces calculées sont égales à zéro.

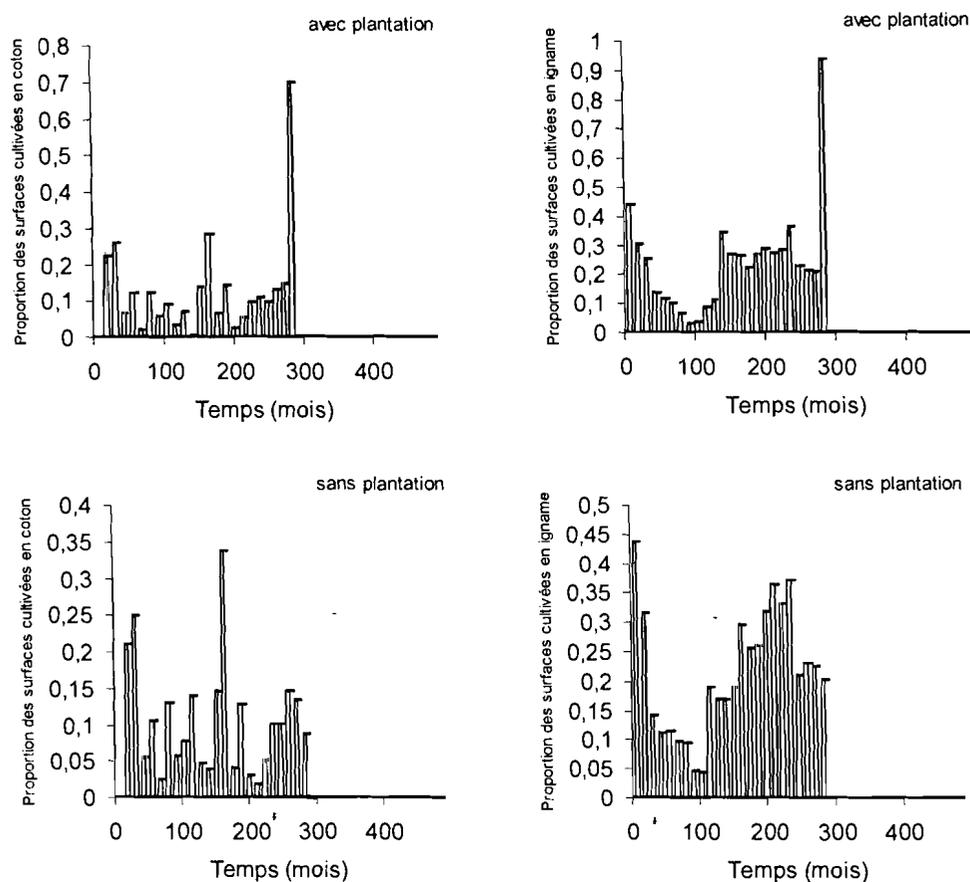


Figure 44: Effet des plantations sur les surfaces de coton et igname, scénario 1

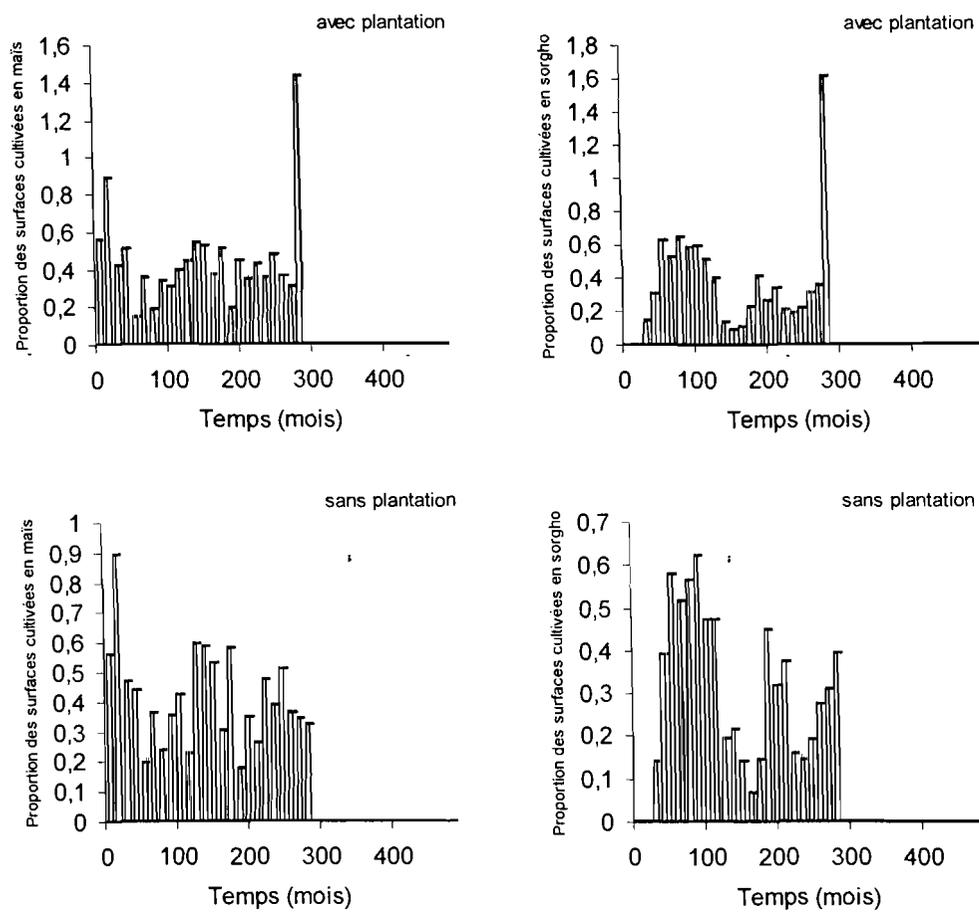


Figure 45: Effet des plantations sur les surfaces en maïs et en sorgho

Les stocks d'argent en revanche sont améliorés lorsque les populations pratiquent les plantations d'anacardiés (Figure 46).

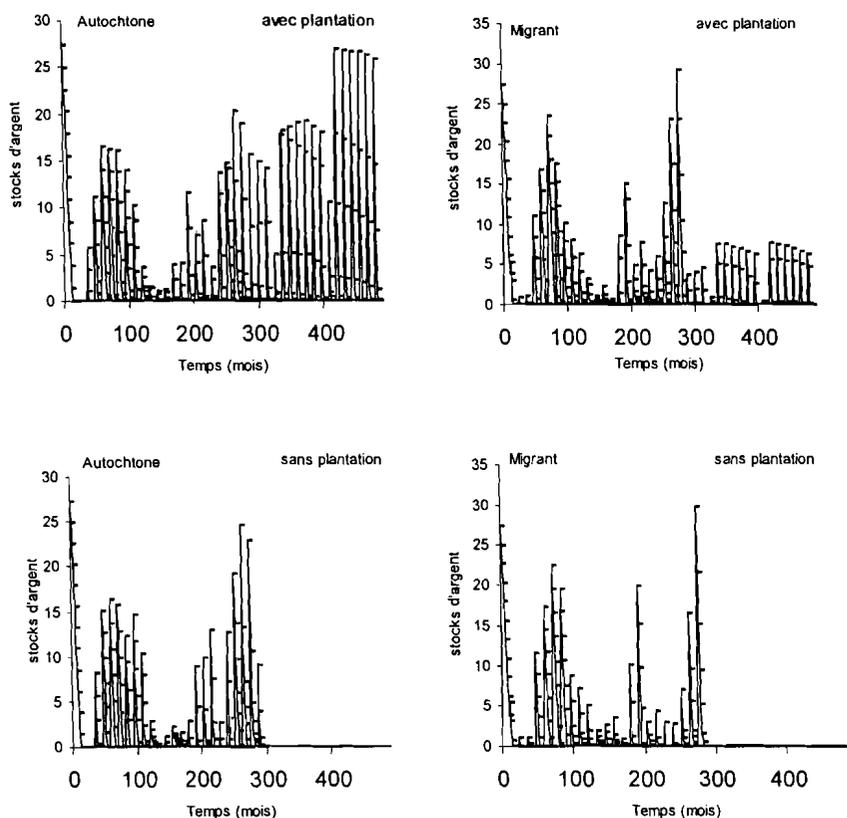


Figure 46: Effet des plantations sur les stocks d'argent chez les populations autochtone et migrante

La plantation d'anacardier est une pratique commune aux deux systèmes. Elle a un impact sur le comportement des exploitants et sur la dynamique des ressources. La plantation d'anacardier est fortement associée aux densités de populations les moins élevées. La plantation est associée avec une réduction d'au moins un quart de la population. Les plantations augmentent les stocks de biomasse dans les domaines en culture itinérante et non en domaine à système de culture permanent.

7.4.5. Effets des besoins monétaires

L'effet des besoins croissants d'argent sur la biomasse du compartiment arboré (exprimé en unité de carbone) et globalement sur le stock de carbone du terroir n'apparaît pas nettement (Figure 47). Un doublement des besoins en ressources monétaires ne modifie pas non plus significativement la dynamique globale des ressources organiques du terroir.

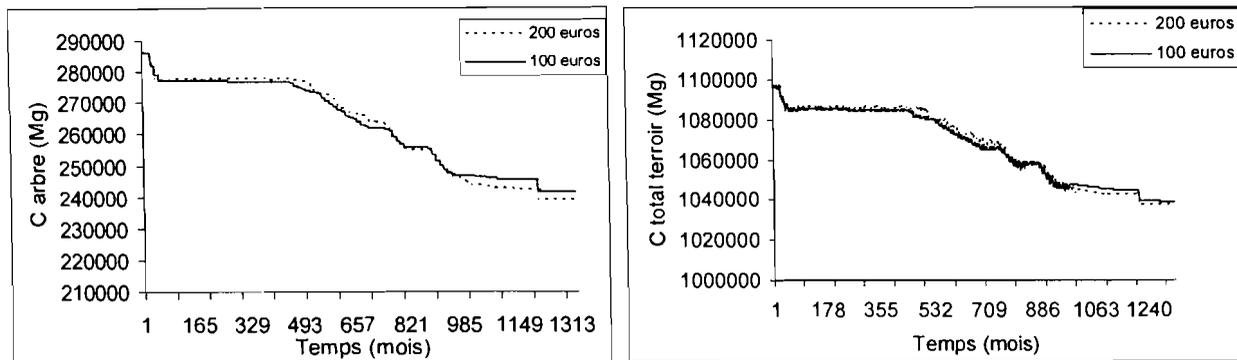


Figure 47: Impact de besoins en argent sur le carbone arboré aérien et du terroir

7.4.6. Impact des aléas climatiques

La variation de plus ou moins 10 mm de pluie n'a pas un effet net sur le stock de C des sols, sur le C arboré et global du terroir (Figure 48). La proportion du terroir occupée ne varie pas non plus significativement en fonction de la variation de la pluie.

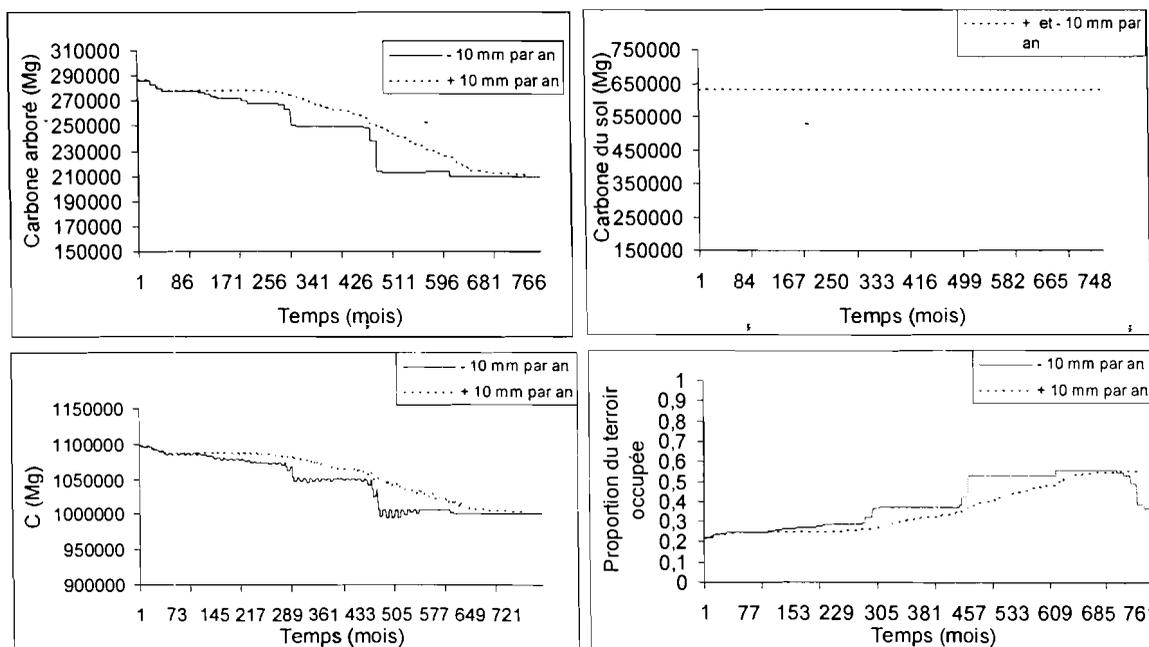


Figure 48 : Effet de la pluviométrie sur les ressources du terroir

7.4.7. DISCUSSION

Des simplifications ont été nécessaires pour la mise en œuvre du SMA. Cependant son réalisme est évident car il intègre des modèles statistiques empiriques mis au point à partir des données (biophysiques et socio-économiques) mesurées à différentes échelles spatiales (parcelles, exploitations agricoles et terroir) et d'une importante source bibliographique. Le

SMA, MIROT, rend bien compte de l'état et de l'évolution des ressources du terroir en fonction des scénarios (démographique, techniques, climatiques et socio-économique).

La spatialisation dans le modèle actuel utilise la carte du terroir. Un couplage avec une carte en mode Raster du terroir permet de prendre en compte les contraintes spatiales (rivières, terres incultes) et rendre ainsi modèle capable de spatialiser les changements d'usages des terres (Berger, 2001). Elle permet de suivre l'évolution des ressources sur une grille et de tester des scénarios. L'intégration des modèles statistiques empiriques (stockage de C) et modèles socio-économiques permet aussi de les rendre réalistes (Lambin *et al.*, 2000). Le couplage en cours avec le logiciel de modélisation économique (GAMs) permet l'optimisation du comportement des exploitants.

La croissance démographique a été utilisée comme principal facteur de changement dans l'évolution des ressources dans ce terroir. Tous les taux de croissance ont des effets significatifs sur l'évolution des ressources. A l'échelle d'une exploitation, lorsque celle-ci atteint un effectif de 20 personnes elle se recompose en deux exploitations de taille égale à 10 et chacune. Celles-ci recommencent leur croissance tant que l'espace est disponible d'où des dents de scies. Le modèle simule l'augmentation la population migrante due à l'effet de la croissance démographique mais aussi l'arrivée de nouveaux migrants. Cette croissance de la population migrante se présente en dents de scie. La simulation de la croissance démographique chez les autochtones ne présente pas la même évolution. Dans notre modèle, la croissance démographique conduit plus ou moins rapidement à la saturation du terroir. Les parcelles n'étant plus disponibles, la population se stabilise autour d'une valeur moyenne. Les nouvelles exploitations qui se créent du fait de ces croissances démographiques sont supprimées simulants ainsi leur sortie du terroir virtuel. On observe de légères différences dans les phases de montée et de stabilisation de la population totale du terroir. Cependant, l'évolution de la courbe est conforme à la courbe de croissance logistique correspondant à un mécanisme naturel de croissance (Ruas et Benoît-Cattin, 1991).

La proportion du terroir occupée (champs, plantations, habitats...) montre que le terroir est saturé dans tous les cas de figure plus ou moins rapidement en raison de la croissance démographique qui implique une augmentation du changement de parcelles sous forêt en culture ou plantation. La saturation du terroir est atteinte plus rapidement si l'on impose une augmentation des besoins en argent. Quant l'espace est saturé, les exploitations agricoles cherchent à améliorer la productivité de la terre en intensifiant le facteur travail et/ou le facteur capital par unité de surface ou par adoption de nouvelles technologies (Barbier, 1994). Cet aspect n'est pas simulé ; notre modèle répond à la saturation par une diminution de la population.

Le modèle simule bien la réalité du terroir car dans la réalité, en système traditionnel (système de culture itinérant) l'épuisement des ressources serait lent et une reconstitution de la forêt est rendue possible par la pratique de longues jachères (plus de 50 ans). La reconstitution de la forêt, pourrait atteindre néanmoins un seuil au-dessus duquel les surfaces n'augmentent plus, due aux loi de croissance naturelle d'un peuplement. A partir de ce seuil, un équilibre s'instaurerait entre l'exploitation et le maintien des ressources, en permettant au système de se conserver.

En revanche, en système permanent, on aurait un épuisement plus rapide des ressources en raison des mises en cultures, des plantations gouvernées par l'amélioration des revenus familiaux. Les surfaces en forêt diminueraient au profit des champs, des plantations, des jachères et des habitations, la biomasse disponible diminuerait également.

Les surfaces sous plantation pourraient augmenter car la vente des noix de cajou (noix d'anacardières) fourni des revenus substantiels aux exploitations agricoles. De plus les plantations seraient utilisées comme stratégie d'appropriation et de marquage des terres et des domaines comme cela a été le cas ailleurs (Bertrand, 1993). Mais se rendant compte du risque

d'invasion de leur domaine, les exploitants développeraient d'autres stratégies. Dans la pratique les surfaces plantées n'excèderaient pas la moitié de leurs terres. Le reste du domaine serait réservé aux cultures céréalières. Les surfaces plantées tendent vers une limite qui oscille entre 15 et 20 % des domaines en moyenne. A terme c'est un risque alimentaire qu'induirait l'occupation des terres par les plantations avec des risques économiques liés aux marchés (stabilité des prix). Même si peu d'études existent, il a été prouvé que c'est aussi la qualité des terres qui est mise en cause car même s'il n'y a pas de perte de matière organique des sols sous plantation, celle-ci provoque des pertes et une perturbation du recyclage des éléments nutritifs des sols en particulier quand la plantation est détruite (Aweto et Ishola, 1994), (Aweto, 2001a). Au delà de l'apport en biomasse végétale c'est une perte de biodiversité pour les écosystèmes (Botoni, 2003). Dans l'optique de la prise en compte des forêts dans le calcul des stocks de C (afforestation, reboisement, changement d'usage et changement de la couverture du sol), les plantations d'anacardiés pourraient être évaluées. Ces aspects devront être pris en compte dans les futures évolutions du modèle.

Dans le système traditionnel la baisse de la biomasse arborée est en dents de scies. Ceux-ci correspondent à des reconstitutions arborées dues aux jachères longues (>50 ans). Dans le système migrant, les plantations contribuent à stabiliser dans la troisième phase le stock de biomasse du terroir. L'augmentation de la biomasse (phase deux) dans les deux systèmes est liée aux plantations, à la régénération par les jachères, aux pratiques de conservations et préservation des espèces utiles comme Karité (*Vitellaria paradoxa*), Néré (*Parkia biglobosa*), Tamarin (*Tamarindus indica*), besoin domestique, une protection de ces espèces maintient la biomasse arborée du terroir (Gazel, 2002), (Nikiéma, 2003).

7.5. CONCLUSIONS

Cette première tentative de simulation à l'aide d'un SMA de la dynamique des ressources organiques d'un terroir ne permet pas une validation définitive du modèle. Cependant, les dynamiques simulées apparaissent cohérentes et rendent bien compte des tendances de la dynamique des ressources du terroir que l'on a pu observé sur le terrain. La croissance démographique s'est révélée être un facteur important qui influence la gestion et la dynamique des ressources. Les **systèmes de production** simulés, autochtones ou migrant, ont des impacts variés sur la dynamique de ressources organiques. Le mode de fonctionnement traditionnel comparé au mode de fonctionnement actuel montre que ce dernier épuise plus vite les ressources. Cependant même en système traditionnel, l'augmentation de la démographie diminue de ressources du terroir. Ces taux de croissance de la population dans les conditions actuelles ont des effets nets sur la dynamique des ressources (terres, forêt, les stocks de biomasse...). La croissance démographique a un impact visible immédiat sur l'évolution des ressources. C'est un des facteurs importants dans la gestion des ressources. Les **revenus financiers** espérés sont importants car ils induisent une multitude d'activités épuisant les ressources. Nos résultats de simulation semblent cependant indiquer qu'un terroir tel que nous l'avons conçu ne soit pas trop sensible d'un point de vue de la dynamique de ses ressources organiques à un doublement des besoins monétaires. La sensibilité du modèle aux **aléas climatiques** est faible. En effet la baisse continue de la pluviométrie n'induit pas significativement les défrichements et les surfaces plantées.

Le modèle a été testé sur plusieurs pas de temps sans anomalie. Les résultats sont assez cohérents pour toutes ces simulations même si la sensibilité à certains paramètres n'est pas encore au point. **Le SMA reproduit donc l'effet des facteurs exogènes (démographie, économiques), de facteurs anthropiques (système de production) et des facteurs naturels sur la dynamique des ressources.**

Les améliorations futures après le calibrage concerneront l'analyse de sensibilité du modèle, la validation de celui-ci, son couplage avec un modèle d'optimisation et le couplage avec un système d'information géographique (SIG) est effectif. L'adaptation à un jeu de rôle permettra une utilisation comme outil d'aide à la concertation ou à la négociation entre les acteurs et les gestionnaires de la ressource. De plus l'amélioration de la prise en compte des types d'élevage et la performance des animaux le rendra plus à même d'intégrer l'agriculture et l'élevage. Une des perspectives d'amélioration sera de doter les agents du modèle des capacités de changer de comportement faces à des changements (dégradation sévères des ressources, baisse de la fertilité...).

Conclusion générale et perspectives

8. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans les zones de savanes d'Afrique de l'Ouest, le facteur humain est une des principales causes de la raréfaction des ressources organiques. En effet, en plus de la croissance démographique, les activités humaines conditionnent fortement la disponibilité et la dynamique de la matière organique des sols mais aussi de la biomasse végétale. Une bonne connaissance de ces activités et de leur impact sur la dynamique des ressources organiques a permis par la modélisation multi-agents de simuler la dynamique de C dans le terroir. Le modèle MIROT, ainsi développé est un outil d'investigation et de recherche. Il simule des modes de gestion, des successions culturales et des itinéraires techniques. Il est adaptable comme outil d'aide à la concertation des acteurs et des décideurs, responsables de la gestion des ressources organiques du terroir villageois. Il pourrait évoluer par la suite vers un outil d'aide à la décision.

Dans cette étude, il apparaît que c'est essentiellement la texture qui gouverne le niveau des stocks de C, la dynamique de C dans les sols. En effet les stocks organiques des sols sont fonction des modes de gestion des parcelles, des restitutions organiques, des apports minéraux mais aussi des pertes (érosion, lessivage, feu, récoltes). C'est ainsi que, contrairement aux hypothèses de départ, dans le système de production à base de coton, en raison de la fertilisation minérale, il y'a une accumulation de C sensiblement plus importante que dans le système de production à base d'igname. Cependant seuls les stocks des horizons de surface sont modifiés par ces pratiques de gestion.

Les plus importants stocks végétaux sont localisées en zone peu peuplée (Ouest du terroir) en raison de l'installation progressive des populations de la zone Est vers la zone Ouest créant ainsi un gradient de densité du couvert végétal. C'est dans cette zone que se rencontre le plus, les formations dites « naturelles ». Celles-ci sont des formations arborées denses dans lesquelles dominent trois espèces (*Azelia africana* et *Isobertinia doka* ou *Isobertinia dalzielii*). Il s'agit de formations non ou peu perturbées. Les stocks de C de la biomasse végétale sont principalement contenus dans le compartiment arboré. La biomasse végétale baisse dès la mise en culture quel que soit le mode de gestion des terres. Seules les parcelles en plantation et les parcelles mises en jachère sur une longue durée accumulent de la biomasse végétale, donc du carbone. Une biomasse végétale ligneuse non négligeable se maintient dans les zones cultivées en raison de pratiques de conservations des espèces utiles, qui sont représentés souvent par des arbres âgés aux dimensions (hauteur, diamètre) conséquentes. Le problème se pose alors sur la capacité de renouvellement des ces ressources organiques sur la durée dans les systèmes de culture permanente.

La connaissance de l'impact des facteurs humains sur les stocks et la dynamique de ces mêmes stocks a permis la conception, l'organisation et la mise en œuvre d'un modèle multi-agents. Celui-ci est calqué sur le terroir. Pour cela les connaissances thématiques multi-échelle ont été intégrées dans ce modèle. Cette diversité d'échelles spatiales (parcelle, exploitation agricole, terroir) et temporelle (le mois, l'année, les années) a été conceptualisée et programmée. Sur l'environnement du modèle interviennent plusieurs agents (agriculteurs, éleveurs) mais aussi des agents comme le troupeau. Ceux-ci agissent sur les objets comme les parcelles. Certains agents interagissent, négocient et échangent des biens et services. Ce SMA permet de simuler les actions individuelles et des ces acteurs et de mettre en évidence l'impact de leurs actions sur l'environnement (dynamique spatiale) et sur les objets. La plate-forme CORMAS, a été utilisée pour concevoir et mettre en œuvre le modèle MIROT.

Le modèle s'est révélé pertinent pour simuler la dynamique de C à l'échelle terroir. Dans ce modèle, l'environnement spatial utilisé est la carte du terroir. Sur celui-ci, pendant le déroulement de la simulation, les agents (exploitants et troupeau) sont explicites. De part leurs activités ils agissent sur le milieu et les ressources. La dynamique des ressources est suivie sur la carte d'occupation. Les résultats sont affichés graphiquement pendant la simulation. La sortie de données numériques est faite sous forme de fichiers transférables dans un tableur comme Excel pour des analyses graphiques et statistiques. La dynamique comparée des ressources (terres, forêt, population, plantation, troupeau, parcours) est suivie en fonction des systèmes de production (itinérant et permanent). Cette dynamique est aussi appréhendée globalement pour l'ensemble du terroir.

Le facteur démographie s'est révélé être le principal moteur du changement dans la gestion des ressources du terroir. Pour satisfaire les besoins monétaires de plus en plus croissants des activités sont mises en œuvre (défriche, mise en culture, plantation) par les exploitants. Ces défrichements et ces mises en culture se font au détriment de la forêt initiale et diminuent les ressources. Il a été montré que les plantations augmentent la biomasse du terroir même si elles affectent les surfaces cultivées. Le modèle simule bien une capacité du terroir à trouver un équilibre en ce qui concerne les ressources organiques et la population exploitant ces ressources dans un système de production associant la rotation culture et la jachère de longue durée.

Des perspectives multiples et intéressantes se dégagent de cette étude du point de vue du développement mais aussi en termes de recherches futures. Elles couvrent deux axes que sont : les perspectives du point de vue de la gestion des ressources, les perspectives du point de vue opérationnel.

Dans une approche de gestion durable des ressources, la première perspective vise à mettre au point et/ou adopter des solutions techniques en vue de minimiser les effets néfastes des changements climatiques, ceux-ci étant d'ordre exogène (ne peuvent être maîtrisés). Pour cela des possibilités éco-technologiques existent. La question est de tester leur adaptation au milieu et le coût de leur adoption. Ces techniques sont principalement des options de gestion des terres. Quelques exemples sont : la jachère prolongée, la mise en défens, les techniques de conservation des sols (labour limité et aménagements CES), l'agroforesterie, le boisement, la gestion raisonnée des parcours, la conversion des terres agricoles, les techniques de fertilisation. Ces possibilités éco-techniques peuvent être simulées pour évaluer la dynamique des stocks de C dans le terroir. Pour le terroir entier, il est possible de faire un bilan des stocks de C en utilisant ces techniques et de retenir les plus appropriées. Secondairement il sera possible d'évaluer la séquestration du C dans les sols pour les modes de gestion des terres qui permettent l'augmentation de C dans les sols. Ces dernières options sont particulièrement prometteuses avec le couplage du modèle MIROT thématiques (modèles carbone, Century) modèles complexe (DSSAT) et/ou avec des modèles spatiaux (systèmes d'information géographique). Enfin il sera ainsi possible d'évaluer la viabilité du terroir.

Du point de vue opérationnel, c'est surtout les applications concrètes qui seront les plus utiles. Pour l'analyse de la viabilité du terroir, un outil existe pour faire le bilan en termes de production et utilisation des ressources organiques. MIROT va permettre de simuler les changements d'usages des terres ou des pratiques agricoles. Il permettra ainsi de prédire l'effet de ces changements sur les autres paramètres du terroir qu'ils soient biophysiques ou humains.

Une autre possibilité est l'adaptation comme un Jeu de rôle (JDR). Le modèle MIROT sera alors utilisable en partenariat avec les populations, les acteurs de terrain. Il sera utilisé comme support pendant des séances d'apprentissage collectif ou de négociation entre acteurs dans le site ou hors du site.

Dans sa version actuelle, le modèle MIROT est un outil d'investigation et de recherche. Il est déjà opérationnel pour l'étude de scénarios divers pour répondre à des hypothèses variées ou des questions de recherche et/ou de développement. Par exemple il est possible de simuler l'impact de différents taux d'adoption des plantations d'anacardiens sur les stocks de C du terroir. Il est possible de simuler l'impact de l'amélioration des revenus agricoles par l'augmentation des prix d'achat aux producteurs de l'igname et/ ou du coton. L'utilisation du modèle MIROT comme outil d'aide à la décision sera le but ultime de cette recherche. Cette option sera hautement utile pour les planificateurs, les décideurs, les gestionnaires des ressources naturelles, la communauté scientifique.... En effet avec une version générique du modèle MIROT, il sera possible de simuler la dynamique des ressources dans d'autres terroirs répondant à des conditions biophysiques différentes ou tout autre zonage agro-écologique. Il sera possible de l'appliquer à d'autres niveaux de découpage, administratif ou non avec la possibilité de changer d'échelle pour raisonner au niveau local, régional ou national.

Bibliographie :

- Abrami G., 2004. *Niveaux d'organisation dans la modélisation multi-agents pour la gestion de ressources renouvelables. Applications à la mise en oeuvre de règles collectives de gestion de l'eau agricole dans la basse-vallée de la Drôme*. Thèse en Sciences de l'eau, Montpellier, Montpellier, 401 p.
- Alexandre D.-Y., Kairé M., 2000. Les productions des jachères africaines à climat soudanien (bois et produits divers). In: Floret C., Pontanier R. (Eds.), *La Jachère en Afrique tropicale -Vol II. De la Jachère Naturelle à la Jachère Améliorée : Le Point des Connaissances*, Dakar, Sénégal, 13-16/04/1999. John Libbey, Paris, pp. 169-199.
- Arrouays D., Bernoux M., Jolivet C., 1998. Spatialisation des stocks d'éléments dans les sols : outils actuels et potentialités : cas du carbone organique. *Cahiers Agricultures* 7, 347-356.
- Arrouays D., Kicin J.L., Péliissier P., Vion I., 1994. Evolution des stocks de carbone des sols après déforestation : analyse spatio-temporelle à l'échelle d'un paysage pédologique. *Etude et Gestion des Sols* (n°2), 29-38.
- Arrow K., Bolin B., Costanza R., Dasgupta P., Folke C., Holling C.S., Jansson B.O., Levin S., Maler K.G., Perrings C., Pimentel D., 1995. Economic-Growth, Carrying-Capacity, and the Environment. *Science* 268 (5210), 520-521.
- Augusseau X., 2000a. *Rapport d'analyse des résultats d'enquêtes d'exploitation du terroir de Torokoro*. INERA-GRN/SP et CIRDES&, Ouagadougou.
- Augusseau X., 2000b. *Typologie fonctionnelle et trajectoire d'exploitations en zone de migration*. Rapport de recherche. CIRAD.
- Augusseau X., Cheylan J.P., Liehoun E., 2004. Dynamiques sociales et transformation des espaces : le cas d'un village burkinabé en pleine recomposition. *Cahiers Agricultures* 6 (13), 488-494.
- Augusseau X., Liehoun E., Kara A., 2000. Evolution de l'organisation agraire dans deux terroirs d'accueil des migrants du sud ouest du Burkina Faso : un même processus dans l'actuel front pionnier? In: FRSIT (Ed.) *FRSIT*, Ouagadougou, p. 17.
- Aweto A.O., 2001a. Impact of single species tree plantations on nutrient cycling in West Africa. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology* 8 (4), 356-368.
- Aweto A.O., 2001b. Trees in shifting and continuous cultivation farms in Ibadan area, southwestern Nigeria. *Landscape and Urban Planning* 53 (1-4), 163-171.
- Aweto A.O., Ishola M.A., 1994. The impact of cashew (*Anacardium occidentale*) on forest soil. *Experimental Agriculture* 30 (3), 337-341.
- Bakam I.T., 2003. *Des systèmes multi-agents aux réseaux de pétri pour la gestion des ressources naturelles: le cas de la faune dans l'est cameroun*. PhD, Université de Yaoundé 1, Yaoundé, 137 p.
- Barbier B., 1993. *La modélisation d'un système agraire villageois des savanes africaines par la programmation linéaire avec le logiciel LINDO*. Rep. No. CIRAD-SAR N°83/93. Département des systèmes agroalimentaires et ruraux CIRAD-SAR, Montpellier.
- Barbier B., 1994. *Modélisation agronomique et économique de la durabilité d'un système agraire villageois : le cas du village de Bala au Burkina Faso*. Thèse de Doctorat, ENSAM, Montpellier, 329 p.
- Barbier B., 1996. *Impact of market and population pressures on production*. Rep. No. EPTD DISCUSSION PAPER NO.21. International Food Policy Research Institute: Environmental and Production Technology Division, Washington, D.C.
- Barbier B., Benoît-Cattin M., 1997. Viabilité à moyen et long termes d'un système agraire villageois d'Afrique soudano-sahélienne : le cas de Bala au Burkina Faso. *Economie rurale* 239, 30-39.

- Barbier B., Bergeron G., 1999. Impact of policy interventions on land management in Honduras : results of a bioeconomic model. *Agricultural Systems* **60**, 1-16.
- Barbier B., Dury S., Weber J., 2002. Simulation des relations populations/ressources naturelles. Prototype de modèle pour un terroir du Nord Cameroun. In: Jamin J.Y., Seiny Boukar L. (Eds.), *Savanes africaines: des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis.*, Actes du colloque, mai 2002, Maroua, Cameroun, N'Djaména, Tchad, Prasac, XXP.
- Bationo B.C., 1993. *Consommation et produit des combustibles ligneux au Burkina Faso : situation actuelle et analyse prospective.* Mémoire de DEA, Ouagadougou, Ouagadougou, 113 p.
- Batjes N.H., 2001. Options for increasing carbon sequestration in West African soils: An exploratory study with special focus on Senegal. *Land Degradation & Development* **12** (2), 131-142.
- Batjes N.H., 2004. Estimation of soil carbon gains upon improved management within croplands and grasslands of Africa. *Environment, Development and Sustainability* **6**, 133-143.
- Batjes N.H., Sombroek W.G., 1997. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global Change Biology* **3** (2), 161-173.
- Bayala B., 2003. *Evaluation des ressources ligneuses dans un système agro-sylvo-pastoral de savane dans l'Ouest du Burkina Faso : cas du terroir de Torokoro.* Mémoires d'ingénieur du développement rural, CPU-IDR, Bobo-Dioulasso, 51 p.
- Bazile D., 1998. *Les gestions des espèces ligneuses dans l'approvisionnement en énergie des populations. Cas de la zone soudanienne du Mali.* Docteur en Géographie, Université de Toulouse le Mirail; Toulouse, 452 p.
- Belem M., 2005. *Couplage entre système multi-agents et modèle bioéconomique mathématique: application à la simulation de la dynamique des ressources en carbone d'un terroir au Burkina Faso.* Mémoire de DEA, Paris Dauphine, Paris.
- Benjaminsen T.A., 1996. Bois-énergie, déboisement et sécheresse au Sahel: le cas du Gourma malien. *Sécheresse* **3** (7), 179-185.
- Berger T., 2001. Agent-based spatial models applied to agriculture: a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics* **25** (2-3), 245-260.
- Bernoux M., Arrouays D., Cerri C.C., Bourennane H., 1998. Modelling vertical distribution of carbon in oxisols of the western Brazilian Amazon (Rondonia). *Soil Science* **163** (12), 941-951.
- Bertrand A., 1979. *Consommation et utilisation des combustibles ligneux en Afrique Occidentale et Centrale.* CTFT - FAO.
- Bertrand A., 1993. La sécurisation foncière, condition de la gestion viable de ressources naturelles renouvelables? In: Ganry F., Cambell B. (Eds.), *Sustainable land management in African semi-arid and subhumid regions*, Dakar, Sénégal, 1995, pp. 313-327.
- Boissau S., Anh H.L., Castella J.-C., 2004. The Samba role play game in northern Vietnam: an innovative approach to participatory natural resource management. *Mountain Research and Development* **24** (2), 101-105.
- Boissau S., Locatelli B., Weber J., 1999. Population and environment relationship: a U-shaped curve hypothesis. In: *International Symposium on Sustainable Ecosystem Management*, Chambéry, France.
- Bommel P., Libourel T., Lardon S., 2000. *Conception objet dans le cadre des systèmes d'information spatiaux. Agrégation spatiale et généralisation.*

- Bonkougou D.Y., 2004. *Déterminants socio-économiques de la gestion des ressources en carbone par les exploitants dans le terroir de Torokoro*. Mémoire de fin d'étude IDR, CPU-Bobo, Bobo-dioulasso.
- Bonnefoy J.-L., Bousquet F., Rouchier J., 2001. *Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi-agents: pâture en forêt virtuelle*.
- Bonnefoy J.-L., Le Page C., Rouchier J., Bousquet F., 2000. Modelling spatial practices and social representations of space using multi-agents. In: Ballot G., Weisbuch G. (Eds.), *Application of simulation to social science*. Hermès, Paris, pp. 155-168.
- Bonnet B., 1990. Elevage et gestion de terroirs en zone soudanienne. *Les Cahiers de la Recherche Développement* **25**, 43-67.
- Bontkes T.S., van Keulen H., 2003. Modelling the dynamics of agricultural development at farm and regional level. *Agricultural Systems* **76** (1), 379-396.
- Bonzi M., 2002. *Evaluation et déterminisme du bilan de l'azote en sols cultivés du centre du Burkina Faso: études par traçage isotopique, 15N au cours d'essais en station et en milieu paysan*. Thèse de Doctorat unique, Institut National polytechnique de Lorraine, Nancy, 177 p.
- Botoni E., Kara A., Augusseau X., Cornelius M., Saidi S., Daget P., 2003. Evolutions agraires et construction des paysages végétaux : l'exemple du village de Torokoro en zone Sud-soudanienne du Burkina Faso. In: *Communication au colloque SAGERT*, Montpellier, France, p. 16.
- Botoni H.E., 2003. *Interactions Elevage-Environnement. Dynamique des paysages et évolution des pratiques pastorales dans les fronts pionniers du Sud-Ouest du Burkina Faso*. Thèse de Doctorat, Université Paul Valéry Arts et Lettres, langues et Sciences Humaines et Sociales, Montpellier.
- Boulet R., 1976. Notice des cartes de ressources en sols de la Haute Volta. *Ministère de la coopération* (Notice explicative: carte à 1/500000 des unités agronomiques déduites de la carte pédologique), 97.
- Bousquet F., Bakam H., Proton H., Le Page C., 1998. Cormas: Common-pool resources and multi-agents systems. *Lecture Notes in Artificial Intelligence* **1416**, 826-837.
- Bousquet F., Barreteau O., D'Aquino P., Boissau S., Aubert S., Dabin D., Castella J.-C., 2000. Multi-agent systems and role games: collective learning process for ecosystem management.
- Bousquet F., Le Page C., 2004. Multi-agents simulation and ecosystems management: a review. *Ecological Modelling* **176**, 313-332.
- Bousquet F., Martine A., Weber J., 1994. Simulations multi-agents et gestion des ressources renouvelables. In: *Recherches-Système en Agriculture et Développement Rural. Systems-Oriented Research in Agriculture and Rural Development. Symposium International*, Montpellier, France, 21-25/11/1994. CIRAD, pp. 431-436.
- Breman H., Kessler J.J., 1995. *Woody Plants in Agro-Ecosystems of Semi-Arid Regions*. Advanced Series in Agricultural Sciences, Vol. 23. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 340 p.
- Brown S., 1997. *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. (FAO Forestry paper 134°*. FAO Forestry paper, Rome.
- Brown S., Lugo A.E., 1990. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology* **6** (1), 1-32.
- Cesar J., 1992. *La production biologique des savanes de Côte d'Ivoire et son utilisation : biomasse, valeur pastorale et production fourragère*. Thèse de doctorat en Sciences naturelles, Université de Paris 6, Paris, 671 p.
- Coleman K., Jenkinson D., 1995. RothC-26.3 A Model for the turnover of carbon in soil. In: Powlson D.S., Smith P., Smith J.U. (Eds.), *Evaluation of Soil Organic Matter Models*

- Using Existing Long-Term Datasets, Harpenden. *Global Environment Change*, pp. 237-246.
- CPCS, 1967. Commission de pédologie et couverture du sol. In.
- Crowley T.J., 2003. When did global warming start? *Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change : Scientific-Technical Analysis* **61**, 259-260.
- Daget P., Djellouli Y., 2002. Une approche écoclimatique des potentialités pastorales en régions sahéliennes. *Science et changements planétaires/ Sécheresse* **13** (2).
- Dajoz R., 1982. *Précis d'écologie*. Vol. quatrième édition augmentée, Paris, 495 p.
- D'Aquino P., Etienne M., Barreteau O., Le Page C., Bousquet F., 2000 *TC: jeux de rôles et simulation multi-agents: un usage combiné pour une modélisation d'accompagnement des processus de décision sur la gestion des ressources naturelles*.
- Detwiler R.P., 1986. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils. *Biogeochemistry* **2**, 67-93.
- Djarra A., 1998. *Contribution socio-économique de l'Igname dans la Comoé (cas de la zone de Mangodara)*. CAP-Matourkou, Bobo-Dioulasso.
- Drabo I., Ilboudo F., Tallet B., 2003. *Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers: Le Burkina Faso, une étude de cas*. INSS, INSD, FAO et CICRED, OUAGADOUGOU.
- Dugué P., 1998. Les transferts de fertilité dus à l'élevage en zone de savane. *Agriculture et Développement* **18**, 99-107.
- Enjalric F., 2004. *Déterminants édaphiques et anthropiques de la distributions granulométrique du carbone dans les lxisols tropicaux: Application à un terroir villageois de sud-ouest du Burkina Faso*. Mémoire de DEA en Science du sol, INAPG, Paris, Montpellier, 24 p.
- Falloon P.D., Smith P., Zabo J.S., Pasztor L., Smith J.U., Coleman K., Marshall S., 1999. Linking GIS and dynamic SOM models: estimating the regional carbon sequestration potential of agricultural management options. In: France J., Crompton L.A. (Eds.), 1999.
- FAO, 1982. *Développement des ressources forestières et renforcement du service forestier Haute Volta : La consommation de bois de feu*. PNUD FAO, Rome.
- FAO, 1989. *Studies on the volume and yield of tropical forest stands. Dry forest formations*. Forestry Papers, Vol. 51. Food and Agricultural Organisation, Rome, 112 p.
- FCCC, 1997. Protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. p. 24.
- Feller C., 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Application aux sols tropicaux, à textures grossières, très pauvres en humus. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie* **27** (4), 339-346.
- Feller C., 1995. La matière organique du sol et la recherche d'indicateurs de la durabilité des systèmes de culture dans les régions tropicales semi-arides et subhumides d'Afrique de l'Ouest. In: Ganry F., Campbell B. (Eds.), *Sustainable Land Management in African Semi-Arid and Subhumid Regions. Proceedings of the SCOPE Workshop*, Dakar, Senegal, 15-19/11/1993. CIRAD, pp. 123-130.
- Feller C., Albrecht A., Blanchard E., Cabidoche Y.M., Chevalier T., Hartmann C., Eschenbrenner V., Larre L.M.C., Ndandou J.F., 2001. Soil organic carbon sequestration in tropical areas. General considerations and analysis of some edaphic determinants for Lesser Antilles soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **61** (1-2), 19-31.
- Feller C., Beare M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* **79** (1-4), 69-116.

- Feller C., Fritsch E., Poss R., Valentin C., 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie* **26** (1), 25-36.
- Frontier S., Pichod-Viale D., 1998. *Ecosystèmes Structure Fonctionnement Evolution*. 2ème Edition/Ed. Dunod, 447 p.
- Gazel G., 2002. *Des migrants et des arbres : Impact de la population sur la durabilité de l'écosystème sud ouest du Burkina Faso : cas de Torokoro*. Mémoire de DESS, Paris VII, Paris, 48 p.
- Geist H., Lambin E., 2003. Is poverty the cause of tropical deforestation? *International Forestry Review* **5** (1), 64-67.
- GIECC, 1997. Protocole de Kyoto à la Convention cadre des NATIONS UNIES sur les changements climatiques. p. 24.
- Goldstone R.L., Janssen M.A., 2005. Computational models of collective behaviour. *TRENDS in Cognitive Sciences* **9** (9), 424-430.
- Grimm V., 1999. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? *Ecological Modelling* **115**, 129-148.
- GRN/SP, 1998. *Bilan des activités du projet front pionnier*. INERA-CIRAD-TERA, Ouagadougou.
- Guèye B., 1999. *Où va la participation? Expérience de l'Afrique de l'Ouest francophone*. Rep. No. Dossier no. 87. IIED, Londres.
- Gueye B., Freudenberg K.S., 1991. *Introduction à la méthode accélérée de recherche participative (MARP) Rapid Rural Appraisal : Quelques notes pour appuyer un formation pratique*. IIED.
- Hagberg S., 2001. A l'ombre du conflit violent : Règlement et gestion des conflits entre agriculteurs karaboro et agro-pasteurs peul au Burkina Faso. *Etudes d'Etudes Africaines*, 45-72.
- Hairiah K., Sitompul S.M., van Noordwijk M., Palm C.A., 2001a. *Carbon stocks of tropical land use systems as part of the global C balance: effects of forest conversion and options for 'clean development' activities*. International Centre for Research in Agroforestry, Bogor.
- Hairiah K., Sitompul S.M., van Noordwijk M., Palm C.A., 2001b. *Methods for sampling carbon stocks above and below ground*. International Centre for Research in Agroforestry, Bogor.
- Hansen T.S., Reenberg A., 1997. *Approaching local limits to field expansion - An analysis of land use patterns dynamics in Ningaré, semi-arid Burkina Faso, their local determinants and regional consequences*. Rep. No. 34. Sahel-Sudan Environmental Research Initiative.
- Henry S., Boyle P., Lambin E.F., 2003. Modelling inter-provincial migration in Burkina Faso, West Africa: The role of socio-demographic and environmental factors. *Applied Geography*.
- Hervé D., Genin D., Migueis J., 2002. A modelling approach for analysis of agro-pastoral activity at one farm level. *Agricultural Systems* **71**, 187-206.
- Hien V., 1990. *Pratiques curlturales et évolution de la teneur en azote organique utilisable par les cultures dans un sol ferrallitique du Burkina Faso*. Docteur de l'INPL, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires, Nancy, 149 p.
- Ingram J.S.I., Fernandes E.C.M., 2001. Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. *Agriculture Ecosystems & Environment* **87** (1), 111-117.
- IPCC, 2000. *Land Use, Land-Use Change, and Forestry*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.

- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- Izac A.-M.N., 1997. Developing policies for soil carbon management in tropical regions. *Geoderma* **79** (1-4), 261-276.
- Janzen H.H., 2006. The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it. *Soil Biology & Biochemistry* **36** (2006), 419-424.
- Jenkinson D.S., Meredith J., Kinyamario J.I., Warren G.P., Wong M.T.F., Harkness D.D., Bol R., Coleman K., 1999. Estimating net primary production from measurements made on soil organic-matter. *Ecology* **80** (8), 2762-2773.
- Jones M.J., 1973. The organic matter content of the savannah soils of West Africa. *Journal of Soil Science* **24** (1), 42-53.
- Jones M.J., Wild A., 1975. *Soils of the West African Savannah*. Technical Communications, Vol. 55. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, 246 p.
- Jorez P.-P., 1991. *Guide technique de l'économie du bois de feu : l'expérience du Sahel*. Lund centre for Habita Studies, Vol. report 1, 176 p.
- Jouve P., 1996. Les opérations de gestion de terroirs, un nouvel avatar des modes d'intervention en milieu rural en Afrique. In: Jouve P. (Ed.) *Gestion des terroirs et des ressources naturelles au Sahel*, CNEARC-Montpellier, 2-3 avril 1996. Chantal Mazzela-second, pp. 7-12.
- Jouve P., 2000. Jachères et systèmes agraires en Afrique sub-saharienne. In: Floret C., Pontanier R. (Eds.), *La Jachère en Afrique tropicale -Vol II. De la Jachère Naturelle à la Jachère Améliorée : Le Point des Connaissances*, Dakar, Sénégal, 13-16/04/1999. John Libbey, Paris, pp. 1-20.
- Jouve P., 2004. La croissance démographique, frein ou opportunité pour une intensification agricole durable en Afrique subsaharienne? Transition agraire et résilience des sociétés rurales. *Courrier de l'environnement de l'INRA N°52* (Septembre 2004), 101-106.
- Kaïré M., 1999. *La production ligneuse des jachères et son utilisation par l'homme au Sénégal*. PhD Thesis, Université d'Aix-Marseille I, Marseille, 115 p.
- Ker A., 1995. *Farming Systems in the African Savanna. A Continent in Crisis*. International Development Research Centre (IDRC), Ottawa, 176 p.
- Kotto-Same J., Woome P.L., Appolinaire M., Louis Z., 1997. Carbon dynamics in slash-and-burn agriculture and land use alternatives of the humid forest zone in Cameroon. *Agriculture Ecosystems & Environment* **65** (3), 245-256.
- Kowal J.M., Kassam A.H., 1978. *Agricultural Ecology of Savanna: a Study of West Africa*. Clarendon Press, Oxford, UK, 403 p.
- Lal R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* **304**, 1623-1627.
- Lambin E.F., Rounsevell M.D.A., Geist H.J., 2000. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? *Agriculture Ecosystems & Environment* **82** (1-3), 321-331.
- Le Page C., Etienne M., Bousquet F., 2001. Using dynamics spatial entities in agent-based simulations.
- Locatelli B., 1996. *Forêts Tropicales et Cycle du Carbone*. Repères. CIRAD, Paris, 91 p.
- Locatelli B., Boissau S., Weber J., 2004. Does population growth affect wooded-cover dynamics? In: Babin D. (ed.) Cirad-Unesco (Ed.) *Beyond Tropical Deforestation: From tropical deforestation to forest cover dynamics and forest development*, pp. 135-150.
- Locatelli B., Loisel C., 2002. Changement climatique: la vérité est-elle au fond du puits? Une analyses des contreverses sur les puits de carbone. *Natures Sciences Sociétés* **10** (4), 7-19.

- Lompo/Djarra B.C., 1998. *Diagnostic spécifique des systèmes de cultures à base d'igname dans la zone d'intervention du projet GEPRENAF*. CAP-Matourkou, Bobo-dioulasso.
- Lykke A.M., Mertz O., Ganaba S., 2002. Food consumption in rural Burkina Faso. *Ecology of Food and Nutrition* **41** (2), 119-153.
- Malezieux E., 2004. *Agriculture du sud, forêts tropicales, effet de serre : de nouveaux défis pour la recherche agronomique*. CIRAD, Montpellier, 50 p.
- Manlay R., 2000a. *Dynamique de la matière organique à l'échelle d'un terroir agro-pastoral de savane ouest-africaine (sud-Sénégal)*. Thèse de Doctorat, ENGREF, Paris, Paris, 326 p.
- Manlay R., 2001. *Dynamique de la matière organique à l'échelle d'un terroir agro-pastoral de savane ouest-africaine (Sud-Sénégal)*. Thèse de doctorat (soutenue en 2000, traduite de l'anglais), Série Environnement, ENGREF, Paris, 373 p.
- Manlay R.J., 2000b. *Organic matter dynamics in mixed-farming systems of the West African savannah: a village case study from south Senegal*. PhD Thesis, ENGREF, Paris, 278 p.
- Manlay R.J., Kairé M., Masse D., Chotte J.-L., Ciornei G., Floret C., 2002a. 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** (3), 215-232.
- Manlay R.J., Masse D., Chotte J.-L., Feller C., Kairé M., Fardoux J., Pontanier R., 2002b. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna - II. The soil component under semi-permanent cultivation. *Agriculture Ecosystems & Environment* **88** (3), 233-248.
- Mathevet R., Bousquet F., Le Page C., Antona M., 2003. Agent-based simulations of interactions between duck population, farming decisions and leasing of hunting rights in the Camargue (Southern France). *Ecological Modelling* **165**, 107-126.
- N'Dali D.Y., 2004. *Monographie de l'igname dans le système d'exploitation Doghossé à Torokoro, Rapport de stage de fin de première année option agronomie*. INERA-CPU-IDR, Ouagadougou.
- Nebjé G., 2000. *Contribution à l'étude des systèmes d'élevage dans la zone du front pionnier de migration : cas de Torokoro, département de Mangodara*. Centre Agricole Polyvalent de Matourkou, Bobo-Dioulasso.
- Nikiéma P., 2003. *Caractérisation de la biodiversité arborée des espaces agricoles dans une zone de front pionnier de migration : Cas du terroir de Torokoro au sud-ouest du Burkina Faso*. CNRST-INERA, Bobo-Dioulasso.
- Nikiéma P., 2004. *Establishment and indigenous management of Vitellari paradoxa parkland systems in the Southwestern part of Burkina Faso: A case study of Torokoro village*. Master's in Agroforestry, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumassi Ghana, 98 p.
- Noble I., Scholes R.J., 2001. Sinks and the Kyoto Protocol. *Climate Policy* **1**, 5-25.
- Olsson L., Ardo J., 2002. Soil carbon sequestration in degraded semiarid agro-ecosystems - Perils and Potentials. *Ambio* **31** (6), 471-477.
- Ouédraogo B., 2004. *Risque d'érosion à Torokoro*. Master, Rabat.
- Ouédraogo M., 2000. *Nouveaux acteurs au BF*. PNGT, Ouagadougou.
- Palé S.V., 2004. *Caractérisation des systèmes de production du terroir de Torokoro, Rapport de stage de fin de première année option agronomie*. INERA-CPU, Bobo-Dioulasso.
- Pansu M., Sallih Z., Bottner P., 1996. Modélisation des formes du carbone organique dans les sols. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris Série II Fascicule A - Sciences de la Terre et des Planètes* **322**, 401-406.

- Parton W.J., 1995. The CENTURY model. In: Powlson D.S., Smith P., Smith J.U. (Eds.), *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets*, Harpenden. Global Environment Change, pp. 283-291.
- Pavé A., 1994. *Modélisation en Biologie et en Ecologie*. Aléas, Lyon, 559 p.
- Pieri C., 1992. *Fertility of Soils : A Future for Farming in the West African Savannah*. Springer Series in Physical Environment. Springer-Verlag, Berlin, 348 p.
- Prudencio C.Y., 1993. Ring management of soils and crops in the West African semi-arid tropics - the case of the Mossi farming system in Burkina Faso. *Agriculture Ecosystems & Environment* **47**, 237-264.
- Rabot C., 1990. Transferts de fertilité et gestion des terroirs. *Les Cahiers de la Recherche Développement* **25**, 19-32.
- Ramade F., 1991. *Eléments d'écologie : écologie fondamentale*. Paris.
- Raynaut C., 2001. Societies and nature in the Sahel: ecological diversity and social dynamics. *Global Environmental Change* **11**, 9-18.
- Reenberg A., 1996. A hierarchical approach to land use and sustainable agricultural systems in the Sahel. *Quarterly Journal of International Agriculture* **1**, 63-77.
- Reenberg A., Lund C., 1997. *Land use and land right dynamics under conditions of population pressure - determinants for resource management options in eastern Burkina Faso*. Sahel-Sudan Environmental Research Initiative.
- Reid R.S., Thornton P.K., McCRabb G.J., Kruska R.L., Atieno F., Jones P.G., 2004. Is it possible to mitigate greenhouse gas emissions in pastoral ecosystems of the tropics? *Environment, Développement and sustainability* **6**, 91-109.
- Rieffel J.-M., Moreau R., 1968. *Etude pédologique de la Haute Volta région : Ouest-sud rapport général de synthèse*. Dakar.
- Rieffel J.-M., Moreau R., 1969. *Etude pédologique de la Haute-Volta region Ouest-Sud : Notice et carte*. ORSTOM, Dakar.
- Ringius L., 2002. Soil carbon sequestration and the CDM: Opportunities and challenges for Africa. *Climatic Change* **54** (4), 471-495.
- Ruqas J.F., Benoît-Cattin M., 1991. Modélisation technico-démographique des futurs alimentaires du Burkina Faso. *Les Cahiers de la Recherche Développement* N°29, 1-13.
- Ruthenberg H., 1971a. *Farming Systems in the Tropics*. Clarendon Press, Oxford, 313 p.
- Ruthenberg H., 1971b. Semi-permanent cultivation systems. In: *Farming Systems in the Tropics*. Clarendon Press, Oxford, pp. 55-82.
- Sadaoc, 1999. *Transformation du système alimentaire pour faire face aux défis d'une population urbaine croissante*. Actes de la table ronde de Bamako, Bamako, 62 p.
- Schlesinger W.H., 2000. Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. *Agriculture Ecosystems & Environment* **82**, 121-127.
- Schwartz D., Namri M., 2002. Mapping the total organic carbon in the soils of the Congo. *Global and Planetary Change* **33**, 77-93.
- Scoles M.C., Swift M.J., Heal O.W., Sanchez P.A., Ingram J., Dalal R., 1994. Soil fertility research in response to the demand for sustainability. In: Woomer P.L., Swift M.J. (Eds.), *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 1-14.
- Sebillotte M., 1974. Agronomie et agriculture, essai d'analyse des tâches de l'agronome. *Cahiers ORSTOM, Série Biologie* **24**, 3-25.
- Sedogo M.P., 1993. *Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité*. Thèse de doctorat d'Etat es sciences, Univ. Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan.

- Serpantié G., 2003. *Persistance de la culture temporaire dans les savanes cotonnières d'Afrique de l'Ouest : Etude de cas au Burkina Faso*. Doctorat de l'INA-PG-Agronomie, INA-PG, Paris, 321 p.
- Serpantié G., Mersadier G., Tezenas du Moncel L., 1985. La dynamique des rapports agriculture-élevage en zone soudano-sahélienne du Burkina-Faso : diminution des ressources, organisation collective et stratégie d'éleveurs-paysans au Nord du Yatenga. In: *Relations Agriculture-Elevage. Actes du Deuxième Séminaire du DSA/CIRAD*, Montpellier, France, 10-13/09/1985. CIRAD-DSA, pp. 264-274.
- Serpantié G., Mersadier G., Tezenas du Moncel L., Mersadier Y., 1988. Transformations d'un système agropastoral soudano-sahélien (Bidi; nord Yatenga; Burkina Faso). *Les Cahiers de la Recherche Développement* **20**, 29-41.
- Serpantié G., Ouattara B., 2000. Fertilité et jachère en Afrique de l'Ouest. In: Floret C., Pontanier R. (Eds.), *La Jachère en Afrique tropicale -Vol II. De la Jachère Naturelle à la Jachère Améliorée : Le Point des Connaissances*, Dakar, Sénégal, 13-16/04/1999. John Libbey, Paris, pp. 21-83.
- Serpantié G., Yoni M., Hien V., Abbadie L., Bilgo A., Ouattara B., 2002. Le carbone du sol dans les terroirs des savanes soudaniennes "cotonnières". Facteurs et dynamiques. In: Roose E. (Ed.) *Land-use management, erosion and carbon sequestration*, Montpellier, France, 23-28/09/2002. Réseau Erosion - IRD - CIRAD.
- Smith P., Falloon P., Coleman K., Smith J., Piccolo M.C., Cerri C., Bernoux M., Jenkinson D., Ingram J., Szabo J., Pasztor L., 2000. Modelling soil carbon dynamics in tropical ecosystems. In: Lal R., Kimble J.M., Stewart B.A. (Eds.), *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*. Crc Press Inc, Boca Raton, pp. 341-364.
- Sokona Y., 1995. Greenhouse gas emission inventory for Senegal, 1991. *Environmental Monitoring & Assessment* **38** (2-3), 291-299.
- Sokona Y., Denton F., 2001. Climate change impacts: can Africa cope with the challenges? *Climate Policy* **1** (1), 117-123.
- Spss, 1999. *SPSS Base 9.0 : User's Guide*. Marketing Department, Chicago, 740 p.
- StatSoft, 1995. *STATISTICA for Windows, version 6*.
- Stéphanne N., Lambin E.F., 2001. A dynamic simulation model of land-use changes in Sudano-sahelian countries of Africa. *Agriculture Ecosystems & Environment* **85**, 145-161.
- Swift M.J., 1998. L'intégration de la société, des systèmes et des sols. 20 p.
- Tieszen L.L., 2000. La séquestration du carbone dans les sols en Afrique semi-aride et sub-humide. *U.S. Geological Survey, EROS Data Center, Sioux Falls, South Dakota*, 4.
- Tonneau J.-P., Sabourin E., Marçal da Silveira L., Sidersky P., 2002. Modélisation des flux de biomasse: une approche de la fertilité dans l'Agreste de la Paraíba (Brésil). *Cahiers Agricultures* **11**, 127-136.
- Touré A., Rasmussen K., Diallo O., Diouf A., 2003. Actual and potential carbon stocks in the north-sudanian zone. A case study: The forest of Delbi and Paniates in Senegal. *Danish Journal of Geography* **103** (1), 45-52.
- Toure I., 2004. Elaboration d'un outil de simulation multi-agents pour la gestion durables des ressources naturelles d'un espace partagé: l'exemple de l'Unité pastorale (UP) de Thieul-Sénégal. Working paper DMP-CIRAD-04/8, Dakar, p. 17.
- Tschakert P., 2004. The costs of soil carbon sequestration: an economic analysis for small-scale farming systems in Senegal. *Agricultural Systems* **81**, 227-253.
- Tschakert P., Tappan G., 2004. Environmental Histories and Carbon Visions: Multi-scale assessment in the Old basin of Senegal. *Journal of arid Land Environments* **59** (2004) 535-564 .

- van den Bosch H., de Jager A., Vlaming J., 1998. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON): II Tool development. *Agricultural ecosystems and environment* **71** (1-3), 81-92.
- Verburg P.H., de Koning G.H.J., Kok K., Veldkamp A., Bouma J., 1999. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. *Ecological Modelling* **116**, 45-61.
- Verburg P.H., Schot P., Dijst M., Veldkamp A., 2004. Land use change modelling: current practices and research priorities. *GeoJournal*.
- Verburg P.H., Veldkamp A., 2001. The role of spatially explicit models in land-use change research: a case study for cropping patterns in China. *Agriculture Ecosystems & Environment* **85** (1-3), 177-190.
- Waneukem V., 1995. *Appréciation de la fourniture d'azote par le sol. Cas des sols cultivés en maïs de la zone Sud-Soudanienne du Burkina Faso*. Doctorat en Sciences agronomiques, Université de Montpellier II, Montpellier, 96+ annexes p.
- Wassmann R., Vlek P.L.G., 2004. Mitigating greenhouse gas emissions from tropical agriculture: scope and research priorities. *Environment, Développement and sustainability* **6**, 1-9.
- Weber J., 1978. Logique paysanne et rationalité technique: illustrations camerounaises. In: ORSTOM (Ed.) *Maîtrise de l'espace agraire et développement en AFrique tropicale : logique paysanne et rationalité technique*, Actes du colloque de Ouagadougou, 1979. ORSTOM, pp. 311-316.
- Woomer P.L., 1993. Modelling soil organic matter dynamics in tropical ecosystems: model adoption, uses and limitations. In: Mulongoy K., Merckx R. (Eds.), *Soil Organic Matter Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture. Proceedings of an International Symposium*, Leuven, Belgium, 4-6/11/1991. John Wiley & Sons, pp. 279-294.
- Ye L., 2002. *Inventaire des types d'associations anacrades+ Cultures dans le terroir de Torokoro, Rapport de stage de fin de première année option agronomie*. INERA-CPU, Bobo-Dioulasso.
- Zech W., Senesi N., Guggenberger G., Kaiser K., Lehmann J., Miano T.M., Miltner A., Schroth G., 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* **79** (1-4), 117-161.

Tables des tableaux :

Tableau 1: Pluviométrie mesurée sur la station météorologique de Mangodara (15 km de Torokoro)	23
Tableau 2: Nombre de parcelles échantillonnées par occupation de sol et système d'exploitation	31
Tableau 3: Taux d'éléments fins dans les deux premiers horizons	35
Tableau 4: Estimation des paramètres d'une régression des teneurs en C du sol en fonction de la profondeur du sol de 14 profils pédologiques	36
Tableau 5: Estimation des paramètres d'une régression des teneurs de C du sol sur 115 parcelles sur les 0-10 et 10-20 cm	38
Tableau 6: Stocks moyens et cumulés de C par classe de profondeurs dans les fosses	39
Tableau 7: Stocks de C dans les deux systèmes de culture en parcelles cultivées ou non (moyenne et erreur standard)	40
Tableau 8: Nombre de parcelles inventoriées par occupation du sol dans les deux systèmes de production	48
Tableau 9: Tarifs de biomasse pour l'estimation de la matière sèche des arbres	49
Tableau 10: Teneur moyennes en C des principaux compartiments végétaux	50
Tableau 11: Densités des individus, dendrométrie et biomasse ligneuses dans les systèmes de production	54
Tableau 12: Estimation des paramètres des régressions dans les espaces non cultivés en système de culture itinérante	58
Tableau 13: Estimation des paramètres des régressions dans les espaces cultivés en système de culture itinérant	59
Tableau 14: Estimation des paramètres des régressions dans les espaces cultivés en système de culture permanent	59
Tableau 15: Principales règles de gestion commune des acteurs en fonction de leur rôle et des objectifs	69
Tableau 16: Objectifs des règles individuelles des exploitants agricoles	70
Tableau 17: Caractéristiques démographiques des exploitations enquêtées	71
Tableau 18: Surfaces emblavées dans les deux systèmes de production (ha)	72
Tableau 19: Ratio surfaces agricoles dans les deux systèmes	72
Tableau 20: Consommation des céréales dans les exploitations agricoles des deux systèmes de production	75
Tableau 21: Revenus monétaires par exploitations agricoles et par personne	77
Tableau 22: Principales successions culturales dans les deux systèmes de production	86
Tableau 23: Paramètres de MIROT	90
Tableau 24: Les variables de sorties du Modèle MIROT	96
Tableau 25: Scénarios simulés	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 26: Analyses statistiques sur quelques variables	111
Tableau 27: Impact de l'effet des plantations d'anacardiens	114

Tables des Figures :

Figure 1: Flux de matières à l'échelle des agro écosystèmes de savanes (Manlay, 2000a)	12
Figure 2: Problématique de la dynamique des ressources organiques en zone de savane d'Afrique de l'Ouest	16
Figure 3: SMA appliqué au terroir, tiré de Manlay, 2002	17
Figure 4: Localisation du terroir de Torokoro et des parcelles échantillonnées	23
Figure 5: Succession culturale dans les deux principaux systèmes de production	25
Figure 6 : Localisation du terroir de Torokoro et des parcelles échantillonnées	30
Figure 7: Dispositif d'échantillonnage dans les parcelles	32
Figure 8 : Densité apparente en fonction de la profondeur du sol	34
Figure 9: Distribution en profondeur de C par type de sols cultivés ou non cultivés	37
Figure 10: Teneurs en C de l'horizon 10-20 en fonction de celles de l'horizon 0-10 cm	38
Figure 11: Relation entre les stocks des horizons 0-10, 10-20 et 20-30 cm avec le stock total de l'horizon 0-50 cm	39
Figure 12: Influence de la position dans la succession culturale sur les stocks de C dans le système de culture itinérant	41
Figure 13: Influence de l'intensité culturale sur les stocks de C dans les sols en système de culture permanent	41
Figure 14: Plan d'échantillonnage des racines épaisses dans les parcelles	50
Figure 15: Description de la succession culturale dans les deux principaux systèmes de production du terroir	51
Figure 16: Impact des types d'usages des terres sur le nombre d'espèce en SCI	53
Figure 17: Diminution de la biomasse dans le SCI en fonction des usages des terres	55
Figure 18: Biomasse et stocks de C dans les sous compartiments arborés en zone cultivée ou non cultivée	56
Figure 19: Stocks totaux de biomasse, C dans les différents domaines comparés à la forêt	57
Figure 20: Stockage de la biomasse dans les jachères en système itinérant	58
Figure 21 : Carte du terroir de Torokoro	66
Figure 22: Modèle conceptuel simplifié des flux et stocks dans l'exploitation agricole	67
Figure 23: Succession de la mise en culture au cours des années des parcelles dans le SCI	73
Figure 24: Succession de la mise en culture au cours des années dans le SCP	74
Figure 25: Consommation céréalière dans les deux types d'exploitations par tête et par an	76
Figure 26: Consommation de bois par tête en saison sèche et en saison humide dans les deux types d'exploitation	78
Figure 27: Diagramme d'activité d'une exploitation agricole	92
Figure 28: Etat de transition d'une parcelle au cours de la succession culturale	93
Figure 29: Règles de mise en culture d'une parcelle en système de culture itinérant	94
Figure 30: Règles de mise en culture des parcelles dans le système de culture permanent	95
Figure 31: Diagramme de déroulement de la négociation entre deux exploitants agricoles	99
Figure 32: Cartes d'occupation du terroir pendant les simulations	106
Figure 33 : Evolution des populations dans le terroir, scénario 1	107
Figure 34: évolution des proportions du terroir sous forêt et sous plantation, scénario 1	108
Figure 35: Dynamique de la biomasse arborée dans les espaces non cultivés dans les deux types de domaines, scénario 1	109
Figure 36 : Evolution de la biomasse végétale du terroir, scénario 1	109
Figure 37: Carbone total des compartiments sol et plante et du terroir, scénario 1	110
Figure 38: Croissance de la population suivant trois taux de croissance démographique, scénario 1	111
Figure 39: Impact de la démographie sur les stocks de carbone	112
Figure 40: Relation démographie, surface en forêt et en plantation, scénario 1	112
Figure 41: Relation carbone arboré et densité de la population	113
Figure 42: Carbone total du terroir en fonction de la densité de la population	113
Figure 43: Impact des plantations d'anacardiés sur les surfaces cultivées, scénario 1	114
Figure 44: Effet des plantations sur les surfaces de coton et igname, scénario 1	115
Figure 45: Effet des plantations sur les surfaces en maïs et en sorgho	116
Figure 46: Effet des plantations sur les stocks d'argent chez les populations autochtone et migrante	117
Figure 47: Impact de besoins en argent sur le carbone arboré aérien et du terroir	118
Figure 48 : Effet de la pluviométrie sur les ressources du terroir	118

Annexes :

Annexe 1: Densité apparente mesurées sur les parcelles.....	139
Annexe 2: Taux d'éléments fins dans les différents horizons en fonction de l'utilisation.....	140
Annexe 3: Impact des systèmes de production sur les teneurs et stocks de C.....	140
Annexe 4: Répartition des espèces inventoriées.....	141
Annexe 5: Diagramme de classe du modèle MIROT.....	143
Annexe 6: Diagramme de séquence du modèle MIROT.....	144

Annexe 1: Densité apparente mesurées sur les parcelles

Densité apparente (Da) moyenne sur les parcelles pour les deux horizons (0-10 et 10-20 cm)
par système de culture et occupation du sol

Système	Statut Occupation	Horizon (cm)	Da (g cm ⁻³)	N
Autochtone	Cultive	0-10	1,24 ± 0,03	24
		0-20	1,14 ± 0,06	23
Autochtone	Non cultivée	0-10	1,23 ± 0,04	21
		10-20	1,14 ± 0,07	22
Autochtone	Moyenne	0-10	1,24 ± 0,03	45
		10-20	1,14 ± 0,05	45
Migrant	Cultive	0-10	1,19 ± 0,03	17
		10-20	1,07 ± 0,05	17
Migrant	Non cultivée	0-10	1,17 ± -	1
		10-20	1,08 ± -	1
Migrant	Moyenne	0-10	1,19 ± 0,03	18
		10-20	1,07 ± 0,05	18
Moyenne	Cultive	0-10	1,22 ± 0,02	41
		10-20	1,11 ± 0,04	40
Moyenne	Non cultivée	0-10	1,23 ± 0,04	22
		10-20	1,14 ± 0,07	23
Moyenne	Moyenne	0-10	1,23 ± 0,02	63
		10-20	1,12 ± 0,04	63

Densité apparente (Da) moyenne dans les fosses pédologiques

Profondeur (cm)	Effectif (N)	Da (g cm ⁻³)
0-10	17	1,35 ± 0,04
10-20	17	1,22 ± 0,06
20-30	16	1,25 ± 0,07
30-50	13	1,13 ± 0,1
50-100	10	1,2 ± 0,12
100-150	4	1,53 ± 0,09

Annexe 2: Taux d'éléments fins dans les différents horizons en fonction de l'utilisation

Taux d'éléments fins (Argiles+limons fins) en % (0-10 cm)

Peuplement	Etat cultural	N	TxEIFin	
Forêt	Non	4	13,02	± 1,37
Forêt	Moyenne	4	13,02	± 1,37
Migrant	Non	5	13,96	± 2,39
Migrant	Oui	28	13,86	± 0,73
Migrant	Moyenne	33	13,87	± 0,68
Autochtone	Non	35	14,12	± 0,69
Autochtone	Oui	36	14,10	± 0,65
Autochtone	Moyenne	71	14,11	± 0,47
Moyenne	Non	44	14,00	± 0,60
Moyenne	Oui	64	13,99	± 0,48
Moyenne	Moyenne	108	14,00	± 0,37

n = nombre de mesures

TxEIFin = Taux d'éléments fins (Argiles+Limons fins en %)

Taux d'éléments fins (Argiles+limons fins) en % (10-20cm)

Peuplement	Etat cultural	N	TxEIFin	
Migrant	Oui	12	15,86	± 1,66
Migrant	Moyenne	12	15,86	± 1,66
Autochtone	Non	24	17,49	± 1,84
Autochtone	Oui	23	17,23	± 1,46
Autochtone	Moyenne	47	17,36	± 1,14
Moyenne	Non	24	17,49	± 1,80
Moyenne	Oui	35	16,76	± 1,08
Moyenne	Moyenne	59	17,06	± 0,96

n = nombre de mesures

TxEIFin = Taux d'éléments fins (Argiles+Limons fins en %)

Annexe 3: Impact des systèmes de production sur les teneurs et stocks de C

Variable	Source de variation	Somme des carrés des écarts	df	Cafré moyen	F	Sig.
CTCHNDK	Between Groups	105,173	1	105,173	14,780	0,000
	Within Groups	1110,078	156	7,116		
	Total	1215,250	157			
STOCKC	Between Groups	186,348	1	186,348	20,795	0,000
	Within Groups	1397,966	156	8,961		
	Total	1584,314	157			

CTCHNDK= carbone total mesuré au CHN à Dakar

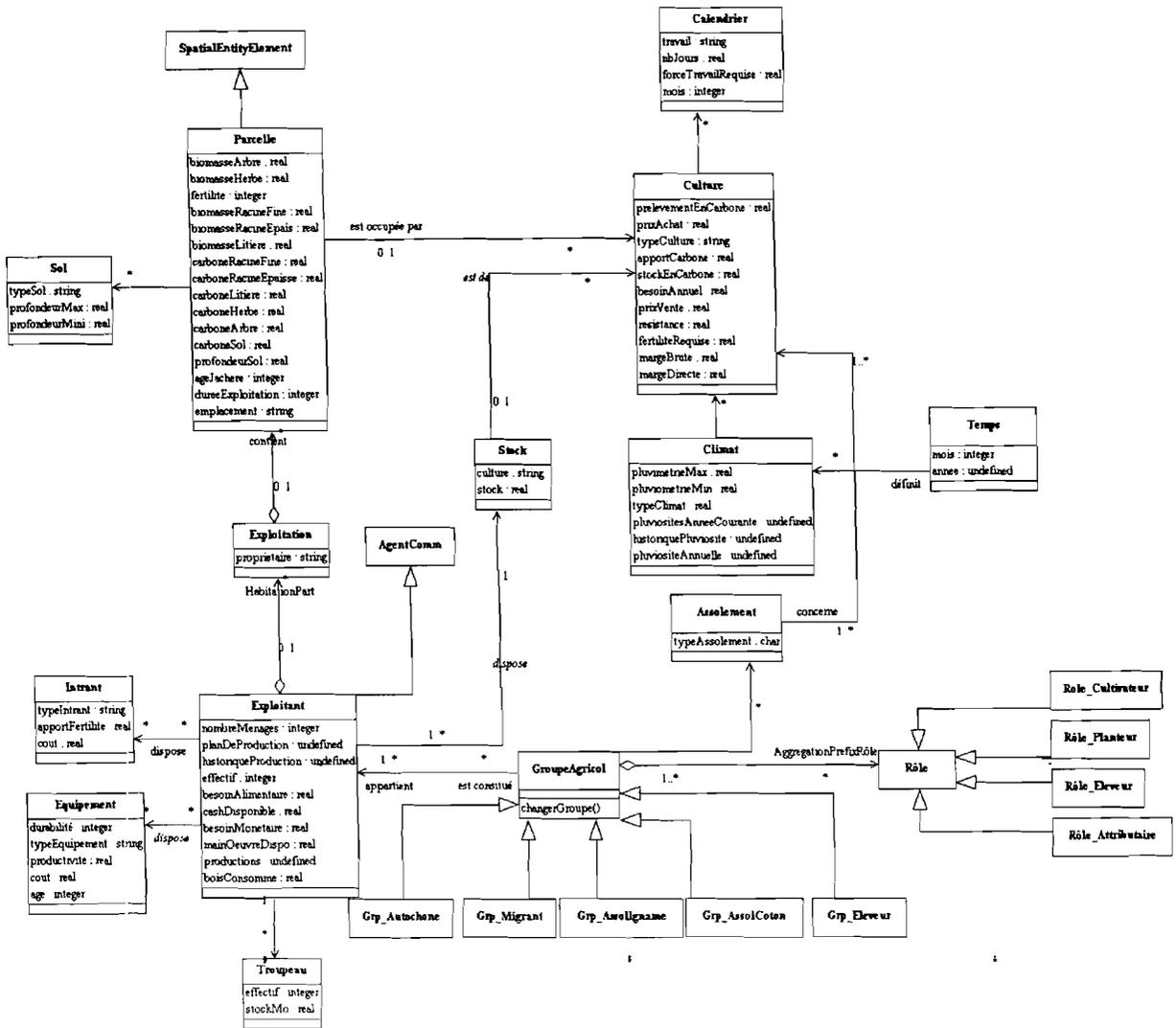
STOCKC= stock de carbone

Annexe 4: Répartition des espèces inventoriées

Familles botaniques	Espèces
ANACARDIACEAE	<i>Anacardium occidentale</i> L. <i>Sclerocarya birrea</i> (A.Rich.) Hochst <i>Lannea microcarpa</i> Engl.et K. Krause
BOMBACACEAE	<i>Bombax costatum</i> Pellegr.et Vuillet
CAESALPINIACEAE	<i>Ceiba pentandra</i> (L) Gaertn <i>Isoberlinia doka</i> Craib et Stapf <i>Isoberlinia dabzielii</i> Craib et Stapf <i>Piliostigma thonningii</i> (Schum.) Milne-Redh <i>Daniella oliveri</i> (Rolfe) Hutch.et Dalz <i>Detarium microcarpum</i> Guill.et Perr. <i>Tamarindus indica</i> L. <i>Piliostigma reticulatum</i> (DC.) Hochst <i>Afzelia africana</i> Smith ex Pers. <i>Burkea africana</i> Hook.
CELASTRACEAE	<i>Maytenus senegalensis</i> (Lam.) Excell
CHRYSOBALANACEAE	<i>Maranthes polyandra</i> (mâle)(Benth.)Prance
COMBRETACEAE	<i>Anogeissus leiocarpus</i> (DC.) Guill.et Perr <i>Combretum collinum</i> (Fresen.) <i>Combretum molle</i> (R. Br.ex G. Don) <i>Terminalia avicennoides</i> Guill.et Perrott <i>Terminalia macroptera</i> Guill.et Perrott <i>Terminalia</i> sp <i>Pteleopsis suberosa</i> Engl.et Diels

DIPTEROCARPACEAE	<i>Monotes kerstingii</i> (Gilg)
EBENACEAE	<i>Diospyros mespiliformis</i> Hochst.ex.A.DC.
EUPHORBIACEAE	<i>Hymenocardia acida</i> Tul.
FABACEAE	<i>Pterocarpus erinaceus</i> Poir. <i>Pericopsis laxiflora</i> (Benth.) van Meeuwen
LOGONIACEAE	<i>Strychnos spinosa</i> Lam.
MELIACEAE	<i>Pseudocedrela kotschii</i> (Schweinf.) Harms <i>Khaya senegalensis</i> (Desr.) A. Juss.
MIMOSACEAE	<i>Acacia albida</i> (Del.) A. Chev. <i>Acacia gourmaensis</i> A. Chev. <i>Acacia dudgeoni</i> Craib ex Holl. <i>Parkia biglobosa</i> (Jacq.) Benth. <i>Acacia Senegal</i> (L.) Willd. <i>Prosopis africana</i> (Guill.,Perrot.et Rich.) Taub
MYRTACEAE	<i>Eucalyptus sp.</i> Denhardt
MORACEAE	<i>Ficus sp</i> <i>Ficus gnaphalocarpa</i> (Miq.) Steud.ex A. Rich.
OLACACEAE	<i>Ximenia Americana</i> L.
RUBIACEAE	<i>Mitragyna inermis</i> (Wild.) O.Ktze. <i>Sarcocephalus latifolius</i> (Smith) Bruce
SALICACEAE	<i>Zanthoxylum zanthoxiloydes</i> (Larn.) Watermann
SAPOTACEAE	<i>Vitellaria paradoxa</i> Gaertn. F. <i>Manilkara multinervis</i> (Bak.) Dubard
STERCULIACEAE	<i>Sterculia setigera</i> Del. <i>Cola cordifolia</i> (Cav.) R. Br.
VIOLACEAE	<i>Uapaca togoensis</i> Pax

Annexe 5: Diagramme de classe du modèle MIROT



Annexe 6: Diagramme de séquence du modèle MIROT

