

Modèle Multi-Agents pour la simulation de la dynamique de Carbone à l'échelle du terroir villageois

Multi Agents Model for carbone dynamic simulation at village area scale

Youl S.¹;
Bélem M.²;
Barbier B.³;
Manlay R. J.⁴;
Masse D.⁵

¹Centre International pour la Fertilité des Sols et le Développement Agricole (IFDC) CMS 11 BP 82, Ouagadougou 11 Burkina Faso,
Tél. : (+226) 50 37 43 03/05
E-mail : syoul@ifdc.org

²Doctorant en Informatique, Institut de Recherche pour le Développement (IRD-Montpellier), ENGREF 648, rue Jean-François Breton
BP 44494 - 34093 Montpellier Cedex 5 FRANCE ENGREF-Montpellier-France,
E-mail : mabelem2003@yahoo.fr

³CIRAD-Ouagadougou, Av. du Président Kennedy, 01 BP 596 Ouagadougou 01 Burkina Faso,
Tél. : (+226) 50 30 70 70
Fax : (+226) 50 30 76 17
E-mail : bbarbier@cirad.fr

⁴DFRT/UR IRD 179 SeqBio, 648, rue Jean-François Breton BP 44494 - 34093 Montpellier Cedex 5, France ;
Tél. : (+33) 4 67 04 71 26
Fax : (+33) 4 67 04 71 01
E-mail : manlay@engref.fr

⁵I.R.D. (Institut de Recherche pour le Développement), UR 179 SeqBio, 01 BP 182 Ouagadougou Burkina Faso,
Tél. : (+226) 50 30 67 37
Fax : (+226) 50 31 03 85
E-mail : dominique.masse@ird.bf

Résumé

Un système multi-agents (SMA) a été conçu et mis en œuvre en vue d'étudier la dynamique des ressources organiques et azotée d'un terroir africain. Les simulations réalisées ont permis de mesurer l'impact des modes de gestion sur les ressources dans le long terme. Trois types d'enquêtes ont été nécessaires pour collecter les données nécessaires. Un premier modèle à l'échelle de la parcelle a permis de simuler le stockage du carbone et de l'azote dans les sols et dans la biomasse végétale. Ensuite la définition des règles individuelles et collectives de décision et de gestion des exploitations agricoles et du terroir ont nécessité des enquêtes approfondies avec les principaux groupes utilisant le terroir. Pour la conception informatique du modèle, le formalisme UML a été utilisé. La représentation statique et dynamique du modèle a été formalisée sur la plate forme de modélisation CORMAS. La méthode développée est appelée MIROT Modélisation Intégrée de la dynamique des Ressources Organiques et analyse de viabilité de Terroirs agro-sylvo-pastoraux des savanes ouest africaines). Le modèle MIROT utilise un fond de carte du terroir avec des contraintes spatiales pour simuler le fonctionnement de celui-ci.

Mots clés : Système multi-agents (SMA), UML, CORMAS, modélisation, ressources organiques, dynamique du carbone, Burkina Faso.

Abstract

A multi-agents system (MAS) was conceived and implemented in order to study the organic resources dynamic within a local small region. The simulations permitted to measure the impact of population growth on natural resources in the long term. Three categories of data were necessary. A first plot level model permitted to simulate the storage of carbon and nitrogen in the soil and in the vegetal biomass. Then individual and collective farmer's decision rules were drawn from in depth surveys among the major groups of stakeholders. The UML formalism was used to design the model and the static and dynamic

representation of the model was drawn under the CORMAS modelling platform. Model MIROT uses the region map background with spatial constraints to simulate this one good working order. The whole model is called MIROT meaning "Integrated modelling of the dynamics of the Organic Resources and analyzes viability of agro-sylvo-agro-sylvo-pastoral Soils of African western savannas".

Key words: multi-agents System (MAS), UML, CORMAS, modelling, carbon organic resources dynamics, Burkina Faso

1. Introduction

Les modèles de simulation de type multi-agents (SMA) sont de plus en plus utilisés pour simuler l'évolution des systèmes agraires (Berger, 2001). 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) (Bousquet et al., 1994), en particulier à l'échelle des exploitations agro-pastorales (Hervé et al., 2002). Ils sont considérés comme une alternative aux modèles mathématiques classiques car ils prennent en compte les modes de coordination et les stratégies des acteurs (Bakam, 2003). 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., 2000), (Boissau et al., 2004). Cette approche (SMA et jeu de rôle) permet de mettre les acteurs en situation de négociation. Les SMA permettent la représentation d'interaction entre individus, espaces et leur environnement (Bonney et al. 2001) et favorisent ainsi l'étude simultanée de dynamiques sociales, techniques et écologiques (Bousquet et Le Page, 2004). Enfin, les SMA sont adaptés à l'échelle du 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).

D'autres approches de modélisation peuvent prédire les changements d'usage des terres (Lambin et al., 2000). Comme les modèles empiriques-statistiques, d'optimisation qu'ils soient déterministes ou stochastiques. Les solutions déterministes sont peu applicables aux systèmes agraires car en réalité les paysans diversifient pour minimiser les risques. L'optimisation ne prend pas en compte les interactions entre exploitants (Berger, 2001). Il en est de même des modèles bioéconomiques qui peuvent associer l'optimisation 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, mais n'ont pas la souplesse nécessaire, car les groupes sont en fait des agrégations d'individus ou agrégation d'exploitations. Les individus ou exploitations collaborent alors que dans la réalité les agents sont souvent en compétition.

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). En plus de leur caractère dynamique, les SMA sont spatialement explicites (Stéphanne et Lambin, 2001). C'est pourquoi le SMA Modélisation Intégrée de la dynamique de ressources organiques et analyse de viabilité des terroirs agro-sylvo-pastoraux de savane Ouest africaine (MIROT) a été construit. En effet la matière organique est à la fois un bien de consommation et moyen de production dans les savanes africaines (Manlay, 2001). C'est une ressource polyvalente pour les agricultures à faible niveau d'intrants. 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 viabilité² du système (Manlay, 2000). Pourtant ces ressources organiques se raréfient pour des raisons naturelles (climatiques) ou anthropiques (changement d'usage et changement d'affectation des terres, démographie). Un SMA peut rendre compte de cette dynamique de la ressource à l'échelle d'un terroir sous différents scénarios.

Dans cette étude un SMA a été mis au point pour simuler la dynamique des ressources organiques dans les zones de savanes d'Afrique de l'Ouest (ZSAO) pour plusieurs raisons. 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 socio-économiques ont été établis à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation. Ces modèles parcelaires de stockage dans le système sol-plante du carbone et de l'azote ont été intégrés dans le SMA. 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. D'importantes sources bibliographiques additionnelles 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.

L'objectif de l'étude est de concevoir, programmer et valider un SMA pour simuler la dynamique du carbone et de l'azote 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 et N dans un terroir de savane
- Programmer ce modèle en utilisant la plateforme CORMAS développé par le CIRAD,
- Calibrer ce modèle à partir des données

collectées pendant trois campagnes de terrain et d'autres données bibliographiques,

2. Le terroir et les exploitations agricoles

Le terroir de Torokoro est situé au sud du Burkina Faso en zone climatiques soudano guinéenne. Il couvre une superficie de 15000 ha. En 1998 15% de celui-ci était sous forêt claire, 61 % en savane arborée, 21 % en cultures et le reste en plantation, habitats ou formations ripicoles (Botoni, 2003). Deux catégories d'exploitants agricoles coexistent : les autochtones (AU), et les migrants (MI). Ces deux catégories d'exploitation se distinguent principalement par leur système de culture (Tableau 1). Les autochtones (les Dogosshé) pratiquent un système de culture traditionnel à base d'igname (*Discorea cayensis-rotundata* et *Discorea alata*, une variété introduite appelée Florido). Quant aux migrants, ils pratiquent un système de culture continu basé sur la culture du coton.

Dans le système traditionnel, en première année c'est l'igname qui est cultivé après défriche de la savane ou, plus couramment, d'une vieille jachère. La perte de fertilité implique ensuite la culture d'une céréale (maïs, sorgho) qui ne peut, sans engrais comme c'est généralement le cas, être maintenue pendant plus de quatre ou cinq ans, avant l'abandon de la parcelle et sa remise en jachère. La plantation d'anacardiens durant la phase de culture est une pratique de plus en plus répandue. La culture annuelle est interrompue lorsque le couvert arboré est trop important (5-6 ans) (système traditionnel alternatif). Le système à base de coton est plutôt pratiqué par les migrants. 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-permanent. Il existe également un système développé par les migrants et qui consiste à planter des anacardiens dans les cultures. Les pasteurs peulhs sont un cas particulier d'exploitation mais sont aussi des migrants.

² Viabilité d'un écosystème : aptitude de celui 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 valeurs définies, pour un état initial et durant une période donnée.

3. Conception et programmation informatique

Cette section porte sur la description du modèle à travers la description de sa structure, la dynamique, des paramètres et des variables de sortie. Le langage UML est utilisé pour illustrer la structure et la dynamique du modèle. Ainsi, les classes du modèle et la structure de celui-ci ainsi que les diagrammes d'activités de quelques agents et les règles de mise en culture des parcelles ont été présentées. Les échanges et négociations entre exploitants agricoles ont été exposés et enfin les perspectives de ces mêmes exploitations agricoles. La plate-forme de simulation utilisée est CORMAS (Common-Pool Ressources and Multi-Agent System) de l'équipe « Green » du CIRAD (Bousquet et al., 1998).

3.1 Le modèle mirot : structure et dynamique

La structure du modèle est basée sur deux types d'agents et un ensemble d'objets permettant de structure l'environnement des agents (Figure Annexe 1).

Les deux types d'agents sont l'Exploitant et le Troupeau. L'agent exploitant est caractérisé par son type (autochtone ou migrant), l'effectif de sa concession, la main d'œuvre dont il dispose, ses équipements agricoles, son troupeau de bovins, son domaine d'exploitation, la quantité d'argent dont il dispose et son stock de nourriture. L'agent Troupeau est un agent situé capable de se déplacer. Son comportement est régi par des contraintes spatiales. L'objectif principal du troupeau est la satisfaction de son besoin en fourrage et en eau.

Tableau 1 : Principales successions culturales dans les deux systèmes de production

Succession culturale				
Autochtone			Migrant	
Nbre d'années	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

3.1.1 L'organisation spatiale du modèle

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. Une parcelle est caractérisée par le type de sol, son couvert végétal, son occupation (culture, forêt), le stock en carbone et en azote.

Le **deuxième niveau** est formé par des entités du premier niveau regroupées en fonction de leur occupation pour former les entités fonctionnelles telles que les forêts ou 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 constitué des entités de niveau 1 et des entités de niveau 2.

L'espace de simulation est reproduit grâce à une importation des données spatiale vers CORMAS. Cette importation basée sur la carte morphopédologique de Torokoro vise à augmenter le réalisme du modèle et à tenir compte des contraintes spatiales sur le comportement des individus. Les types de sol de l'environnement de simulation sont définis à partir de la carte morphopédologique. Une carte étant représentée par des points, chaque point correspond à une cellule. Chaque cellule représente une parcelle 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.

La carte est constituée de 24 462 points donc autant de cellules sous Cormas. La taille minimum d'une exploitation est de 25 cellules. Le terroir supporte 310 à 314 exploitations agricoles. Un exploitant ne pouvant gérer qu'une exploitation à la fois, dans le pire des cas (lorsque tout le terroir est occupé) le nombre d'exploitants est de 314 au maximum. Si chaque exploitant dispose d'un troupeau, alors le terroir supporte 314 troupeaux. Globalement, à la saturation, le modèle simule 628 agents actifs.

L'emplacement des exploitants dépend de leur appartenance (migrante ou autochtone) conformément à la réalité. Les exploitants ont tendance à se regrouper en fonction de leur appartenance sociale.

3.1.2 La dynamique du modèle

La dynamique du modèle prend en compte les relations entre la démographie, la production agricole, le cheptel, la pluviosité et la dynamique du carbone. Des dynamiques existent à des échelles de temps différentes : le mois et l'année.

La pluviosité mensuelle est égale à la pluviosité mensuelle moyenne et corrigée d'un terme aléatoire compris entre + et - 20% de cette valeur moyenne. A la fin de la période hivernale, la pluviosité annuelle est calculée. La pluviosité annuelle calculée est historisée et servira de mémoire pour les exploitants. Elle influence le rendement de culture.

La population totale est soumise à une croissance démographique de 2,5% an-1 conformément aux taux observés dans la zone. Dans le modèle la croissance des concessions définit la génération de la population. Chaque année l'effectif des concessions augmente en fonction du taux de croissance. Le taux de croissance est dynamique, il évolue en fonction de la population totale et la charge du terroir. Il est défini par le modèle logistique :

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

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.

Le cheptel

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 a été utilisé. 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.

L'objectif de l'exploitant est de satisfaire ses besoins alimentaires et monétaires qui sont fonction de l'effectif et du besoin annuel par personne. Cependant, ses règles de décisions sont soumises à plusieurs contraintes : disponibilité en terres cultivables, en main d'œuvre, en argent, en fertilisants, la fertilité des sols. Pour représenter les règles de décision du paysan, nous utilisons un modèle d'optimisation économique.

Ce modèle d'optimisation optimise l'utilité du paysan qui est la satisfaction de ses besoins. Il prend en compte les ressources disponibles (argent, fertilisants organiques et minéraux), les besoins (en argent et en nourriture), la répartition des cultures dans les différents usages (consommation et vente), les surfaces disponibles pour chaque culture et leur rendement. Le rendement d'une culture correspond au plus faible rendement au cours de ces cinq dernières années. En sortie, le modèle d'optimisation définit la surface à cultiver pour culture, la quantité de fertilisants organiques et minéraux nécessaires pour atteindre les objectifs de l'exploitant.

Les règles de décision de l'exploitant sont décrites comme suite. Dans un premier temps, l'exploitant définit ses besoins en argent et en nourriture et les ressources disponibles. Ensuite, il définit son plan

de production qui détermine la surface à cultiver pour chaque culture. Il procède à la mise en culture et gère les cultures jusqu'à la récolte.

Après chaque récolte, l'exploitant définit un plan de vente. Le plan de vente détermine pour chaque culture la quantité à stocker et à vendre pour satisfaire les besoins. La satisfaction des besoins est une condition de stabilité des exploitants. Lorsque les besoins alimentaires n'ont pas été satisfaits et le cash n'a pas été suffisant, une partie de la concession migre vers une nouvelle exploitation ou quitte

chaque exploitation sont sur des sols peu profonds (pp) ou profonds (p). Les parcelles sont situées sur trois positions topographiques (haut de pente, moyenne pente et bas de pente) et dans les basfonds. Une parcelle non bâtie, à un moment donné, supporte une ou plusieurs couvertures végétales (Forêt, Jachère, Culture, Plantation).

Les parcelles cultivées sont mises en jachère lorsque leur fertilité est insuffisante ou lorsqu'elles sont en fin de rotation. Les parcelles en jachère ont

des âges variables de 1 à 10 ans et plus. Elles sont utilisées pour la culture lorsque les parcelles disponibles sont insuffisantes ou lorsque leur fertilité est suffisante. Les champs peuvent être semencés par des céréales (maïs, sorgho, riz), par l'igname, le coton ou par des légumineuses (arachide, niébé, sésame) en fonction du système de production. Les cultures peuvent recevoir de la fertilisation organique (fumier, résidus) ou minérale (engrais mi-

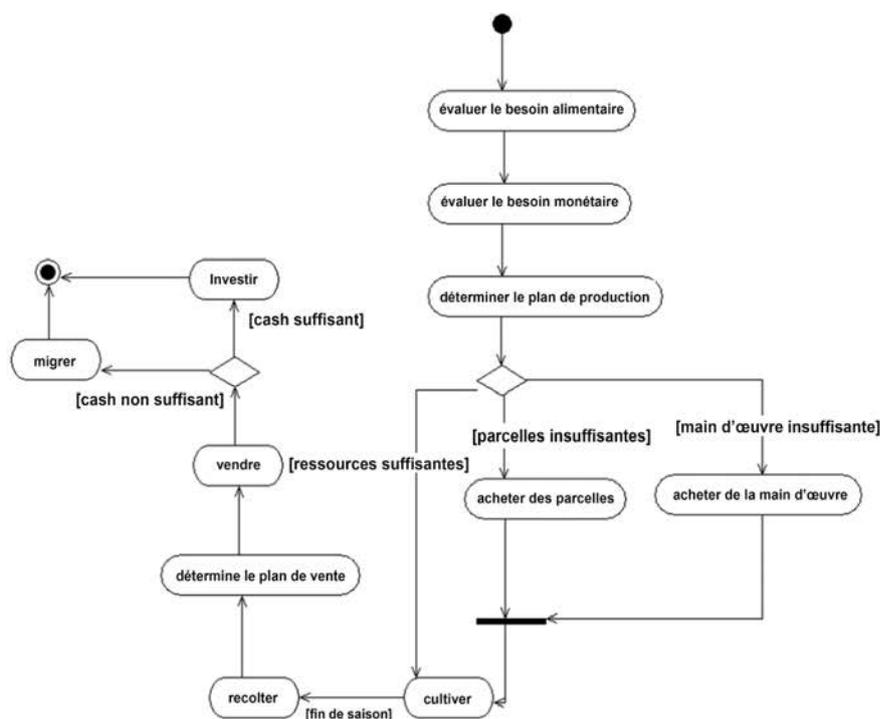


Figure 1 : Diagramme d'activité d'une exploitation agricole

le terroir. Dans le cas contraire, l'exploitant investit dans l'achat (1) d'équipement pour améliorer sa production ou (2) des animaux. Lorsque les besoins alimentaires ne sont pas satisfaits, l'exploitant vend une partie de son troupeau. Le diagramme de séquences (Figure Annexe 2) décrit le comportement général des exploitants.

La dynamique d'usage des parcelles dépend de la production agricole (Figure 2) et varie en fonction des systèmes de culture (Figure 3 et Figure 4).

Toutes les parcelles au départ sont en forêt. Hormis les parcelles occupées par la concession (parcelle bâtie) toutes les autres parcelles dont dispose

néraux) dans le système de production migrant. En revanche dans le système autochtone il n'y a pas d'apports (minéraux et/ou organiques). Les plantations sont essentiellement constituées d'anacardières (*Anacardium occidentale*). Lorsqu'une parcelle est plantée, il est possible d'associer des cultures pendant les 5 premières années, après cela l'arbre recouvre le sol ce qui empêche toute association. Les vieilles plantations (âge supérieur à 30 ans) sont coupées pour être rajeunies (remise à 5 ans qui correspondent à l'âge de fructification). 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

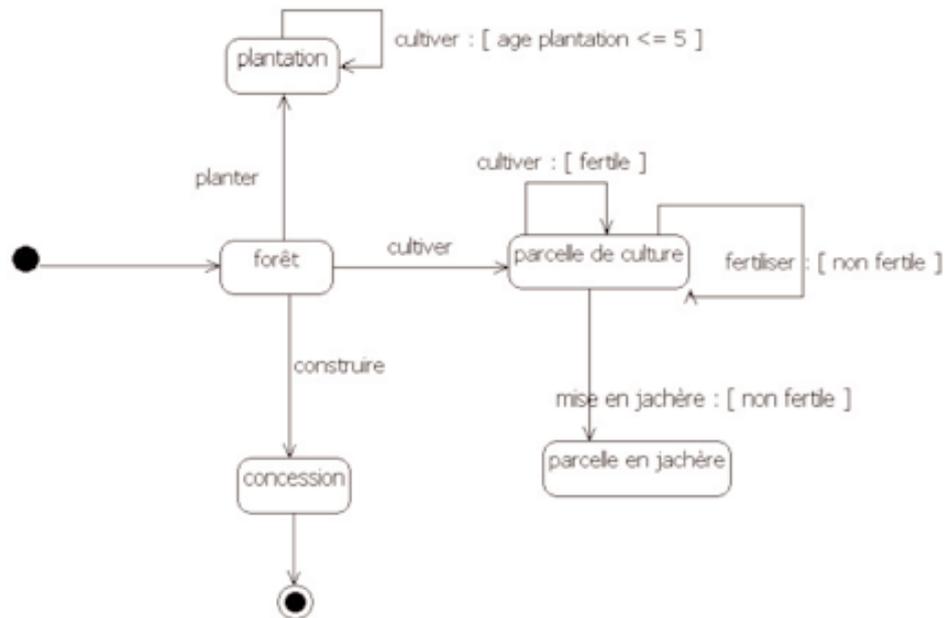


Figure 2 : Etat de transition d'une parcelle au cours de la succession culturale

minimale et maximale d'une parcelle est respectivement 0 et 25 points. L'apport d'engrais et de matière organique entraîne une augmentation de la fertilité.

L'usage des parcelles vont déterminer la dynamique du carbone qui dépend en partie de la production de la biomasse.

Plusieurs compartiments de biomasses sont représentés 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.

$$S(t) = k / \left(1 + \left(\left(\frac{k - S_0}{S_0} \right) \times \text{EXP}(-r * t) \right) \right)$$

Équation 3 : modèle de stockage de la biomasse végétale sur les parcelles non cultivées

$$s(t) = \text{EXP}(-r \times t)$$

Équation 4 : 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, S_0 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

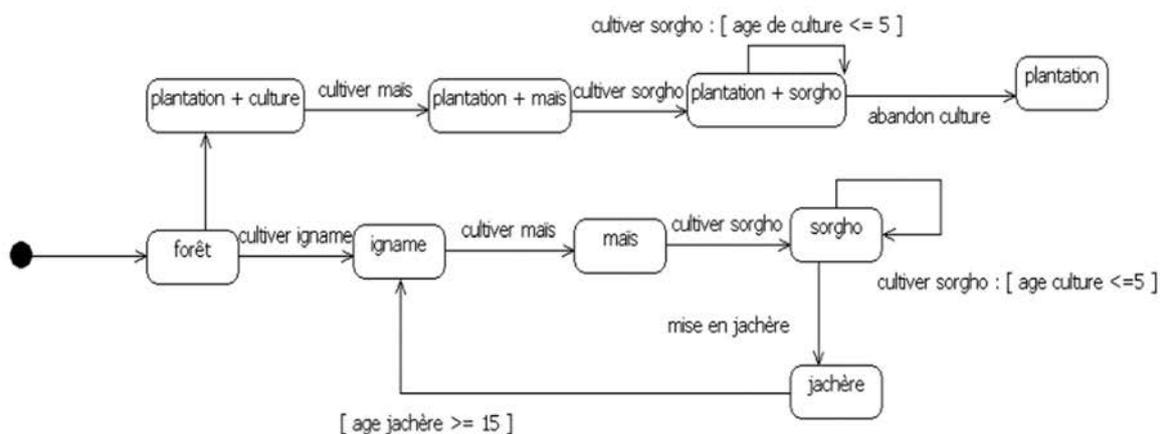


Figure 3 : Règles de mise en culture d'une parcelle en système de culture itinérant

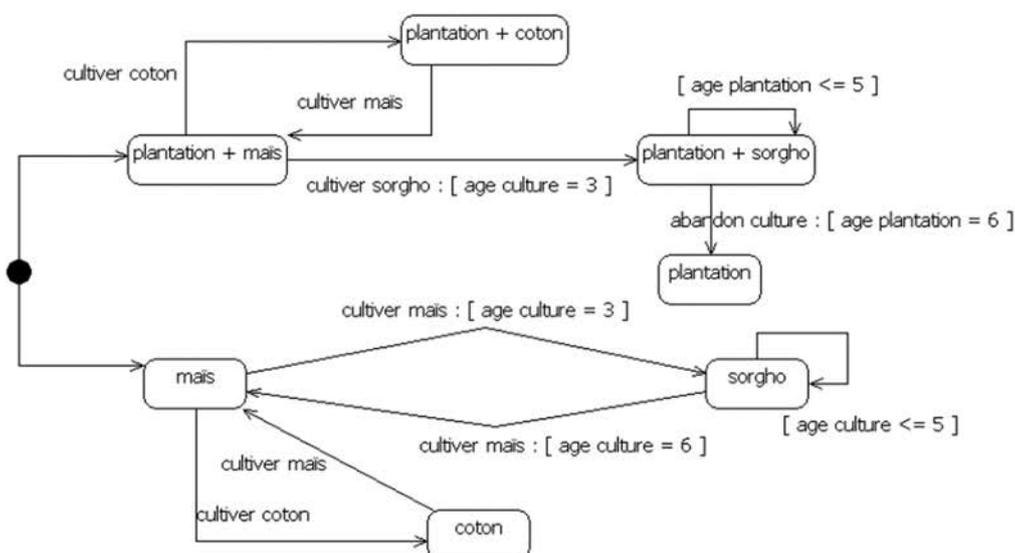


Figure 4 : Règles de mise en culture des parcelles dans le système de culture permanent

défini, la biomasse au $t+1$ est évaluée selon les formules définies précédemment.

$$t = \left(\ln \left(\frac{((a \times k) - s) \times s_0}{s \times (k - s_0)} \right) \right) / r$$

Équation 5 : Modèle d'évaluation de l'âge de la jachère d'une parcelle non cultivée

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

Équation 6 : 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.

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

Équation 7 : 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* ; *stockArbMax*, le stock arboré maximal sur une parcelle ; *stock*, la biomasse arborée à l'instant *t* et *stockArbMax*, la biomasse arborée maximale.

4. Les paramètres du modèle

Les paramètres ou attributs des classes utilisés dans le modèle MIROT sont multiples. Ceux-ci conditionnent la dynamique des ressources organiques. 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, d'azote 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 (Tableau 2). 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.

Les variables de sortie

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 3 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.

5. Simulations

Des simulations ont été réalisées pour analyser l'impact des deux systèmes de culture, de la population sur l'évolution de l'occupation des terres et la dynamique du carbone.

Evolution de l'occupation du terroir

Les résultats des simulations sont 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 6). Des points de vue permettent des observations aux échelles des parcelles (couverture, type de sols) ou au niveau des exploitations agricoles (autochtone, migrant). Ces résultats confirment les graphiques. En système traditionnel, la baisse des ressources organiques du terroir est limitée contrairement au système migrant qui, pour la même durée de simulation, colonise totalement le 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.

Le carbone du terroir le C décroît quand augmente la densité de la population (Figure 7). 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. 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.

Tableau 2 : 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
Concession			
Nombre de concessions à l'initialisation		Nombre	5
Autochtones		%	60
Effectif initial autochtone		Nombre	0
Limite taille de la concession autochtone		Nombre	20
Migrants		%	40
Nombre d'années avant arrivée de migrants		Nombre	0
Taux de croissance de la population		%	2,5
Besoins d'un individu			
Besoin céréalière		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			
Surface		ha	1
Stock maxi d'herbes		kg MS	10000
Croissance herbe		kg MS mois ⁻¹	800
Stock maxi d'arbres		kg MS	50000
Pluiosité		m an ⁻¹	1
Variabilité		%	20
Dimensions de l'espace			
Nombre de lignes et colonnes		152 x 161	
1CFCA= 0.00152449 euros			

Paramètres annuels et leurs caractéristiques dans le modèle MIROT		Paramètres des cultures et leurs caractéristiques dans le modèle	
Attributs	Description	Type	Unité
TypeCulture	Le type de la culture	C	
fertilierRequise	La fertilité requise pour la mise en culture de la parcelle	R	
Rendement	Le rendement de la culture par hectare	R	Tonne/ha
valeurEnergetique	La valeur énergétique de la culture	R	
PrixDeVente	Le prix de vente	R	Million/FCFA
PrixAchat	Le prix d'achat de la culture	R	Million/FCFA
CoutEngrais	Le prix d'achat d'engrais destiné à la culture	R	Million/FCFA
R=Réel; C=Caractère			

Paramètres annuels et leurs caractéristiques dans le modèle MIROT		Paramètres des cultures et leurs caractéristiques dans le modèle	
Nom	Description	Type	Unité
NomMois	Le nom du mois	Entier	
Pluvisite	Quantité de pluie au cours du mois	Réel	mètre
ExcretionUBT	Excrétion UBT au cours du mois	Réel	Tonne
BesoinUBT	Besoin UBT dans le mois	Réel	Tonne
CroissHerbeMaxi	Croissance herbacée maximale mois ⁻¹	Réel	réel
Fichier de sortie	Résultats sous forme de fichier	Boleen	
Système traditionnel	Fonctionnement sans plantation	Boleen	
step	Pas de temps	Entier	mois

6. Discussion

Le SMA est adapté à la gestion des ressources naturelle grâce à la représentation explicite d'interactions entre les individus, leur espaces et leur environnement (Bonney et al.). Les SMA ont été expérimentés avec succès dans la gestion de ressources renouvelables (Bousquet et al., 1994) Le SMA, MIROT, a été utilisé pour l'étude de la dynamique du carbone et de l'azote à l'échelle du terroir villageois. 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 toute sa complexité du point de vue de l'organisation et de son fonctionnement. Les simplifications opérées sont l'espace qui a été subdivisé en cellules ou parcelles de un hectare, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Les systèmes de production ont été réduits aux deux principaux (Autochtone et Migrant) rendant plus aisée la modélisation. Les exploitants agricoles disposent de 25 ha chacun et disposent aussi de troupeaux. Dans la réalité la taille des exploitations n'est pas homogène.

Les SMA a été aussi utilisé à l'échelle de la ferme agro-pastorale et s'adapte à la modélisation du fonctionnement de celle-ci (Hervé et al., 2002). Dans le SMA MIROT, chaque exploitant dispose d'un domaine qu'il gère en fonction de règles propres.

La croissance de la population due à la croissance démographique et aux migrations entraîne une demande de plus en plus forte de terres (culture, habitat, plantation,...). Le développement des activités humaines entraîne la baisse des ressources en terre, diminue la densité des ligneux (baisse des stocks de biomasse). L'espace du terroir tend peu à peu à une saturation.

7. Conclusion et perspectives

Le SMA dénommé MIROT intègre bien les échelles de la parcelle, de l'exploitation agricole et du terroir villageois. L'environnement du terroir est intégré dans le modèle grâce au couplage avec un système d'information géographique. MIROT est un SMA conçu sous la plate forme CORMAS dans lequel des agents optimisent sous le logiciel GAMS puis interagissent.

Du point de vue de l'organisation les contraintes spatiales 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 différentes relations entre agents et objets ont été définies à travers le formalisme UML

Du point de vue du fonctionnement la simulation de la dynamique du C est possible car des agents agissent sur le milieu et interagissent entre eux (messages, échanges, négociations). Les autres agents non situés (climat, temps) agissent sur les objets du terroir que sont les parcelles, les cultures, les biomasses. La cohérence d'ensemble a permis la programmation informatique du modèle rendant compte de la dynamique des ressources. Les agents agissent en fonction des règles de décisions et de gestion identifiés et traduites en langage informatique. 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.

Du point de vue thématique, il est toujours possible d'améliorer le modèle en approfondissant les 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 et améliorerait le réalisme de l'évolution des troupeaux.

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.

Tableau 3 : Les variables de sorties du Modèle MIROT

Attributs	Unités	Description
Azote	Tonne	azote du compartiment sol et végétaux
azoteSol	Tonne	azote total du sol
azoteBiomasse	Tonne	azote de la biomasse végétale
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 arborées de toutes les parcelles
biomasseArbustes	Tonne	La somme des biomasses arbustives de toutes les parcelles
biomasseRacineEpaisse	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
carboneBiomasse	Tonne	La somme du carbone de la biomasse végétale
Concession	%	La proportion des parcelles bâties
Culture	%	La proportion des parcelles cultivées
Maïs	Ha	surface en maïs
Sorgho	Ha	surface en sorgho
Coton	ha	surface en coton
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 autochtones	L'effectif des autochtones
Population	La population effective	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

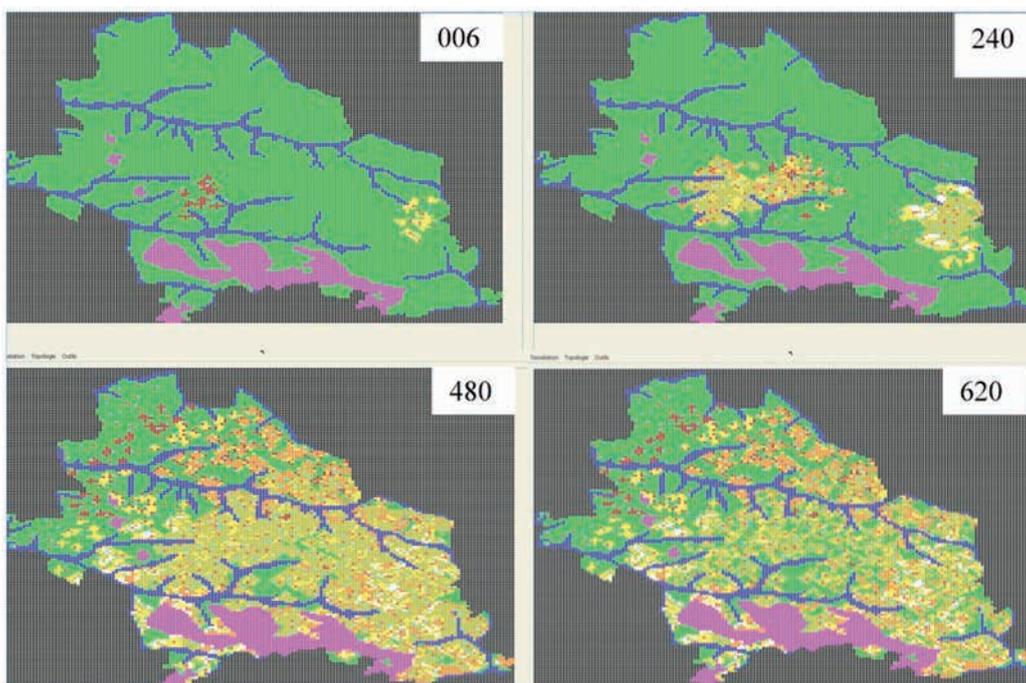


Figure 5 : Carte d'occupation du terroir pendant les stimulation

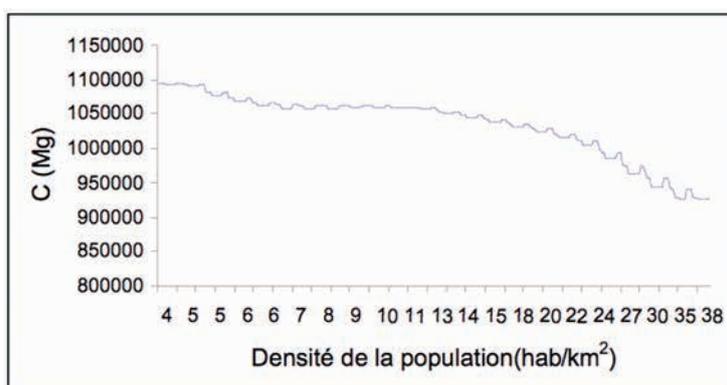


Figure 6 : Carbone total du terroir en fonction de la densité de la population

Bibliographie

- [1] 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.
- [2] 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.*
- [3] Bakam I.T., 2003. *Des systèmes multi-agents aux réseaux de pètri pour la gestion des ressources naturelles : le cas de la faune dans l'est cameroun. PhD, Université de Yaoundé 1, Yaoundé, 137 p.*
- [4] Barbier B., Bergeron G., 1999. *Impact of policy interventions on land management in Honduras : results of a bioeconomic model. Agricultural Systems* 60, 1-16.
- [5] 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.*
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Bonnefoy J.-L., Bousquet F., Rouchier J., 2000. *Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi-agents: pâture en forêt virtuelle.*
- [9] 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.*
- [10] 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.
- [11] Bousquet F., Barreteau O., D'acquino P., Boissau S., Aubert S., Dabin D., Castella J.-C., 2000. *Multi-agent systems and role games : collective learning process for ecosystem management.*
- [12] 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.
- [13] 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 Thièul-Sénégal. Working paper DMP-CIRAD-04/8, Dakar, p. 17.*
- [14] Verburg P.H., Schot P., Dijst M., Veldkamp A., 2004. *Land use change modelling: current practices and research priorities. GeoJournal.*

ANNEXES

Annexe 1 : Diagramme de classe du modèle MIROT

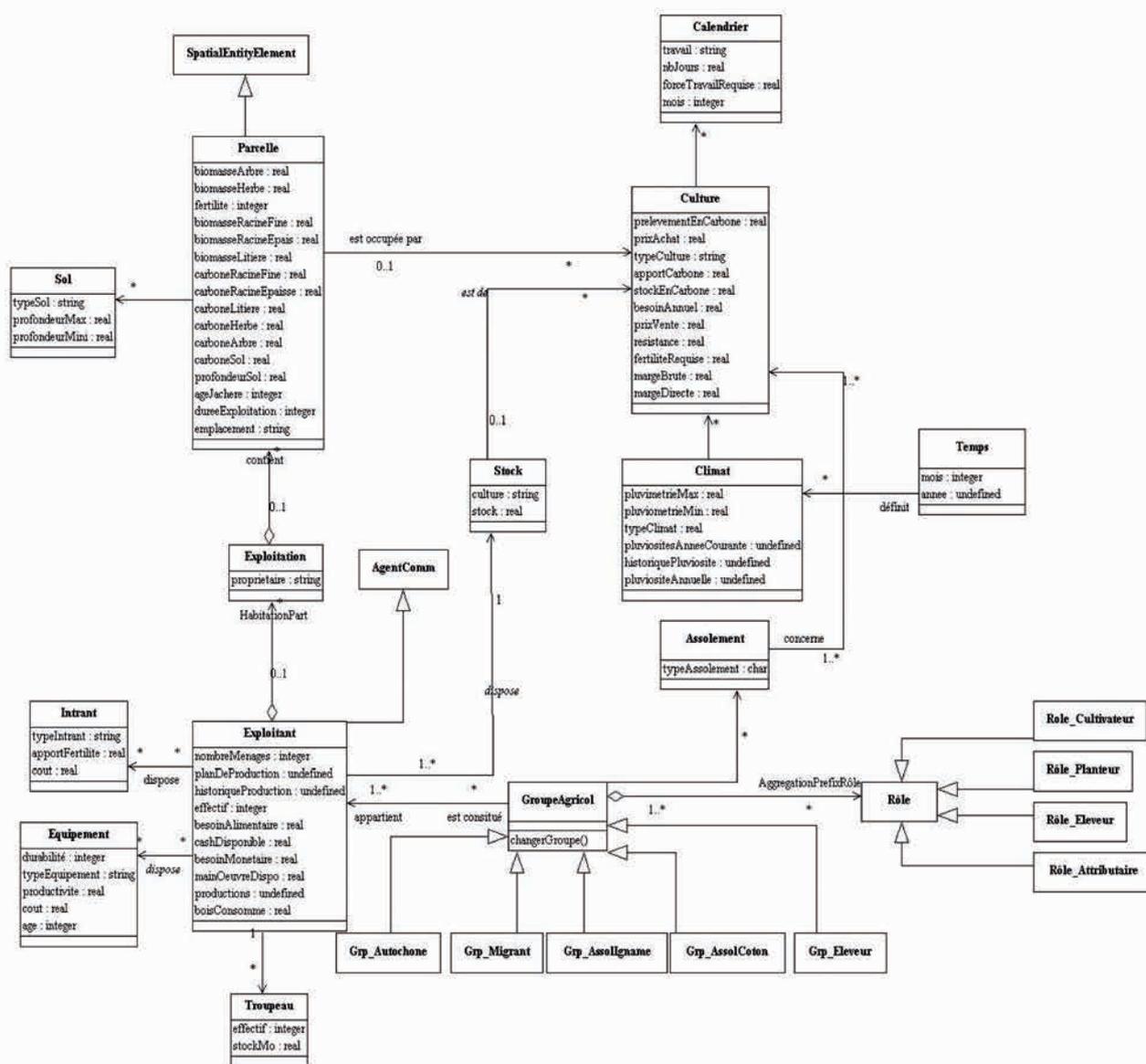


Figure Annexe 1: La description de la structure du modèle à travers un diagramme de classes

Annexe 2 : Diagramme de séquence du modèle MIROT

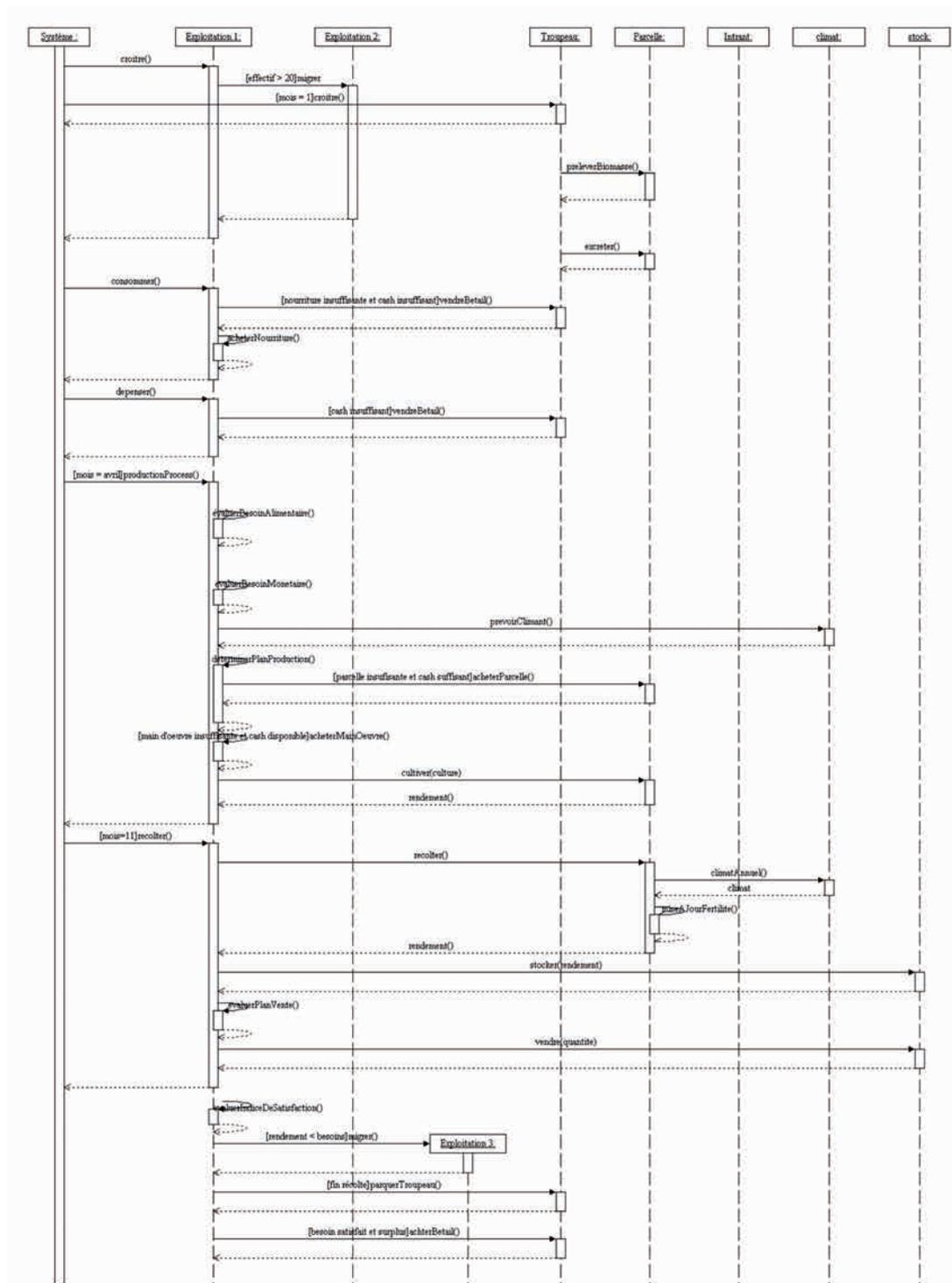


Figure Annexe 2 : Le diagramme de séquences décrivant le comportement général des exploitants