

Mémoire de stage

présenté par

Mahamadou BELEM

pour obtenir le Diplôme d'Etudes Approfondies

INFORMATIQUE :

SYSTEMES INTELLIGENTS

De l'Université Paris Dauphine

Sujet :

**Couplage entre système multi-agents et programmation
mathématique : application à la simulation de la dynamique
des ressources en carbone d'un terroir au Burkina-Faso**

Soutenu publiquement le 15 septembre 2005

à Paris

Dr. MANLAY RAPHAEL

Maître de stage

Dr. SUZANNE Pinson

Professeur

Remerciements

Je remercie Mr Raphaël Manlay mon maître de stage qui a accepté de m'accueillir pour ce stage dont j'ai trouvé très intéressant. Pour moi, il fut plus qu'un maître de stage. Je remercie également Mr. Sansan Youl pour l'apport considérable qu'il m'a apporté malgré ses occupations pour ses travaux de thèse.

Je n'oublie pas toute l'équipe de laboratoire MOST pour son accueil, et dont j'apprécie leur modestie et leur ouverture d'esprit. Je remercie également, le directeur de l'ENGREF Mr Thierry Rieu le directeur du centre pour avoir accepté de m'accueillir au sein de son établissement. Mes remerciements vont aussi aux Dr. Bruno Barbier et Damien Jourdain du CIRAD pour leurs conseils précieux.

Sur le plan académique, je remercie Dr. Pinson SUZANNE, la responsable de la formation qui par la qualité de son cours et son amour pour le travail bien fait, a augmenté mon intérêt pour les systèmes multi-agents au moment j'étais dans les doutes. Je n'oublie pas tous mes enseignants qui n'ont ménagé aucun effort pour nous donner une formation de qualité.

Le stage marquant la fin de ma formation de DEA, mon arrivée à ce stade est le résultat de l'ensemble des efforts consentis depuis le début de la formation. Ainsi, je remercie tous ceux qui m'ont soutenu pendant cette formation. Je pense à Dr. Geneviève Jomier et son neveu Méderic qui ont été ma première famille en France, mes amis, les responsables et les résidents du foyer Félicie où j'ai passé un bon moment.

Dédicace

À mes deux parents, eux qui m'ont offert l'un des plus beaux cadeaux de la vie : le savoir. Je leur dis merci pour tout ce qu'ils ont fait et continuent à faire pour moi.

À toute ma famille, à Mariam, eux qui m'ont toujours soutenu dans les moments difficiles tout au long de mes études.

À tous ceux qui me sont chers

Résumé

La maîtrise de la gestion des ressources nécessite de comprendre les interactions complexes qui existent entre des processus écologiques et des dynamiques sociales. En prenant en compte les actions individuelles des entités et la gestion spatiale des ressources, les systèmes multi-agents (SMA) permettent de représenter et d'étudier la dynamique des ressources renouvelables. L'objet de cette étude s'inscrivant dans le cadre du projet MIROT (Modélisation Informatique de la dynamique des Matières Organiques dans un Terroir) vise à mettre en place un modèle multi-agents pour simuler la dynamique du carbone dans le terroir de Touroukoro (Burkina Faso).

A cet effet, un modèle multi-agents a été construit. La méthode utilisée pour la construction du modèle multi-agents a permis de construire un modèle suffisamment complexe pour représenter et étudier la dynamique du carbone à l'échelle du terroir. Interfacé avec un modèle SIG, le système permet d'étudier l'environnement dans son ensemble, à savoir son aspect physique, biologique et anthropique. Le couplage du SMA avec un modèle d'optimisation économique a permis non seulement de prendre en compte l'impact du niveau d'équipement dans les prises de décision mais aussi de montrer que les deux systèmes peuvent être complémentaires. Enfin les simulations réalisées ont permis de mettre en évidence quelques interactions qui existent entre les dynamiques sociales et écologiques.

Mots clés : ressource renouvelable — systèmes multi-agents – modèle d'optimisation économique– carbone – Terroir - Savane

Table des matières

1. INTRODUCTION	7
1.1. PROBLEMATIQUE	9
1.1.1. Problématique générale	9
1.1.2. Problématique du stage	11
1.1.3. Cadre institutionnel : le projet mirot	12
1.1.4. Objectifs	12
2. MATERIEL ET METHODES	13
2.1. MODELISER LA GESTION DES RESSOURCES NATURELLES	13
2.1.1. Les modèles économiques	13
2.1.2. Les modèles individus centrés	14
2.1.3. Les automates cellulaires	14
2.1.4. Les systèmes multi-agents	15
2.2. LA METHODOLOGIE	18
2.2.1. La modélisation avec cormas	19
2.2.2. Récapitulation: pertinence de la méthode proposée	19
2.3. SITE D'ETUDE	20
2.3.1. Représentation conceptuelle de la dynamique du carbone à l'échelle d'un terroir générique	20
2.3.2. L'environnement simulé : le village de torokoro	22
3. ETUDE DE L'EXISTANT	23
4. LA CONSTRUCTION DU MODELE	24
4.1. LES AGENTS	24
4.1.1. Exploitant	24
4.1.2. Troupeau	28
4.1.3. Climat	31
4.1.4. Temps	32
4.2. LES OBJETS	32
4.2.1. Mois	32
4.2.2. Culture	32
4.2.3. Systeme_Culture	32
4.2.4. Stock	32
4.3. LES INTERACTIONS	32
4.3.1. Interaction par communication	33
4.3.2. Le traitement des messages	36
4.4. L'ENVIRONNEMENT	37
4.4.1. L'organisation spatiale du modèle	37
4.4.2. La dynamique spatiale	38
4.5. L'ORGANISATION	42
4.5.1. L'organisation sociale	42
4.5.2. L'organisation du système	44
4.6. Quelques chiffres	44
5. LA SIMULATION	46
5.1. La dynamique du modèle mirot	46
5.2. La configuration de l'espace	47
5.3. Les données en entrée du modèle	48
5.4. Les données en sortie du modèle	48
5.5. Le calibrage du modèle	48
5.6. Résultats des simulations et discussion	49
CONCLUSION	54
6. REFERENCES	57
7. LISTE DES TABLEAUX	61
8. LISTE DES FIGURES	61
9. LISTE DES ABREVIATIONS	62
10. ANNEXES	63

annexe 1 : aspects socio-economiques du systeme	63
annexe 2 : les figures	70
Annexe 3 : liste des parametres et des variables de sortie du modele	77
annexe 4 : presentation du modele	80
Annexe 5 : Code Source	83

1. INTRODUCTION

La maîtrise de la gestion des ressources renouvelables (GRR) vise à assurer leur disponibilité afin de garantir la pérennité des activités qui en dépendent. Cela nécessite cependant de comprendre les interactions complexes qui existent entre des processus écologiques et des dynamiques sociales. La complexité de ces systèmes caractérisés par un grand nombre d'acteurs rend difficile, voir impossibles, les expériences en milieu réel, nécessitant ainsi des modèles explicatifs permettant de comprendre les mécanismes sous-jacents et de prédire leur évolution future pour une politique de gestion adéquate. La gestion des ressources renouvelables relève de l'écologie et des sciences humaines. A cet effet, en prenant en compte les actions individuelles des entités et la gestion spatiale des ressources, ils permettent de représenter les interactions qui existent entre les dynamiques sociales et spatiales.

Le projet MIROT (Modélisation Informatique de la dynamique des Matières Organiques dans un Terroir) est principalement dédié à l'analyse de la viabilité¹ de terroirs agro-pastoraux de savane ouest-africaine par une modélisation de la dynamique de leurs ressources organiques. Ainsi, un prototype simple de la dynamique du carbone dans le terroir² de Torokoro, a été développé en Smalltalk avec Cormas sous VisualWorks. Ce premier modèle a été développé au moment où peu de données étaient disponibles. Des études récentes ont été réalisées et devraient être prises en compte dans le modèle. Il s'agira ici, d'améliorer le réalisme du système en intégrant les nouvelles données et de coupler le modèle avec un modèle d'optimisation économique.

Ainsi dans ce document, la première partie portera sur la présentation des matériels et méthode utilisés à travers la définition des différents outils de simulation, le contexte de notre étude, les systèmes multi-agents et la plate-forme CORMAS. Cette première partie est suivie de l'étude de l'existant où il s'agira de procéder à une mise en cause du système afin de proposer une solution informatique intégrant les nouvelles connaissances du terrain. Après avoir étudié le système existant, nous décrirons la solution informatique que nous proposons qui sera suivie de la présentation du modèle et de quelques résultats de simulation.

¹ *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

² *Terroir* : entité socio-géographique cohérente regroupant une communauté d'exploitations agricoles

1.1. PROBLEMATIQUE

1.1.1. PROBLEMATIQUE GENERALE

Par ses propriétés structurales, de stockage et d'échange d'information, d'énergie et de nutriments, le carbone joue dans l'**écosystème** de **multiples rôles** de type statique (constitution du squelette végétal et de la matrice argilo-humique du sol) et dynamique (transferts d'énergie et de matière dans et entre les individus) (Mohr et Schopfer, 1995 ; Kaplan et Bartley, 2000). Dans les écosystèmes, les modes de recyclage du carbone renseignent précisément sur le fonctionnement (productivité et stabilité) des écosystèmes (Odum, 1969). En **écologie de la restauration**, Aronson *et al.* (1993) proposent d'ailleurs, pour caractériser l'état des écosystèmes, trois **attributs vitaux** découlant du cycle du carbone: productivité de la biomasse, stockage de la biomasse et teneur en matière organique du sol.

Dans les écosystèmes tropicaux, l'étude de la dynamique du carbone sous ses diverses formes se justifie de deux points de vue complémentaires.

Ressources organiques et durabilité des systèmes agraires tropicaux à faible intrant : le point de vue du paysan

En Afrique la durabilité des systèmes de production adoptés par la petite paysannerie repose encore largement sur la gestion qui y est faite des ressources organiques, donc en carbone (Ruthenberg, 1971 ; Kowal et Kassam, 1978). La matière organique endogène est naturellement un **bien économique** (alimentation humaine, bois, fourrage). C'est aussi un **moyen de production** puisqu'elle entretient les animaux, qui fournissent travail et fumier, et le statut organique du sol, qui pilote largement la fertilité des sols tropicaux lessivés. Le **statut carboné** - concept qui renvoie à l'état et à l'intensité d'utilisation des ressources en carbone - de la parcelle, de l'exploitation agricole ou de la communauté rurale, est donc souvent un indicateur pertinent de la reproductibilité du système considéré.

La quantification des ressources en carbone et de leurs usages à un instant donné est un outil de diagnostic de l'état du système (Manlay *et al.*, 2004b). La viabilité du système de production peut, elle, être appréhendée par l'étude de la dynamique temporelle de son statut organique, sur la base d'une simulation par un modèle informatique.

Cycle du carbone et changement global : le point de vue de la société

Les changements d'usage des terres en milieu tropical (utilisation de l'espace, pratiques agricoles entre autres) représentent 15-20% de l'augmentation nette du stock de carbone atmosphérique

(IPCC, 2001 ; Achard *et al.*, 2004), alors que celui-ci participe à plus de 60% du forçage radiatif des émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à l'activité humaine (Houghton, 2000 ; IPCC, 2001).

La gestion du carbone en tant que ressource renouvelable, et la prévision de son bilan dans ces systèmes, s'inscrit également dans un enjeu de maîtrise des changements climatiques globaux, en raison des échanges entre les compartiments de carbone organique dans le système sol-plante et de carbone gazeux de l'atmosphère (gaz à effet de serre).

Concilier les deux visions

La prise en compte par ces outils de régulation du bilan de carbone d'une activité rurale pourrait modifier la rentabilité économique de cette activité, et orienter les politiques de coopération inter-Etats, influençant donc les dynamiques rurales des pays du Sud.

La **priorité légitime** des gouvernements de ces pays est l'**amélioration** de leurs **situations sociale et économique**. L'intensification durable des systèmes de production de la petite paysannerie tropicale n'est cependant pas incompatible avec une augmentation des stocks de carbone dans le système sol-plante de ces agro-écosystèmes tropicaux (Izac, 1997) :

- ces deux **objectifs** peuvent être **synergiques**, si les stratégies de séquestration de carbone sont adaptées aux systèmes de production agricoles (Olsson et Ardo, 2002) et tiennent compte de leur diversité, de leur flexibilité et de leur faible capitalisation, comme l'ont montré Woomer *et al.* (1998) et Tschakert (2004) en l'Afrique de l'Est et de l'Ouest respectivement,
- le **changement climatique** global **affectera** sans doute **négativement** la situation socio-économique en Afrique de l'Ouest (Hulme *et al.*, 2001),
- plusieurs stratégies de séquestration de carbone sont aussi des moyens efficaces de **lutter contre la désertification** (Lal, 2001),
- la prise en compte du bilan de carbone dans la rentabilité économique des activités agricoles pourrait **rendre un avantage compétitif** aux paysans du Sud. Ceux-ci sont en effet mis en concurrence avec des pays technologiquement plus développés, où l'efficacité d'utilisation de la main d'œuvre est plus importante, mais au prix d'émissions de carbone fossile supérieures (Hall et Hall, 1993 ; Zinck *et al.*, 2004).

Nécessité de la modélisation informatique

La dynamique du carbone dans les systèmes de production agricoles doit être appréhendée comme un système complexe. Cette dynamique met en jeu des **formes du carbone variées** et manipulées par **divers acteurs** (plante, microorganisme, animal, homme), qui les produisent, les

consomment, ou les transforment de façon non indépendante le long de chemins trophiques (Falkowski *et al.*, 2000). Ceci a lieu à des **échelles de temps et d'espace** variées, suivant des processus dont l'étude relève de **différentes disciplines** techniques ou humaines.

Les approches descriptives ne permettent d'obtenir des bilans fiables que pour des situations présentes ou passées. Au niveau parcellaire, la prévision peut se baser sur des expérimentations en milieu réel. Mais **à l'échelle du système de production et de la région**, la multiplicité des acteurs, des échelles de temps et d'espace, font de la **modélisation informatique** un **outil d'expérimentation incontournable** pour l'analyse du cycle du carbone, qu'on se situe dans la problématique agroécologique locale ou environnementale globale.

1.1.2. PROBLEMATIQUE DU STAGE

Un modèle prototype multi-agent programmé sous SmallTalk (plateforme CIRAD-Cormas) a été conçu, avec l'appui des thématiciens du projet MIROT, par Belem (2003), pour simuler la dynamique des ressources en carbone à l'échelle du terroir de Torokoro. Il intègre un modèle simplifié de fonctionnement des exploitations agricoles.

Son développement se fait selon une démarche de complexification classique et permise par la souplesse de l'outil de simulation. Afin d'améliorer le réalisme du modèle cette démarche suppose que soient effectuées de façon régulière (1) une remise en cause de structure du modèle, et (2) l'intégration de données capitalisées au cours du projet MIROT (Bayala, 2003 ; Bonkoukou, 2004 ; Cambou, 2004) ou d'autres sources telles que le projet FAC « Fronts Pionniers de Migration ». (Anonyme, 1999).

La présentation individu-centrée et spatialisée du fonctionnement bioéconomique de l'exploitation agricole en tant qu'élément d'une communauté virtuelle permet d'intégrer : (1) des déterminants tant qualitatifs que quantitatifs du choix du paysan qui ne relèvent pas d'un simple objectif de maximisation du revenu économique, (2) les interactions avec le voisinage, et (3) les échanges de ressources comme la terre ou la main d'œuvre (Berger, 2001). Elle permet aussi de simuler des trajectoires de développement sous contraintes diversifiées, et tient compte des contraintes spatiales fortes en région d'agriculture traditionnelle (coût du transport, mobilité des animaux, importance de l'échange direct d'information etc.).

La programmation mathématique est une autre technique, plus classique, de représentation du fonctionnement bioéconomique d'une exploitation agricole ou même d'une communauté (Barbier, 1998). « *le comportement des acteurs [y] est généralement simulé par un algorithme de maximisation d'une fonction d'utilité sous contrainte de terre, de travail, de capital, de risque alimentaire et monétaire* ».

(Barbier, comm. pers.). Dans les agricultures semi-commercialisées ces modèles simulent le comportement d'un agriculteur qui maximiserait son revenu monétaire après avoir satisfait les besoins alimentaires de la famille, et possédant une connaissance raisonnable du contexte technico-économique local et régional nécessaire à la réalisation de cette optimisation.

Les deux approches peuvent se compléter même si elles répondent à des objectifs apparemment divergents. La modélisation individu-centrée est une représentation plus réaliste mais complexe engendrant un comportement plus difficile à interpréter. La programmation mathématique ignore une partie de la complexité du processus de décision de l'agriculteur mais permet plus facilement d'analyser et d'interpréter les différents scénarios technico-économiques.

1.1.3. CADRE INSTITUTIONNEL : LE PROJET MIROT

Le stage réalisé se situe dans le cadre du projet MIROT (Modélisation Informatique de la Dynamique des Matières Organiques à l'échelle du Terroir). impliquant plusieurs équipes de recherche (CIRAD, CIRDES, INERA, IRD).

Il est principalement dédié à l'analyse de la viabilité de terroirs agro-pastoraux de savane ouest-africaine par une modélisation de la dynamique de leurs ressources organiques. Il ne s'agit bien sûr pas d'une représentation exhaustive de la réalité, mais de s'inspirer de certaines caractéristiques structurelles de situations existantes (par exemple hétérogénéité spatiale des sols et de la végétation, diversité socio-technico-économique des exploitations agricoles) pour caractériser l'état initial du système modélisé et intégrer les déterminants naturels et humains de sa dynamique. Au Burkina Faso, le projet s'est intéressé aux terroirs du projet « Front Pionnier de Migration » (Projet FAC n° 94/CD/78/BKA). Le terroir de Touroukoro en particulier, situé au sud-ouest du Burkina en zone soudanienne, a fait l'objet de nombreuses études thématiques. Ainsi, ont déjà été caractérisées : la géomorphologie, la pédologie, la typologie de la végétation de savane, l'occupation de l'espace et la typologie des exploitations agricoles.

1.1.4. OBJECTIFS

L'objectif principal du projet MIROT est l'analyse de la dynamique du carbone à l'échelle du terroir. Ainsi, deux approches sont utilisées à cet effet : une approche statistique et une approche multi-agents utilisant les données de la première. C'est dans cette optique qu'un prototype multi-agents a été développé en SmallTalk sur *Cormas* sous VisualWorks. Ce premier modèle a été développé avec l'appui des chercheurs de l'IRD et de l'INERA. Cependant, le modèle a été conçu au moment où peu de connaissances sur le site étudié étaient disponibles. Des travaux récents (Bayala, 2003 ; Youl, 2003 ; Bonkoukou, 2004 ; Cambou, 2004) permettent de mieux appréhender la dynamique le système étudié.

Ainsi il s'agira pour nous, dans un premier temps, de procéder à une remise en cause du modèle existant et d'apporter des solutions face aux nouvelles connaissances du terrain. La solution proposée devra en outre permettre d'améliorer le réalisme du modèle.

En second lieu, il s'agit pour nous de coupler le modèle SMA avec un modèle d'optimisation économique et de mettre en évidence l'apport de ce couplage par rapport à un modèle non couplé.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. MODELISER LA GESTION DES RESSOURCES NATURELLES

La GRR vise à garantir la disponibilité d'une ressource afin d'assurer la pérennité des activités qui en dépendent. La dynamique des ressources renouvelables est un système complexe caractérisé par une triple complexité (celle des dynamiques écologiques, celle des pratiques sociales et celle des interactions entre dynamiques écologiques et pratiques sociales). La problématique qui se dégage de cette complexité est celle de la représentation de ce système complexe. La représentation des systèmes complexes dans le cadre des GRR vise à comprendre les relations qui existent (1) entre usages et espace, (2) entre usages et niveau d'organisation sociale, (3) entre différents niveaux d'usage.

De nos jours la GRR fait l'objet de nombreuses études dans le monde de la recherche environnementale. Ces études visent à la mise en place des outils d'aide à la décision permettant non seulement de comprendre le système étudié, mais aussi de prédire son état afin de proposer une méthode de gestion adéquate. Parmi ces outils, on peut retenir les modèles économiques qui agrègent les prises de décision au niveau sectoriel ou régional et les modèles individus-centrés (les automates cellulaires et les systèmes multi-agents).

2.1.1. LES MODELES ECONOMIQUES

Dans le modèle économique, les règles des décisions sont basées sur les méthodes de programmation mathématique (Hazell et Norton, 1986 ; Berger, 2001). Les règles de décision sont agrégées au niveau régional ou sectoriel dans le but de comparer les stratégies. L'objectif principal dans un modèle économique est la maximisation des revenus. Mais la maximisation de la fonction objectif ne peut constituer le seul élément influençant les règles de décision. Plusieurs éléments tels que les normes sociales et culturelles ont un impact sur les stratégies adoptées par les agents. Ainsi, avec un modèle économique, il est impossible de représenter les interactions entre

les différentes entités. Par conséquent, il n'est pas adapté aux systèmes où on s'intéresse aux problèmes de coordination et d'interactions. Ils ne prennent pas non plus en compte la dimension spatiale des activités humaines. Dans le domaine de l'écologie, l'espace constitue un élément central, il est porteur de ressources et son état influence les décisions des individus (coût de transport, mobilité physique) ; il est par conséquent nécessaire d'étudier les articulations entre les dynamiques sociales et spatiales.

2.1.2. LES MODELES INDIVIDUS CENTRES

L'étude des systèmes complexes tels que la GRR fait intervenir plusieurs disciplines (par exemple pour les RN en carbone: économie, agronomie, écologie et sciences humaines). La modélisation de ces types de systèmes nécessite donc des outils permettant d'intégrer dans un même modèle, des connaissances et des expertises diverses. L'agrégation de ces connaissances ne permet pas une étude efficace du système, nécessitant ainsi une prise en compte individuelle des acteurs le constituant.

Les modèles individus-centrés visent à représenter les actions individuelles des entités du système et mettre en évidence l'impact de leurs actions sur leur environnement. Ainsi, contrairement aux modèles mathématiques où les règles de décisions sont agrégées, les modèles individus-centrés mettent l'accent sur le comportement individuel des agents. De même, dans un modèle individu-centré, les agents interagissent et échangent des informations. Cet aspect fait de ces modèles des outils intéressants pour les sciences sociales.

2.1.3. LES AUTOMATES CELLULAIRES

Les automates cellulaires (AC) ont été introduits par John von Neumann et Stanislaw Ulam à la fin des années 1940 (Balman, 1997). Contrairement aux modèles mathématiques, les automates cellulaires permettent de modéliser les dynamiques spatiales du système étudié. L'environnement est représenté par un ensemble de cellules à n -dimensions (1 ou 2). Le comportement des individus est défini à travers les cellules qui sont caractérisées par un ensemble fini d'états et des règles de transitions. Les règles de transition définissent l'état d'une cellule et sont communes à toutes les cellules. L'état futur d'une cellule dépend de son état actuel et de celui de ses voisines. Le système est homogène car les règles de transitions sont communes pour toutes les cellules. De ce fait les AC sont adaptés aux systèmes munis d'une complexité organisée (Bousquet *et al.*) où les entités ont des comportements homogènes.

Appliqué dans la GRR, les AC s'intéressent plus spécifiquement à l'impact de configurations spatiales sur la dynamique d'une ressource à travers les réseaux de voisinage qu'elles induisent (Abrami, 2004). Ainsi, à travers les AC, Vanbergue et al (2000) modélisent le phénomène de

migration urbaine à Bogota ; Berger (2001) étudie la propagation des techniques d'innovation et ses conséquences sur l'irrigation.

Les AC présentent quelques inconvénients. Les relations sociales sont plus complexes que les relations de voisinage. Les règles de décision étant communes pour toutes les cellules, il est impossible de prendre en compte l'hétérogénéité de comportement des agents.

2.1.4. LES SYSTEMES MULTI-AGENTS

Les systèmes multi-agents sont nés de l'intelligence artificielle distribuée. Elle est née de la nécessité de distribuer les connaissances entre les différentes entités d'un système et de les faire coopérer.

2.1.4.1 Définition

Selon (Ferber), (95), *on appelle système multi-agents (SMA), un système composé des éléments suivants :*

1. *Un environnement E , c'est à dire un espace disposant généralement d'une métrique.*
2. *Un ensemble d'objets O . Ces objets sont situés, c'est à dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné d'associer une position dans E . Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.*
3. *Un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers ($A \subseteq O$), lesquels représentent les entités actives du système.*
4. *Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.*
5. *un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets O .*
6. *Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers.*

Un agent est un système informatique, autonome, évoluant dans un environnement sur lequel il est capable d'agir pour atteindre ses objectifs. L'autonomie d'un agent s'explique par le fait qu'un agent peut agir sans aucune intervention humaine ; en effet il contrôle son comportement et ses propres ressources. Un agent perçoit son environnement sur lequel il agit pour atteindre ses objectifs. Mais il ne dispose que d'une représentation partielle de son environnement. La capacité d'un agent à modifier son environnement, est déterminée par un ensemble d'actions qui lui sont assignées, définissant ainsi ses compétences. Nous distinguons deux types d'agent.

Le premier type concerne les **agents réactifs**. Ils n'ont qu'une représentation partielle de leur environnement. Ils n'ont pas de mémoire, c'est-à-dire qu'ils ne tiennent pas compte de leurs expériences pour agir. Ils agissent en fonction des informations qui leur parviennent. Les systèmes

d'agents réactifs nécessitent un grand nombre d'agents. Le second type concerne **les agents cognitifs**. Ils ont une représentation explicite de leur environnement. Ce sont des agents complexes et tiennent compte de leur expérience passée pour agir. Contrairement aux systèmes d'agents réactifs, les systèmes d'agents cognitifs nécessitent moins d'agents.

2.1.4.2 SMA et gestion des ressources renouvelables

Les qualités des systèmes multi-agents ont été analysées par plusieurs auteurs (Grimm, 1999 ; Axtell, 2000 ; Drogoul *et al.*, 2003 ; Bousquet, 2004). Ces qualités peuvent être regroupées en points suivants :

1. Possibilité de représenter un système dans toute sa complexité

Les modèles de simulation sont généralement utilisés pour prédire l'état d'un système en faisant des hypothèses sur son évolution. Cependant, dans le cadre de la **GRR**, les systèmes étudiés sont des systèmes complexes dont le comportement est dynamique et imprévisible. De plus, ces systèmes relèvent des domaines pluridisciplinaires : écologie, hydrologie, sociologie, économie. Dans ce cas, on a besoin des modèles explicatifs permettant de comprendre les *mécanismes sous jacents* (Bousquet *et al.*, 2002) et de déterminer les états futurs possibles, afin d'adopter une politique de gestion adéquate. Les SMA sont adaptés à cet effet : à partir d'une approche distribuée, ils permettent d'intégrer des vues disciplinaires et des individus ayant des comportements hétérogènes et imprévisibles.

2. Usage et organisation sociale

La **GRR** relève entre autre du domaine des sciences sociales où les seules données numériques ne permettent pas d'appréhender la dynamique qui la caractérise. Cette gestion implique les processus difficilement quantifiables comme le comportement des individus, les règles de décision, et les interactions qui existent entre les individus d'une part et entre les individus et leur environnement d'autre part. Les SMA sont adaptés à cet effet. Ils permettent de modéliser les actions individuelles des individus et les interactions qui existent entre eux. Cependant un agent peut dynamiquement changer de comportement au cours du temps et adopter une nouvelle stratégie. De ce fait, les systèmes multi-agents offrent des possibilités d'intégrer dans un seul modèle des individus hétérogènes ayant des comportements et des connaissances variées. La prise en compte de l'hétérogénéité des individus permet par conséquent, de mettre en évidence l'impact des différents usages des ressources à partir des hypothèses que l'on peut faire sur leur comportement.

Dans un SMA, les agents sont en interaction et de cette interaction peut émerger une organisation. Plusieurs travaux dans le domaine des SMA ont proposé des formalismes

permettant une organisation sociale à plusieurs niveaux hiérarchiques. L'un des travaux les plus connus est celui de (Ferber et GUTKNECHT, 1998) qui fonde l'organisation sur la notion d'Agent-Groupe-Rôle (AGR).

3. Possibilité d'étudier les articulations en différents niveaux d'usage

Dans un système multi-agents, les agents évoluent dans un environnement dynamique, complexe et imprévisible dont il est difficile de définir correctement à priori le fonctionnement. Pour s'adapter et réagir aux différents changements, les agents utilisent des actions individuelles ou collectives (coordination). Cette caractéristique des SMA peut être utilisée dans la GRR dont l'un des objectifs est d'étudier les articulations entre les différents niveaux d'usage (Barreteau, 1998 ; Le Bars, 2003 ; Abrami, 2004 ; Barreteau *et al.*, 2004)

4. Prise en compte de la gestion spatiale des ressources

Dans le domaine de la GRR, l'espace constitue un élément central dans les interactions entre les agents. L'espace est porteuse des ressources qui font l'objet d'une utilisation commune par les différentes entités qui la composent. Contrairement aux modèles mathématiques qui ne permettent pas une représentation spatiale de l'environnement, les modèles multi-agents autorisent la prise en compte de l'organisation spatiale des ressources et les contraintes spatiales de leur gestion (Lardon *et al.*, 1998 ; Bonnefoy *et al.*, 2000 ; Bonnefoy *et al.*, 2001 ; Dumont et Hill, 2001 ; Lion, 2005). Ainsi, à travers la modélisation spatiale et la modélisation des actions des acteurs, les SMA mettent en évidence l'impact des différents usages sur la dynamique de l'espace. L'un des problèmes majeurs dans les sciences environnementales, est la représentation de l'espace à plusieurs échelles hiérarchiques. Ainsi, aujourd'hui il existe plusieurs plate-formes tel que *Cormas* fournissant des utilitaires pour représenter l'hétérogénéité de l'espace et les interactions qui existent entre dynamiques sociales et spatiales.

Les SMA sont donc pertinents pour modéliser la dynamique du carbone. La dynamique du carbone vue à l'échelle du terroir est caractérisée par un grand nombre d'éléments, la végétation, le climat, le sol, les animaux, les exploitations qui adoptent des types d'assolement différents, etc. nécessitant ainsi un traitement individuel. Aussi, l'étude de la dynamique à l'échelle du terroir s'intéresse au flux de carbone dans le sol, par conséquent à sa distribution spatiale (Manlay *et al.*, 2004a). Le sol dans ce cas, est porteur de ressources faisant l'objet d'une utilisation par les différents acteurs du système. Ainsi, une modélisation spatiale permettra de prendre en compte les interactions entre dynamiques sociales et spatiales.

Malgré les avantages qu'ils présentent, les SMA présentent un désavantage par rapport aux modèles économiques (Axtell, 2000). Supposons un modèle A, permettant d'obtenir un résultat R. Combien de changements sont nécessaires dans A pour obtenir R. ? La seule façon de répondre à

cette question avec un modèle multi-agents, consiste à faire tourner le modèle plusieurs fois et de faire varier les conditions initiales et les paramètres afin de valider le résultat. Alors que quelques équations simples suffisent pour trouver la réponse. Il en résulte sans doute que les modèles économiques et les modèles multi-agents peuvent être complémentaires.

2.2. LA METHODOLOGIE

La méthodologie proposée s'appuie sur la modélisation des systèmes multi-agents à travers la construction et la simulation sur ordinateur. Comme plate-forme de simulations, nous utilisons *Cormas* (Common-Pool Resources and Multi-Agent System) de l'équipe « Green » du Cirad Montpellier (Bousquet *et al.*, 1998).

Dans un système agricole semi-commercialisé, l'objectif principal des exploitants est la maximisation de leur utilité. Cependant, leurs décisions sont influencées par un ensemble de contraintes. A cet effet, Capillon dans (Herve *et al.*, 2002) définit le système agricole comme une chaîne de prise de décisions avec un ensemble de contraintes et de capitaux, mise en œuvre pour atteindre un ou plusieurs buts, qui régit les procédés de production et peut être caractérisée par des flux (argent, matériel, information) à l'intérieur et l'extérieur de la ferme ; d'où la nécessité d'intégrer une fonction de rationalité. Les modèles d'optimisation économique sont ainsi utilisés comme fonction de rationalité de exploitants. L'environnement GAMS est utilisé comme système de programmation de ces modèles d'optimisation.

Afin d'étudier l'environnement dans tout son ensemble, le modèle Mirot est interfacé avec un système d'information géographique (SIG).

Pour mener à bien notre étude, nous utilisons la démarche suivante :

1. Etude de l'existant : il s'agira de procéder à la mise en cause du système existant, relever des défaillances dans le but de proposer des solutions adéquates ;
2. Conception : il sera proposé un *modèle conceptuel* ((Drogoul *et al.*, 2003)) qui tient compte non seulement des insuffisances du modèle existant mais aussi des nouvelles connaissances acquises et des nouvelles exigences. Il s'agira de décrire les **agents conceptuels** ((Drogoul *et al.*, 2003)) et de décrire leurs propriétés à travers leurs **architectures comportementales, les interactions, communications, l'environnement, le modèle de perception et d'action, etc.** ((Drogoul *et al.*, 2003))
3. Construction du système : il s'agit de l'implémentation du système.

4. le calibrage et la validation du système : il s'agit d'effectuer des choix de paramètres et d'effectuer des simulations pour mettre en évidence l'impact des différents paramètres sur la dynamique du système.

2.2.1. LA MODELISATION AVEC CORMAS

Bousquet (2004) distingue trois types de plate-formes multi-agents : (1) les plate-formes génériques qui n'ont pas une application spécifique. Il s'agit par exemple de *Swarm*, *Echo*, *Geamas*, *Madkit*. (2) les plate-formes orientées écosystème utilisées pour la dynamique de l'écosystème ou des problèmes de gestion de ressource ; ce sont les plate-formes tels que *Ecosim*, *SugarScape*, *Cormas* ; (3) les plate-formes dédiées, s'intéressant à des types d'application spécifiques ; parmi ces dernières, nous avons *Manta* simulant une société d'insectes, *ArborScape* qui modélise la dynamique forestière, *BacSim* s'intéressant aux dynamiques micro-biologiques et *Mobydic* qui simule les dynamiques des peuplements de poissons.

Pour la réalisation du modèle, il sera utilisé la plate-forme *Cormas* (Bousquet *et al.*, 1998 ; Le Page *et al.*, 2001) qui est mieux adaptée à notre domaine d'étude. *Cormas* a été développé avec le langage de programmation orienté objet SmallTalk sous VisualWork. Il dispose d'une bibliothèque de méthodes et une interface utilisateur permettant de simuler la dynamique de l'écosystème. La différence majeure entre *Cormas* et les autres plate-formes est sa simplicité. Celle-ci a permis d'élargir son champ d'application dans la modélisation multi-agents qui se veut pluridisciplinaire.

L'un des problèmes majeurs de l'application des SMA dans la gestion d'enjeux environnementaux, est de représenter le paysage à différentes échelles. *Cormas* permet de représenter l'hétérogénéité de l'espace à travers des entités spatiales génériques hiérarchisées. La modélisation d'un modèle SMA avec *Cormas* se réalise en trois phases, consistant à définir :

1. les entités spatiales qui sont des porteuses de ressources, les entités sociales et les entités passives.
2. l'ordonnement des activités des entités ;
3. les points de vue permettent d'observer le changement de l'espace ; la dynamique du modèle à partir d'une grille de cellules et de visualiser les messages échangés entre les entités communicantes.

2.2.2. RECAPITULATION: PERTIENENCE DE LA METHODE PROPOSEE

L'objectif principal de cette étude est la construction d'un modèle permettant de représenter et d'étudier la dynamique du carbone à l'échelle du terroir. Aujourd'hui, aucune étude concernant la dynamique des ressources en carbone à l'échelle du terroir recouvrant les systèmes multi-agents n'existent.

La méthode retenue présente plusieurs d'avantages. L'utilisation des SMA permet de représenter le système dans sa complexité. L'interfaçage du système avec un SIG permet de présenter l'environnement dans son ensemble. Cet interfaçage permettra sans doute d'étudier d'intégrer les structures spatiales existantes du milieu (sol, végétation, initiale, situation des habitats).

Le modèle constitue d'autre part un outil pour analyser les décisions des exploitants au niveau global. Il intègre les contraintes liées à l'utilisation des ressources (équipement, finance, terre, etc.). En couplant ces deux approches, les motivations économiques dans les prises de décision et l'utilisation des équipements agricoles dans la production sont ainsi prises en compte.

2.3. SITE D'ETUDE

2.3.1. REPRESENTATION CONCEPTUELLE DE LA DYNAMIQUE DU CARBONE A L'ECHELLE D'UN TERROIR GENERIQUE

Plusieurs éléments interviennent dans la dynamique du carbone à l'échelle du terroir.

1. L'environnement

Il est porteur des ressources (biomasse végétale, eau, bois, etc.) qui font l'objet d'usages multiples. Il est aussi le lieu où se déroulent les interactions entre les différents individus qui y existent à travers des réseaux de communication tel que le marché, les institutions, etc.

2. Les exploitants

Les exploitants par leurs activités transforment l'environnement. Pour survenir à leur besoin, les exploitants utilisent les parcelles pour la production agricole. Une partie de la production réalisée est consommée et la seconde partie est vendue pour survenir aux besoins monétaires. En fonction de leur revenu, les exploitants investissent dans l'achat des animaux ou des équipements afin d'améliorer leur production. Cependant, l'exploitation des parcelles entraîne une baisse de fertilité. Pour améliorer leur productivité, les exploitants peuvent apporter des éléments de fertilisation (engrais, matière organique, etc.) ou procéder à leur mise en jachère.

3. Les animaux

Les animaux par leurs activités de pâturage participent au transfert du carbone. Ils prélèvent de la matière sèche et en retour déposent des fèces qui participent à la fertilisation des sols. Les animaux qui sont la propriété des exploitants, constituent une source de revenu. Ils sont vendus afin de satisfaire les besoins monétaires.

4. Le climat

Il conditionne largement les activités des exploitants et des animaux. Cela s'explique par le fait que le climat influence (1) le rendement des cultures, condition sine qua non de la stabilité des exploitants et (2) la production du fourrage qui intervient dans la consommation des animaux

A travers ces descriptions, il en résulte que les relations entre les individus et leur environnement sont réciproques : les individus transforment l'environnement qui par son comportement influence leurs activités. La viabilité des ressources dépend de ces interactions qui sont parfois complexes dont les seules expériences au laboratoire ne permettent pas de comprendre.

La Figure 1 définit le cadre conceptuel de la dynamique du carbone.

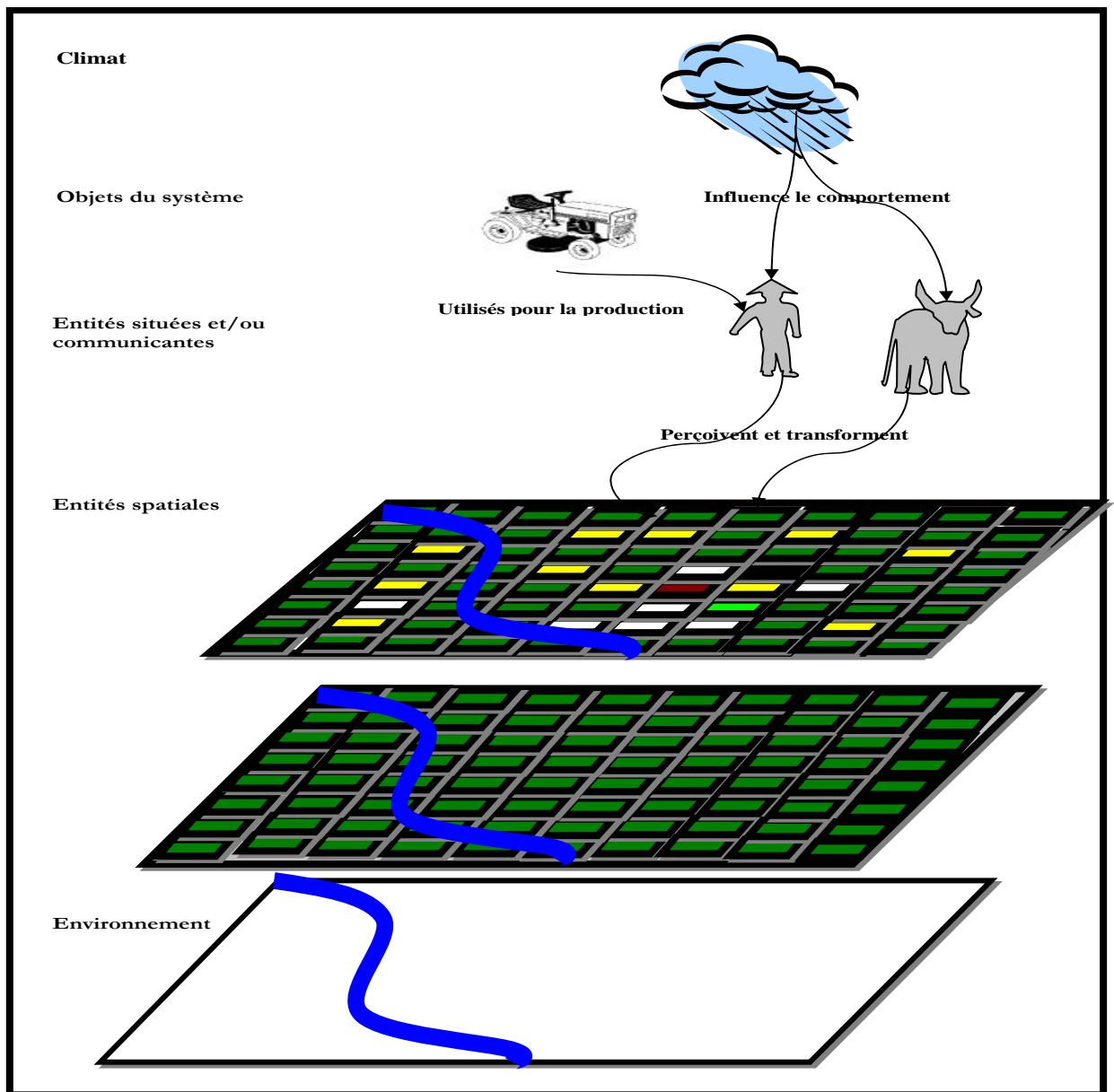


Figure 1: cadre conceptuel du système étudié

2.3.2. L'ENVIRONNEMENT SIMULE : LE VILLAGE DE TOROKORO

Le village de Torokoro est situé dans le sud-ouest du Burkina Faso dans la province de la Comoé. Le climat est de type sud-soudanien avec des précipitations supérieures à 1000 mm (Bonkougou, 2004). La végétation est très variée caractérisée par un nombre important d'espèces végétales.

Sur le plan démographique, la population de Torokoro est caractérisée par une variété de groupes ethniques : Doghossè, Peuhl, Mossi, Lobi, Samo, Karaboro, Bobo, Turka, Dafin, Goin, Dagara, etc. (Bonkougou, 2004). La croissance de la population est importante et connaît un flux migratoire très important.

Trois systèmes de culture sont pratiqués :

1. un système autochtone de culture semi-continue à base d'igname : pratiqué par les autochtones qui font une succession culturale du type igname/maïs/sorgho puis céréales pendant deux (2) ou trois (3) ans avant retour à une jachère longue.;
2. un système migrant de culture continue à base de coton : pratiqué par les migrants, il correspond à une succession de type maïs/coton/céréale ;
3. un système de culture continue pratiqué par les petits exploitants réalisant une exploitation manuelle.

L'agriculture pratiquée à Torokoro est caractérisée par deux types de culture : les cultures de rente (coton, igname) pour la satisfaction des besoins monétaires et les cultures vivrières (maïs, sorgho, etc.) intervenant dans la satisfaction des besoins alimentaires. En plus de l'agriculture qui constitue la principale activité des exploitants, l'élevage est pratiqué par nombre d'entre eux. Il constitue la seconde source de revenu pour ces derniers. La plantation d'anacardier pratiquée généralement dans un but de sécurisation foncière, est la troisième source de revenu.

3. ETUDE DE L'EXISTANT

Le modèle MIROT a déjà fait l'objet d'une première étude (Belem, 2003). L'objectif premier de celle-ci était la construction d'un prototype simple de simulation de la dynamique des ressources d'un terroir virtuel. Le modèle a été développé à un moment où de nombreuses connaissances du milieu étudié n'étaient pas disponibles et les études sur le terrain étaient en cours. Pour combler ces lacunes, des hypothèses très simplificatrices avaient été réalisées sur certains aspects du modèle, comme l'utilisation de données provenant d'autres sites (bench-marking) ou abstraction de certaines caractéristiques des écosystèmes et des règles de leur utilisation. Ainsi le prototype présentait plusieurs insuffisances :

1. Environnement

L'environnement bénéficiait d'une représentation simplifiée. Ainsi, le prototype ne prenait pas en compte l'hétérogénéité spatiale initiale (sol, végétation). L'homogénéité de l'espace ne permettait pas d'étudier l'impact de certaines contraintes spatiales sur le comportement des individus et sur la dynamique de la ressource. Le choix du type d'occupation d'une parcelle par un paysan dépend par exemple de ses propriétés agronomiques et de son emplacement dans le domaine de l'exploitation agricole. Les propriétés agronomiques d'une parcelle dépendent en large partie, du type de sol qui suit lui-même une loi de distribution spatiale dans le paysage. Certains types de sols ne sont pas propices à la culture, d'autres par contre sont spécifiques à certains types de culture. Par exemple, les sols de bas fonds sont propices à la culture de riz mais inappropriés pour la culture du maïs. Aussi, le taux de carbone varie d'un type de sol à l'autre.

2. Organisation sociale du système

Plusieurs groupes sociaux coexistent et pratiquent des types d'assolement différents. Le prototype n'intégrait pas l'organisation sociale ni les interactions entre individus : demande, location, achat, vente de parcelles, demande de parcage, achat de main d'œuvre, entre-aide, etc. De plus, le comportement des individus était statique, c'est-à-dire qu'un paysan ne pouvait pas changer de stratégie, ce qui ne correspondait pas à la réalité.

3. Utilisation des équipements comme moyen de production

Le niveau d'équipement de l'exploitation n'était pas pris en compte. Or les équipements, moyen de production, ont un impact très important sur la stratégie adoptée par les exploitants, car ils constituent dans certaines opérations culturales une contrainte majeure et influencent le choix d'investissement (achat de troupeau ou de moyen de production) de l'exploitant.

4. La gestion des flux de carbone

Le modèle n'intégrait pas certains stocks et flux de carbone majeurs. Par exemple, il était impossible de simuler le bilan en carbone par système de production

5. Comportement spatial des animaux

Le comportement spatial des animaux n'était pas correctement simulé. Les troupeaux n'étaient pas autorisés à pâturer que dans les exploitations de leur propriétaire, ce qui occulte la réalité de la chaîne pâture et ne permet pas de simuler le transfert de carbone par les animaux dans le paysage.

4. LA CONSTRUCTION DU MODELE

Un modèle peut être défini comme une représentation abstraite de la réalité. Il s'agit d'une image simplifiée de la réalité permettant de comprendre le fonctionnement du système en fonction des objectifs poursuivis (Bousquet *et al.*). Dans cette partie de notre document, il s'agira de décrire la structure du modèle et les dynamiques qui la composent. Nous utiliserons le formalisme **AOIE** de Demazeau pour définir la structure et la dynamique du modèle. Pour Demazeau, un SMA se compose de quatre éléments principaux :

- un environnement (**E**) qui est représenté par une espace ;
- un ensemble d'objets, (**O**). Ces objets sont situés et peuvent être associés à une position dans l'environnement **E**.
- un ensemble d'agents, (**A**) qui sont des objets spécifiques et représentent les entités actives du système.
- Les interactions **I**
- L'organisation **O**

4.1. LES AGENTS

4.1.1. EXPLOITANT

L'agent Exploitant est un agent **cognitif**. Il dispose d'une base de données qui détermine sa connaissance sur l'état de son environnement, et d'une base de règles lui permettant de déterminer l'action à exécuter dans une situation donnée. Il a la connaissance de l'existence des autres agents avec qui il peut échanger des informations.

Un exploitant est caractérisé par l'effectif de sa concession, l'effectif de 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 en nourriture.

L'exploitant est défini comme une entité qui est motivée par la recherche de maximisation de son utilité : il cherche à satisfaire ses besoins alimentaire et monétaire. Afin d'atteindre ses objectifs, il modifie son environnement, en exploitant la surface nécessaire. Pour cela, il doit définir un **plan de production optimal** suivant la stratégie adoptée (Figure Annexe 1 et Figure Annexe 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cependant, le plan de production évalué par l'exploitant dépend de la disponibilité des ressources (terres, main d'œuvre.) et des facteurs biophysiques nécessitant de la part de l'exploitant, un comportement rationnel. Lorsque les ressources sont insuffisantes, il peut soit les louer soit les acheter en fonction de la disponibilité en argent.

Par l'exploitation des parcelles, l'environnement de l'exploitant change d'état (baisse de fertilité) et lui retourne une rétroaction (**production**) qui va influencer son comportement futur. Ainsi, lorsque la rétroaction est positive, il investit dans l'achat de troupeaux et de nouveaux équipements pour améliorer sa production. Les investissements sont réalisés grâce à la vente de la production. Pour arriver à cette fin, il établit un **plan de vente** qui définit pour chaque culture la quantité à vendre tout en tenant compte de la contrainte de satisfaction du besoin alimentaire. Dans le cas où le rendement est mauvais, il adoptera un nouveau comportement (par exemple migrer ou changer de stratégie). En fonction de la réaction de son environnement, l'exploitant ajuste son comportement pour s'adapter aux nouvelles exigences. Pour cela, il utilise ses expériences passées (**effet mémoire**) lui permettant de minimiser les risques. L'exploitant peut être aussi influencé par les autres exploitants qui adoptent d'autres stratégies de production plus rentables et répondent aux nouvelles exigences de l'environnement (diffusion des stratégies d'exploitation).

Les besoins alimentaire et monétaire sont fonction de l'effectif de l'exploitation et du besoin annuel par personne. Ils sont définis comme suit :

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

Équation 1: Modèle d'évaluation du besoin alimentaire

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

Équation 2: Modèle d'évaluation du besoin monétaire

Ainsi, après chaque production, l'exploitant met à jour sa mémoire. La mémoire de l'exploitant est limitée à 5 ans. A partir de ses expériences, il définit le rendement minimal pour chaque culture. Le rendement minimal d'une culture est calculé à partir du plus faible rendement au cours de ces

cinq dernières années. Cette règle permettra de minimiser les risques et garantir la satisfaction des besoins. 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 concession¹ migre vers une nouvelle exploitation ou quitte le terroir.

A travers ces descriptions il ressort sans doute que l'exploitant est une entité rationnelle capable d'agir de manière à améliorer son utilité. Le problème majeur est comment permettre à un exploitant contraint par la limitation des ressources et de l'état de l'environnement de produire et de vendre sa production de manière optimale. Pour cela, nous utilisons des modèles bio-économiques (cf. annexe 1 : aspects socio-economiques du système). Deux modèles ont été construits à cet effet :

- Un premier modèle permettant de définir le plan de production en fonction des besoins de l'exploitant, des ressources disponibles et du climat. Le modèle fournit en sortie la surface à exploiter pour chaque type de culture.
- Le second modèle définit un plan de vente qui définit en fonction de la production réalisée, la quantité à stocker et à vendre pour satisfaire les besoins.

La Figure 2 présente les règles de décision d'un exploitant.

¹ *Concession ou exploitation agricole* : communauté de personnes partageant le même grenier et les mêmes moyens de production (champs, parfois animaux).

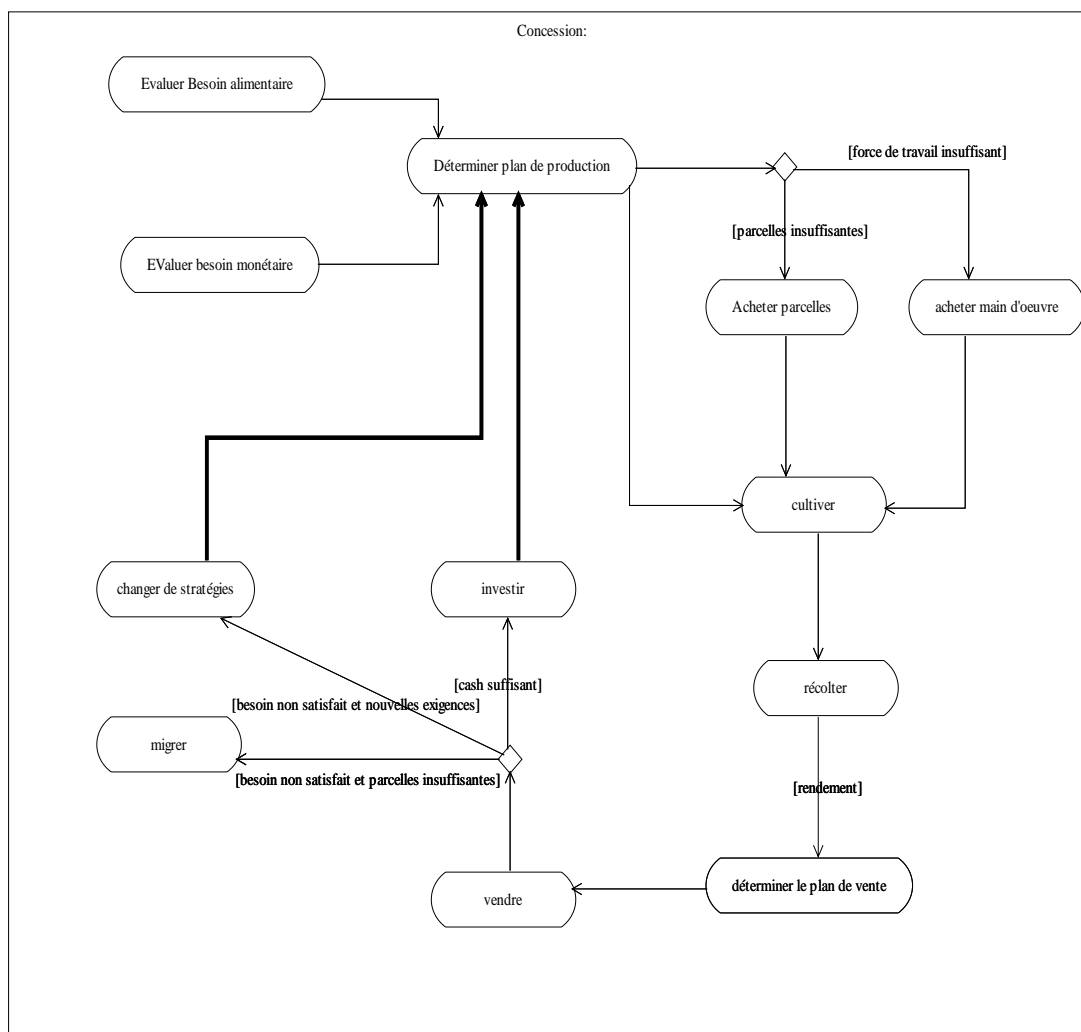


Figure 2 : règles de décision de mise en culture chez un exploitant

La croissance

La croissance des concessions définit la génération de la population. Elle permet de mettre en évidence le niveau des populations sur la disponibilité des ressources. Chaque année l'effectif des concessions augmente en fonction du taux de croissance défini et de la capacité d'une exploitation. 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 de Verhulst (1838)

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

Équation 3: 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.

4.1.2. TROUPEAU

Les troupeaux constituent le second groupe d'entités actives du modèle. Ils jouent un rôle important dans la dynamique du carbone en tant que facteur de redistribution de la matière organique (MO) dans le paysage (Landais et Guérin, 1993). Par leurs activités, les troupeaux transfèrent de la M.O des parcours naturels et les jachères vers les parcelles cultivées et déposent des quantités importantes de fèces lors de la pâture des résidus de culture et de leur stationnement nocturne dans les parcs (Achard *et al.*, 2000) ; ce qui modifie la fertilité du sol.

Ainsi, le rôle des troupeaux dans le transfert de matière organique permet de mettre en évidence les éléments suivants sur leurs activités : le prélèvement de la biomasse, l'excrétion et la mobilité réglant la distribution spatiale des prélèvements et des restitutions (Landais et Guérin, 1993). Nous pouvons dire que le comportement des troupeaux est régi par des contraintes spatiales.

Afin de modéliser son comportement, le troupeau est considéré comme un agent situé, capable de se déplacer. C'est une entité réactive qui fonctionne par stimulus réponse. L'objectif principal du troupeau est la satisfaction de son besoin en fourrage et en eau qui constituent des ressources distribuées sur l'environnement. Pour atteindre ces ressources, le troupeau doit se déplacer. Il est attiré par les parcelles les plus attractives (ouvertes au pâturage et disposant du fourrage en quantité) par contre les autres parcelles, (plantations, cultures) lui sont interdites. Ainsi, à partir de son emplacement actuel, le troupeau sélectionne la parcelle connexe la plus attractive et se déplace vers cette dernière en menant ses activités de pâturage. De ce fait, le troupeau se déplacera vers le sud, le nord, l'est ou l'ouest de la position actuelle selon sa préférence pour une parcelle (Figure 3).

Le sens du déplacement détermine la distance parcourue sur une parcelle (Figure 3) et par conséquent le temps de séjour qui dépend de la vitesse de déplacement du troupeau. Le temps de séjour servira à déterminer la quantité de biomasse prélevée (Équation 4) et la quantité de matière organique déposée (Équation 5). Le troupeau se déplace pour satisfaire son besoin, son

parcours est limité par un temps de déplacement journalier et la satisfaction de son besoin. La Figure 4 définit l'activité d'un troupeau au cours d'un parcours.

$$prelevement = vitesse\ Pr\ elevement * tempsSejour$$

Équation 4: Modèle de prélèvement du fourrage

Où $vitessePrelevement$ est la quantité de fourrage prélevée par heure et $tempsSejour$ est le temps de séjour du troupeau sur la parcelle.

$$depotMO = vitesseDepoMo * TempsSejour$$

Équation 5 : Modèle de définition de dépôt de matières organiques par un troupeau en fonction de son temps de séjour

Où $vitesseDepotMo$ est la quantité de matière organique déposée par heure et $tempsSejour$ est le temps de séjour du troupeau sur la parcelle

Croissance

La croissance des animaux est limitée par la capacité de charge du terroir. La capacité de charge varie avec l'accroissement du cheptel et l'augmentation des terres cultivables. Le modèle logistique (Verhulst, 1838) est utilisé pour modéliser la croissance de la population animale. Il permet de définir la croissance d'une population en fonction de la capacité de charges selon la formule suivante :

$$dNdt = rN \left(1 - \frac{N}{K} \right)$$

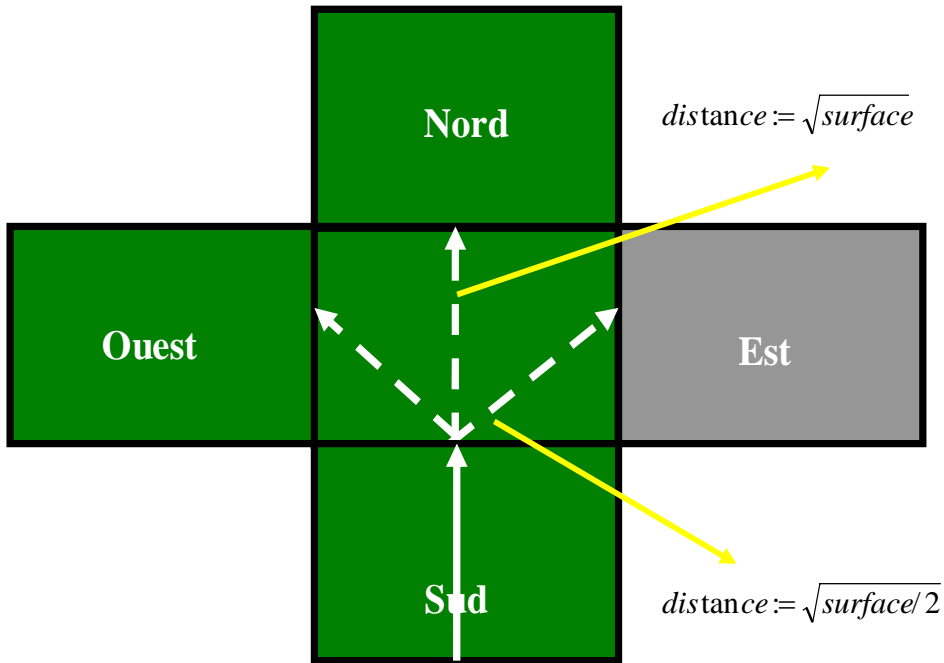
Équation 6: Modèle de croissance des troupeaux

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.

$$K = \frac{productionAnnuelleFourrage}{besoinFourrage}$$

Équation 7: Calcul de la capacité de charge du terroir

Où $productionAnnuelleFourrage$ est la production de fourrage au cours de l'année écoulée et $besoinFourrage$ est le besoin du cheptel du terroir.



$$besoinFourrage \leftarrow besoinAnnuelUBT \times effectifCheptel \times 0,75$$

Équation 8 : Besoin de fourrage

Où *besoinAnnuelUBT* est le besoin annuel en kg/ et l'*effectifCheptel* est l'effectif total des troupeaux.

1 bovin de poids vif (250 kg) = 0,75 UBT (Botoni, 2003).

Figure 3 : Sens du déplacement d'un troupeau sur les parcelles

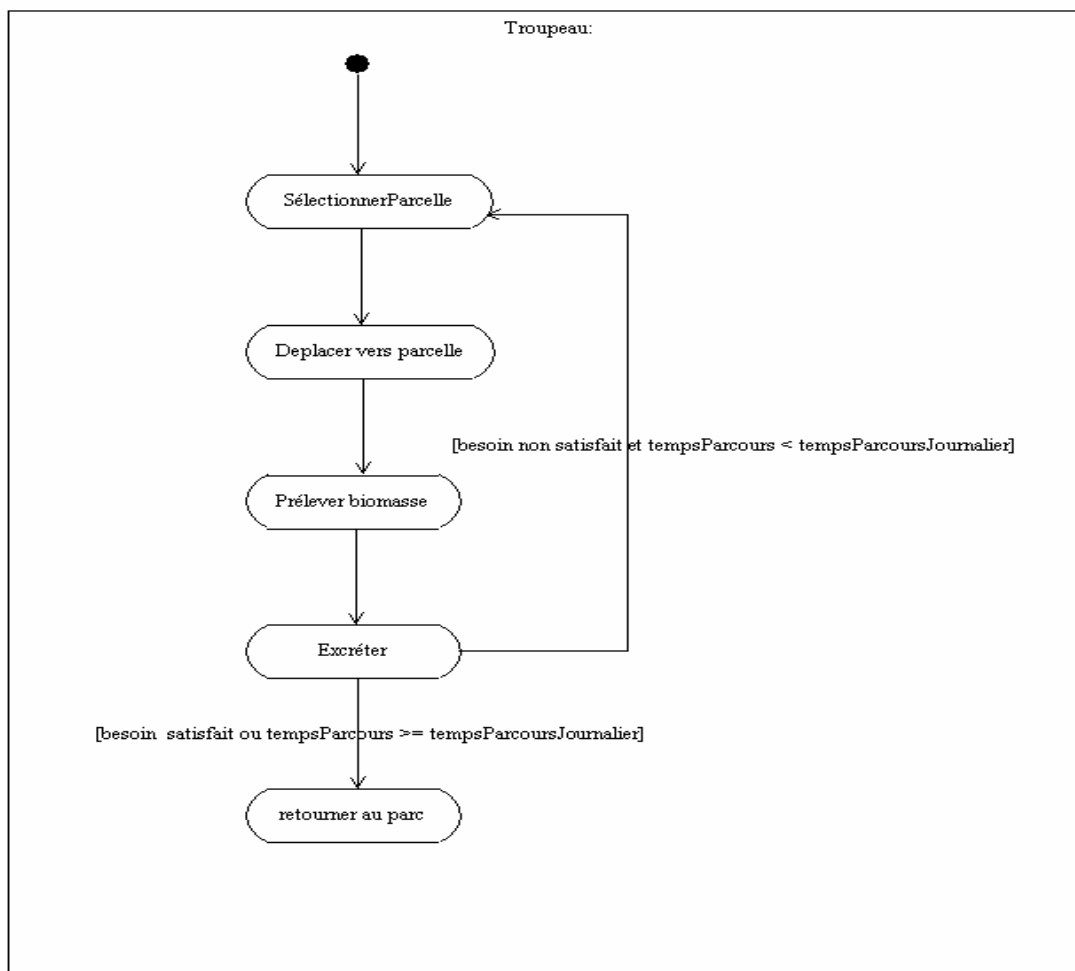


Figure 4: Diagramme d'activités d'un troupeau

4.1.3. CLIMAT

Le climat est une entité réactive. Il influence le comportement des exploitants, des troupeaux et de l'environnement.

Le climat intervient dans la détermination de la pluviosité d'un mois. Au début de chaque mois de la période hivernale, la pluviosité est calculée. 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. Pour limiter la mémoire de l'exploitant, seules les pluviosités des 10 dernières années sont mémorisées.

4.1.4. TEMPS

Le comportement des agents (exploitants, troupeaux) est une succession de décisions à différentes échelles spatio-temporelles. Exemple : le comportement d'un exploitant varie selon qu'il s'agit de la période hivernale ou de la saison sèche. Le temps de simulation étant discret, il est primordial de déterminer à chaque pas de temps, le mois et/ou l'année correspondants.

4.2. LES OBJETS

4.2.1. MOIS

L'objet 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.

4.2.2. CULTURE

L'objet culture permet de décrire les différents types de culture utilisés 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.

4.2.3. SYSTEME_CULTURE

L'objet Systeme_Culture décrit les systèmes de culture. Ainsi, chaque système de culture est caractérisé pour son type, et la succession culturale pratiquée. La succession culturale est une liste ordonnée des cultures pratiquées.

4.2.4. STOCK

L'objet 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 et au moment de la consommation ou de la vente des produits agricoles.

4.3. LES INTERACTIONS

Bousquet (2004) identifie 3 modes d'interaction dans le cas des systèmes multi-agents simulant l'objet environnemental :

- **les interactions directes entre agents** : il s'agit des communications entre agents à travers lesquelles les agents échangent des informations pour la coordination de leurs activités.
- **Les interactions des agents avec l'environnement** : il s'agit des actions individuelles des agents sur leur environnement et les conséquences de ces actions sur leur comportement. L'environnement est vu comme les ressources et l'espace physique dans laquelle évoluent les agents.
- **Les interactions physiques** : il s'agit des actions physiques exercées par un agent sur un objet.

Dans cette partie de notre document, nous présentons les différentes interactions qui existent dans notre modèle. Nous nous intéresserons qu'au premier type.

4.3.1. INTERACTION PAR COMMUNICATION

L'installation des exploitants

L'installation d'un exploitant fait l'objet d'une recherche de parcelles propices à ses activités. Lorsqu'il existe des parcelles vides, les nouvelles concessions s'installent sur celles-ci. L'installation sur une exploitation doit obéir à certaines règles : les exploitants s'installent en fonction de leur appartenance sociale.

Ainsi l'attribution des terrains est faite par le chef coutumier. Lorsqu'un nouvel exploitant souhaite s'installer, il s'adresse au chef coutumier. Le chef coutumier a la connaissance du terroir et des terrains interdits à l'exploitation, il est le plus habilité à chercher une exploitation. Le rôle d'attribution de parcelles par le chef prend fin lorsqu'il n'existe plus de parcelles exploitables sur le terroir. C'est à partir de ce moment que la vente et la location de parcelles apparaissent.

Le parcage des animaux

Le parcage des animaux constitue un moyen de transfert de matières organiques sur les parcelles cultivées. Les animaux consomment les résidus de cultures se trouvant sur les parcelles et produisent en retour du fumier qui sert à leur fertilisation. Ainsi les éleveurs de bovins ne disposant pas assez de parcelles négocient avec les agriculteurs pour parquer leurs animaux faisant ainsi l'objet d'un contrat où l'objectif de l'éleveur est de nourrir ses animaux et celui de l'agriculteur est de fertiliser ses parcelles.

Lorsqu'un éleveur E souhaite parquer ses animaux :

1. il formule une demande de parcage aux agriculteurs où il spécifie le nombre d'animaux à parquer ;
2. A la réception, les agriculteurs évaluent la demande. Lorsque l'effectif du troupeau de l'agriculteur est important, il rejette la demande. Dans le cas contraire, il fait une proposition à l'éleveur. Une proposition est un ensemble de parcelles et la durée du parcage.
3. L'éleveur évalue les propositions et sélectionne les meilleures propositions. L'éleveur cherche à optimiser son choix. Dans ce cas, il tient compte du nombre de parcelles proposées, la quantité et la qualité de biomasses se trouvant sur les parcelles et leur distance par rapport à son exploitation. Quant à la qualité de la biomasse, il s'agit plutôt des types de débris agricoles. Ces types étant variés (coton, maïs, sorgho, etc.), certains sont plus propices à l'alimentation des bétails que d'autres.
4. Après avoir sélectionné les meilleures propositions, il envoie un message d'acceptation aux meilleurs offrants qui s'engagent à respecter le contrat;
5. A la fin, l'éleveur effectue une répartition de ses troupeaux sur les parcelles acquises.

Le processus se répète jusqu'à ce qu'il arrive à parquer tous ces animaux ou qu'il n'y ait plus de propositions de parcelles.

La Figure 5 et la Figure 6 décrivent le processus de négociation de demande de parcage.

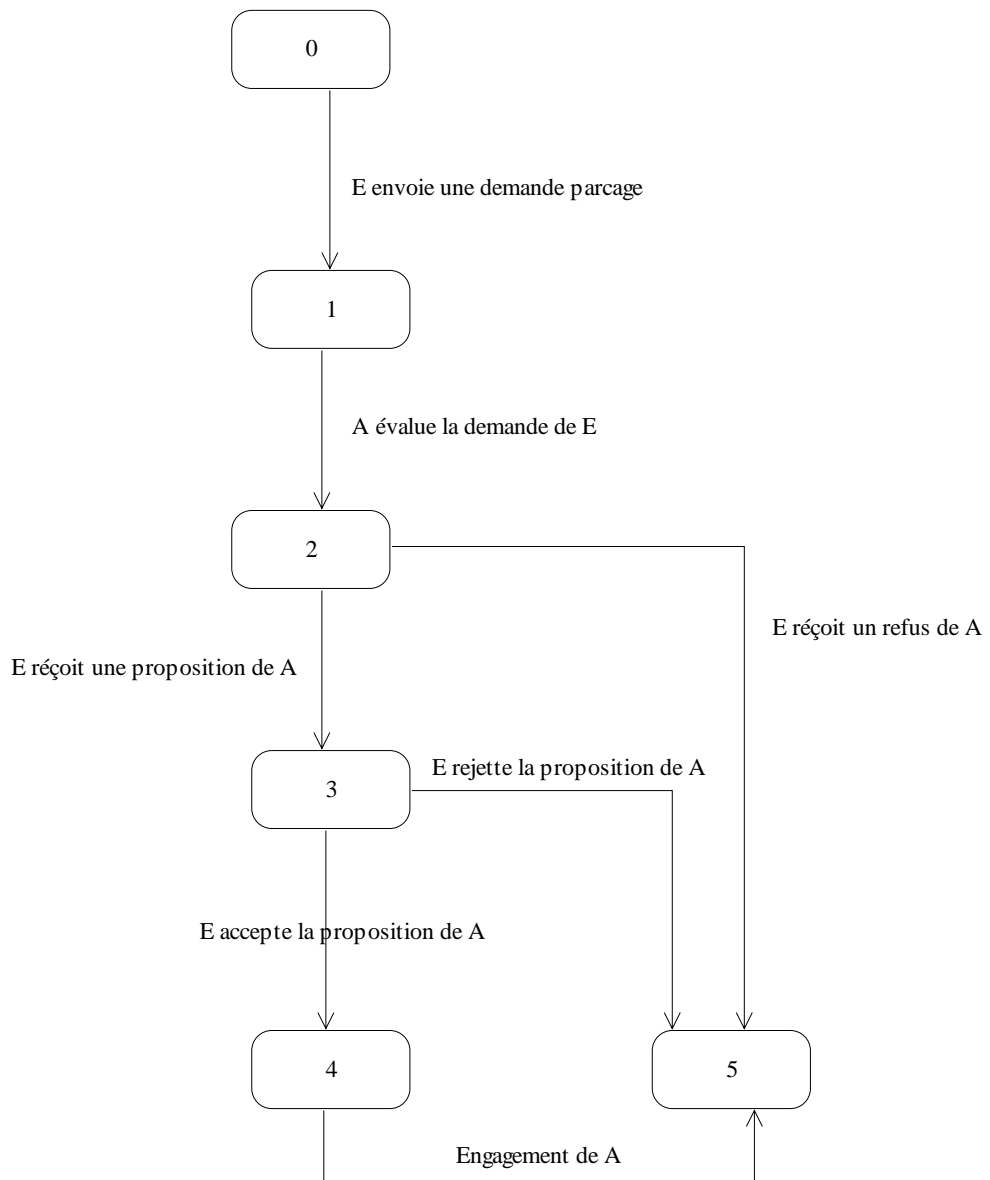


Figure 5 : Négociation lors d'une demande de parcage

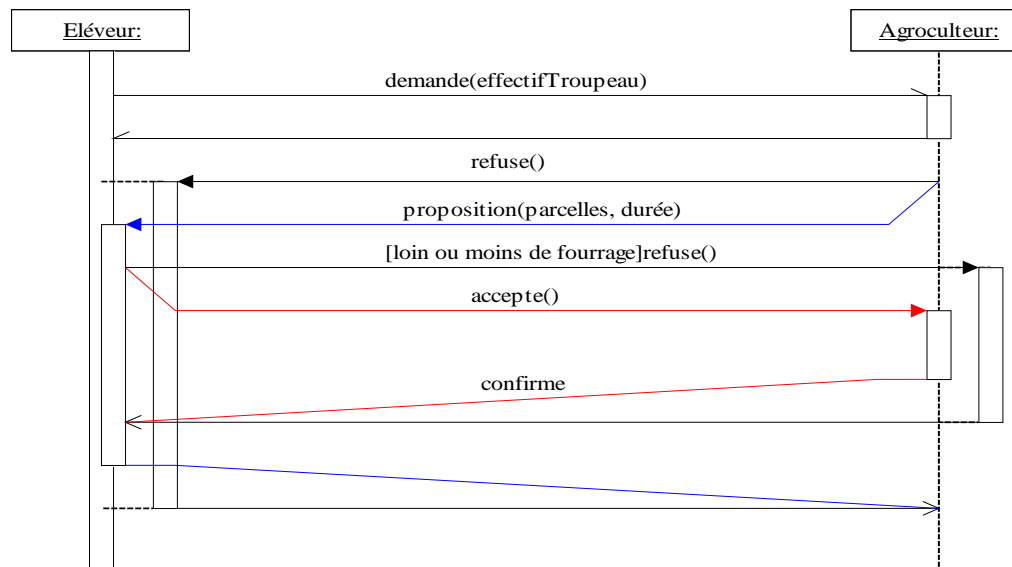


Figure 6: Diagramme de séquence : Négociation pour le parcage

4.3.2. LE TRAITEMENT DES MESSAGES

Dans un système multi-agents, les agents interagissent à travers les échanges de messages dans le but de coordonner les activités ou de partager les ressources. Cependant, la communication nécessite une compréhension mutuelle entre l'émetteur et le récepteur. Un message s'il est mal spécifié, peut être différemment compris des deux. De ce fait, la théorie des actes de langages ((Ferber, 1995)) a été introduite pour permettre aux agents de se comprendre lors d'un processus de communication. Elle considère la communication comme des actions de requêtes, suggestion, engagement, réponse, etc. ((Michael et Larry, 1999)). Ainsi, le type de message envoyé ou reçu permet à un agent de prendre une place dans la communication. Pour chaque message envoyé par un agent, le système associe un performatif (Tableau 1).

L'envoi des messages est asynchrone. Contrairement à l'envoi synchrone, les agents peuvent envoyer les messages et poursuivre l'exécution de la tâche courante. L'envoi étant asynchrone, l'agent doit pouvoir déterminer à tout moment les messages qui sont en attente de réponse. Ainsi, l'agent sauvegarde dans une liste tout message envoyé et nécessitant une réponse. A la réception d'une réponse à un message, ce dernier est supprimé de la liste. De ce fait, l'identité du message d'origine est associée à chaque **message réponse**.

Chaque agent dispose d'une boîte aux lettres qu'il consulte constamment. La consultation de la boîte aux lettres est effectuée grâce à un **Thread**.

Tableau 1: Liste des types de messages traités dans le modèle

Messages	Description	Performatif
demandeExploitation	Message de demande de parcelles au distributeur de parcelles	Demande
installer	Message de proposition de parcelles pour installation	Informe
demandeParcage	Message de demande de parcage	Demande
proposeParcage	Message de proposition de parcelles pour parcage	Propose
refuseDemandeParcage	Message de refus de demande de parcage	Refuse
acceptePropParcage	Message d'acceptation de demande de parcage	Informe
refusePropParcage	Message de refus de proposition de parcelles pour parcage	Refuse

4.4. L'ENVIRONNEMENT

La modélisation d'un système passe nécessairement par la modélisation de l'environnement dans lequel évoluent les différentes entités dont les comportements sont simulés.

4.4.1. L'ORGANISATION SPATIALE DU MODELE

L'espace à simuler est reparti en trois niveaux hiérarchiques (Figure 7).

Premier niveau : il s'agit des entités spatiales élémentaires que sont les cellules. Dans notre système, une cellule correspond à une parcelle. Elle est définie par sa taille, la quantité de biomasses qui s'y trouvent, etc. Une parcelle est soit une forêt, une culture, une plantation, une jachère, une bâtie, un parc ou un point d'eau. Ces différents éléments définissent l'occupation d'une cellule.

Deuxième niveau : les entités de niveau 1 sont regroupées en fonction de leur occupation pour former les entités de niveau 2. Alors les entités de niveau 2 sont (1) des forêts, dans ce cas elles sont constituées des parcelles ayant comme couvert végétal la forêt ou (2) des exploitations, dans ce cas, elles définissent les limites d'activités d'un exploitant et sont constituées de parcelles de culture, en jachère, des plantations, du bâti, des parcs d'animaux et éventuellement de la forêt.

Troisième niveau : il s'agit du paysage simulé. Il est constitué des entités de niveau 1 et des entités de niveau 2.

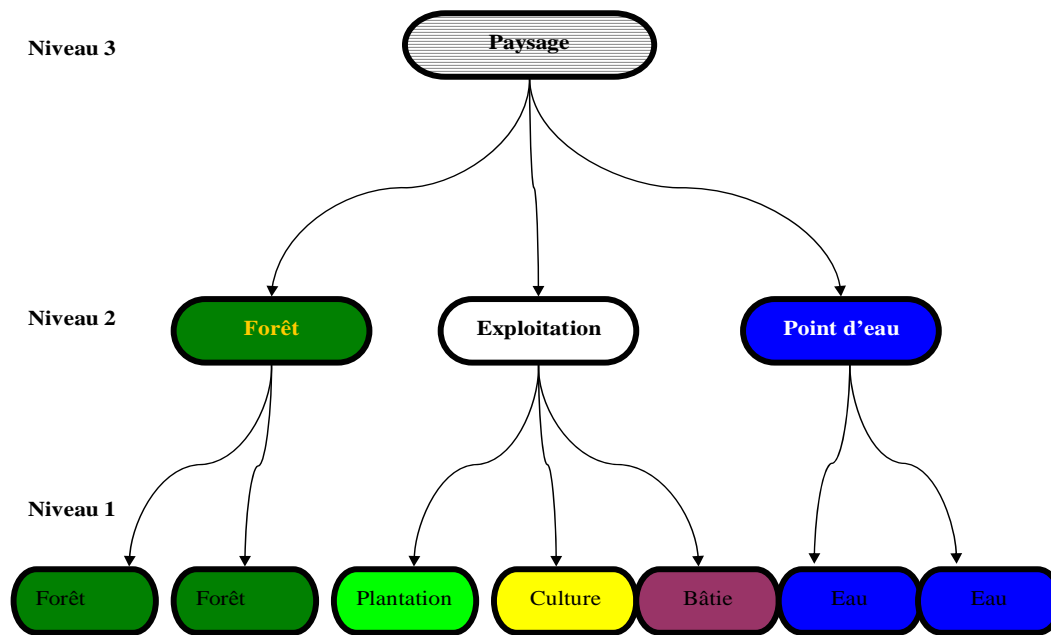


Figure 7: Organisation spatiale de l'environnement par niveau

4.4.2. LA DYNAMIQUE SPATIALE

Occupation des parcelles

L'occupation initiale d'une parcelle exploitable est la forêt et varie en fonction de son utilisation (culture, parc d'animaux, bâtie, plantation) (Figure 8).

Ainsi, l'occupation des parcelles cultivées change en fonction de la technique culturale pratiquée (Figure 9 et Figure 10). Une parcelle dont la fertilité est insuffisante pour la culture est mise en jachère et exploitée lorsque sa fertilité sera suffisante.

Pour formaliser les règles d'utilisation des parcelles, des attributs *ageCulture*, *ageJachere* et *agePlantation* ont été introduits : (1) « *ageCulture* », qui définit la durée de mise en culture depuis sa première culture ou sa dernière mise en jachère, il est mis à zéro, lorsque la parcelle n'est plus cultivée, (2) « *ageJachere* » qui définit la durée de la mise en jachère d'une parcelle, il est mis à zéro lorsque la parcelle est cultivée et (3) « *agePlantation* » définissant l'âge de la plantation. La productivité d'une plantation dépend de son âge. Lorsqu'elle est trop vieille, sa productivité baisse et doit être ainsi taillée pour son rajeunissement. Pour modéliser le rajeunissement d'une plantation, lorsque son âge atteint les 30 ans (360 mois), son âge est remis à 5 (l'âge à partir duquel une plantation produit).

Croissances des biomasses

Plusieurs compartiments de biomasses sont représentés dans le modèle : les strates herbacées, arborées et arbustives, les racines, 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 représentée par une fonction logistique croissante (Équation 9) (Youl, 2003). Dans les parcelles cultivées, la croissance est une fonction exponentielle décroissante (Équation 10) (Youl, 2003).

$$S(t) = \frac{k}{1 + \left(\frac{k - S0}{S0} \right) \times e^{-r \times t}}$$

Équation 9: modèle de stockage de la biomasse végétale sur les parcelles non cultivées

$$s(t) = e^{-r \times t}$$

Équation 10: modèle de stockage 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 (Équation 11 et Équation 12). Une fois t défini, la biomasse au $t+1$ est évaluée selon les formules définies précédemment.

$$t = - \left(\frac{\ln \left(\frac{(a \times k - s) \times S0}{s \times (k - S0)} \right)}{r} \right)$$

Équation 11: Modèle d'évaluation de l'âge de la jachère d'une parcelle non cultivée

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

Équation 12: 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 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les parcelles cultivées sont considérées comme désherbées.

$$s(t+1) = s(t) + \left(\text{croissHMax} \times \left(\frac{k - s(t)}{k} \right) \times \left(\frac{\text{stockArbreMax} - \text{stock}}{\text{stockArbreMax}} \right) \right)$$

Équation 13: 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* ; *stockArbreMax*, le stock arboré maximal sur une parcelle ; *stock*, la biomasse arborée à l'instant *t* et *stockArbMax*, la biomasse arborée maximale.

La fertilité des parcelles

Pour modéliser la fertilité des parcelles, nous utilisons une échelle de fertilité du sol. La fertilité d'une parcelle est initialisée à 25 points (fertilité d'une forêt). La fertilité varie en fonction de son occupation. Ainsi, 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, et que l'on souhaite cultiver l'igname dont la fertilité requise est de 15, la fertilité de la parcelle après la récolte sera de 5. Par contre, pour une 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.

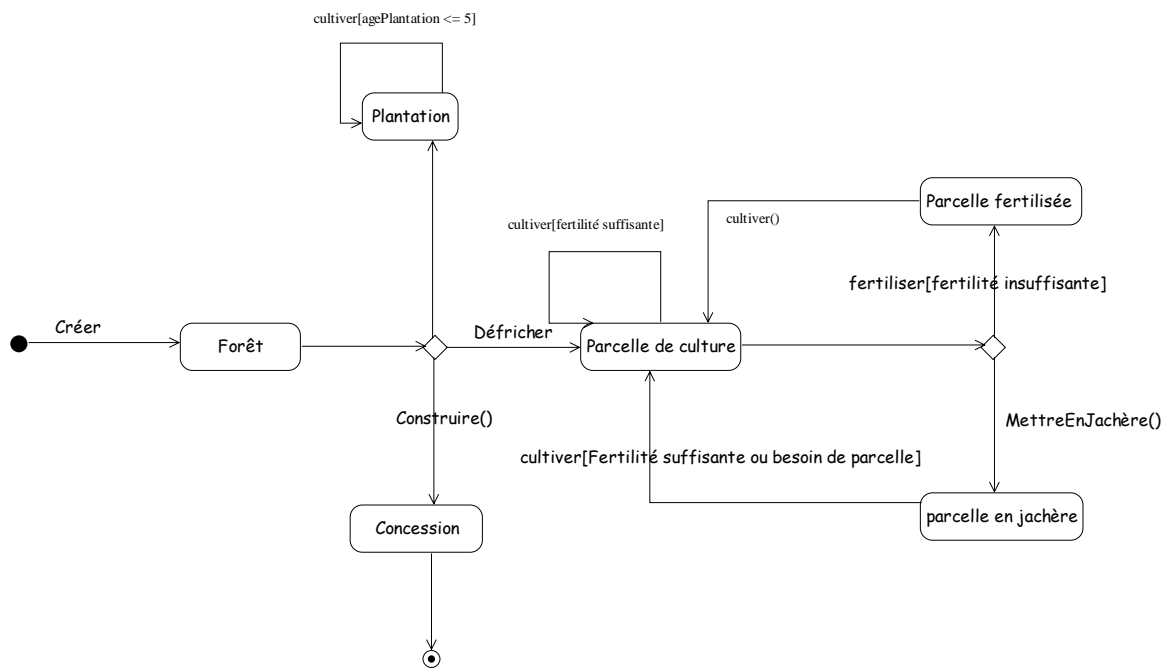


Figure 8: Diagramme d'états transition de la dynamique d'occupation d'une parcelle

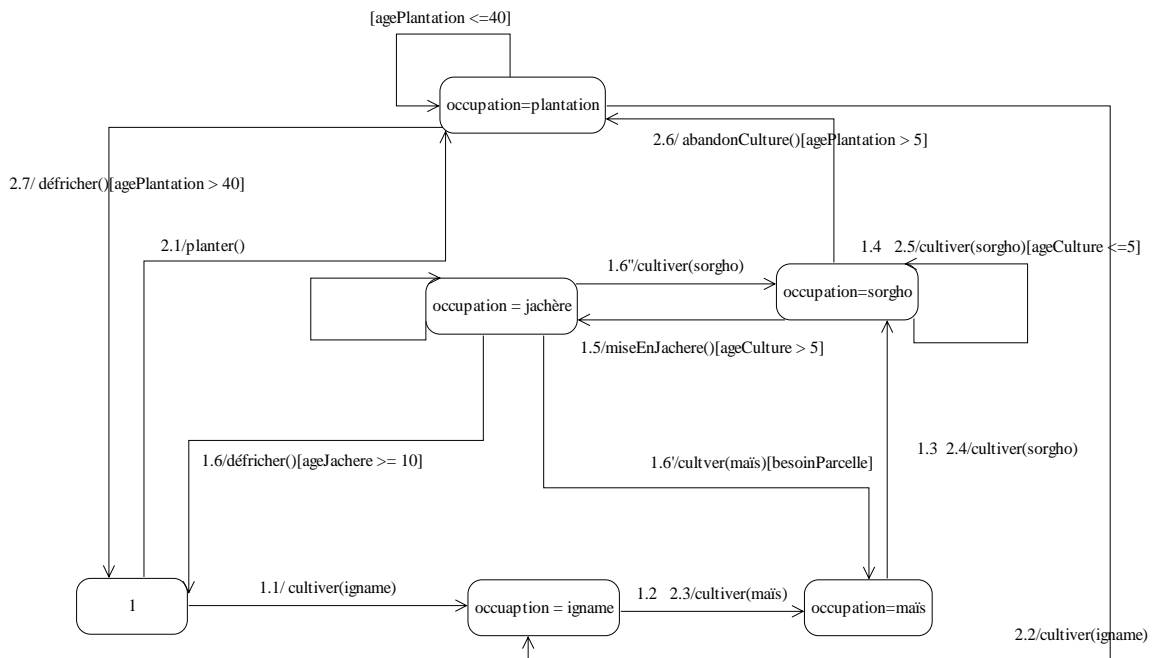


Figure 9: diagramme d'états transition d'occupation de parcelle par un autochtone

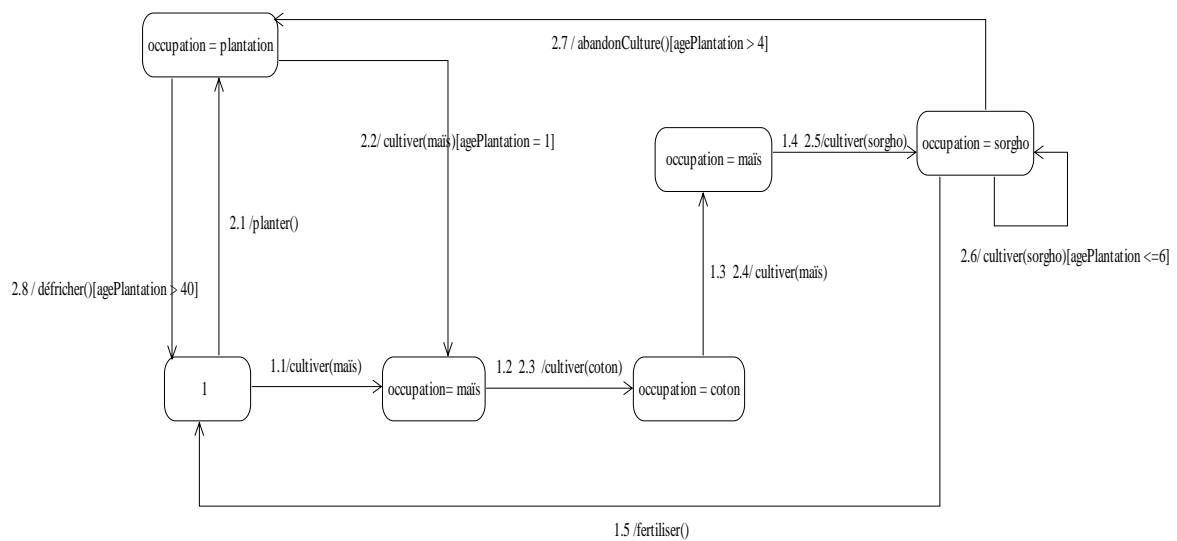


Figure 10: diagramme d'états transition d'occupation de parcelles par un migrant

4.5. L'ORGANISATION

4.5.1. L'ORGANISATION SOCIALE

Dans un système multi-agents, plusieurs entités évoluent dans un même environnement. Ces entités qui sont en interaction et utilisent souvent les mêmes ressources ne peuvent être traitées isolément. Il faut donc donner aux systèmes multi-agents une considération sociale. De ce fait, nous utilisons le formalisme Agent-Groupe-Rôle (AGR) (Ferber et GUTKNECHT, 1998 ; Parunak et Odell, 2001 ; Abrami, 2004) pour définir l'organisation sociale du modèle Mirot.

AGR permet de mieux représenter l'organisation sociale d'un système multi-agents. 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 du formalisme permettra d'augmenter la souplesse de notre modèle. Par exemple, un agent peut changer dynamiquement de pratique culturale. En terme de programmation et de conception, il permet d'augmenter l'expressivité et la modularité du système. La maintenance du modèle est également plus facile et permet une évolution à long terme pour l'adapter à d'autres situations différentes de celle étudiée.

De même, l'agent ne communiquant qu'à travers les rôles, le traitement des messages est plus facile. Il évitera une programmation rudimentaire contraignant de 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 :

Groupes

Comme groupes, nous avons les groupes « **Grp_Autochtone** », et « **Grp_Migrant** » pour définir 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.

Rôles

Les rôles décrivent le comportement des agents et définissent leurs compétences. Les rôles « **Rôle_Cultivateur** », pour définir le comportement d'un cultivateur, « **Rôle_Planteur** », pour décrire le comportement d'un planteur, « **Rôle_Eleveur** » pour spécifier le comportement d'éleveur ont été créés.

Comme précédemment dit, l'attribution de parcelle n'incombe pas à tous les agents. Il est sous la responsabilité d'un seul agent appartenant au groupe « **Grp_Autochtone** » à qui est affecté le rôle « **Rôle_Attributaire** ».

La vente et l'achat des parcelles constituent également des rôles (« **Rôle_Vendeur** » et « **Rôle_Acheteur** »).

Dans le modèle, 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. Nous avons donc entièrement développé les modules gérant les rôles.

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 leur appartenance d'un agent à un groupe. Par exemple, un exploitant dans le groupe **Grp_Asolement_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.

4.5.2. L'ORGANISATION DU SYSTEME

Les précédentes descriptions ont permis de mettre en évidence les relations qui existent entre les différentes entités du modèle **Mirot**. Le diagramme de classes (Figure Annexe 7) matérialise ces relations.

L'un des grands avantages des SMA réside dans l'autonomie des agents. Cette autonomie s'explique par la capacité des agents à contrôler leurs actions et leurs ressources. Cependant, cela nécessite un contrôle distribué. Dans **Cormas**, l'organisation d'un modèle est basée sur un contrôle centralisé ne permettant pas ainsi de garantir l'autonomie des agents. De ce fait, les agents actifs du modèle Mirot (Exploitant et Troupeau) sont dotés de threads indépendants qui s'exécutent de façon concurrente.

Le comportement des agents étant un processus de décision spatio-temporel, il est primordial que les agents se situent dans le même espace temps. L'objet actif **Controler** a été créé pour évaluer le temps (mois et année) de simulation à travers l'objet **Temps** ; ce qui permettra aux agents d'évaluer l'activité correspondante. Après avoir exécuté toutes les actions correspondant au temps t , l'agent doit attendre la prochaine évaluation de temps pour exécuter l'action du temps $t+1$. Pendant ce temps l'agent (**Exploitant**) peut recevoir et traiter des messages.

Le développement de Mirot a fait l'objet d'un couplage avec Gams pour résoudre les problèmes d'optimisation. L'exécution du Gams à partir de Mirot se fait à l'aide des DLL C construites à cet effet. L'exécution du modèle mathématique est réalisée par chaque agent. D'où l'exécution simultanée du modèle par tous les agents. 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.

4.6. QUELQUES CHIFFRES

L'environnement simulé est représenté par une carte exportée sous Cormas. La carte est constituée de 24462 points donc 24462 cellules sous Cormas. Avec une taille minimum de 25 cellules par exploitation, on peut créer environ 310 exploitations. Un exploitant ne pouvant gérer

qu'une exploitation à la fois, dans le pire des cas (lorsque tout le terroir est occupé) le nombre des exploitants est de 314. Si chaque exploitant dispose d'un troupeau, nous aurons 314 troupeaux donc 628 agents actifs s'exécutant de façon concurrente.

Le nombre élevé des agents n'est pas sans conséquence pour le système. Plus le nombre d'agents est important, le temps d'exécution est long. Chaque agent actif disposant d'un thread, la consommation en ressource est importante entraînant une baisse de la performance du système lorsque celle-ci n'est pas importante (mémoire vive, le processeur, etc.). En plus, l'appel répété de Gams diminue la performance du système. Il serait intéressant de développer les modules d'optimisation sous Cormas, mais le temps qui nous était réparti ne permettait pas d'effectuer cette réalisation.

Pour une rapidité dans l'exécution du modèle, une machine de 512 Mo de Ram et 3 Ghz est nécessaire.

5. LA SIMULATION

La simulation consiste à mettre en œuvre des modèles dans des conditions variées pour tenter d'explorer leurs possibilités, leurs défaillances, et éventuellement découvrir telle ou telle trajectoire comportementale encore inconnue (Quéau dans Le Bars, 2003). Ainsi, nous présenterons les données en entrée et en sortie et les différents scénarios mis en place pour vérifier la pertinence du modèle. L'objectif principal du modèle est de simuler la dynamique du carbone, les différents scénarios doivent permettre de comprendre les interactions qui existent entre les dynamiques de M.O et les dynamiques sociales.

La simulation peut être définie comme une manipulation numérique d'un modèle symbolique conçu pour représenter l'évolution d'un système dans le temps (Anderson dans Le Bars, 2003). Par cette définition, nous nous rendons compte que le temps constitue un élément important dans la simulation. Le temps de simulation est discret et mensuel dans le modèle. Le temps évolue par incrémentation d'une unité de temps. A chaque pas de temps, les tâches à exécuter sont sélectionnées pour être réalisées par les agents. Par exemple : à chaque début de la période des pluies qui correspond au cinquième mois de l'année dans notre modèle, l'exploitant procède à la mise en culture. En revanche, à la fin de la saison des pluies (dixième mois de l'année), il procède à la récolte qui est suivie de la vente des productions. A chaque cycle de 12 unités de temps (12 mois), l'année évolue d'une unité. Le choix du mois comme temps de référence pour la simulation s'explique par le fait qu'il permet de mieux modéliser la dynamique du monde paysan.

5.1. LA DYNAMIQUE DU MODELE MIROT

La dynamique du modèle décrit le comportement du système au cours d'un processus de simulation (Figure Annexe 8).

La croissance

La croissance des concessions et des troupeaux s'effectue à chaque début de l'année. La croissance des troupeaux est fonction de l'espace alloué à l'élevage. Lorsque la charge maximale est atteinte, une partie des animaux est vendue.

La consommation

La consommation est une action qui se réalise à chaque pas de temps. Elle vise à satisfaire le besoin alimentaire du mois. Lorsque la quantité de nourriture disponible est insuffisante,

l'exploitant achète de la nourriture s'il a suffisamment d'argent disponible, sinon il vend des animaux pour acheter de la nourriture.

La mise en culture

La mise en culture au début de la saison des pluies. Ainsi, l'exploitant définit son plan de production en fonction de la surface totale et de la force de travail disponible. Après avoir défini le plan de production, il procède à la mise en culture.

Après la mise en culture, les anciennes parcelles de culture non utilisées sont mises en jachère.

La récolte

Elle est réalisée à partir du 10^{ème} mois de l'année. Le rendement de chaque parcelle, est évalué en fonction de son occupation et du climat. Après la récolte, la fertilité des parcelles cultivées baisse en fonction de leur occupation.

Après avoir récolté et stocké toute la production, l'exploitant définit un plan de vente. Lorsque ces besoins ne peuvent pas être satisfaits, la concession se divise en deux parties. La deuxième partie s'installe sur une nouvelle exploitation au cas où il y a de l'espace libre, sinon elle quitte le terroir.

Le parcage

Le parcage a lieu à la fin de la récolte ; (12^{ème} mois) et fait l'objet de négociations entre les éleveurs et les agriculteurs.

Le déplacement des animaux

Il se déroule à chaque pas de temps. Les troupeaux cherchant à satisfaire le besoin journalier, ils se déplacent de parcelles en parcelles jusqu'à la satisfaction de leur besoin. Le déplacement étant journalier et le temps de référence étant mensuel, le parcours est répété trente fois par temps de simulation pour chaque troupeau.

5.2. LA CONFIGURATION DE L'ESPACE

L'espace de simulation est reproduit grâce à une importation des données **SIG** 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. A travers les données **SIG** nous définissons les types de sol qui constituent l'environnement. Une carte étant représentée par des points, chaque point correspond à une cellule. Nous distinguons cinq (05) types de sol (Figure Annexe 3). Ainsi, le couvert végétal de chaque parcelle est défini en

fonction de son type de sol. Dans le modèle Mirot, seul les parcelles ayant un type de sol non dénudé supporte un couvert végétal (Figure Annexe 4). Le couvert végétal initial d'une parcelle est la forêt. La taille des parcelles est uniforme et elle est d'un hectare.

Une fois le couvert végétal produit, les parcelles sont regroupées en lot de 25 parcelles au minimum pour former des exploitations (Figure Annexe 5). L'emplacement des exploitants dépend de leur appartenance (migrant ou autochtone) et est un peu conforme à la réalité (Figure Annexe 6). Les exploitants ont tendance à se regrouper en fonction de leur appartenance sociale.

5.3. LES DONNEES EN ENTREE DU MODELE

Il s'agit ici de définir les variables d'entrée qui ont non seulement une importance pour le système étudié mais aussi une influence sur l'évolution du modèle. Ces paramètres permettent à l'utilisateur de définir les différents scénarios de simulation et d'effectuer une étude de sensibilité (cf. Annexe 3). Pour faciliter le paramétrage du modèle, une valeur par défaut est attribuée à chaque paramètre. Certaines valeurs proviennent des études effectuées sur le terrain et des lectures bibliographiques. Pour faciliter le paramétrage du modèle, des interfaces utilisateurs ont été conçues à cet effet (cf. Annexe 4).

5.4. LES DONNEES EN SORTIE DU MODELE

Au cours des simulations, les quantités importantes de données sont produites. Les données produites peuvent être utilisées pour analyser la cohérence du modèle. Les résultats de la simulation sont d'ordres visuels (évolution de l'espace de simulation), numériques et symboliques (les interactions entre les agents). Cependant pour une analyse pertinente du système, les données en sortie doivent être définies en fonction des objectifs du système étudié. Ainsi, les variables en sortie du modèle MIROT ont été choisis dans l'objectif d'étudier d'une part les relations entre les dynamiques sociales et les dynamiques biophysiques et d'autre part les dynamiques des ressources organiques.

5.5. LE CALIBRAGE DU MODELE

Il s'agit de faire évoluer les paramètres du modèle et d'évaluer leur influence. Ainsi, nous effectuerons des études de sensibilité sur les paramètres suivants : le besoin monétaire, le taux de croissance des populations, la pluviosité et des pratiques d'exploitations des parcelles. Le choix de ces variables s'explique par le fait qu'elles permettent de mieux expliquer les relations entre les dynamiques sociales et de l'écosystème.

Plusieurs plans de simulations ont été construits à cet effet (Tableau 2). Chaque plan fait l'objet de plusieurs scénarios et porte sur une variable à tester. En dehors de la variable à tester, les valeurs des autres paramètres restent inchangées d'une simulation à l'autre pour un même plan de simulations. Pour chacune de ces simulations, nous nous intéresserons principalement à l'évolution des surfaces cultivées, de la population autochtone et migrante, du stock d'argent en fonction de la pratique culturale, à l'âge de la jachère des parcelles.

Plan de simulation 1 : Le niveau de la population

Ce plan de simulation vise à étudier l'impact des niveaux des populations sur la dynamique des ressources.

Plan de simulation 2 : le besoin monétaire

Ce plan de simulation a pour objectif d'étudier l'influence de la valeur des besoins individuels sur le comportement des individus et celui du système.

Plan de simulation 3 : la pluviosité

Le climat a un effet sur le rendement des cultures. Ce plan de simulation est d'une grande importance, car il permettra d'étudier l'impact du changement climatique sur la dynamique du terroir. Deux scénarios ont été définis à cet effet. Un premier où la pluviosité est stable, un deuxième scénario où la pluviosité diminue de façon continue dans le temps.

Tableau 2 : les plans de simulation

Plan de simulation	Scénarios	Paramètres
Niveau de population	Scénario 1 Scénario 2 Scénario 2	Taux de croissance = 2,5 % Taux de croissance = 5 % Taux de croissance = 10 %
Besoins monétaires	Scénario 1 Scénario 2 Scénario 3	Besoin monétaire := 30 000 Besoin monétaire = 60 000 Besoin monétaire = 90 000
Pluviosité	Scénario 1 Scénario 3	Pluviosité fixe Pluviosité décroissante avec une pente de -2 % par an

5.6. RESULTATS DES SIMULATIONS ET DISCUSSION

Les simulations ont été réalisées avec une population initiale de 20 exploitations dont 50% d'autochtone et 50% de migrants.

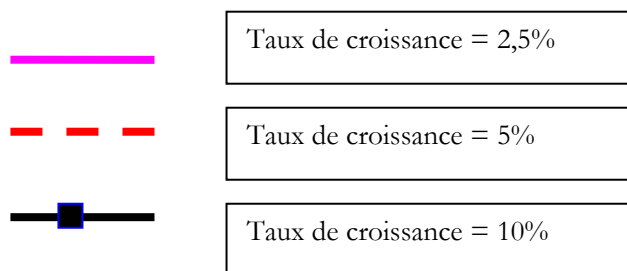
1. Plan de simulation : Niveau de population

Ainsi à travers les résultats obtenus, on constate que plus le taux de croissance est important, la surface en forêt (Figure 11), le stock de biomasse arborée (Figure 12) et le stock en carbone (Figure 13) diminuent très fortement. Cela s'explique par le fait que lorsque le taux de croissance est fort, la population croît plus vite augmentant ainsi le besoin en surface de culture et la consommation de bois.

Cette analyse est confirmée à travers une analyse comparative des courbes précédentes avec la courbe de la Figure 14. On constate que lorsque l'effectif de la population est important, les ressources s'épuisent plus rapidement et les ressources régénèrent lorsque l'effectif diminue. La diminution de l'effectif de la population au niveau de la Figure 14 s'explique par le départ des exploitants n'arrivant pas à satisfaire les besoins.

Les cartes d'occupation (Figure 15) du terroir viennent appuyer ces analyses. Elles montrent l'évolution de la surface occupée en fonction du taux de croissance. Avec un taux de croissance de 2.5% la surface occupée augmente très légèrement entre 120 pas de temps (où le niveau de la population est inférieur à 260 habitants) et 620 pas de temps (51 ans où la population reste inférieure 1000 habitants). En terme de besoin en terre de culture, on constate que quelque soit le taux de croissance, il reste pratiquement le même pour une population inférieure à 1000 habitants avec un effectif moyen par concession compris entre 15 et 20 personnes. Ainsi, avec un effectif moyen compris entre 15 et 20 personnes par concession et un besoin monétaire estimé à 30000 FCFA, le besoin en surface de culture évolue très faiblement.

Légende des courbes :



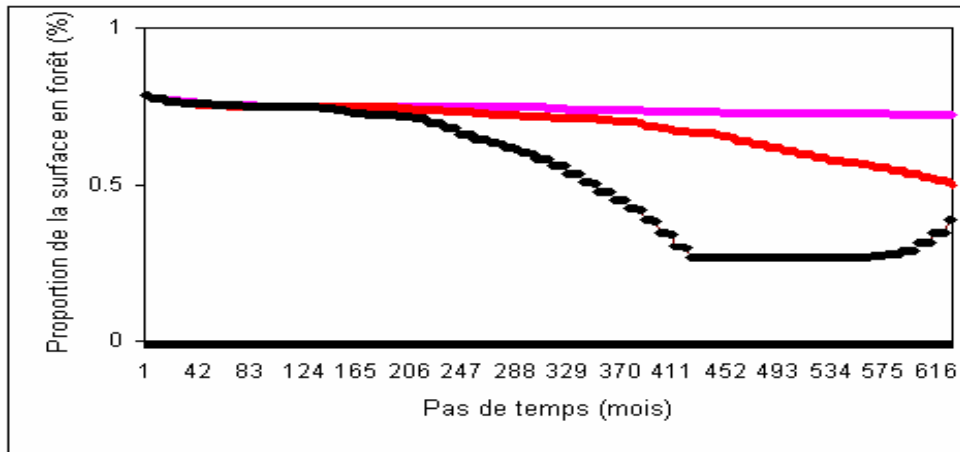


Figure 11: courbe d'évolution de la surface en forêt

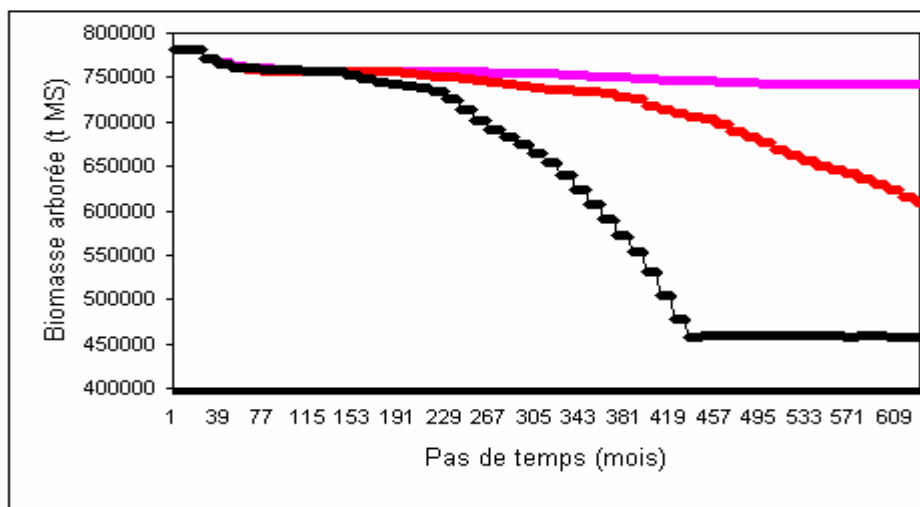


Figure 12 : Bilan de stockage de MO (biomasse arborée)

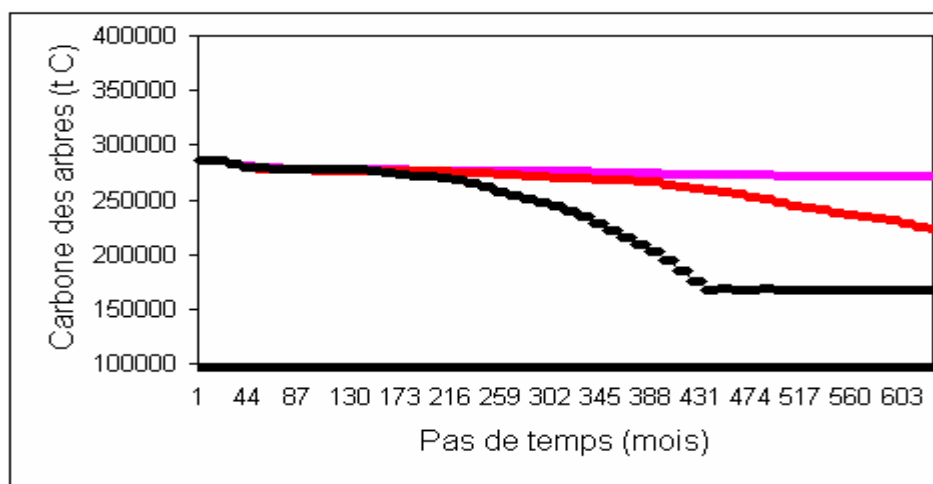


Figure 13 : Bilan de stockage du carbone arboré

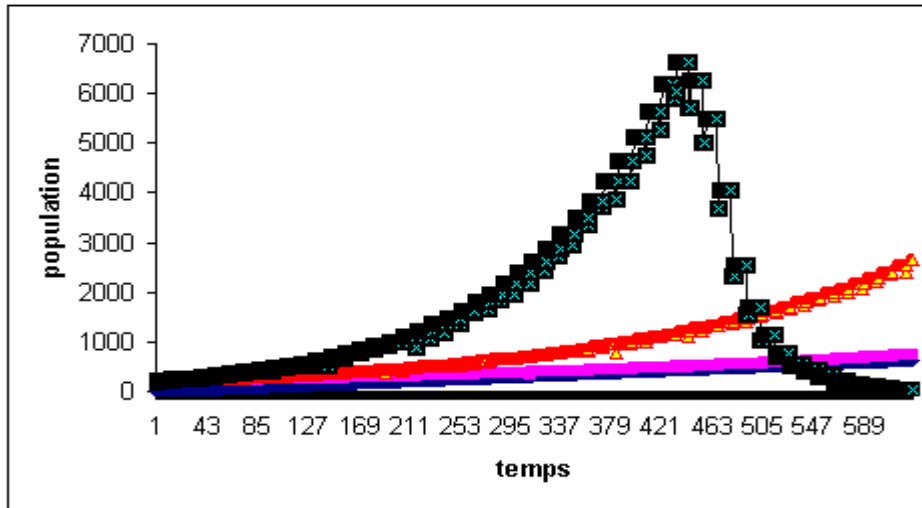


Figure 14 : Dynamique de la population

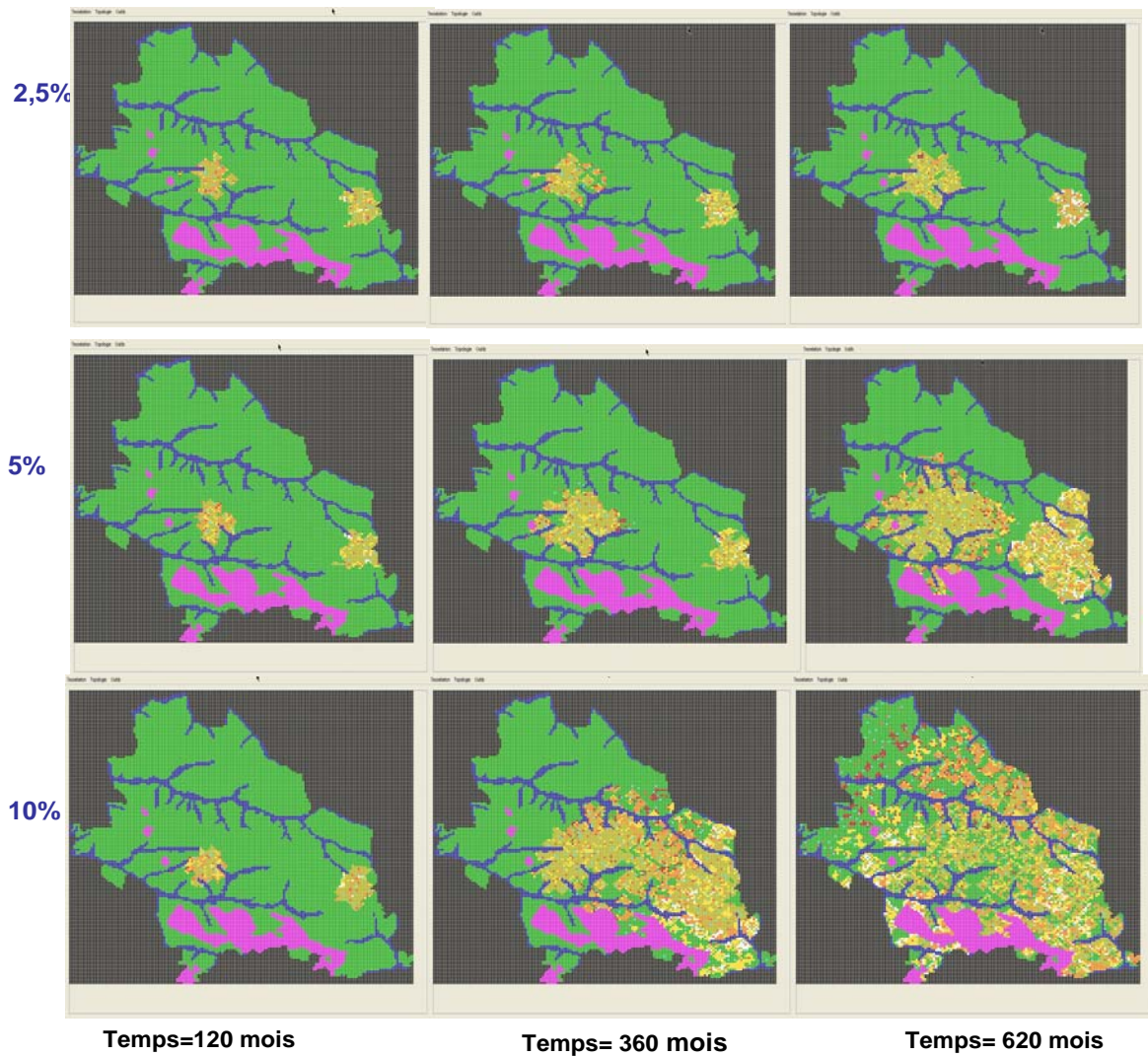


Figure 15: Cartes d'occupation en fonction du taux de croissance démographique annuelle (2,5% ; 5% et 10%)

2. Plan de simulation : Besoin monétaire

En faisant varier le besoin monétaire de 30000 FCFA à 90000 FCFA, on constate que les migrants ont un effectif moyen plus élevé que celui des autochtones (Figure 16 et Figure 17). Cela s'explique par le fait que les migrants pratiquent une culture plus rentable que celle pratiquée par les autochtones et arrivent à satisfaire facilement leurs besoins. Les exploitations autochtones n'arrivant pas à satisfaire leurs besoins se divisent en deux et s'installent sur d'autres exploitations, ce qui explique la diminution de l'effectif moyen autochtone.

Quant aux migrants, on constate que l'effectif moyen est plus important lorsque le besoin est élevé contrairement aux autochtones.

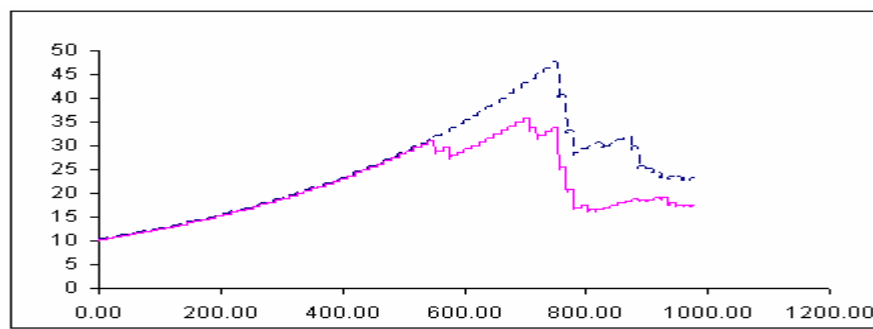


Figure 16 : Effectif moyen des exploitations migrantes

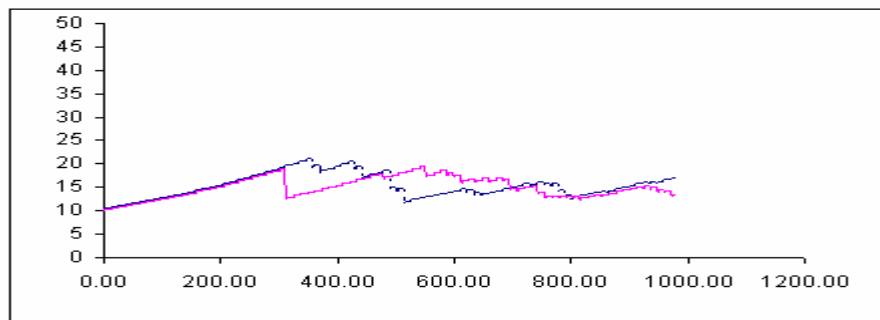
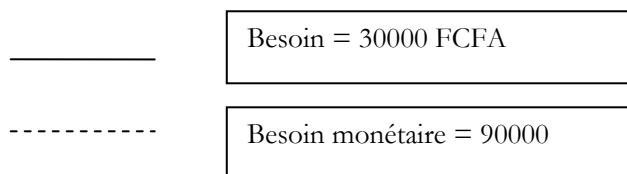


Figure 17 : Effectif moyen des exploitations autochtones

Légendes ;



CONCLUSION

Cette seconde étude sur Mirot a permis d'effectuer une remise en cause du modèle précédent et de faire des propositions permettant non seulement de prendre en compte les insuffisances mais aussi les nouvelles exigences.

Ces propositions ont permis d'améliorer l'organisation sociale du système en utilisant le paradigme AGR. De plus, le modèle a été interfacé avec un système d'information géographique (SIG). Cet interfaçage a permis d'avoir une représentation explicite de l'environnement et de prendre en compte d'une part l'aspect physique, biologique et anthropique de l'environnement et d'autre part les contraintes spatiales sur le comportement des individus. Le comportement spatial des animaux (trajectoire de divagation) a également été représenté dans le modèle. En couplant le modèle Mirot avec un modèle économique, une première représentation des motivations économiques a été effectuée. Ce couplage a aussi permis de prendre en compte les contraintes liées à la disponibilité des ressources tels les équipements, la main d'œuvre disponible, les ressources en argent, etc. Ainsi, nous avons développé un modèle suffisamment complexe pour présenter le système étudié. Un autre avantage du modèle est son niveau de paramétrage élevé. Presque toutes les données sont paramétrables y compris la configuration de l'espace. Ceci devrait faciliter l'utilisation du modèle dans d'autres contextes avec bien sur des petites modifications dans le système.

Malgré ces acquis d'autres améliorations sont nécessaires dans le modèle. L'achat, la vente et la location des parcelles ne sont pris en compte dans le modèle. Notre objectif est de reproduire un modèle plus réaliste, ne disposant pas toutes les informations sur ces transactions, nous avons préféré abandonner ce module. De même, la gestion des plantations n'est pas totalement prise en compte. La plantation est une activité jeune à Touroukoro et plusieurs éléments manquent pour sa représentation dans le système. Selon Bonkougou (2004), le niveau d'éducation de l'exploitant expliquent en partie les besoins alimentaires. Il serait intéressant d'étudier son impact sur les prises de décisions des exploitants.

Un modèle est une abstraction de la réalité, il ne s'agit pas de représenter le système dans toute sa réalité. Il faut alors trouver un bon niveau d'abstraction permettant une bonne analyse au risque de se trouver avec un modèle complexe difficile à comprendre dont les résultats ne seront pas maîtrisables. Ce constat nous pousse à faire abstraction de certains éléments du système.

Le système étudié en plus de son potentiel pour la compréhension de la dynamique du carbone, se veut un outil d'aide à la décision non seulement pour les chercheurs mais aussi pour les acteurs du

terrain (décideurs et paysans). Ces derniers ont besoin de comprendre les processus de prise de décision qu'ils suivent dans leurs activités. Il serait alors intéressant de faire intervenir ces acteurs pendant la construction du modèle en procédant à une *conception participative* (Drogoul *et al.*, 2003) c'est-à-dire sous la forme de jeux de rôle (Barreteau, 2003 ; Barreteau *et al.*, 2003a ; Barreteau *et al.*, 2003b ; D'Aquino *et al.*, 2003 ; Daré et Barreteau, 2003). Mais il faut noter que cette étude ne fait pas parti des objectifs de notre étude.

Le problème de la compréhension et de la gestion d'un système complexe repose sur l'**articulation** d'au moins deux **niveaux** de description : celui **local** des composants du système, et celui, **global**, du comportement collectif qui en résulte. La représentation d'un tel système ne se satisfait pas d'un seul type de formalisme ni d'une seule échelle de représentation des phénomènes (Müller, 2004). Concernant la gestion, l'articulation entre les options au niveau global (réglementation, taxes et subventions) et l'impact au niveau des comportements individuels et ce qui peut effectivement en résulter est loin d'être clair et demande, de nouveau d'articuler des niveaux différents de description.

6. REFERENCES

- Abrami G., 2004. *Niveaux d'organisation dans la modélisation multi-agent pour la gestion de ressource renouvelables: Application à la mise en oeuvre de règles collectives de gestion de l'eau agricole dans la basse-vallée de la Drône*. Science de l'Eau, Ecole Nationale de Génie Rural et de la Foresterie, France, 401 p.
- Achard F., Banoin M., Bartholmey C., 2000. Gestion de la fumure animale dans un terroir du sud-ouest du Niger. In: Dugué P. (Ed.) *Fertilité et relations agriculture-élevage en zone de savane*, Montpellier, France, 5-6/05/1998. Centre International de Recherche pour le Développement, pp. 97-106.
- Achard F., Eva H.D., Mayaux P., Stibig H.J., Belward A., 2004. Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. *Global Biogeochemical Cycles* **18** (2), NIL_1-NIL_12.
- Anonyme, 1999. *Synthèse des activités du projet "Fronts pionniers de migration" (campagne 1998-1999)*. INERA/GRNSP-CIRAD/TERA, Ouagadougou.
- Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovale C., Pontanier R., 1993. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands. I. A view from the South. *Restoration Ecology* **1** (1), 8-17.
- Axtell R., 2000. *Why agents? On the varied motivations for agent computing in the social sciences*.
- Balman A., 1997. Cellular Approach. *European Review of Agricultural Economics* **24** (1),.
- Barbier B., 1998. Induced innovation and land degradation: results from a bioeconomic model of a village in West Africa. *Agricultural Economics* **1335** (1-2), 1-11.
- Barreteau O., 1998. *Un système Multi-Agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués: dynamique des interactions et modes d'organisation*. Science de l'eau, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Montpellier, 260p p.
- Barreteau O., 2003. The joint use of role-playing games and models regarding negotiation processes: characterization of associations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)* **6**(2).
- Barreteau O., Le Page C., D'Aquino P., 2003a. Role-Playing Games, Models and Negotiation Processes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **Vol. 6** (2).
- Barreteau O., Le Page C., D'Aquino P., 2003b. Role-Playing Games, Models and Negotiation Processes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **6** (2).
- Barreteau O., Bousquet F., Millier C., Weber J., 2004. Suitability of Multi-Agent Simulations to study irrigated system viability: application to case studies in the Senegal River Valley. *Agricultural Systems* **80** (3), 255-275.
- Bayala B.S., 2003. *Evaluation des ressources ligneuses dans un système agro-sylvo-pastoral de savane de l'ouest de Burkina Faso : cas du terroir de Torokoro. ; I*. DR : UPB/Bobo, Burkina Faso.
- Belem M., 2003. *Modélisation informatique de systèmes complexes : Le Modèle MIROT*. Ecole Supérieure d'Informatique (Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso), Burkina Faso.
- Berger T., 2001. Agent-based spatial model applied to agriculture : a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural economics* N°25, 245-260.
- Bonkougou D.Y., 2004. *Déterminants socio-économique de la gestion des ressources en carbone par les exploitants dans le terroir de Torokoro. Province de la Comoé (Burkina Faso)*. Institut de Développement Rural (Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso), Burkina Faso.
- 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.
- 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. *Espace Géographique* **1**, 13-25.

- 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*. Biologie des Populations et Ecologie, Université Paul Valéry-Montpellier III, Montpellier (France), 293 p.
- 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., Le Page C., Müller J.-P., 2002. Modélisation et simulations multi-agents. In: *Actes des deuxièmes assises nationales du GDR I3*, Nancy, France, 4 au 6 décembre 2002, pp. 173-182.
- Bousquet F., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological Modelling*, 313-332.
- Cambou J., 2004. *Contribution à la modélisation de la ressource en carbone du terroir de Torokoro*. ENSAIA., Nancy.
- D'Aquino P., Le Page C., Bousquet F., Bah A., 2003. Using self-designed role-playing games and a multi-agent system to empower a local decision-making process for land use management: The SelfCormas experiment in Senegal. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* . **Vol. 6** (3).
- Daré W., Barreteau O., 2003. A role-playing game in irrigated system negotiation: between play and reality. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)* **vol. 6, no. 3**.
- Drogoul A., Vanbergue D., Meurisse T., 2003. Simulation Orientée Agent: où sont les agents ? In: *Actes des Journées de Rochebrune, Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels*, Megève, France.
- Dumont B., Hill D.R.C., 2001. Multi-agent simulation of group foraging in sheep: effects of spatial memory, conspecific attraction and plot size. *Ecological Modelling* **141** (1-3), 201-215.
- Falkowski P., Scholes R.J., Boyle E., Canadell J., Canfield D., Elser J., Gruber N., Hibbard K., Hogberg P., Linder S., Mackenzie F.T., Moore B., Pedersen T., Rosenthal Y., Seitzinger S., Smetacek V., Steffen W., 2000. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science* **290** (5490), 291-296.
- Ferber J., 1995. *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*. InterEdition.
- Ferber J., GUTKNECHT O., 1998. A meta-model fro the analysis and design of organisation in multi-agents. In: press I.C.S. (Ed.) *Proceedins Third international Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'98)*, Paris, 3-4 juillet 1998, pp. 128-135.
- Grimm V., 1999. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? *Ecological Modeling* **115**, 129-148.
- Hall C.A.S., Hall M.H.P., 1993. The efficiency of land and energy use in tropical economies and agriculture. *Agriculture Ecosystems & Environment* **46**, 1-30.
- Hazell P.B.R., Norton R.D., 1986. *Mathematical programming for economics analysis in agriculture*. Macmillan Publishing Company, 387 p.
- Herve D., Genin D., Migueis J., 2002. A modelling approach for analysis of agro pastoral activity at the one-farm level. *Agricultural Systems* **71** (3), 187-206.
- Houghton R.A., 2000. Emissions of carbon from land-use change. In: Wigley T.M.L., Schimel D.S. (Eds.), *The Carbon Cycle*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 63-76.
- Hulme M., Doherty R., Ngara T., New M., Lister D., 2001. African climate change: 1900-2100. *Climate Research* **17** (2), 145-168.
- 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.
- Kaplan I.R., Bartley J.K., 2000. Global biogeochemical cycles: carbon, sulfur, and nitrogen. In: Ernst W.G. (Ed.) *Earth Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 278-296.
- Kowal J.M., Kassam A.H., 1978. *Agricultural Ecology of Savanna : a Study of West Africa*. Clarendon Press, Oxford, UK, 403 p.
- Lal R., 2001. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Climatic Change* **51** (1), 35-72.
- Landais E., Guérin H., 1993. Système d'élevage et transferts de fertilité dans la zone des savanes africaines.
- Lardon S., Baron C., Bommel P., Bousquet F., Le Page C., R. L., Monestiez P., Reitz P., 1998. Modéliser les configurations et les stratégies spatiales dans un système multi-agents pour

- la maîtrise de dynamiques d'embroussaillage. In: *Colloque SMAGET: Modèles et systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires*, Iermon-Ferrand,, 05-08/10/98.
- Le Bars M., 2003. *Un simulateur Multi-Agent pour l'Aide à la Décision d'un Collectif Application à la gestion d'une ressource limitée Agro-environnementale*. Spécialité Informatique, Paris Dauphine, France, 234 p.
- Le Page C., Bousquet F., Bommel P., Baron C., Lardon S., 2001. CORMAS : un environnement de développement de systèmes multi-agents dédié à la gestion des ressources naturelles. *Technique et science informatiques sous presse*.
- Lion M., 2005. La modélisation comme outil d'aide à la gestion: Le cas de la colonisation forestière des pelouses sommitales du mont Lozère (Cévennes, France). In: *Colloque SMAGET, Modèles et systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires*, Saint-Maurice Les Arcs, France, p. 12.
- Manlay R.J., Ickowicz A., Masse D., Feller C., Richard D., 2004a. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savana-II. Element flows and functioning of a mixed-farming system. *Agricultural Systems* **79** (1), 83-107.
- Manlay R.J., Ickowicz A., Masse D., Floret C., Richard D., Feller C., 2004b. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget of a village in the West African savanna - I. Element pools and structure of a mixed-farming system. *Agricultural Systems* **79** (1), 55-81.
- Michael N.H., Larry M.S., 1999. Multi-agent Systems and Societies of Agents. In: ed. Gherard Weiss M.P., 1999 (Ed.) *Multiagent Systems: A modern approach to DAI*.
- Mohr H., Schopfer P., 1995. Ecological cycles of materials and energy. In: *Plant Physiology*. Springer Verlag, Berlin, pp. 269-274.
- Müller J.P., 2004. The Mimosa generic modelling and simulation platform. In: *Proceedings of ABS'04*, Lisbonne.
- Odum E.P., 1969. The strategy of ecosystem development. *Science* **164**, 262-270.
- Olsson L., Ardo J., 2002. Soil carbon sequestration in degraded semiarid agro-ecosystems - Perils and Potentials. *Ambio* **31** (6), 471-477.
- Parunak H.V., Odell J., 2001. Representing social structures in UML. In, p. 8.
- Ruthenberg H., 1971. *Farming Systems in the Tropics*. Clarendon Press, Oxford, 313 p.
- Tschakert P., 2004. The costs of soil carbon sequestration: an economic analysis for small-scale farming systems in Senegal. *Agricultural Systems* **81**, 227-253.
- Verhulst P.-F., 1838. Notice sur la loi que suit la population dans son accroissement., 10, 113-121,.
- Woomer P.L., Palm C.A., Qureshi J.N., Kotto-Same J., 1998. Carbon sequestration and organic resource management in African smallholder agriculture. In: Lal R., Kimble J.M., Follett R.F., Stewart B.A. (Eds.), *Management of Carbon Sequestration in Soil*. CRC Press Inc, Boca Raton, pp. 153-173.
- Youl S., 2003. *Dynamique du carbone d'un terroir de savane d'Afrique de l'ouest : Approche par modélisation multi agent.*, Université Montpellier II.
- Zinck J.A., Berroteran J.L., Farshad A., Moameni A., Wokabi S., Van R.E., 2004. Approaches to assessing sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* **23** (4), 87-109.

7. LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Liste des types de messages traités dans le modèle.....	37
Tableau 2 : les plans de simulation.....	49
Tableau 3 : modèle mathématique de définition du plan de production 59.....	65
Tableau 4 : Modèle de définition du plan de vente.....	68
Tableau 5: Paramètres généraux du système.....	77
Tableau 6: Données mensuelles (pluviosité et besoin de animaux).....	79
Tableau 7: Données sur les cultures pratiquées.....	79

8. LISTE DES FIGURES

Figure 1: cadre conceptuel du système étudié.....	21
Figure 2 : règles de décision de mise en culture chez un exploitant.....	27
Figure 3 : Sens du déplacement d'un troupeau sur les parcelles.....	30
Figure 4: Diagramme d'activités d'un troupeau.....	31
Figure 5 : Négociation lors d'une demande de parçage.....	35
Figure 6: Diagramme de séquence : Négociation pour le parçage.....	36
Figure 7: Organisation spatiale de l'environnement par niveau.....	38
Figure 8: Diagramme d'états transition de la dynamique d'occupation d'une parcelle.....	41
Figure 9: diagramme d'états transition d'occupation de parcelle par un autochtone.....	41
Figure 10: diagramme d'états transition d'occupation de parcelles par un migrant.....	42
Figure 11: courbe d'évolution de la surface en forêt.....	51
Figure 12 : Bilan de stockage de MO (biomasse arborée).....	51
Figure 13 : Bilan de stockage du carbone arboré.....	51
Figure 14 : Dynamique de la population.....	52
Figure 15: Cartes d'occupation en fonction du taux de croissance.....	53
Figure 16 : Effectif moyen des exploitations migrantes.....	53
Figure 17 : Effectif moyen des exploitations autochtones.....	53
Figure Annexe 1: règle de décision pour le choix d'assolement des parcelles chez les exploitants pratiquant un système de culture à base d'igname.....	71
Figure Annexe 2 : règle de décision pour le choix d'assolement des parcelles chez les exploitants pratiquant un système de culture à base de coton.....	72
Figure Annexe 3: Carte morphopédologique dans MIROT.....	73
Figure Annexe 4: Couvert végétal généré à partir des types de sol.....	73
Figure Annexe 5: Répartition de l'espace de simulation en exploitation.....	74
Figure Annexe 6: Emplacement des concessions en fonction de leur appartenance sociale.....	74
Figure Annexe 7: Diagramme de classes du modèle MIROT.....	75
Figure Annexe 8 : Diagramme de séquences simplifié du modèle MIROT.....	76
Figure Annexe 9: Menu général.....	80
Figure Annexe 10: Ecran de définition des paramètres généraux.....	81
Figure Annexe 11: Définition des systèmes de culture.....	81
Figure Annexe 12: Définition des différents types de culture.....	82
Figure Annexe 13: Ecran de définition du climat.....	82

9. LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Signification
BDI	Believe-Desire-Intention
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (France)
CIRDES	Projet concerté de recherche et développement pour l'élevage en Afrique de l'Ouest (Burkina Faso)
CORMAS	Common-Pool Resources and Multi-Agent Systems
GAMS	General Algebraic Modeling System
GRR	Gestion des Ressources Renouvelables
INERA	Institut de l'Environnement et de recherches Agricoles, (Burkina Faso)
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
MIROT	Modélisation Informatique des Ressources Organiques à l'échelle du Terroir
MO	Matière Organique
RN	Ressource Naturelle
SMA	Système Multi-Agents

10. ANNEXES

ANNEXE 1 : ASPECTS SOCIO-ECONOMIQUES DU SYSTEME

Le système étudié est une agriculture semi-commercialisée où l'objectif de l'exploitant est l'optimisation de son revenu. Cependant, la décision de l'exploitant est influencée par un ensemble de facteurs socio-économiques. Parmi ces facteurs, nous pouvons citer :

Objectif

L'objectif de l'exploitant est la satisfaction des besoins alimentaires et monétaires.

Les contraintes

1. **La disponibilité de la main d'œuvre** : elle constitue un facteur limitant pour le choix de l'exploitant. Elle est constituée des actifs et des employés.
2. **Equipement** : l'utilisation des équipements utilisés comme moyen de production constituent aussi un facteur limitant pour la production de certaines cultures. Son utilisation nécessite de la disponibilité des ressources en argent non seulement pour son achat mais aussi pour son entretien et les frais de fonctionnement.
3. **Utilisation des fertilisants** : certaines cultures exigent l'utilisation des fertilisants. La quantité de fertilisant disponible conditionne sans doute leur production.
4. **La disponibilité des ressources en argent** : l'achat des équipements, de la force de travail, des fertilisants dépendent des ressources en argent de l'exploitant. A cet effet, la quantité d'argent disponible constitue aussi un facteur limitant dans la production.
5. **Disponibilité des parcelles de culture**

Stratégies d'exploitation : deux systèmes de production existent.

Le système est caractérisé par une hétérogénéité de comportements chez les exploitants. Ainsi, nous distinguons deux grands groupes pratiquant des systèmes de culture différents. Le premier groupe, les autochtones, pratiquent principalement la culture à base d'igname. Le second groupe, les migrants, est constitué de deux sous groupes : les agriculteurs pratiquant une culture à base de coton et les éleveurs menant l'élevage comme activité principale. En plus de leurs activités agricoles, les agriculteurs autochtones et migrants pratiquent aussi l'élevage, mais leur comportement varie en fonction de leur appartenance sociale.

L'exploitant cherche à optimiser son revenu ; il doit tenir compte de la masse salariale des employés, des frais d'entretien des équipements, de la quantité des fertilisants à acheter et des ressources disponibles. Il doit cependant trouver un équilibre entre les ressources disponibles et son choix d'exploitation. Le choix d'exploitation peut être ainsi considéré comme une fonction de production définie par un modèle mathématique (Tableau 3).

Le plan d'exploitation n'est qu'une espérance pour l'exploitant. Elle est concrétisée qu'après la récolte qui peut être influencée par le climat ou d'autres facteurs. Une partie de la récolte étant destinée à la vente dans l'optique de satisfaire les besoins monétaires, un bon équilibre doit être trouvé entre les quantités à stocker et celles à vendre. Ainsi, le plan de vente peut être défini par un modèle économique qui définit pour chaque culture, la quantité à vendre en tenant compte des besoins alimentaire et monétaire de l'exploitant (Tableau 4).

Tableau 3 : modèle mathématique de définition du plan de production

```

sets culture la liste des cultures /coton, sorgho, mais/
    intrant la liste des intrants /uree, npk/

table intrantMin(culture, intrant)  quantite d'intrants par hectare
    uree  npk
    coton 2  1
    mais  2  1
    sorgho 0  0;
$include "%system.fp%data.inc";
parameter partAssolement(culture)  la part de chaque culture dans la production totale
    /  coton  0.20
    mais  0.48
    sorgho  0.32/;
parameter calW(culture)              le temps de travail pour la mise en culture
    /  coton  43
    mais  43
    sorgho  32/;
parameter prixIntrant(intrant)       le prix d'un sac d'intrants
    /  uree  12500
    npk  12500/;
parameter surfaceEquipement(culture) le prix d'un sac d'intrants
    /  coton  0.125
    mais  0.125
    sorgho  0.125/;
parameter exigenceEquipement(culture)
    /  coton  1
    mais  1
    sorgho  1 /;

```

```

scalar
    salaireMainOeuvre la salaire annuel d'un employe /60000/;
scalar prixCharrue    le prix d'une charrue    /50000/;

parameter
    productionMin(culture) la production minimale a satisfaire pour chaque culture ;
    productionMin(culture) = (besoinAlimentaire + besoinMonetaire) * partAssolement(culture);

parameter
    masseSalariale la masse salariale;
    masseSalariale = nbEmpl*salaireMainOeuvre ;

parameter
    forceConcession ;
    forceConcession = nbEmpl+nbActif;

variables
    surface(culture)      la surface a exploiter pour la culture
    vente(culture)        la vente
    conso(culture)        la consommation
    qteIntrant(culture,intrant) la quantite d'intrant
    revenu                le revenu a maximiser
    achatCharrue ;

positive variables surface,vente,conso, qteIntrant,achatCharrue;

equations
    e_Revenu          revenu
    e_production(culture)
    e_production1(culture)
    e_Rendement(culture)
    e_Rendement1(culture)
    e_vente

```

```

e_vente_ind(culture)
e_conso
e_conso_ind(culture)
e_equip1
e_equip2
e_Surface(culture)    la surface
e_W                    la force de travail
e_Cash                 le capital
e_Intrant(culture,intrant)
e_Intrant1(culture,intrant) ;
conso.lo(culture)= 0;
vente.lo(culture)= 0;
surface.lo(culture)= 0;
surface.up(culture)= surfaceDispo(culture);
achatCharrue.lo = 0;
qteIntrant.lo(culture,intrant)=0;

e_Revenu.. revenu =e= sum(culture,vente(culture)) - sum((culture,intrant),qteIntrant(culture,intrant)*prixIntrant(intrant))
- (nbEmpl*salaireMainOeuvre)- achatCharrue*prixCharrue;
e_Surface(culture).. surface(culture) =l= surfaceDispo(culture);
e_Rendement(culture).. vente(culture) + conso(culture) =l= rendement(culture)*surfaceDispo(culture);
e_Rendement1(culture).. vente(culture) + conso(culture) =e= rendement(culture)*surface(culture);
e_Vente.. sum(culture,vente(culture))=g= besoinMonetaire ;
e_conso_ind(culture).. conso(culture)=l=rendement(culture)*surface(culture);
e_vente_ind(culture).. vente(culture)=l=rendement(culture)*surface(culture);
e_Conso.. conso('mais')+ conso('sorgho') =g= besoinAlimentaire ;
e_W.. sum(culture,surface(culture)*rendement(culture)) =l= forceConcession*(sum(culture,surface(culture)*rendement(culture)/calW(culture)));
e_Production(culture)$(surfaceDispo(culture)*rendement(culture)>=productionMin(culture)).. surface(culture)*rendement(culture) =g= productionMin(culture);
e_Production1(culture)$(surfaceDispo(culture)*rendement(culture)< productionMin(culture)).. surface(culture)*rendement(culture) =l= productionMin(culture);
e_Intrant(culture,intrant)$(intrantMin(culture,intrant)>0 and surfaceDispo(culture)>0).. surface(culture)*intrantMin(culture,intrant) - qteIntrant(culture,intrant)
=e= 0;
e_Intrant1(culture,intrant)$(intrantMin(culture,intrant)=0 or surfaceDispo(culture)=0).. qteIntrant(culture,intrant) =e= 0;
e_equip1$(sum(culture,surfaceDispo(culture)*exigenceEquipement(culture)*surfaceEquipement(culture))>0)..
sum(culture,surface(culture)*exigenceEquipement(culture)*surfaceEquipement(culture)) - nbEquipement - achatCharrue =e= 0;

```

```
e equip2$(sum(culture,surfaceDispo(culture)*exigenceEquipement(culture)*surfaceEquipement(culture))=0).. achatCharrue =e= 0;
e_Cash.. sum((culture,intrant),prixIntrant(intrant)*qteIntrant(culture,intrant)) + achatCharrue*prixCharrue =l= cashDispo;
```

```
Model planProduction /all/;
solve planProduction using lp maximizing revenu;
display surface.l, surface.m;
display achatCharrue.l, achatCharrue.m;
```

Tableau 4 : Modèle de définition du plan de vente

```
sets culture la liste des cultures /mais,coton, sorgho /
$include "%system.fp%donneesvente.inc";
parameter consoMin(culture) la quantite minimale pour la conso
/ mais 0.80
```

```

    coton    0
    sorgho   0.20/;
variables
    revenu
    vente(culture)      la vente
    conso(culture)      la consommation
    imprevu(culture) ;
positive variables vente,conso;
equations
    e_Revenu      la vente
    e_Conso(culture)      la consommation
    e_Production(culture)
    e_BesoinAlimentaire      besoin alimentaire;
e_Revenu.. revenu =e= sum(culture,vente(culture));
e_Conso(culture).. conso(culture) =e= consoMin(culture)*production(culture);
e_Production(culture).. vente(culture)+ conso(culture) =e= production(culture);
e_BesoinAlimentaire.. sum(culture,conso(culture)) =e= besoinAlimentaire;
Model planVente /all/;
solve planVente using lp maximizing revenu;
display vente.l, vente.m;

```

ANNEXE 2 : LES FIGURES


```

occupation := occupation(parcelle)

Si occupation = Forêt ou (occupation = Plantation et agePlantation >= 40 ans) ou (occupation = 'jachère' et
ageJachere >= 10) ou (occupation = plantation et agePlantation=0) Alors
    cultiver(igname) ;
    ageCulture(parcelle) := 1 ;
Sinon
    Si occupation = 'Igbame' Alors
        cultiver(maïs) ;
        ageCulture(parcelle)+1 ;
    Sinon
        Si occupation='maïs' Alors
            cultiver(sorgho) ;
            ageCulture(parcelle)+1 ;
        Sinon
            Si occupation='sorgho' Alors
                Si ageCulture <= 5 Alors
                    cultiver(sorgho) ;
                    ageCulture(parcelle)+1 ;
                Sinon
                    miseEnJachere() ;
                    ageCulture(parcelle) := 0 ;
                    ageJachere(parcelle) := 1 ;
                Finsi
            Sinon
                Si occupation = 'jachère' Alors
                    ageJachere(parcelle)+1 ;
                Sinon
                    Si occupation = 'plantation' Alors
                        agePlantation(parcelle) +1 ;
                    Finsi
            Finsi
        Finsi
    Finsi
Finsi

```

Figure Annexe 1: règle de décision pour le choix d'assolement des parcelles chez les exploitants pratiquant un système de culture à base d'igname

```

occupation := occupation(parcelle)

Si occupation = Forêt ou (occupation = Plantation et agePlantation >= 40 ans) ou (occupation=
'jachère' et ageJachere >= 10) ou (occupation = plantation et agePlantation=0) Alors
    cultiver (maïs) ;
    ageCulture(parcelle) := 1 ;
Sinon
    Si occupation = 'maïs' et (culture(année-2)<>coton) Alors
        cultiver(coton) ;
        ageCulture(parcelle)+1 ;
    Sinon
        Si occupation='coton' Alors
            cultiver(maïs) ;
            ageCulture(parcelle)+1 ;
        Sinon
            Si occupation='maïs' alors
                Cultiver(sorgho) ;
            Sinon
                Si occupation='sorgho' Alors
                    Si ageCulture <= 5 Alors
                        cultiver (sorgho) ;
                        ageCulture(parcelle)+1 ;
                    Sinon
                        fertiliser() ;
                        cultiver (maïs) ;
                        ageCulture(parcelle)+1 ;
                    Finsi
                Sinon
                    Si occupation = 'plantation' Alors
                        agePlantation(parcelle) +1 ;
                    Finsi
                Finsi
            Finsi
        Finsi
    Finsi
Finsi

```

Figure Annexe 2 : règle de décision pour le choix d'assolement des parcelles chez les exploitants pratiquant un système de culture à base de coton

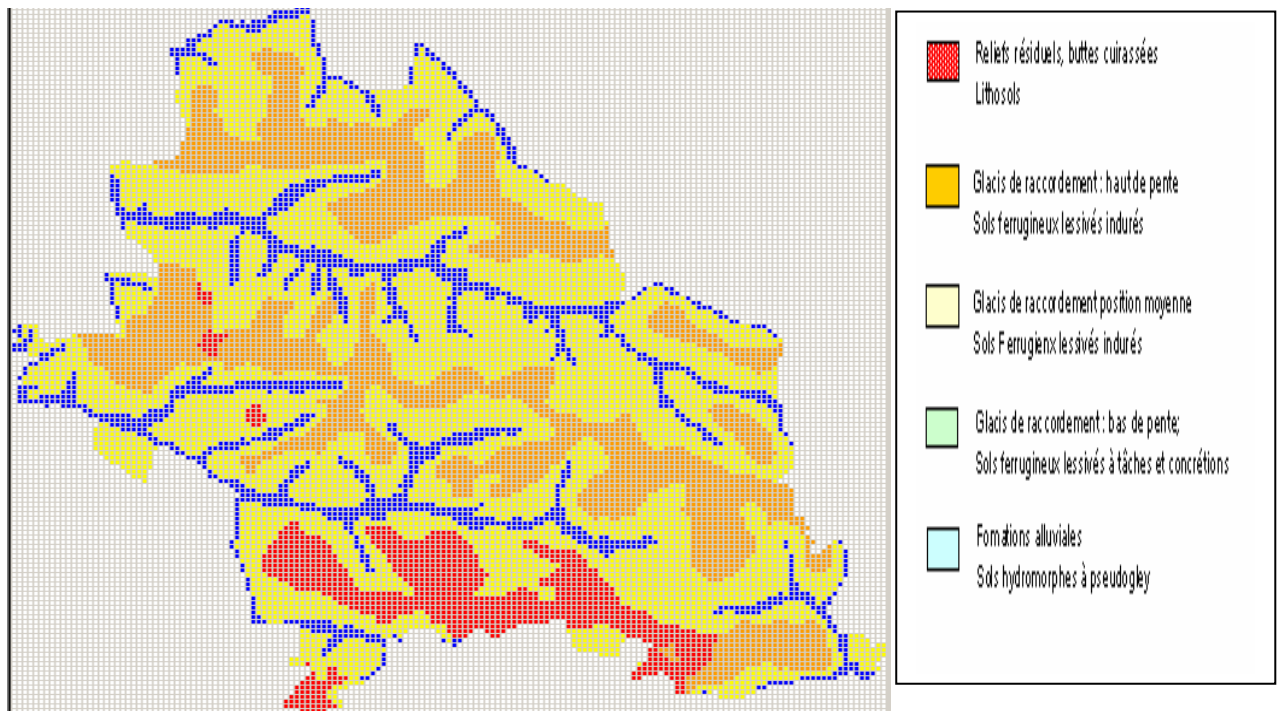


Figure Annexe 3: Carte morphopédologique dans MIROT

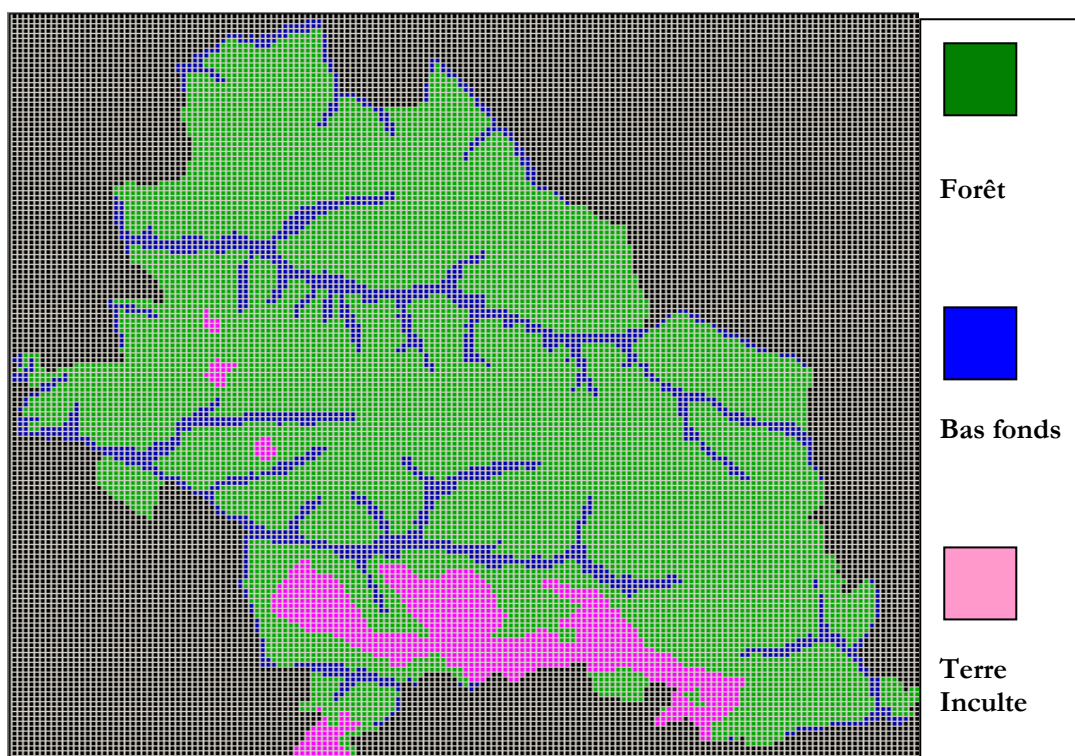


Figure Annexe 4: Couvert végétal généré à partir des types de sol

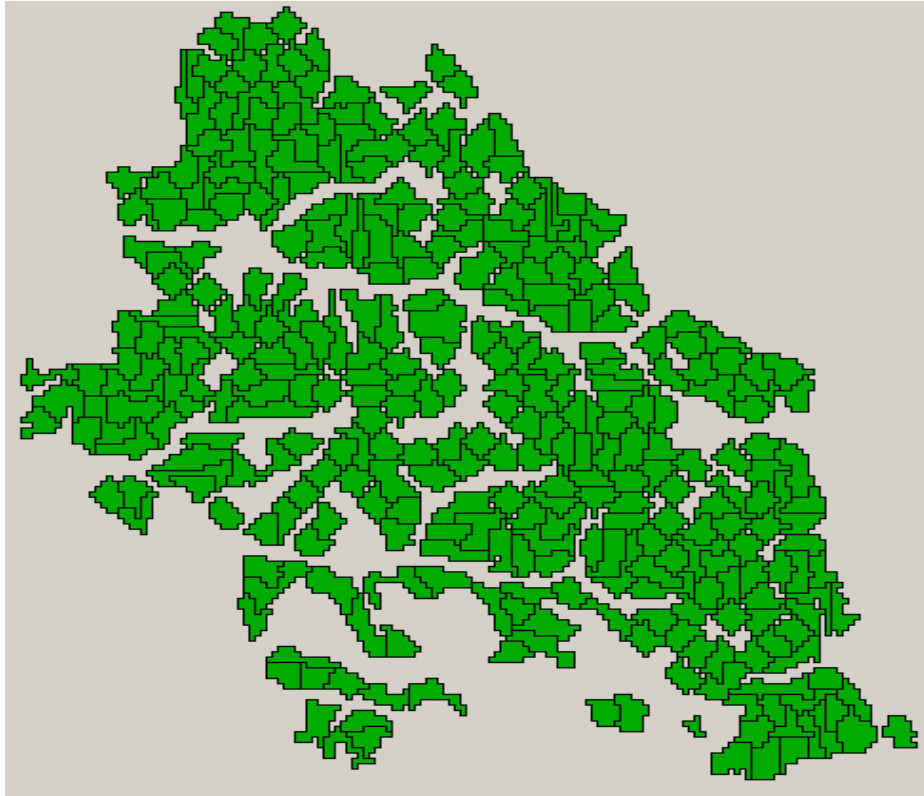


Figure Annexe 5: Répartition de l'espace de simulation en exploitation

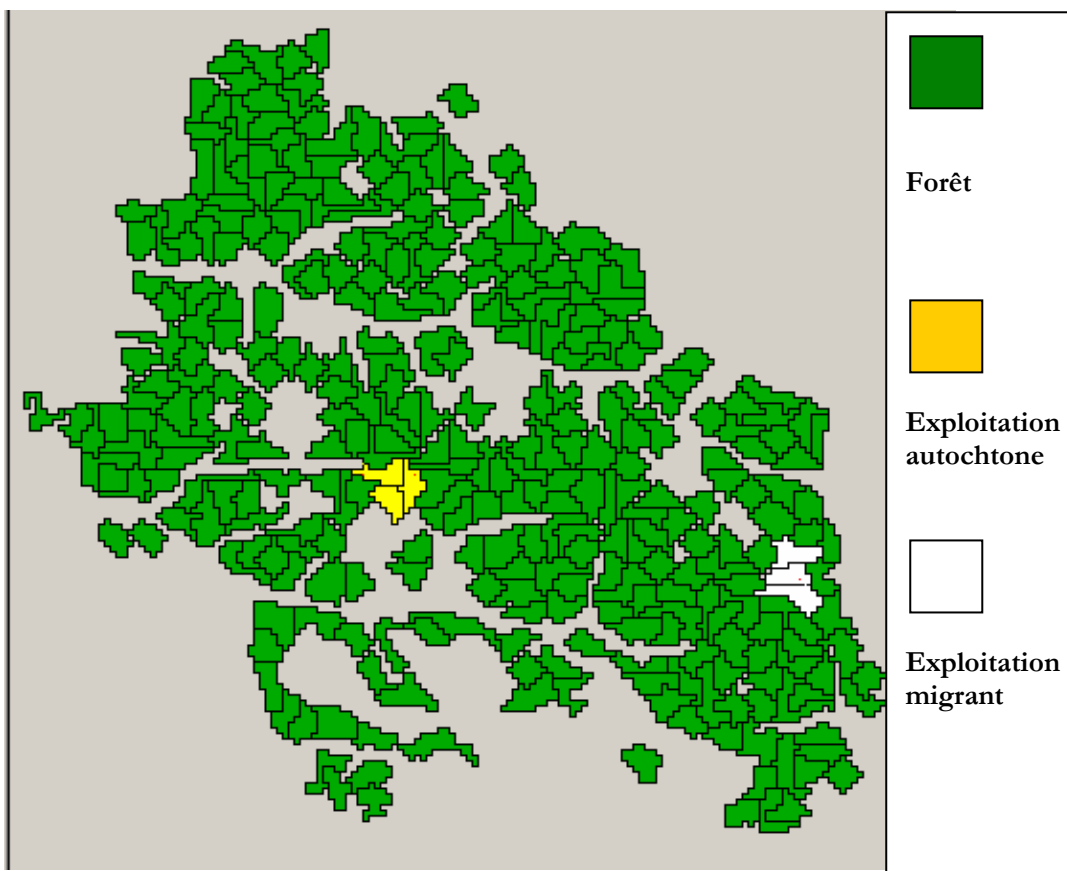


Figure Annexe 6: Emplacement des concessions en fonction de leur appartenance sociale

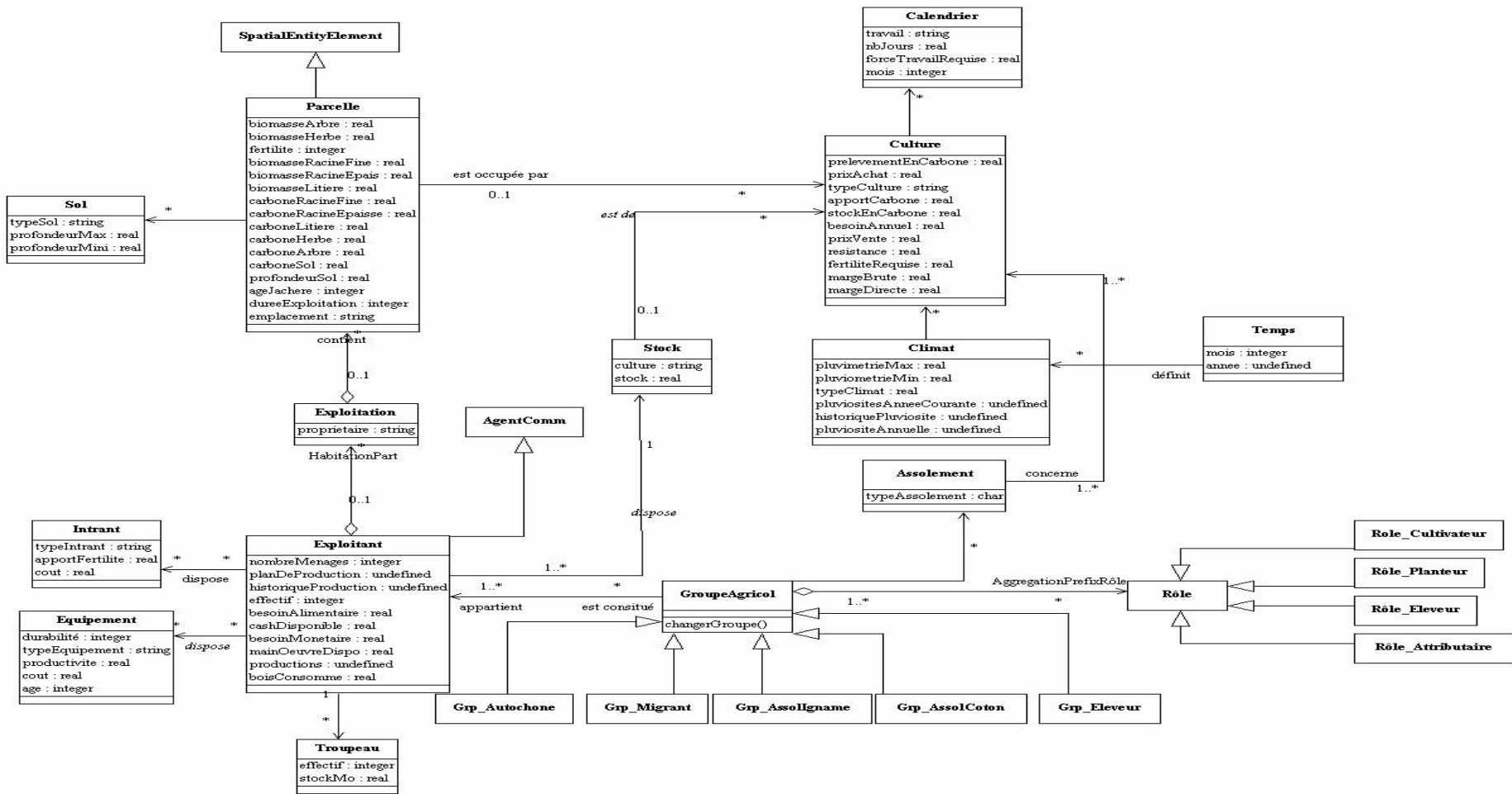


Figure Annexe 7: Diagramme de classes du modèle MIROT

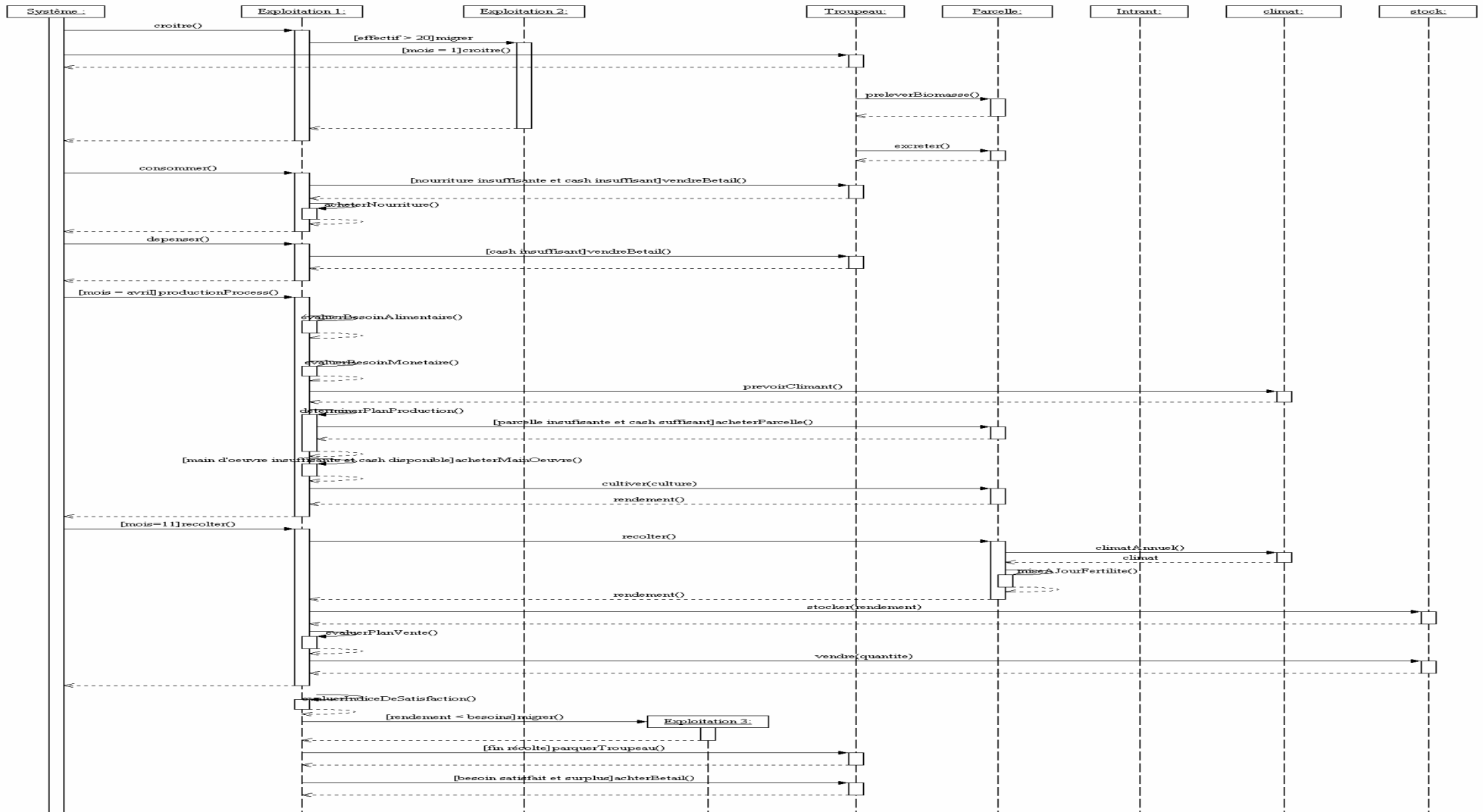


Figure Annexe 8 : Diagramme de séquences simplifié du modèle MIROT

ANNEXE 3 : LISTE DES PARAMETRES ET DES VARIABLES DE SORTIE DU MODELE

Tableau 5: Paramètres généraux du système

EXPLOITANT			
Paramètre	Description	Valeur	Unité
nbreConcession	Le nombre initial d'exploitations		
Autochtones	La proportion de la population autochtone par rapport à la population totale		
Migrant	La proportion de la population migrante par rapport à la population totale		
tauxCroissance	Le taux de croissance de la population		
BesoinNourriture	Le besoin alimentaire annuel d'un individu	175	Kg/an
BesoinArgent	Le besoin monétaire annuel d'un individu	30865	FCFA/an
besoinBois	Le besoin en bois de consommation par individu et par an	300	Kg-Ms/an
boisCoupe			
boisMort			
TROUPEAU			
Paramètre	Description	Valeur	Unité
coeffCroisTroupeau	Le taux de croissance des troupeaux		
surfacePaturage	La surface pour un animal	1.25	ha
prixVenteUBT	Le prix de vente d'un UBT	80000	CFA
prixAchatUBT	Le prix d'achat d'un UBT	100000	CFA
vitessePaturage	La vitesse de déplacement du troupeau pendant le prélèvement	0.5	Km/Heure
vitesseRechPaturage	La vitesse de déplacement du troupeau pendant la recherche du pâturage	3	Km/heure
tempsPaturageHivernal	La durée d'un parcours journalier en saison hivernale	9	heures
tempsPaturageSeche	La durée d'un parcours journalier en saison sèche	11	heures
vitessePrelevement	La quantité de MS prélevée par heure	0,74	Kg Ms/heure
limiteTroupeau	La limite de l'effectif d'un troupeau		
PARCELLE			
Paramètre	Description	Valeur	Unité
surface	La surface d'une parcelle	1	ha
stockArbreMaxi	La biomasse arborée maximale sur un hectare	46524000	kg Ms/ha
stockHerbeMaxi	La biomasse herbacée maximale sur un hectare	10000	Kg Ms/ ha
croissanceHerbeMaxi	Le seuil maximal de la croissance herbacée	800	Kg Ms/ha
PLUVIOSITE			
Paramètre	Description	Valeur	Unité
pluviositeNormale	La pluviosité normale	1000	mm
variabilitePluviosite	Le coefficient de variation de la pluviosité mensuelle	+ ou - 20	%
evolutionPluviosite	Le coefficient de la pluviosité dans le temps		

CLIMAT

Tableau 6: Données mensuelles (pluviosité et besoin de animaux)

Mois	Pluviosité	BesoinUBT	ExcretionUBT
Janvier		0,19	0,06576897
février		0,19	0,08985996
Mars		0,19	0,05993596
avril		0,19	0,05886365
mais		0,19	0,0613882
juin		0,19	0,05264796
juillet		0,19	0,04978811
août		0,19	0,04758182
septembre		0,19	0,05121925
octobre		0,19	0,05485668
novembre		0,19	0,05849411
décembre		0,19	0,06213154

CULTURE

Tableau 7: Données sur les cultures pratiquées

Caractéristiques	unité	igname	Coton	Maïs	Sorgho	Anacarde
rendement	Tonne/ha	5.5	1	1	1	0.17
fertiliteRequise	point	12	10	5	5	
prixDeVente	FCFA/tonne	53000	150000	85000	85000	180000
prixAchat	FCFA/tonne	60000		90000	90000	
coutEngrais	FCFA/sac	240000	240000	240000	240000	
margeBrute	FCFA/tonne	178000	192000	127500	68000	
margeDirecte	FCFA/tonne	138000	142000	77500	68000	
productionPaille	Tonne/ha	10	10	10	10	

ANNEXE 4 : PRESENTATION DU MODELE

Dans cette section nous présentons l'application développée. Il s'agira de présenter les différents éléments de paramétrage et de suivi de la simulation.

Le paramétrage est réalisé à travers plusieurs interfaces. La Figure Annexe 10 présente l'interface de définition des paramètres généraux du système : il s'agit des données sur le nombre de concessions initiale, les données sur les individus (besoin monétaire et alimentaire) et sur les troupeaux. L'écran de la Figure Annexe 11 permet de définir les systèmes de culture. Dans la zone, à droite, on a le nom des systèmes et la zone à gauche présente la liste des cultures praticables. La Figure Annexe 12 présente les caractéristiques des différents types de culture (rendement, prix de vente et d'achat, etc.). Quant à la Figure Annexe 13, elle correspond à l'écran de définition des données climatiques.

Le lancement du modèle est réalisé à partir du menu général (Figure Annexe 9). Quant au suivi de la simulation, il est possible grâce à la grille et les graphiques de Cormas.

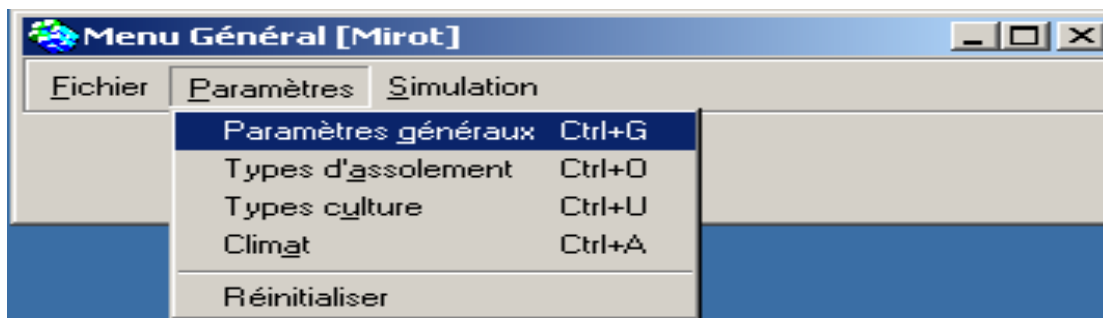


Figure Annexe 9: Menu général

Menu Général

Concessionnaire

Nbre de concessions: Autochtones: Migrants:

Effectif initial: Taux croissance:

Apparition des migrants à partir de: ans Système traditionnel

Besoins d'un individu

Alimentation: kg an-1 Argent: FCFA an-1

Bois

Besoin: kgMS an-1 coupe: Bois mort:

Troupeau

Taux croissance: an-1 Surface Pâturage: ha/Animal

Prix vente UBT: FCFA Prix Achat UBT: FCFA

Vitesse au patur: km/h Vitesse à la rech.: km/h

Temps pat. Hiver: heure(s)/jour Temps pat. Sèch.: heure(s)/jour

Vitesse prélèvem: KgMS/heure Limite troupeau:

Parcelles

Surface: ha Stock Maxi Herbe: kgMS

Stock Maxi Arbre: kgMS Croiss Herbe Maxi: kg MS mois-1

Pluviosité

Pluviosité: m an-1 Variabilité: Evolut* ds le temps:

Gams:

Figure Annexe 10: Ecran de définition des paramètres généraux

Les système de production

Les caractéristiques du système de culture

Type:

Culture à ajouter

Culture:

Les cultures

mais
coton
sorgho

Les systèmes de culture

migrant
autochtone

Figure Annexe 11: Définition des systèmes de culture

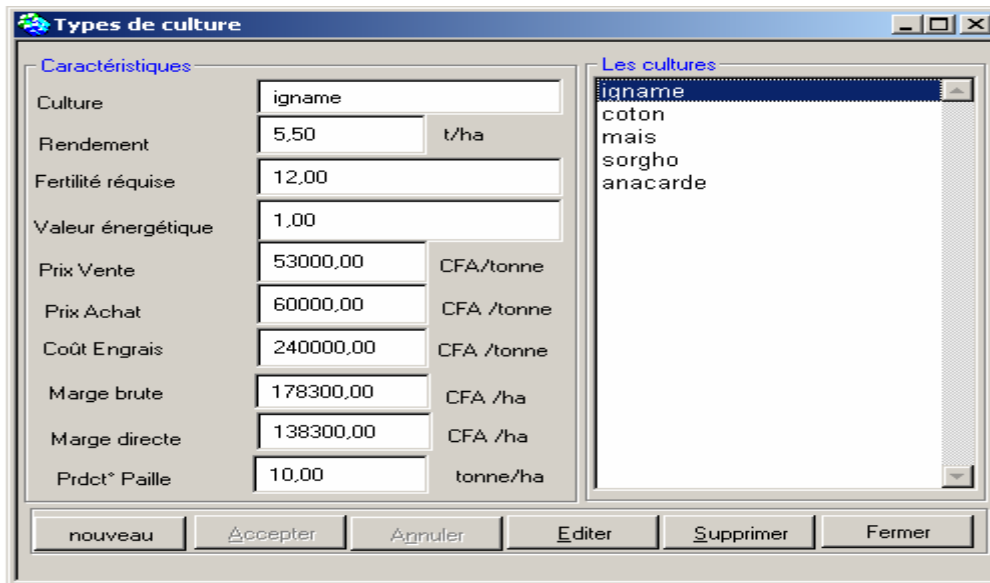


Figure Annexe 12: Définition des différents types de culture

Sélection	Mois	CroissanceHerbe	Pluviosité	besoinUBT: t-MS/Mc	création UBT t-MS/m
▶	Janvier	0,00	0,00	0,19	0,06
2	Février	0,00	0,00	0,19	0,06
3	Mars	0,00	0,00	0,19	0,06
4	Avril	0,00	0,00	0,19	0,05
5	Mai	0,00	0,90	0,19	0,05
6	Juin	1,00	1,20	0,19	0,05

Figure Annexe 13: Ecran de définition du climat

ANNEXE 5 : CODE SOURCE

Le code source généré par Visual Works est de 287 pages. Par conséquent, il ne sera présenté que quelques fonctionnalités du système.

Exploitant

activity

```
self patch isNil

ifFalse:[

self currentMonth = 1
ifTrue:[self activiteCourante:#croitre.].

self currentMonth = 2
ifTrue:[self activiteCourante:#planterArbre.].
"temps de mise en culture"
self currentMonth = 4
ifTrue:[ (self activiteCourante ~= #miseEnCulture)
ifTrue:[ self

activiteCourante:#miseEnCulture.]

].
self currentMonth = 10 "période de la récolte"
ifTrue:[ self activiteCourante:#recolter.].
self currentMonth = 11 "fin de la récolte"
ifTrue:[ self activiteCourante:#vendreProduction.].
self currentMonth = 12 "récolte des plantations"
ifTrue:[ self activiteCourante:#recolterPlantation.].
self executeActivity.
self currentMonth = 11
ifTrue:[ self parcentage].
self consommerNourriture. "consommation de la nourriture"
self depenser. "satisfaction des besoin en

argent"

self consommerBois.
self mois: (self currentMonth).
self runningTime: (self currentStep).

].

acheterNourriture: qteaAcheter
"*****
*****"
l'achat de la nourriture dépend du cash disponible. Lorsque le cash disponible est suffisant, on achète de la nourriture
sinon on vend du bétail pour en acheter. Le prix des céréales varient en fonction des saisons, alors pour chaque achat,
le prix est évalué par le marché.
*****
*****"

| t_culture t_prix t_vente |
t_culture := self patch spaceModel cormasModel culture:#mais.
t_prix := t_culture prixAchat * qteaAcheter.
t_prix := self diminuerCash: t_prix.
"le cash disponible ne suffit pas pour acheter de la nourriture"
t_prix > 0
ifTrue:[ | t_role |
t_role := self roles at:#eveleur ifAbsent:[nil].
t_role isNil
ifFalse:[

t_vente := t_role vendreTroupeauPour:t_prix.
"si la vente dépasse le besoin, le surplus d'argent est stocké"
t_vente > t_prix
ifTrue:[self augmenterCash:(t_vente-t_prix)]

].


```

].

Role_Cultivateur

construirePlanProduction

"La méthode construirePlanProduction permet de générer le plan de production
Le plan de production est défini par un modèle de programmation linéaire
Il fournit les surfaces et les quantités à produire pour chaque culture
l'exploitant définit les surface disponibles pour chaque type de culture ainsi que le rendement des cultures
Le rendement d'une culture est le plus faible rendement au cours des cinq dernières années"

```
| fichierParam t_cmd type repertoire t_gams_rep |
fichierParam := self creerDonnees.
repertoire := ((Cormas
                modelPath: exploitant patch spaceModel cormasModel class name)
               construct: 'utils') asString.
repertoire := self formaterRepertoire: repertoire.
t_gams_rep := self
                formaterRepertoire: self exploitant patch spaceModel cormasModel
                gamsRepertoire.

fichierParam close.
type := exploitant type = #autochtone ifTrue: [1] ifFalse: [2].
"Procédure d'optimisation"
t_cmd := CommonDialogsInterface new.
t_cmd
    production: type
    with: repertoire
    with: t_gams_rep
```

calculerSurfaceDispo

"définit les surfaces disponibles par types de culture"
"les surfaces disponibles sont définies en fonction du type d'assolement à base d'igname"
"l'igname est cultivé sur les parcelles vierges, les parcelles en jachère ayant un âge très avancé"
"le maïs est cultivé sur les parcelles dernièrement occupées par l'igname"
"le sorgho est cultivé sur les parcelles ayant été occupées par du maïs ou du sorgho"
"dans ce dernier cas, la fertilité de la parcelle doit être suffisante pour cultiver du sorgho.
Le plan d'exploitation est pour chaque culture est un ensemble de parcelles qui lui sont dédiées selon la technique
culturelle pratiquée"

```
| t_parcellesDispo t_surfaceDispo t_surface t_parcelles t_culture t_surface_maïs |

t_parcelles := exploitant parcellaire components.
t_parcellesDispo := Dictionary new.
t_surfaceDispo := Dictionary new.
"définir la surface totale disponible pour la culture d'igname"
t_surface := OrderedCollection new.
t_culture := self exploitant patch spaceModel cormasModel culture:#igname.
"la surface totale disponible pour l'igname"
"la culture d'igname se réalise d'abord sur les nouvelles plantations, ensuite sur les vieilles jachères et enfin sur les
parcelle
vierges"
t_surface addAll:(t_parcelles select:[:parc | parc estPlantee and:[parc
agePlantation = 0]]). "les nouvelles plantations"
t_surface addAll:(t_parcelles select:[:parc | (parc estForet)]). "sélection des
parcelles vierges"
t_surface addAll:(t_parcelles select:[:parc | parc estPlantee and:[parc
agePlantation >= 30]]). "les vieilles plantations"
t_surface addAll:(t_parcelles select:[:parc | (parc estJachere and:[parc fertilité >=
t_culture fertilitéRequise]))). "sélection des vieilles plantations"

t_parcellesDispo at: #igname put: t_surface.
"la surface totale en hectare correspond aux parcelles trouvées"
```

```

    somme := 0.
    t_surface do:[:parc | somme := somme + parc surface].
    t_surfaceDispo at: #igname put: somme.
    t_surface := OrderedCollection new.
    "la surface totale disponible pour le maïs"
    "le maïs est cultivé de préférence sur les parcelles dernièrement occupées par l'igname"
    t_culture := self exploitant patch spaceModel cormasModel culture:#maïs.
    t_surface addAll:(t_parcelles select:[:parc | ( parc derniereOccupation = #igname)
and:[parc fertilite >= t_culture fertiliteRequise]]).
    t_surface size = 0
    ifTrue:[ t_surface addAll:(t_parcelles select:[:parc | (parc estJachere and:[(parc fertilite >=
t_culture fertiliteRequise) and:
                                                                    [parc fertilite <= (t_culture
fertiliteRequise+1)]))]).

    t_parcellesDispo at: #maïs put: t_surface.

    somme := 0.
    t_surface do:[:parc | somme := somme + parc surface].
    t_surfaceDispo at: #maïs put: somme.
    t_surface_maïs := t_surface copy.
    t_surface := OrderedCollection new.
    t_culture := self exploitant patch spaceModel cormasModel culture:#sorgho.
    "la surface totale disponible pour le sorgho"

    t_surface addAll:(t_parcelles select:[:parc | parc derniereOccupation = #maïs and:[parc
fertilite >= t_culture fertiliteRequise]]).
    t_surface addAll:(t_parcelles select:[:parc | parc derniereOccupation = #sorgho
and:[parc fertilite >= t_culture fertiliteRequise]]).
    t_surface size = 0
    ifTrue:[ t_surface addAll:(t_parcelles select:[:parc | (parc estJachere and:[(parc fertilite >=
t_culture fertiliteRequise)
                                                                    and:[parc fertilite <= (t_culture
fertiliteRequise+1)
                                                                    and:[(t_surface_maïs includes:parc) not]])
    ])
    ].
    t_parcellesDispo at: #sorgho put: t_surface.
    somme := 0.
    t_surface do:[:parc | somme := somme + parc surface].
    t_surfaceDispo at: #sorgho put: somme.

    exploitant planExploitation: t_parcellesDispo.

^t_surfaceDispo

cultiver
    "*****"
    "à partir du modèle généré par le modèle mathématique, on déduit, les surfaces à exploiter pour chaque culture"
    "à partir du fichier de sortie de construction du plan de production"
    "les données sont extraites, les cultures dont l'indice est 1 pour une parcelle sont exploitées"
    "les parcelles sont exploitées selon la technique culturale. Lrsque les parcelles dédiées à une culture ne sont pas
suffisantes alors l'exploitant peut ainis utiliser les autres parcelles libres de son exploitation"
    "*****"
    "*****"

    self class accessSemaphore critical:
        [| fichierPlan repertoire t_ligne t_surface t_culture t_parcelle t_parcelles i t_nom_culture |
        self construirePlanProduction.
        self exploitant surfacesExploitees: Dictionary new.
        repertoire := ((Cormas
                        modelPath: exploitant patch spaceModel cormasModel class name)
                        construct: 'utils') asFilename.
        repertoire exists iffFalse: [repertoire makeDirectory].

```

```

fichierPlan := (repertoire construct: 'production.txt') asFilename
readWriteStream.
[fichierPlan atEnd] whileFalse:
    [t_ligne := fichierPlan upTo: Character cr.
    t_ligne size = 0
    ifTrue:
        [fichierPlan close.
        self construirePlanProduction.
        fichierPlan reset.
        t_ligne := fichierPlan upTo: Character cr.
        ^nil].
    t_ligne := t_ligne asArrayOfSubstringsSeparatedBy: Character space.
    t_nom_culture := (t_ligne at: 1) asSymbol.
    t_surface := (t_ligne at: 2) asNumber roundTo: 1.
    t_surface < (t_ligne at: 2) asNumber ifTrue: [t_surface := t_surface + 1].
    self exploitant surfacesExploitees at: t_nom_culture put: t_surface.
    "Transcript show: t_nom_culture printString, ' ', t_surface printString;cr."
    t_surface > 0
    ifTrue:
        [t_culture := exploitant patch spaceModel cormasModel
        culture: t_nom_culture.
        "L'exploitant utilise d'abord les parcelles dédiées à la
        culture selon sa technique culturale"
        typeCulture.
        t_parcelles := exploitant planExploitation at: t_culture
        i := 1.
        [t_surface > 0 and: [i <= t_parcelles size]] whileTrue:
            [t_parcelle := t_parcelles at: i.
            "t_parcelle surface <= t_surface
            ifTrue: [t_parcelle
            surfaceExploitee: t_parcelle surface]
            ifFalse: [t_parcelle
            surfaceExploitee: t_surface]."
            t_parcelle cultiver: t_culture.
            t_surface := t_surface - t_parcelle
            i := i + 1.
            "exploitation des parcelles lorsque les
            parcelles dédiées selon la technique culturale ne suffisent pas"
            ((i > t_parcelles size) and: [t_surface >
            0])
            ifTrue:
                [t_parcelles :=
                self chercherParcellePour: t_culture.
                t_parcelles := t_parcelles
                self acheterCharrue.
                fichierPlan
                reset;
                cr.
                fichierPlan close.
                t_parcelles := exploitant parcellaire components
                select: [:parc | parc estDernierementCultivee and: [parc estCultivee
                not]].
                t_parcelles do: [:parc | parc miseEn]achere]]
                i := 1]]].

```

Troupeau parcours

```

"*****
le parcours d'un troupeau simule le déplacement des troupeaux sur
terroir. Les troupeaux se déplacent de parcelles en parcelles pour
prélever de la biomasse. Seules les parcelles en jachères et en forêt
sont accessibles par les animaux.
La quantité prélevée sur une parcelle dépend du taux de prélèvement
par unité de temps et le temps de séjour d'un troupeau sur une parcelle.
Le troupeau cherche à satisfaire son besoin alimentaire, il continue le parcours
tant que le besoin n'est pas satisfait.
La vitesse et le temps de déplacement est fonction de la saison
Le troupeau mémorise le dernier parcours qui lui permis de satisfaire son besoin

```


qu'il suivra jusqu'à l'épuisement des ressources

"évaluation du besoin du troupeau"

```
| i t_besoin t_prelevee t_position t_temps_parcours t_temps_sejours t_temps_retour t_temps_journalier |
self tempsDeplacementMensuel: 0.
30 timesRepeat:
```

```
    [self ancienParcours: OrderedCollection new.
     self sensDeplacement: nil.
```

```
     t_besoin := self patch spaceModel cormasModel besoinUBTMois / 30
                    * self effectif.
```

```
     "temps de parcours journalier en fonction de la saison"
```

```
     "période hivernale"
```

```
     (self currentMonth >= 6 or: [self currentMonth <= 2])
```

```
         ifTrue:
```

```
             [t_temps_journalier := self patch spaceModel cormasModel
                tempsPaturageHivernal]
```

```
         iffFalse:
```

```
             [t_temps_journalier := self patch spaceModel cormasModel
```

```
tempsPaturageSeche].
```

```
     t_temps_parcours := 0.
```

```
     t_temps_retour := 0.
```

```
     self distanceJournaliere: 0.
```

```
     i := 1.
```

```
     [t_besoin > 0 and: [t_temps_parcours + t_temps_retour < t_temps_journalier]]
```

```
     whileTrue:
```

```
         [t_position := self determinerSensDeplacement.
```

```
         t_position isNil
```

```
         iffFalse:
```

```
             [self ancienParcours addLast: t_position.
```

```
             self moveTo: t_position.
```

```
             t_temps_sejours := self evaluerTempsDeplacement.
```

```
             t_temps_retour := self evaluerTempsRetour.
```

```
             t_temps_parcours := t_temps_parcours +
```

```
t_temps_sejours.
```

```
             t_prelevee := self preleverBiomasse: t_temps_sejours.
```

```
             t_besoin := t_besoin - t_prelevee.
```

```
             self excreter: t_temps_sejours.
```

```
             self
```

```
                 tempsDeplacementMensuel: self
```

```
tempsDeplacementMensuel + t_temps_parcours.
```

```
                 self tempsDeplacementJournalier: t_temps_parcours].
```

```
         i := i + 1].
```

```
     self dernierParcoursSatisfaisant: t_besoin <= 0.
```

```
     self retournerAuParque.
```

```
]
```

determinerSensDeplacement

"le troupeau a la capacité de perception de son environnement"

```
| t_parcelles_voisines t_targets t_selection t_sens |
```

```
t_parcelles_voisines := OrderedCollection new.
```

"le troupeau est sur le lieu de parcage"

```
self sensDeplacement isNil
```

```
    iffFalse:
```

```
        [t_selection := self patch
```

```
perform: ('neighbour', self sensDeplacement asString) asSymbol].
```

```
t_selection isNil
```

```
    ifTrue:
```

```
        [t_parcelles_voisines := self patch neighbourhood
```

```
select: [:parcelle | parcelle estAttractive and:[(self ancienParcours
```

```
includes: parcelle) not]].
```

```
        "il se deplace vers la parcelle ayant la quantité de biomasse la plus importante"
```

```
        t_targets := t_parcelles_voisines
```

```

asSortedCollection: [:p1 :p2 | p1 biomasseHerbe > p2
biomasseHerbe].
    t_targets isEmpty iffFalse: [t_selection := t_targets first].
    "troupeau entouré par des cultures"
    t_selection isNil iffTrue: [t_selection := self passerParCulture].
    t_parcelles_voisines := OrderedCollection new.
    "définir le sens de déplacement : nord, ouest,sud ou est"
    t_parcelles_voisines add: t_selection neighbourN.
    t_parcelles_voisines add: t_selection neighbourS.
    t_parcelles_voisines add: t_selection neighbourE.
    t_parcelles_voisines add: t_selection neighbourW.
    "sélectionner la parcelle la plus attractive des quatre parcelles voisines de la position courante"
    t_parcelles_voisines := t_parcelles_voisines
        select: [:parcelle | parcelle isNil not].
    t_parcelles_voisines := t_parcelles_voisines
        select: [:parcelle | parcelle estAttractive and:[(self ancienParcours includes: parcelle) not]].
    t_targets := t_parcelles_voisines
        asSortedCollection: [:p1 :p2 | p1 biomasseHerbe >= p2 biomasseHerbe].
    t_targets isEmpty iffFalse: [t_sens := t_targets first].
    t_sens isNil
        iffFalse: [self sensDeplacement: (t_selection directionNeighbour: t_sens)]
        iffTrue: [self sensDeplacement: (t_selection directionNeighbour: self patch)].
    ^t_selection

```