

UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE BOBO-DIOULASSO
(UPB)

ECOLE SUPERIEURE D'INFORMATIQUE
(ESI)

CYCLE DES INGENIEURS DE CONCEPTION EN INFORMATIQUE
(CICI)

01 BP 1091 BOBO-DIOULASSO 01
BURKINA FASO



INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT
(IRD)

01 BP 182 OUAGADOUGOU 01
BURKINA FASO

TEL : (+226) 30-67-37/39

ANNEE ACADEMIQUE 2001-2002

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Thème :

MODELISATION INFORMATIQUE DE SYSTEMES

COMPLEXES :

LE MODELE MIROT

Novembre 2002 – mars 2003

Présenté par :

- **Mahamadou BELEM**

Élève Ingénieur de conception en informatique

Membres du jury :

M. Mesmin DANDJINO (Président du jury), enseignant à l'ESI

M. Oumarou SIE (Superviseur), Maître de conférence

M. Masse Dominique (Maître de stage), ingénieur agro-écologie l'IRD-
Ouagadougou

M. Sado TRAORE (le Rapporteur), enseignant à l'ESI

REMERCIEMENTS

Je remercie Monsieur MASSE Dominique pour l'accueil chaleureux qu'il nous a réservé et pour avoir mis à notre disposition des moyens de travail et apporter son soutien tout au long de notre stage.

Sans oublier M. Christophe CAMBIER, Maître de conférence, l'Université Paris 6 .

Je remercie également Monsieur MANLAY Raphaël pour avoir proposé ce thème qui m'a permis d'approfondir, non seulement mes connaissances pratiques mais également mes connaissances théoriques sur l'« approche objet » et les Systèmes Multi-agents (SMA). Je lui présente toute ma gratitude pour son apport considérable dans la réalisation de mon stage.

Je remercie énormément Monsieur Youl Sansan qui malgré ses occupation, n'a cessé de me soutenir tout au long de ce stage.

Un grand merci à mon superviseur, le professeur SIE Oumarou (Directeur de la Promotion des NTIC à l'Université de Ouagadougou), pour les éclaircissements qu'il m'a apportés.

Je n'oublie pas la Direction de l'Ecole Supérieure et tout son personnel pour leur apport considérable tout au long de cette formation.

Merci à mon ami et collègue MASSA Alioun Badara qui a été un véritable soutien, tant moral que matériel.

Je remercie aussi tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont permis de réaliser ce stage dans des meilleures conditions.

DEDICACES

A 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. J'en profite pour souhaiter bonne guérison à mon père.

A tous mes frères et sœurs, ma belle-sœur et mon neveu, eux qui m'ont toujours soutenu dans les moments difficiles tout au long de mes études.

A M. COULIBALY Drissa et ses voisins,

A tous ceux qui me sont chers

SOMMAIRE

Table des figures	5
Liste des tableaux	5
INTRODUCTION	6
1 PROBLEMATIQUE	7
1.1 DEFINITIONS	7
1.2 PROBLEMATIQUE GENERALE.....	7
1.3 PROBLEMATIQUE DU PROJET MIROT	7
1.4 OBJECTIFS.....	8
1.5 CONTRAINTES A RESPECTER	8
2 METHODOLOGIE	9
2.1 LE MODELE	9
2.2 LES SYSTEMES MULTI-AGENTS.....	9
2.2.1 DEFINITION.....	9
2.2.2 L'HISTORIQUE DES SMA.....	12
2.2.3 LES INTERETS DES SMA	12
2.2.4 QUAND UTILISER LES SMA ?.....	13
2.2.5 LES DOMAINES D'APPLICATION DES SMA	14
2.3 CHOIX DES OUTILS DE TRAVAIL.....	14
2.4 LA MODELISATION AVEC CORMAS	15
3 LA DYNAMIQUE DU PAYSAGE AGRICOLE	17
4 MODELISATION DE LA DYNAMIQUE	26
4.1 LE DIAGRAMME DES CAS D'UTILISATION	26
4.2 LES DIAGRAMMES DE SEQUENCE	28
4.3 LES DIAGRAMMES DE COLLABORATION	31
4.4 LES DIAGRAMMES D'ETAT TRANSITION	33
4.5 LES DIAGRAMMES D'ACTIVITES.....	35
5 STRUTURE ORGANISATIONNELLE	43
5.1 LA STRUCTURE SPATIALE DES AGENTS.....	45
5.2 LES AGENTS ACTIFS ET PASSIFS.....	47
5.3 LE SCHEMA DES AGENTS DU MODELE.....	48
6 SIMULATION	56
6.1 LA CONFIGURATION INITIALE DE L'ESPACE	56
6.2 LA DESCRIPTION DES INDICATEURS DE SUIVI.....	58
6.3 LE PARAMETRAGE ET LE SUIVI DE LA SIMULATION	59
6.3.1 LE PARAMETRAGE.....	59
6.3.2 LE SUIVI DE LA SIMULATION.....	62
7 BILAN GENERAL	65
7.1 CONDITIONS GENERALES DU TRAVAIL.....	65
7.2 PERSPECTIVES.....	65
7.2.1 LES PERSPECTIVES A COURT TERME	65
7.2.2 LES PERSPECTIVES A LONG TERME	66
CONCLUSION	67
BIBLIOGRAPHIE	68
ANNEXES	70
ANNEX-1 : LE CONCEPT D'OBJET.....	70
ANNEX-2 : ECRANS DE PARAMETRAGE DE CORMAS.....	74

Table des figures

<i>Figure 1 : Dynamique du carbone dans le sol.....</i>	18
<i>Figure 2 : Illustration du processus de migration.....</i>	21
<i>Figure 3 : succession culturelle traditionnelle chez un autochtone.....</i>	22
<i>Figure 4 : succession culturelle avec anacarde chez un autochtone.....</i>	22
<i>Figure 5 : succession culturelle chez un migrant.....</i>	22
<i>Figure 6 : Le rôle de la concession.....</i>	25
<i>Figure 7 : Exemple de cas d'utilisation.....</i>	27
<i>Figure 8 : Diagramme de cas d'utilisation du modèle MIROT.....</i>	27
<i>Figure 9 : Diagramme de séquence de l'évolution d'une concession.....</i>	29
<i>Figure 10 : : Diagramme de séquence de l'évolution d'un troupeau.....</i>	30
<i>Figure 11 : Diagramme d'évolution d'une concession.....</i>	31
<i>Figure 12 : Diagramme d'évaluation des besoins.....</i>	32
<i>Figure 13 : Diagramme de collaboration sur la récolte.....</i>	32
<i>Figure 14 : Diagramme d'état/transition d'une parcelle.....</i>	34
<i>Figure 15 : Diagramme d'état/transition d'une concession.....</i>	34
<i>Figure 16 : Croissance d'une concession.....</i>	36
<i>Figure 17 : Evaluation des besoins d'une concession.....</i>	37
<i>Figure 18 : Choix d'occupation des parcelles.....</i>	39
<i>Figure 19 : récolte.....</i>	40
<i>Figure 20 : gestion des récoltes.....</i>	41
<i>Figure 21 : La migration.....</i>	42
<i>Figure 22 : la structure du paysage agricole.....</i>	44
<i>Figure 23 : la structure spatiale de l'environnement.....</i>	45
<i>Figure 24 : le schéma d'héritage des entités spatiales.....</i>	46
<i>Figure 25 : Diagramme de classes.....</i>	49
<i>Figure 26 : Les types de répartition des cellules.....</i>	56
<i>Figure 27 : configuration de l'espace de simulation.....</i>	57
<i>Figure 28 : Ecran principal.....</i>	60
<i>Figure 29 : Ecran de définition de types d'occupation.....</i>	61
<i>Figure 30 : Ecran de définition des types de concession.....</i>	62
<i>Figure 31 : : Ecran de suivi des résultats.....</i>	63
<i>Figure 32 : Ecran de suivi des simulations.....</i>	63
<i>Figure 33 : courbes de croissance de la population.....</i>	64
<i>Figure 34 : courbes d'évolution de l'occupation des parcelles.....</i>	64
<i>Figure 35 : Ecran de paramétrage et d'initialisation de Cormas.....</i>	74
<i>Figure 36 : Ecran de confirmation et de lancement.....</i>	74

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Tableau comparatif des types d'agents.....</i>	10
<i>Tableau 2 : tableau descriptif de la classe Parcelle.....</i>	50
<i>Tableau 3 : Tableau descriptif de la classe Domaine.....</i>	51
<i>Tableau 4 :Tableau descriptif de la classe Concession.....</i>	51
<i>Tableau 5 : Tableau descriptif de la classe Stock.....</i>	52
<i>Tableau 6 : Tableau descriptif de la classe Troupeau.....</i>	52
<i>Tableau 7 : Tableau descriptif de la classe Occupation.....</i>	53
<i>Tableau 8 : tableau descriptif de la classe ListeTypeOccupation.....</i>	53
<i>Tableau 9 : Tableau descriptif de la classe TypeConcession.....</i>	54
<i>Tableau 10 : Tableau descriptif de la classe ListeTypesConcession.....</i>	54
<i>Tableau 11 : Tableau descriptif de la classe sol.....</i>	54
<i>Tableau 12 : Tableau descriptif de la classe Scenario.....</i>	55

INTRODUCTION

La gestion des ressources renouvelables indispensables pour la survie de l'homme, est d'un grand enjeu et fait l'objet de nombreuses recherches. La recherche sur la gestion de ressources renouvelables vise à comprendre des systèmes complexes d'interactions entre des processus écologiques et des dynamiques sociales. La complexité de ces systèmes a pour conséquence de rendre les expériences difficiles voir impossibles à réaliser dans les laboratoires. Ce qui fait de la simulation informatique une méthode d'expérimentation incontournable.

C'est dans cette optique que nous avons réalisé au sein de l'Institut de Recherche pour le Développement de Ouagadougou (IRD), un stage pratique portant sur la « ***Modélisation de la dynamique du carbone dans un terroir agro-sylvo-pastoral*** ». L'objectif principal de ce stage est de mettre en place un outil simple d'estimation et de quantification de flux de carbone et de prédiction du bilan en carbone d'un terroir virtuel.

Le présent rapport décrit le modèle construit. En premier lieu nous présentons les systèmes multi-agents, l'approche de modélisation utilisée. En second lieu, nous présentons la dynamique du paysage agricole qui décrit les relations et les interactions entre les différents agents. Dans une troisième partie, nous décrivons la structure organisationnelle du paysage agricole, comment marche le modèle et enfin nous parlons des difficultés rencontrées et les perspectives à court et à long terme.

1 PROBLEMATIQUE

1.1 DEFINITIONS

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.

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

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

1.2 PROBLEMATIQUE GENERALE

En raison des rôles structuraux, énergétiques et de transport minéral de la matière organique, le cycle du carbone, principal constituant de la matière organique sèche, conditionne largement la productivité, mais aussi la viabilité des écosystèmes. Cette prévalence est particulièrement forte en Afrique sub-saharienne, où dominant des systèmes agro-pastoraux peu intensifs, dont la durabilité dépend de la disponibilité des ressources organiques en bois, grain, fourrage et humus du sol. 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). Au niveau parcellaire, la prévision peut se baser sur des expérimentations en milieu réel. A l'échelle du système de production ou du bassin versant, la multiplicité des acteurs, des échelles de temps et d'espace, font de la simulation informatique une méthode d'expérimentation incontournable.

1.3 PROBLEMATIQUE DU PROJET MIROT

Le projet MIROT 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. 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.

1.4 OBJECTIFS

L'objectif général du stage est de développer un outil simple d'estimation et de quantification du flux de carbone et de prédiction du bilan en carbone d'un terroir virtuel.

Il s'agit pour moi de concevoir et programmer un modèle de système multi-agents (SMA) prenant en compte les aspects majeurs de la dynamique du carbone dans un terroir virtuel, c'est à dire ses déterminants biophysiques et socio-économiques. Le modèle devra comporter une interface facile à utiliser et permettant à l'utilisateur de définir les paramètres de la simulation afin de comparer plusieurs scénarios de simulation.

La modélisation de SMA s'accompagne d'une série de simulations permettant d'évaluer le modèle par rapport à son objectif. Alors, il s'agira pour moi de participer à la validation du modèle.

1.5 CONTRAINTES A RESPECTER

Pour la réalisation du modèle, plusieurs contraintes sont à prendre en compte.

Il faut noter que le projet **MIROT** est en cours d'exécution. Par conséquent toutes les connaissances (principalement quantitatives) de l'objet à modéliser ne sont pas encore acquises. Le modèle doit donc être construit en tenant compte d'améliorations ultérieures possibles. Le modèle que nous devons développer ne prendra pas en compte tous les aspects du système étudié. De même, il doit être un outil simple d'estimation et de quantification du flux de carbone et de prédiction du bilan en carbone.

Le modèle doit être programmé en SmallTalk sous VisualWorks 7, en utilisant la plate-forme de simulation **CORMAS** du CIRAD.

2 METHODOLOGIE

2.1 LE MODELE

Un modèle peut être défini comme une abstraction de la réalité (une simplification de la réalité) qui consiste à identifier les caractéristiques principales de cette réalité. Le but de la modélisation est de permettre une bonne compréhension du système étudié et de le simuler. La systémique distingue trois types de systèmes :

- ❑ **Les systèmes simples (exemple pendule, billard) :** régis par des rapports de causalité linéaire ;
- ❑ **Les systèmes compliqués :** on peut les simplifier pour découvrir l'intelligibilité (explication).
- ❑ **Les systèmes complexes (par exemple Mirot) :** on doit les modéliser pour construire son intelligibilité (compréhension).

Dans le cas d'études de systèmes hétérogènes ou complexes, une démarche consiste à analyser le problème et à le représenter avec des processus ou des objets indépendants mais en interaction. C'est une des composantes des systèmes multi-agents (TELES, 1999).

2.2 LES SYSTEMES MULTI-AGENTS

La méthodologie proposée s'appuie sur la modélisation des systèmes multi-agents à travers la construction et la simulation sur ordinateur. La simulation multi-agents est un concept de modélisation particulièrement adapté à l'étude de la dynamique des interactions entre ressources et sociétés prenant en compte la dimension spatio-temporelle (Bousquet, 2001).

2.2.1 DEFINITION

Ferber (1995) donne la définition suivante des systèmes multi-agents :

« un système multi-agents est un système composé des éléments suivants :

- ❑ Un **environnement**, c'est à dire un espace disposant d'une métrique,
- ❑ Un ensemble d'**objets** dans l'espace, ils sont passifs, ils peuvent être perçus, détruits, créés et modifiés par les agents,
- ❑ Un ensemble d'**agents** qui sont des entités active du système,
- ❑ Un ensemble de relations qui unissent les objets entre eux,

- ❑ *Un ensemble d'opérations permettant aux agents de percevoir, de détruire, de créer, de transformer et de manipuler les objets*
- ❑ *Un ensemble d'opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification (les lois de l'univers) »*

Quatre (4) dimensions se dégagent pour l'analyse et la conception d'un système multi-agents (Boissier et al citant Demazeau) :

1. **Agent** : un système informatique évoluant dans un environnement qu'il peut percevoir et le modifier. Un agent est une entité réelle ou virtuelle dont le comportement est autonome, évoluant dans un environnement capable de le percevoir, d'y agir dessus et d'interagir avec les autres agents (Boissier et al citant Demazeau, 1996) :

Un agent tout comme l'objet encapsule des données (de son état) et des comportements ; mais un agent est autonome, c'est à dire qu'il a le contrôle sur son comportement contrairement à l'objet. Dans la conception d'un SMA, l'agent définit les entités agissantes (architecture interne, représentation des connaissances). Nous distinguons deux types d'agents (**tableau 1**) :

Systèmes d'agents cognitifs	Systèmes d'agents réactifs
Représentation explicite de l'environnement	Pas de représentation explicite
Peut tenir compte de son passé	Pas de mémoire de son passé
Agents complexes	Fonction stimulus/action
Petit nombre d'agents	Grand nombre d'agents

Tableau 1 : Tableau comparatif des types d'agents

2. **Environnement** : Eléments pour structurer les interactions avec les entités externes communes (Perception, Action, Dynamique de l'environnement,...). On distingue deux types d'environnement :

- **L'environnement du SMA** : « espace » commun aux objets du système. Cet environnement est doté d'un ensemble d'objets pouvant être :
 - **Situés** (à tout moment, il est possible de déterminer la position d'un objet) ;
 - **Passifs** (ces objets peuvent être perçus, détruits, modifiés par les agents) ou **actifs** ;
 - **L'environnement d'un agent** : environnement du SMA et les autres agents appartenant au système.
3. **Interaction et communication** : un agent peut communiquer directement avec d'autres agents, est capable d'agir dans un environnement, est mu par un ensemble de tendance (objectifs individuels), possède des ressources propres, est capable de percevoir son environnement, ne dispose que d'une représentation partielle (éventuellement aucune) de son environnement, offre des services, peut éventuellement se reproduire, a un comportement tendant à satisfaire des besoins, en tenant compte de ses ressources et de ses compétences, et en fonction de sa perception, ses représentations et ses communications (Ferber, 1995).
4. **Organisation** : Eléments pour structurer les agents (structures organisationnelles, Relations) de dépendance, dynamiques de l'organisation...

La construction d'un SMA passe par cinq (5) grandes étapes d'après (Aiello citant [Del89], [Del96b] et [Law91]) :

1. **La formulation du problème**

Durant cette phase, on procède à la présentation du problème, à la détermination des objectifs et à la définition des critères d'évaluation à utiliser.

2. **Détermination du modèle**

A partir des spécifications décrites dans l'étape précédente, nous aborderons ici, la conception du modèle qui sera utilisé pour fournir des résultats.

3. **Génération du simulateur et simulation**

Cette étape est consacrée d'une part, à l'élaboration de la structure de contrôle (simulateur) chargée de gérer le modèle et d'autre part, à l'exécution du processus de simulation ce qui a pour conséquence la génération d'un ensemble de données (résultats).

4. *La validation*

Il consiste à comparer les résultats obtenus en phase 3 avec les résultats du système étudié suivant les critères de validation. Si ces critères sont satisfaisants alors, le modèle est considéré valide et peut être utilisé comme tel (étape 5), sinon, il est nécessaire de retourner à l'étape 2 afin de modifier le modèle existant.

5. *L'utilisation*

Il s'agit de l'utilisation proprement dite du modèle valide.

2.2.2 L'HISTORIQUE DES SMA

Au début, on avait l'intelligence artificielle centralisée. Les connaissances sont distribuées aux différents agents du modèle. Les agents communiquaient à travers un « tableau noir » sur lequel ils agissaient tous pour contribuer à l'élaboration de la solution du problème posé. Le « tableau noir » est l'espace de travail commun à tous les agents. Cette architecture est caractérisée par une absence de communication directe entre les agents.

Face à l'insuffisance de l'intelligence artificielle centralisée, on assiste à l'émergence de l'intelligence artificielle distribuée. Les connaissances et le contrôle sont totalement distribués aux agents (indépendance des agents). Les agents se communiquent entre eux par envoi des messages (langage d'acteur). Les SMA sont une des composantes de l'intelligence artificielle distribuée.

2.2.3 LES INTERETS DES SMA

Les SMA sont très appropriés pour la modélisation des systèmes complexes et cela pour plusieurs raisons :

- ❑ Les SMA permettent de créer des agents autonomes virtuels et de les soumettre à des expériences difficiles voire impossibles à réaliser dans la réalité, d'où la qualification de laboratoires virtuels (TELES citant Treuil et Mullon, 1997).
- ❑ Les SMA sont très souvent programmés avec des langages de programmation orientée objet (**LPOO**). Les **LPOO** permettent une programmation modulaire ce qui entraîne une flexibilité du programme ainsi réalisé. De même, il permet une bonne maintenance du programme (possibilité d'ajouter et de supprimer des agents et des comportements sans remettre en cause le reste du programme). Le modèle peut être

alors évolutif, c'est à dire qu'on peut facilement modifier le modèle pour l'adapter aux contextes actuels.

- ❑ Un autre avantage est de pouvoir manipuler à la fois des paramètres quantitatifs et des paramètres qualitatifs (des comportements) (Teles citant Ferber, 1995).

Les SMA ont aussi des points faibles :

- ❑ La conception orientée objet demande un effort considérable de conception pour le concepteur. De plus le modèle n'est qu'une représentation subjective de la réalité ;
- ❑ Il n'existe pas de norme méthodologique pour le développement des SMA ;
- ❑ Absence de support informatique générique. Par conséquent, les LPOO sont souvent utilisés pour la programmation des SMA ;
- ❑ Le contrôleur global manque ;
- ❑ Une vision globale manque.

L'un des concepts majeurs des SMA est l'autonomie, un contrôle centralisé ou global n'est pas du tout dans l'esprit de cette approche

2.2.4 QUAND UTILISER LES SMA ?

L'utilisation des SMA pour la modélisation d'un système complexe est appropriée dans les cas suivants :

1. La nature de l'application

- Le problème est complexe et doit être décomposé (modèle **MIROT**) ;
- Absence de solution globale ;
- Modélisation des systèmes naturels/sociaux (modèle **MIROT**) ;
- Existence des différents domaines de connaissance ;
- Distribution des données, de contrôle, des connaissances, des ressources.

2. La contrainte d'exécution

- Volonté d'avoir des résolutions concurrentes, simultanées, asynchrones
- Satisfaction de contraintes de fiabilité (redondances) de contraintes physiques...
- Besoin d'évolutivité : adaptation aux modifications et/ou à l'environnement ;
- Besoin d'ouverture : le système doit pouvoir s'adapter dynamiquement au retrait/ajout des nouveaux composants.

2.2.5 LES DOMAINES D'APPLICATION DES SMA

De nos jours, les SMA sont de plus en plus appliqués dans plusieurs domaines. Ainsi, ils existent actuellement plusieurs modèles qui ont été développés parmi lesquels nous pouvons citer :

- ❑ **En agronomie**
 - Modélisation de la dynamique des matières organiques dans le sol : **MIOR** [] ;
 - Périmètres irrigués au Sénégal : **Shadoc** et **Njoobari**
- ❑ **En industrie**
 - Supervision des processus : **ARCHO** [Jenning95] ;
 - Production industrielle : **YAMS** [Parunak87] ;
 - Contrôle de trafic aérien : **OASIS** [Kinny96]
- ❑ **En médecine**
 - Surveillance des patients : **GUARDIAN** [Hayes-Roth89] ;
- ❑ **En commerce**
 - Commerce électronique : **KASBHA** [Chavez96] ;
 - Processus administratifs : **ADEPT** [O'Brien] ;
 - Gestion de l'information www : **MAXIMS** [Maes]

2.3 CHOIX DES OUTILS DE TRAVAIL

De nos jours, plusieurs plates-formes ont été mises en place pour la programmation des SMA. On peut citer entre autre :

- ❑ *MadKit*
- ❑ *StarLogo*
- ❑ *Swarm*
- ❑ *Zeus*
- ❑ *Desire*
- ❑ *Sdml*
- ❑ *Oris*
- ❑ *Cormas* ;

□ ...

Bousquet et al. classent les différentes plates-formes en trois groupes :

1. Les plates-formes génériques,
2. Les plates-formes orientées écosystème parmi lesquels nous pouvons classer **Cormas** : proposent des utilitaires pour simuler des écosystèmes ou des problèmes de gestion de ressources.
3. Les plates-formes dédiées : ces outils s'intéressent à des types d'application bien précis.

Seul le second groupe de ces outils nous intéressent car répondant au mieux à notre attente.

Il faut noter que la liste donnée n'est pas exhaustive. Plusieurs études comparatives ont été menées sur les plates-formes de développement des SMA souvent avec des critères différents et sur des outils différents. Vu le temps qui nous a été imparti, nous n'avons pas pu effectuer une étude comparative détaillé de ces outils pour critiquer le choix de l'utilisateur sur la plate-forme **Cormas**.

Le modèle **MIROT** sera conçu en UML (Unified Modeling Language). UML est un outil de modélisation orientée objet. C'est un outil pertinent pour la description et la documentation d'un système d'information. Chaque participant a la possibilité de comprendre le système. Il est consistant, facile à l'utiliser et à comprendre.

2.4 LA MODELISATION AVEC CORMAS

Cormas est une plate-forme de programmation des SMA, programmé en VisualWorks. VisualWorks développé par *CinCom*, est un environnement de programmation en Smalltalk. **Cormas** propose un certain nombre d'entités génériques desquelles héritent les agents de chaque modèle.

Le processus de modélisation en **Cormas** peut être décomposé en trois étapes (Bousquet, 2001) :

1^{ère} étape : Agents et interactions

il s'agit de définir les agents de base du modèle à construire et les modes d'interactions entre les agents. Nous distinguons trois grands types d'agents desquels héritent les entités du modèle à construire :

1. Le premier est l'agent situé. Une entité située possède une référence (la cellule) et est caractérisée par son champ de perception ;
2. Le second type est l'agent communicant. Une entité communicante a la possibilité d'envoyer des messages aux autres entités communicantes. Elle possède une boîte aux lettres ainsi que des programmes lui permettant de recevoir et d'envoyer des messages ;
3. Les agents situés et communicants qui cumulent les propriétés des deux premiers.

Nous distinguons deux modes d'interactions pour les agents :

1. Le premier concerne l'espace correspondant à une grille de cellules. La cellule constitue l'entité spatiale de base et joue le rôle d'intermédiaire entre les agents.
2. Le second mode est constitué par les messages que les entités s'envoient par l'intermédiaire d'un canal de transmission.

2^{ème} étape : Le contrôle de la dynamique de la simulation

La deuxième étape consiste à définir l'ordre dans lequel, les différents agents du modèle vont interagir.

3^{ème} étape : Définition du point de vue de l'observateur et interfaces

La troisième étape de la modélisation va correspondre à la définition du point de vue avec lequel, on va observer l'évolution du système. **Cormas** propose trois types d'interfaces pour définir le point de vue de l'observateur :

1. Les graphiques permettant de suivre l'évolution des indices de la simulation ;
2. Une grille permettant de visualiser l'ensemble des cellules constituant l'environnement de la simulation. Cette grille donne une représentation de l'espace géographique à simuler. L'utilisateur a la possibilité de définir la taille, la forme, la connexité des cellules, la dimension de la grille ainsi que le type de frontières (toroïdale ou fermée). Il est possible d'initialiser l'état des cellules à partir des fichiers de données. Aussi, le couplage avec un Système d'Information Géographique (SIG) est possible ; ceci permet d'importer des données en provenance d'un SIG et de les traiter.
3. Le troisième type d'interface que propose **Cormas**, permet de visualiser les communications entre les différents agents communicants.

3 LA DYNAMIQUE DU PAYSAGE AGRICOLE

L'objectif principal de notre étude est la mise au point d'un modèle SMA permettant la simulation de la dynamique du carbone dans les terroirs agropastoraux du sud-ouest burkinabé afin d'en évaluer la durabilité future selon différents facteurs démographiques, techniques, politico-économique et climatiques ou même politiques.

Ainsi plusieurs stratégies interviennent dans le processus de génération et d'utilisation des ressources organiques à l'échelle du terroir. Ce processus peut être représenté par la figure 1 :

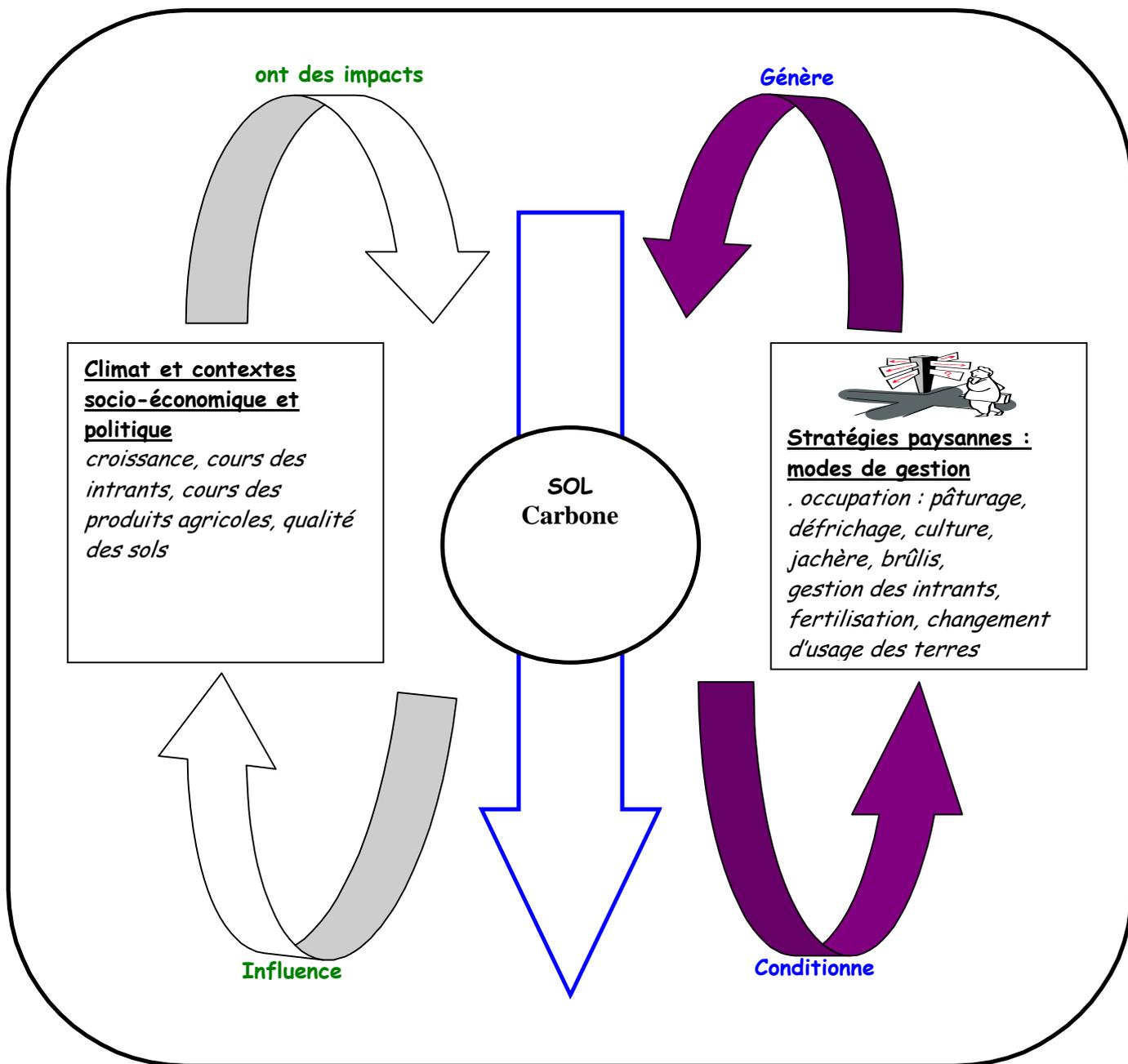


Figure 1 : Dynamique du carbone dans le sol

Le SMA est un ensemble d'agents interagissant dans un environnement commun. Ainsi, dans cette partie de notre rapport nous allons décrire les interactions entre les différents agents du modèle tout en faisant ressortir les aspects spatio-temporels.

Dynamique de l'exploitation des parcelles

Chaque année, chaque concession définit ses choix de gestion de ses parcelles en fonction de ses besoins en nourriture et en argent qui dépendent de son effectif et de son disponible en terres cultivables. Le besoin en nourriture d'une concession est fonction de son effectif et du besoin de chaque membre de la concession. Ainsi le besoin en nourriture peut être décrit par la formule suivante :

$$\text{BesoinNourriture}_{t+1} = \text{Effectif}_t * \text{BesoinPersonne}$$

BesoinNourriture : le besoin en nourriture de la concession

Effectif_t : l'effectif de la concession

BesoinPersonne : le besoin en nourriture pour une personne (ce besoin est évalué en énergie, ceci afin de donner au paysan la possibilité de choisir facilement entre plusieurs cultures aux valeurs alimentaires différentes).

La concession va donc occuper les parcelles en fonction de ses besoins en nourriture et en argent et de la productivité d'une parcelle pour une culture donnée dans des conditions normales. Ainsi, il lui faudra déterminer le nombre de parcelles pour chaque type de culture en fonction de ses besoins annuels. La formule ci-dessous, détermine le nombre de parcelles à mettre en valeur pour un type de culture donné :

$$\text{NbParcellesCulture}_{t+1} = (\text{BesoinCulture} * \text{Effectif}_t) / \text{RecoltePrevue}$$

NbParcellesCulture_{t+1} : le nombre de parcelles à dégager pour un type de culture

BesoinCulture : le besoin annuel d'une personne pour un type d'aliment

Effectif_t : l'effectif actuel de la concession

RecoltePrevue : la production normale d'un champ occupé par la culture.

Ces différentes formules décrivent l'évaluation des besoins d'une concession uniquement sur le plan nutritionnel. Mais les concessions manifestent aussi des besoins en argent pour des achats d'équipement, d'intrants et même d'animaux. Les entrées monétaires se réalisent principalement par la vente des produits agricoles (igname, céréale, coton, anacarde, etc.) et le commerce. Ces différents besoins influencent donc l'évaluation des parcelles cultivées.

$$\text{NbParcellesCulture}_{t+1} = ((\text{BesoinCulture} + \text{BesoinArgent}) * \text{Effectif}_t) / \text{RecolteNormale}$$

BesoinArgent : besoin annuel en argent d'une personne.

La principale contrainte pour une concession dans la satisfaction de ses besoins, est ici la disponibilité en terres cultivables. Si le nombre de parcelles disponibles dans son domaine est insuffisant pour satisfaire ses besoins, alors une partie de la concession migre si cela est possible sur le territoire pour créer un nouveau domaine ; sinon elle émigre. Il est donc nécessaire de suivre ce parcours afin de pouvoir mieux analyser l'impact des différents scénarios sur la dynamique de l'exploitation des parcelles à l'échelle du terroir. La migration se déroule selon le processus suivant: la concession cherche au voisinage de son domaine des parcelles libres (**figure 2**) . Si elle trouve un domaine libre alors elle migre sur ce dernier, sinon elle envoie un message aux autres concessions. Lorsqu'une concession trouve des parcelles libres à son voisinage, cette dernière envoie un message à la concession demandante.

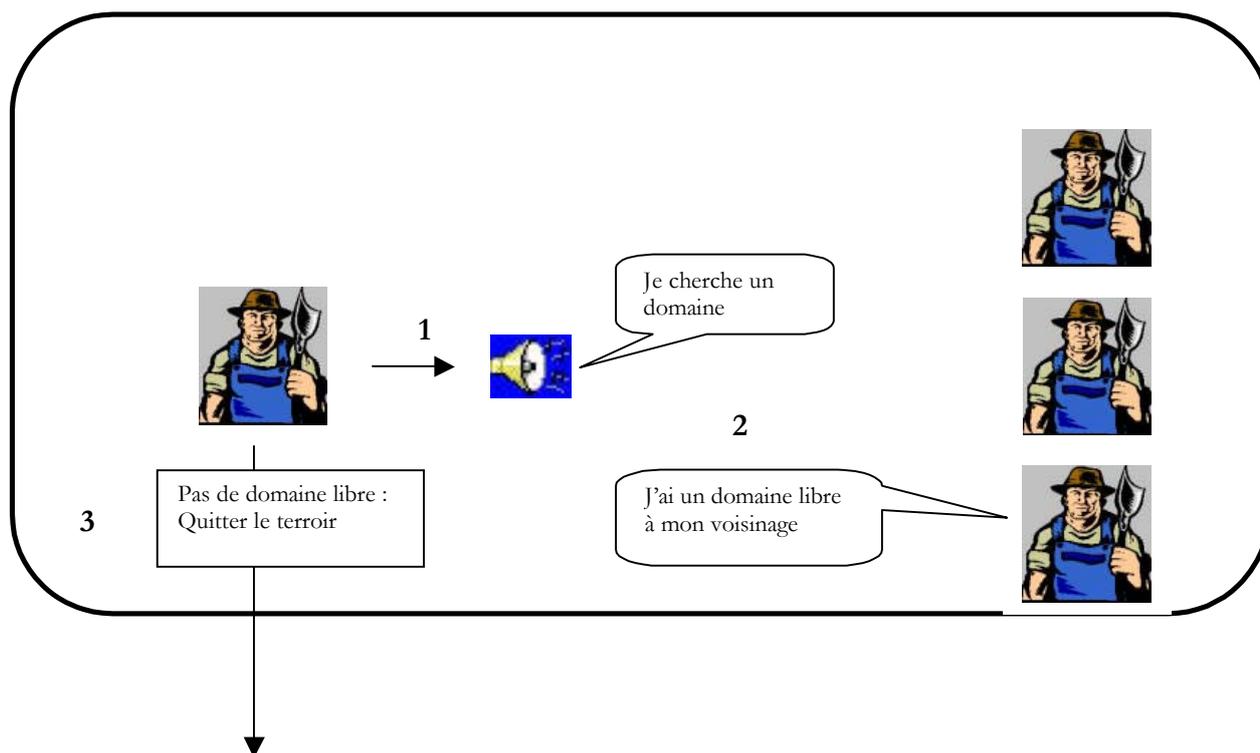


Figure 2 : Illustration du processus de migration

Les stratégies de gestion des parcelles ainsi décrites varient selon le type de concession. En effet, nous distinguons deux types de concessions qui existent sur le territoire de Touroukoro :

- ❑ Les concessions occupées par les autochtones pratiquant une culture semi-permanente (**figure 3** et **figure 4**);
- ❑ Les concessions occupées par les migrants pratiquant une culture continue céréale- coton (**figure 5**).

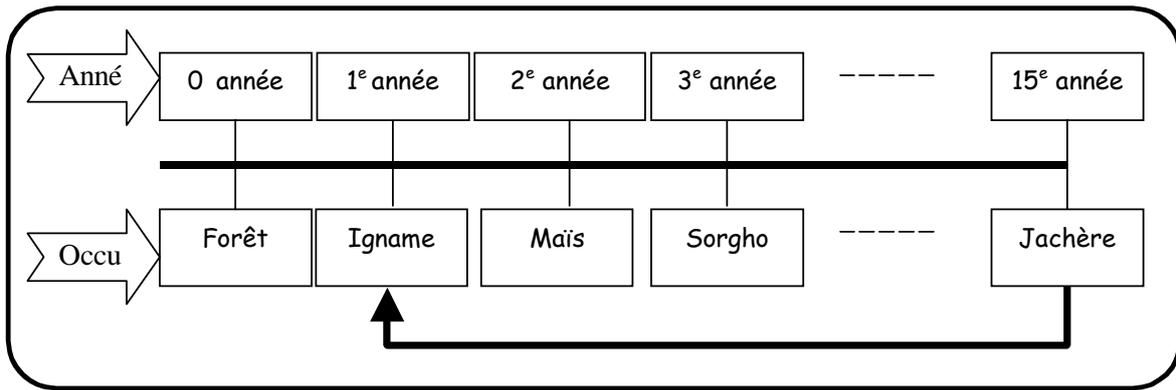


Figure 3 : succession culturelle traditionnelle chez un autochtone

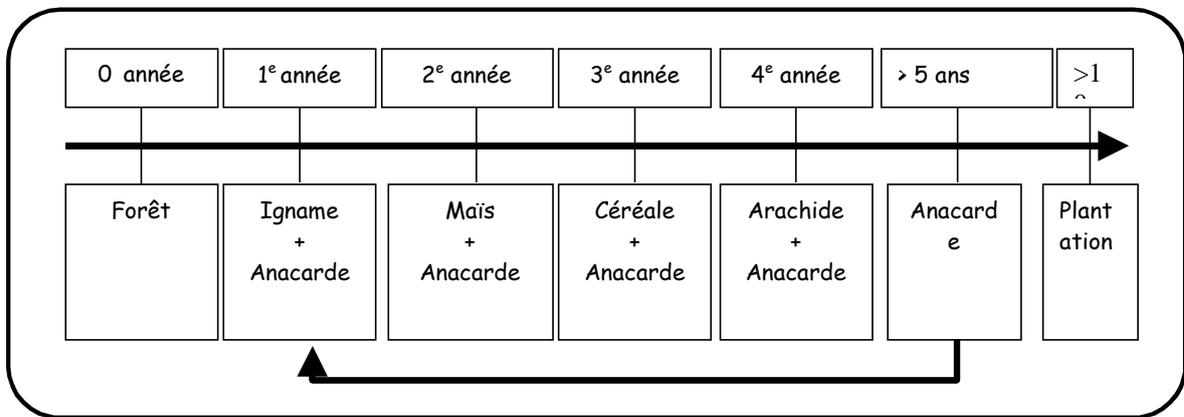


Figure 4 : succession culturelle avec anacarde chez un autochtone

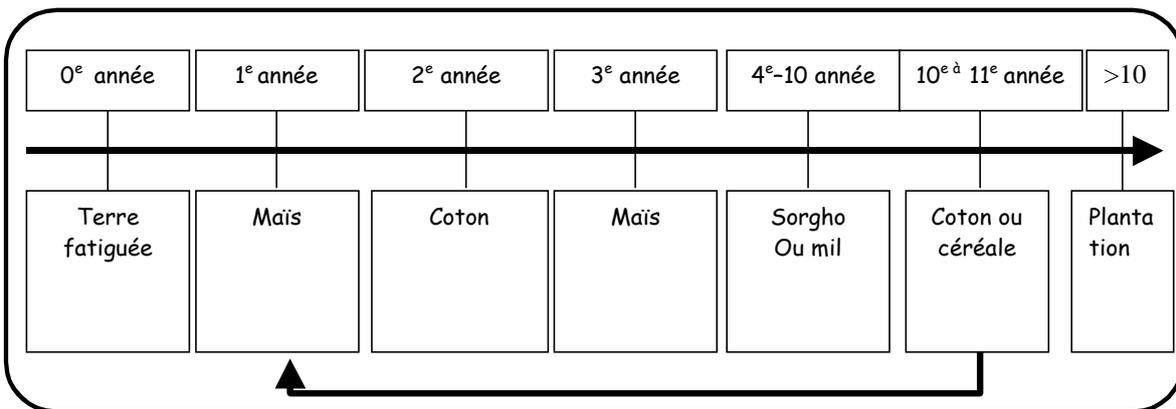


Figure 5 : succession culturelle chez un migrant

La biomasse herbacée

La gestion pastorale des agriculteurs a un impact important sur le stock de la biomasse herbacée d'une parcelle. La croissance de la biomasse herbacée dépend aussi fortement de la fertilité et de l'histoire de la parcelle (qui détermine en large partie l'état du couvert arboré, facteur limitant de la production herbacée).

A un instant $t+1$ (jour), la biomasse d'une parcelle croît selon la formule suivante :

$$\mathbf{BioH_{t+1} = BioH_t + CroisBioH - PrelevementTroupeau_{t+1}}$$

BioH_t : la biomasse herbacée avant prélèvement

BioH_{t+1} : la biomasse herbacée actuelle (après prélèvement)

CroisBioH : croissance de la biomasse herbacée (fonction du couvert arboré). Les paramètres sur la croissance de la biomasse herbacée ne sont pas encore disponibles. Les valeurs restent à fournir par une étude de terrain en cours.

PrelevementTroupeau : la quantité de la biomasse herbacée prélevée par les troupeaux.

La biomasse arborée

Le bois couvre une grande partie des besoins en énergie domestique. Ce bois provient essentiellement de la récolte des bois morts et de la coupe.

La productivité des arbres dépend de la biomasse arborée, qui est fonction de l'histoire de la parcelle. Durant les phases de jachère la biomasse ligneuse croît de façon logistique. Durant les phases de culture elle décroît de façon logarithmique ou linéaire.

La mise en culture d'une parcelle

Une parcelle peut être utilisée si sa fertilité est supérieure à la perte de fertilité engendrée par sa mise en culture. La mise en jachère et les engrais (minéraux, organiques) augmentent la fertilité d'une parcelle, la mise en culture et le surpâturage la diminuent.

$$\text{Fertilité}_{t+1} = \text{fertilité}_t + \text{effetJachère} + \text{effetClimat} + \text{effetIntrant} + \text{effetApportTroupeau}_t - \text{effetCulture}_{t+1} - \text{effetPrélèvementTroupeau}_t$$

Fertilité_t : la fertilité de la parcelle durant l'année en cours

Fertilité_{t+1} : la fertilité de la parcelle durant l'année suivante

effetIntrant : la fertilité engendrée par l'apport d'engrais dans la parcelle. Elle est nulle pour les parcelles qui n'ont pas été fertilisées.

effetJachere : l'augmentation de la fertilité engendrée par la mise en jachère de la parcelle à chaque année. Elle est nulle pour les parcelles cultivées.

effetClimat : l'impact climatique sur la fertilité de la parcelle (pluviométrie par exemple).

effetApportTroupeau_t : fumure animale.

effetCulture_t : perte de fertilité engendrée par la mise en culture.

La récolte

La productivité d'une parcelle dépend fortement de sa fertilité.

La formule ci-après donne la valeur de la récolte annuelle d'une parcelle :

$$\text{Recolte}_{t+1} = \text{Fertilité} * \text{RecoltePrevue}$$

Récolte_{t+1} : la quantité produite par la parcelle ;

Fertilité : le niveau de fertilité de la parcelle ;

RecoltePrevue : la récolte prévue dans des conditions normales

La pression démographique

La croissance démographique a un impact sur la disponibilité des ressources organiques. Trois (3) facteurs influencent la croissance démographique : les naissances, l'immigration et l'émigration.

$$\text{effectif}_{t+1} = \text{effectif}_t * \text{TauxCrois}$$

effectif_t : l'effectif initial de la concession (avant la croissance)

effectif_{t+1} : l'effectif actuel de la concession

TauxCrois : le taux de croissance de la population résidente

A partir de ces différentes interactions entre les différents agents, nous pouvons définir le rôle de la concession par le schéma suivant :

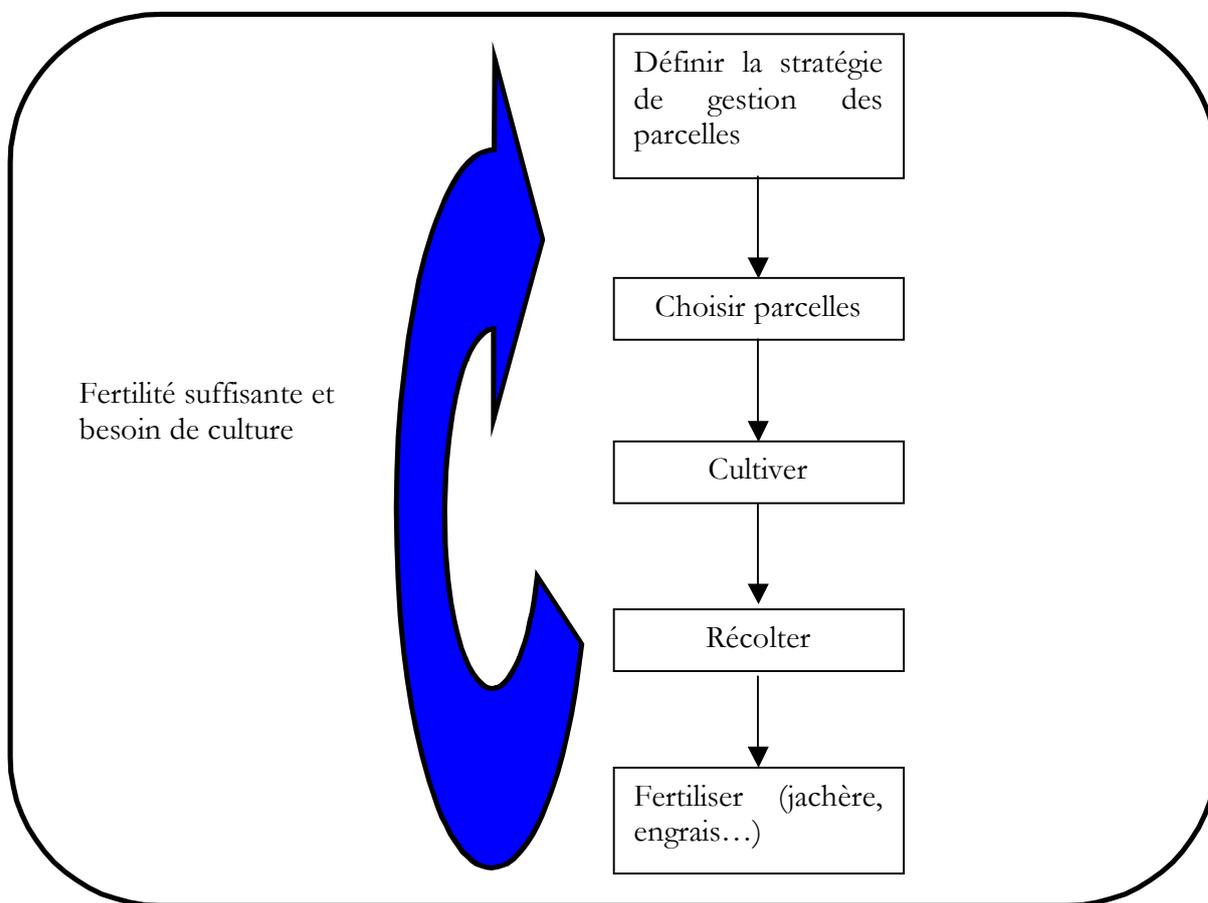


Figure 6 : Le rôle de la concession

4 MODELISATION DE LA DYNAMIQUE

La dynamique du système agricole, décrit les relations et les dynamiques des agents du modèle. Le but de la conceptualisation est de comprendre et structurer les besoins de l'utilisateur. Le modèle conceptuel doit permettre une compréhension du système. Le modèle conceptuel doit aussi servir d'interface entre tous les acteurs du projet.

Ainsi, on peut diviser le modèle en trois grandes parties appelées les « cas d'utilisation » :

- ❑ Définition des scénarios permettant la saisie des paramètres et la définition des différents cas de figure ;
- ❑ La dynamique du système agricole ;
- ❑ La génération des résultats ;

4.1 LE DIAGRAMME DES CAS D'UTILISATION

On décompose l'ensemble des besoins en se basant sur les différents utilisateurs du système. Le formalisme est basé sur le langage naturel pour permettre aux utilisateurs de formaliser leurs besoins. On distingue trois éléments dans le modèle :

- ❑ Les acteurs représentés par des personnages qui déclenchent des cas d'utilisation ;
- ❑ Les cas d'utilisation : il s'agit de la solution UML pour représenter le modèle conceptuel. Les cas d'utilisation permettent de structurer les besoins des utilisateurs et les objectifs correspondant d'un système.
- ❑ Le système (contient les cas d'utilisation) correspond au système à modéliser (ici, le modèle *MIROT*).

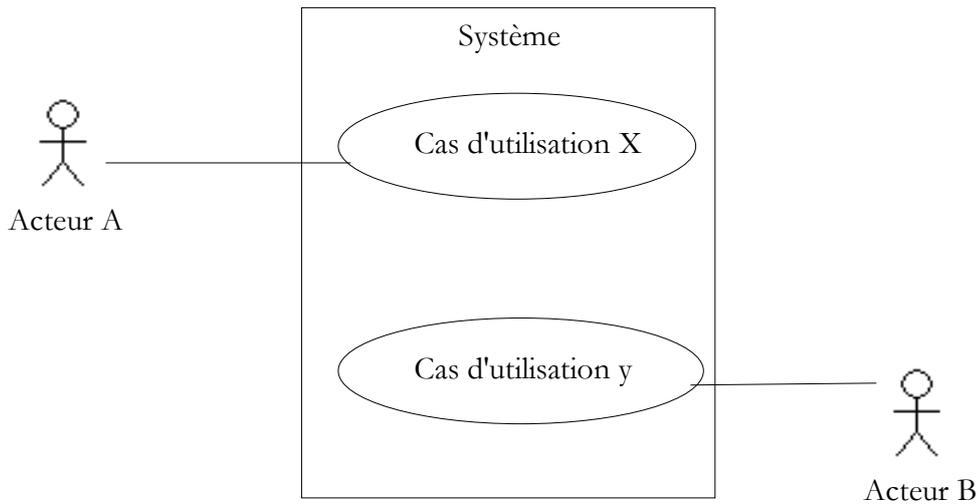


Figure 7 : Exemple de cas d'utilisation

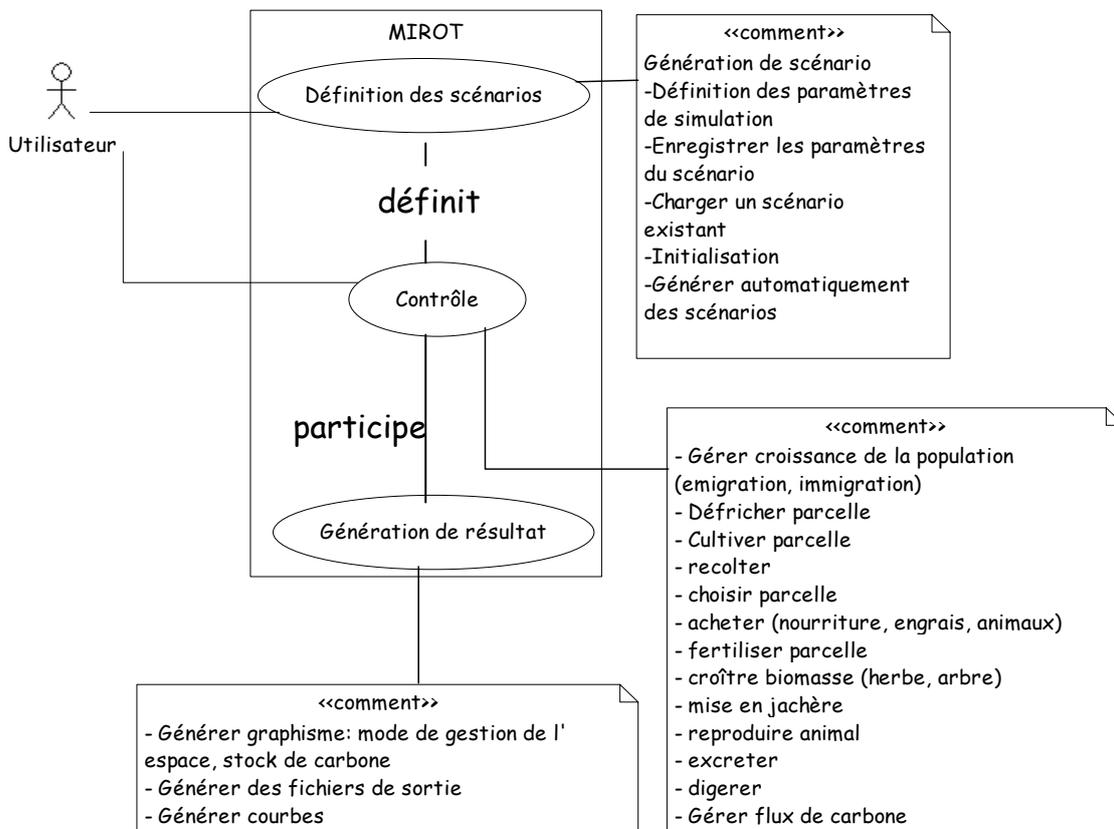


Figure 8 : Diagramme de cas d'utilisation du modèle MIROT

4.2 LES DIAGRAMMES DE SEQUENCE

Les diagrammes de séquences permettent de représenter des collaborations entre objets selon un point de vue temporel. On y met l'accent sur la chronologie des envois de messages. Les diagrammes de séquence peuvent servir à illustrer un cas d'utilisation.

Dans cette partie de notre document, nous présentons deux diagrammes de séquences. Le premier (**figure 9**) présente la collaboration entre objets au cours de l'évolution des concessions. Il représente principalement les actions (croissance, évaluation des besoins, choix d'occupation des parcelles, etc.) effectuées par le système et une concession au cours de l'évolution de cette dernière.

Quant au second (**figure 10**), il représente la collaboration entre objets au cours d'évolution des troupeaux des concessions.

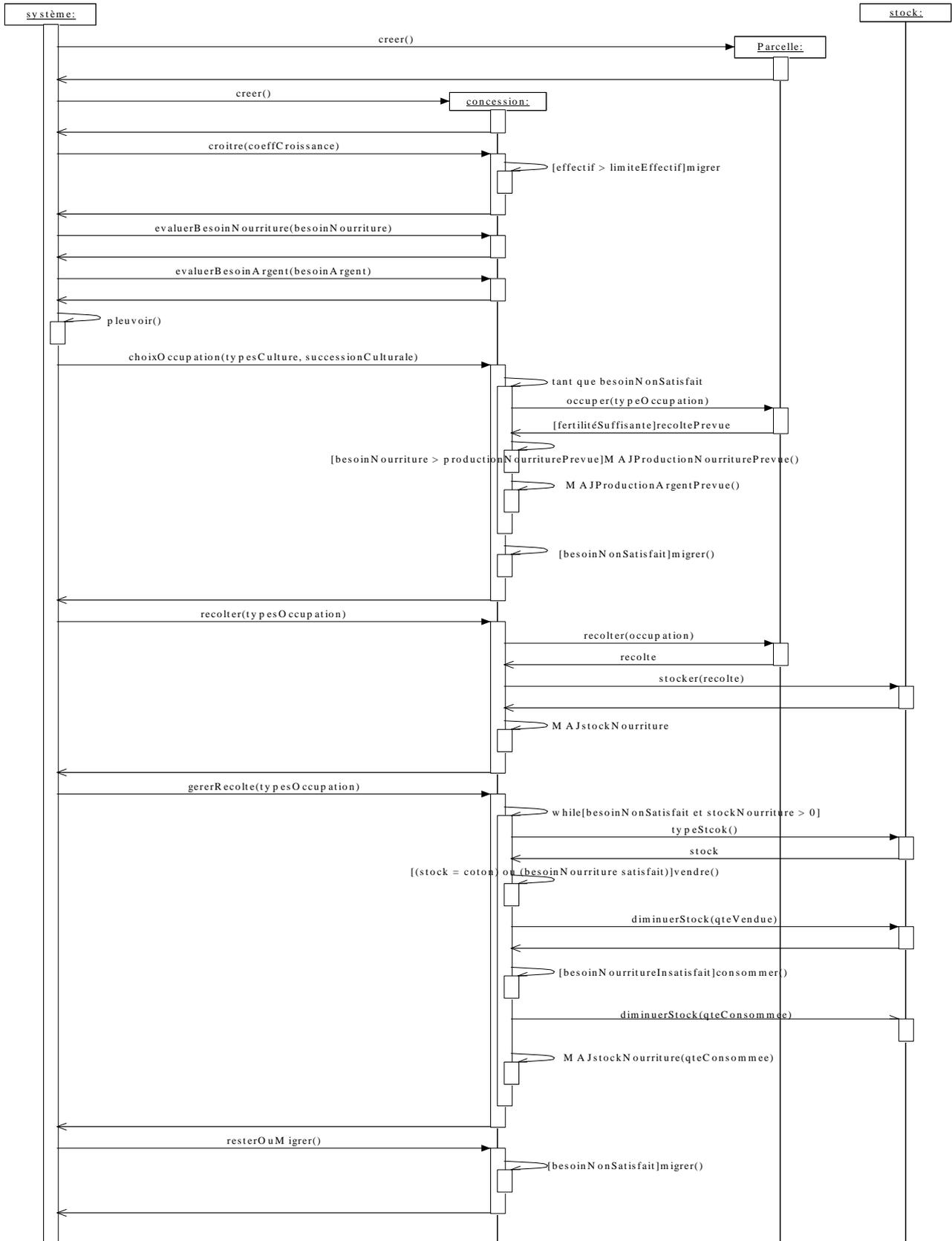


Figure 9 : Diagramme de séquence de l'évolution d'une concession

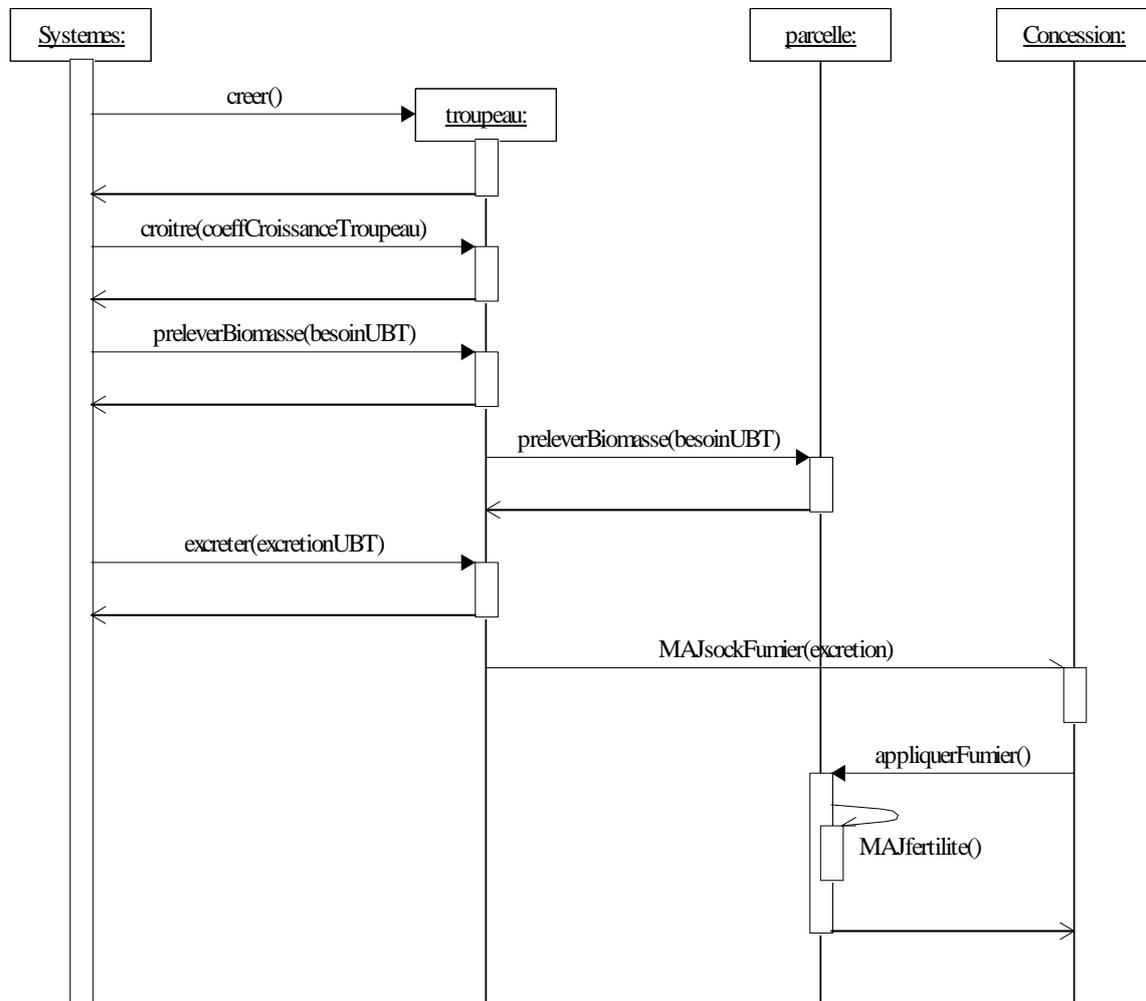


Figure 10 :: Diagramme de séquence de l'évolution d'un troupeau

4.3 LES DIAGRAMMES DE COLLABORATION

Un diagramme de collaboration montre des interactions entre les objets d'une manière plus détaillée en insistant sur la structure spatiale statique qui permet la mise en collaboration des objets.

La description des interactions comprend des arguments, les variables locales créées pendant l'interaction et les liens entre les objets qui participent à l'interaction.

La croissance des concessions

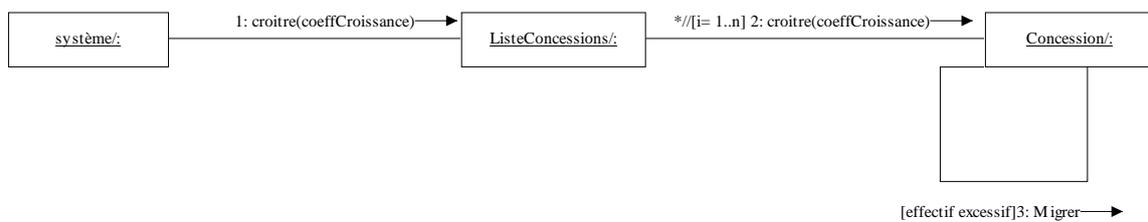


Figure 11 : Diagramme d'évolution d'une concession

L'évaluation des besoins

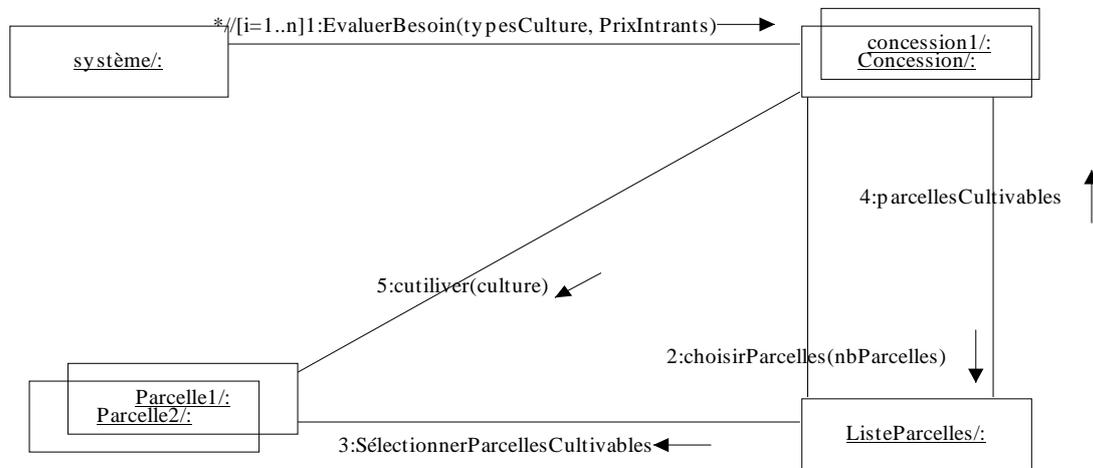


Figure 12 : Diagramme d'évaluation des besoins

La Récolte

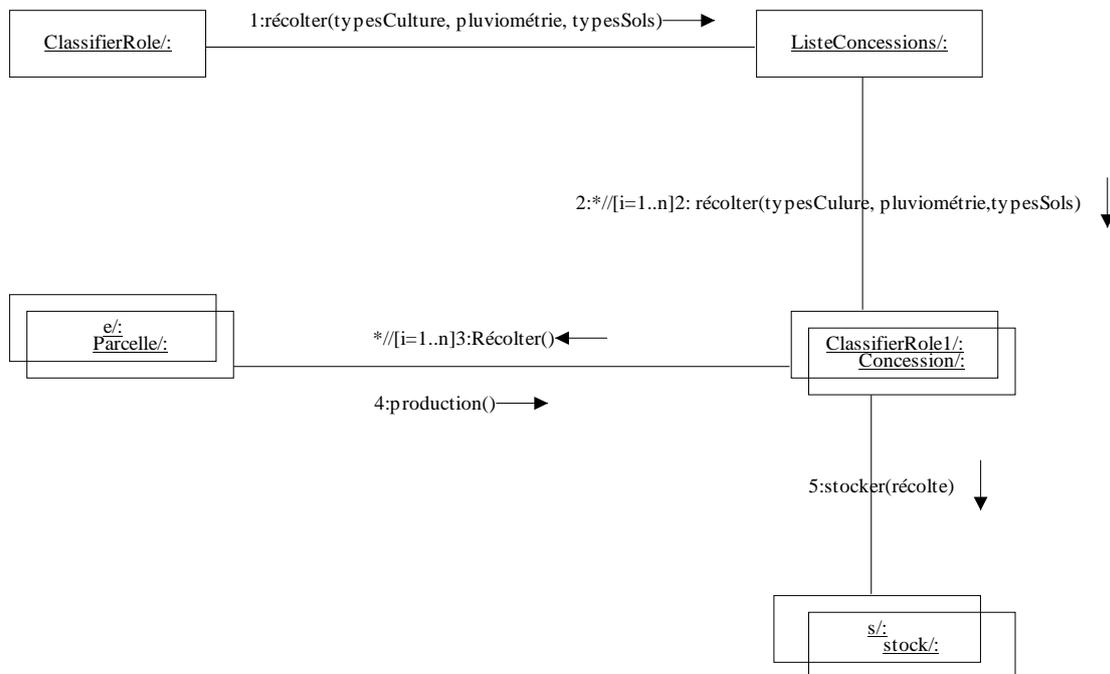


Figure 13 : Diagramme de collaboration sur la récolte

4.4 LES DIAGRAMMES D'ETAT TRANSITION

Ces diagrammes permettent d'associer un automate à une classe.

Cet automate spécifie le comportement d'un objet instance de la classe en termes d'état et d'évènement. Ces diagrammes sont associés à des objets qui ont un fort comportement réactif. Le diagramme d'état/transition donne une vue plus globale de l'objet centrée sur la classe de l'objet

Dans notre modèle les objets qui ont un fort comportement réactif sont la **concession** (figure 14) et la **parcelle** (figure 15). dont les diagrammes d'état/transition sont représentés.

Comportement d'une parcelle

La figure 14 montre le comportement d'une parcelle pendant tout le processus :

L'état initial d'une parcelle est la forêt. Elle peut être soit défrichée pour des besoins de culture ou bâtie. Lorsque la parcelle est défrichée, elle devient une parcelle cultivée. Dans ce cas, elle est exploitée jusqu'à son épuisement éventuel. Alors la parcelle est soit mise en jachère ou on apporte des fertilisants pour une future utilisation et le même processus continue pour la parcelle. Lorsque l'âge de la jachère atteint un certain nombre d'année, la parcelle devient une plantation si on y avait planté des anacardes.

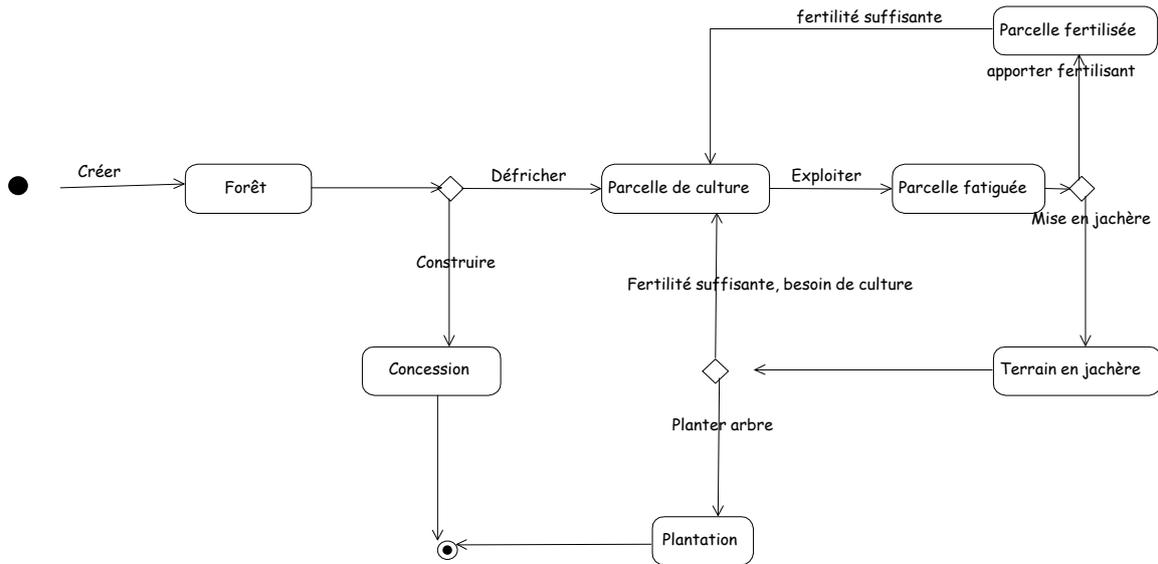


Figure 14 : Diagramme d'état/transition d'une parcelle

Evolution d'une concession (figure 15)

Une concession croît selon un taux de croissance démographique. Elle analyse ses besoins en fonction de son effectif total. Lorsque les besoins de la concession ne sont pas satisfaits, la concession crée alors un nouveau domaine sur lequel, une partie de la concession s'installe.

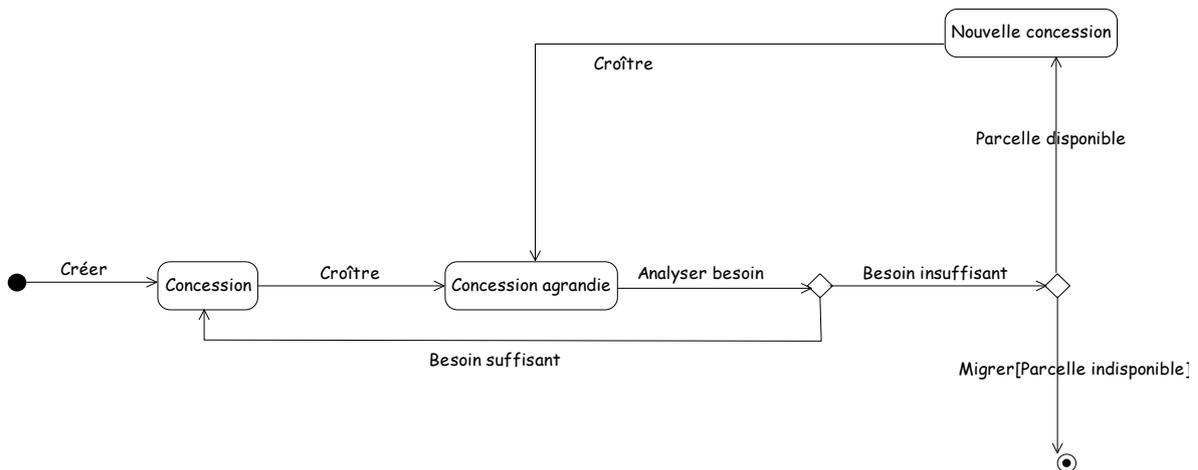


Figure 15 : Diagramme d'état/transition d'une concession

4.5 LES DIAGRAMMES D'ACTIVITES

UML permet de représenter graphiquement le comportement d'une méthode ou le déroulement d'un cas d'utilisation, à l'aide de diagrammes d'activités (une variante des diagrammes d'état/transition).

Une activité représente une exécution d'un mécanisme, un déroulement d'étapes séquentielles. Les transitions sont déclenchées par la fin d'une activité et provoquent le début immédiat d'une autre (elles sont automatiques).

En théorie, tous les mécanismes dynamiques pourraient être décrits par un diagramme d'activités, mais seuls les mécanismes complexes ou intéressants méritent d'être représentés.

.

Croissance d'une concession (figure 16)

La figure 16 montre graphiquement le déroulement de la croissance d'une concession.

La croissance d'une concession est déclenchée par l'appel de la méthode « croitreConcession » faisant appel à la méthode « croitre » de la concession. Lorsque l'effectif de la concession est supérieur à la limite imposée, une partie de la concession migre sur un nouveau domaine.

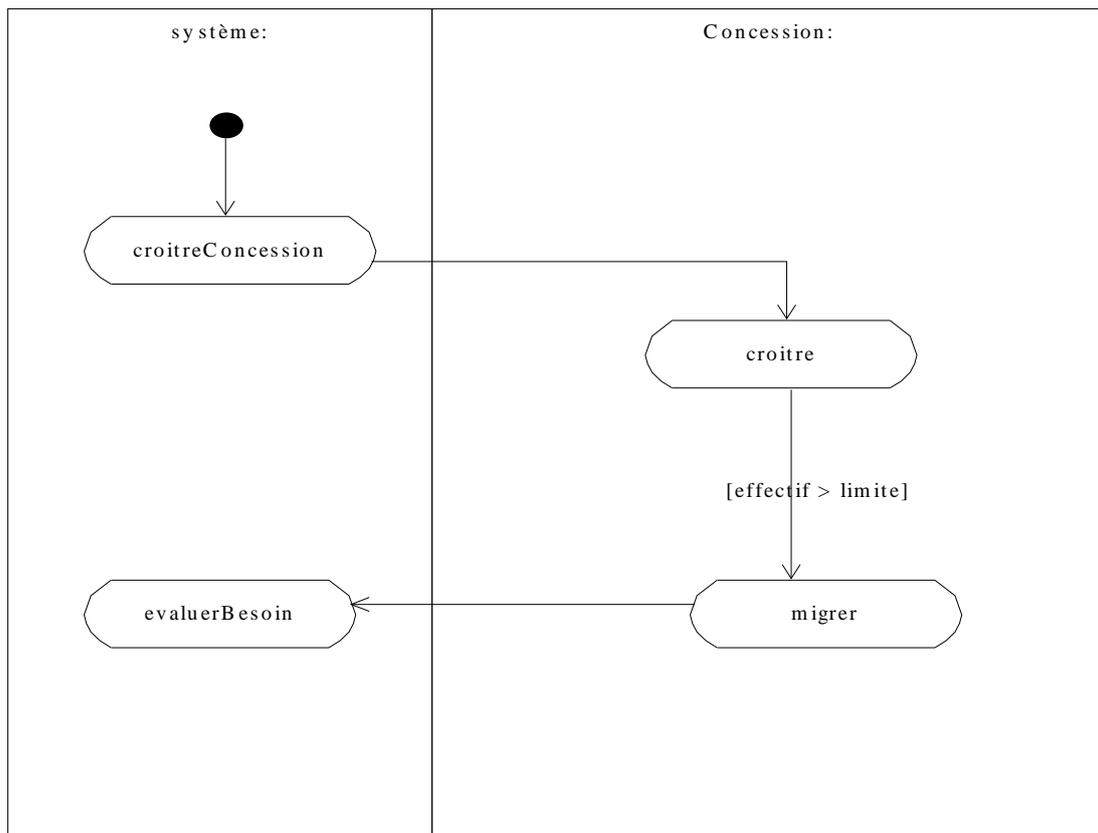


Figure 16 : Croissance d'une concession

Evaluation des besoins d'une concession (figure 17)

La concession évalue son besoin en nourriture et en argent en fonction de son effectif afin de déterminer ses besoins en parcelles.

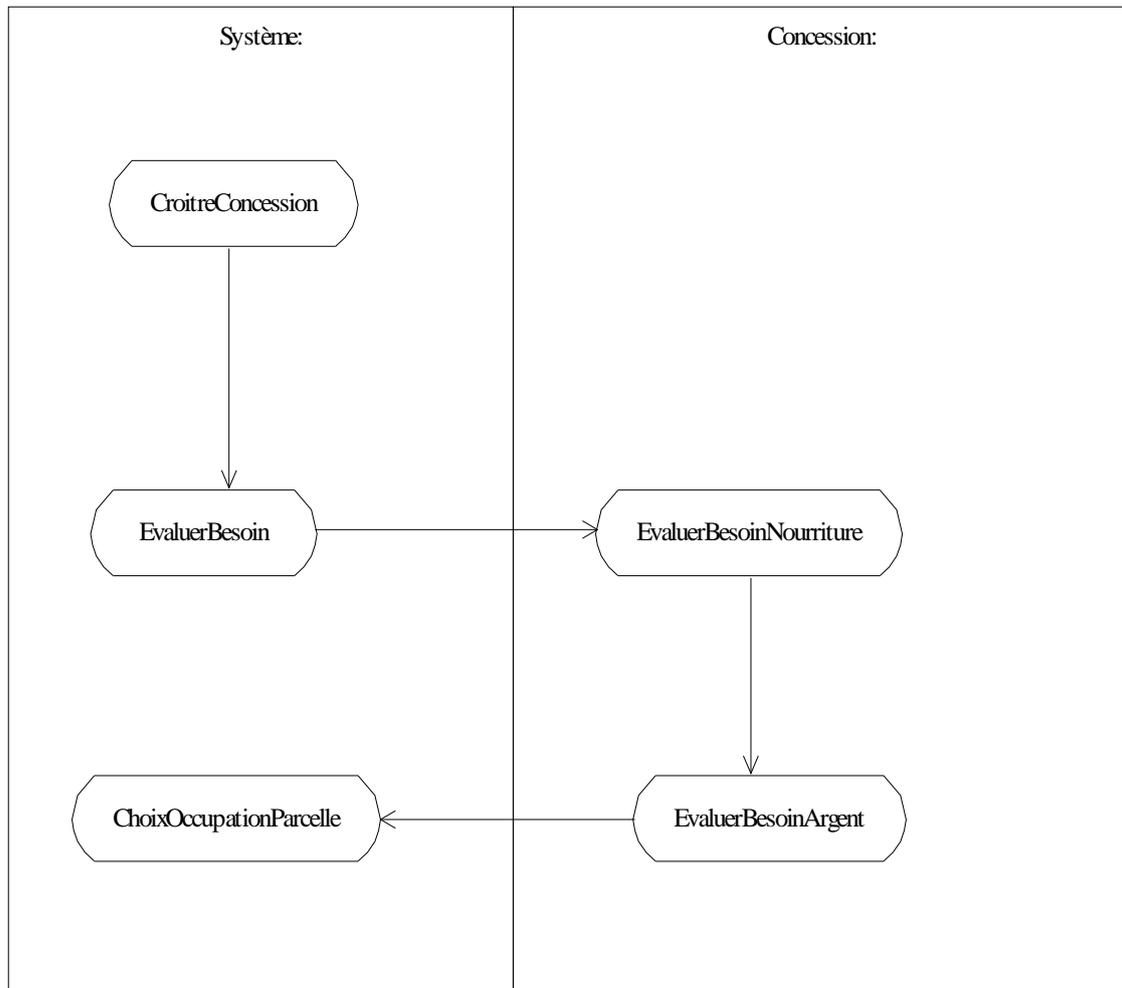


Figure 17 : Evaluation des besoins d'une concession

Choix d'occupation des parcelles (figure 18)

Une fois ses besoins évalués, la concession procède à l'occupation des parcelles en fonction des ses besoins.

Ainsi, la concession cherche d'abord à satisfaire son besoin en nourriture en occupant les parcelles avec les cultures vivrières. Lorsque le besoin en nourriture est satisfait, elle cherche à satisfaire son besoin en argent en cultivant des cultures de rente.

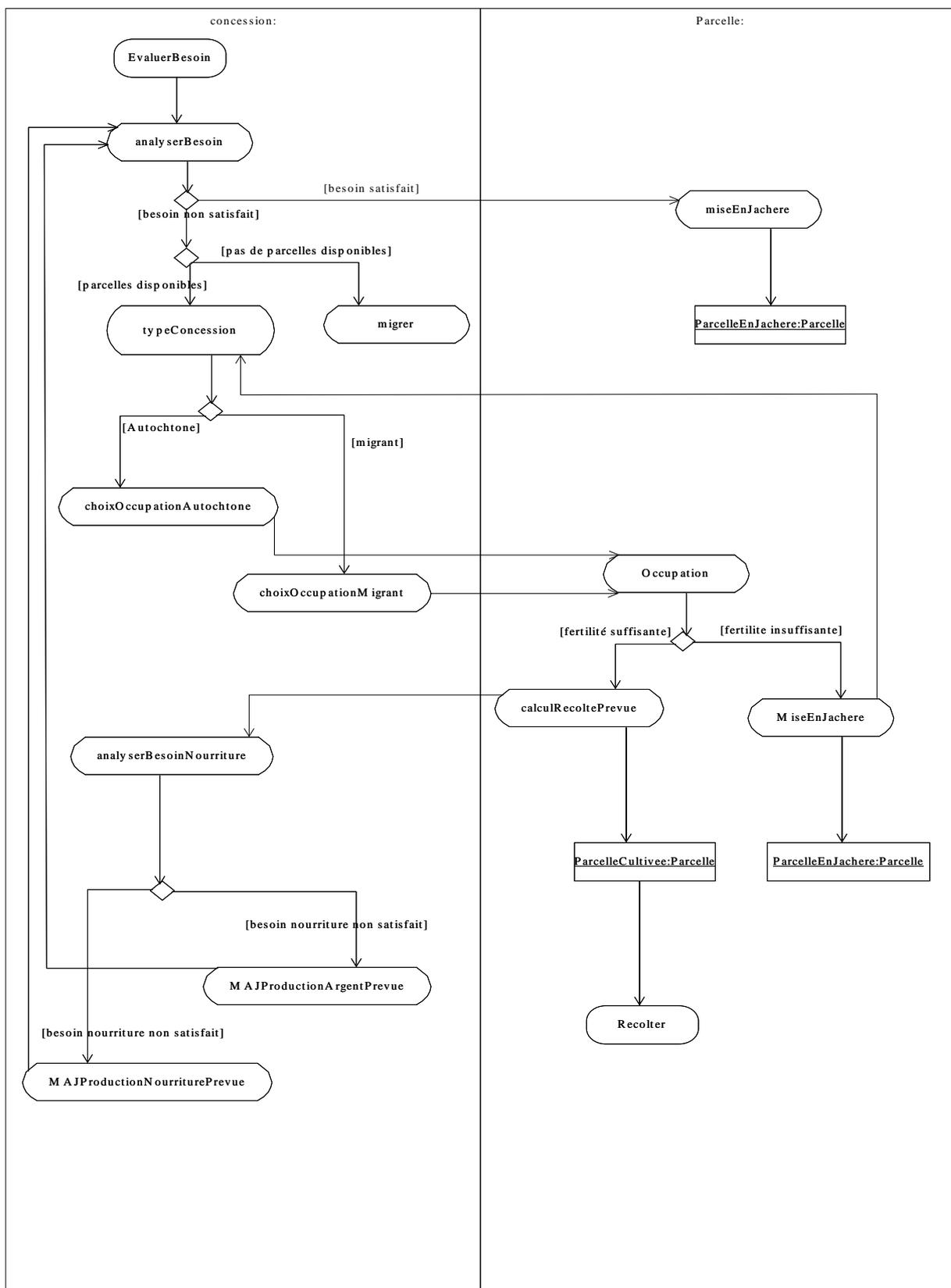


Figure 18 : Choix d'occupation des parcelles

La récolte (figure 19)

A la fin de la saison, les concessions procèdent à la récolte. La récolte effectuée est ainsi stockée. Au stockage, lorsqu'il s'agit d'une nouvelle culture, un nouveau stock est ainsi créé. Si la culture correspondante est une culture vivrière, on met à jour le stock de nourriture.

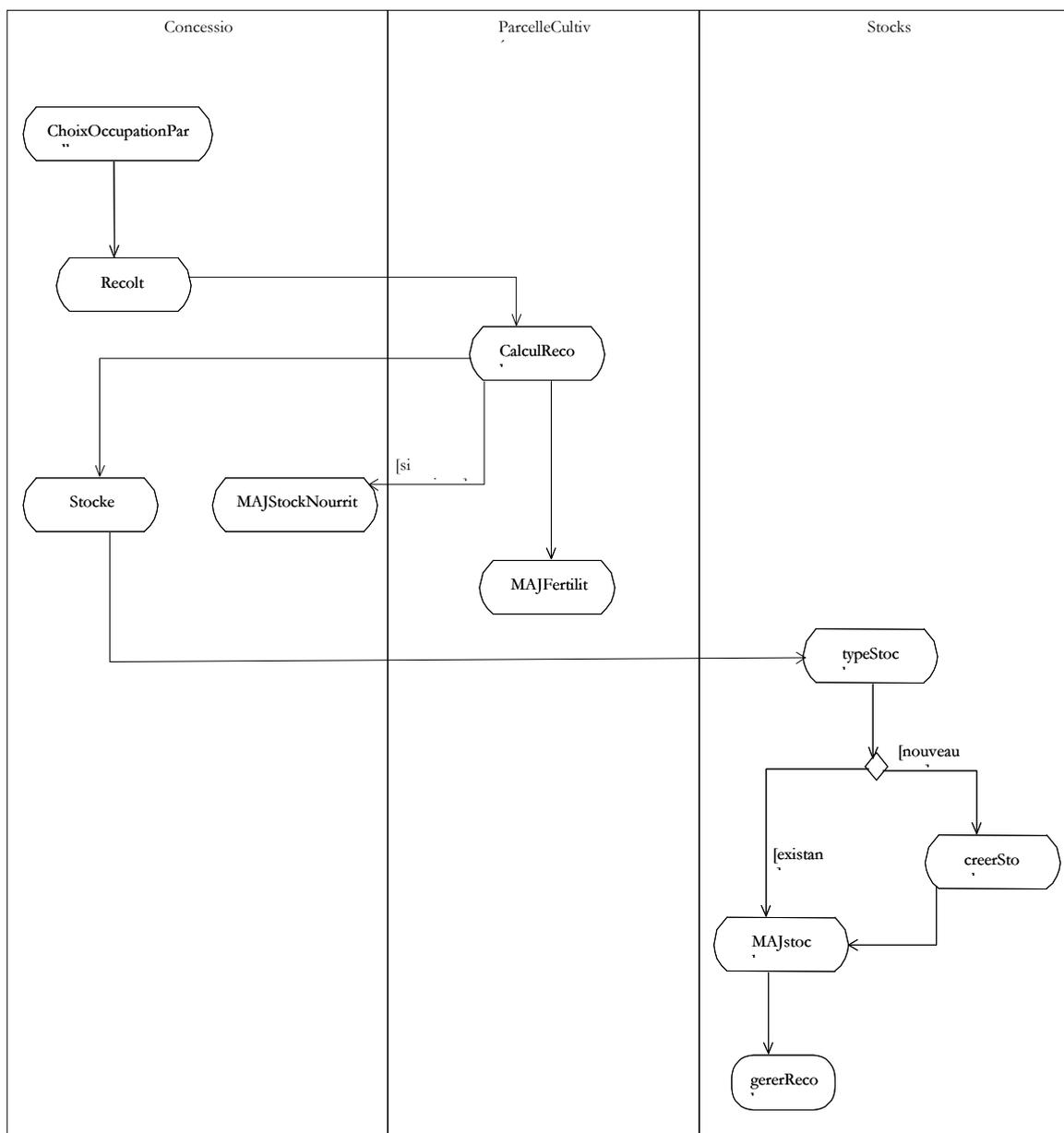
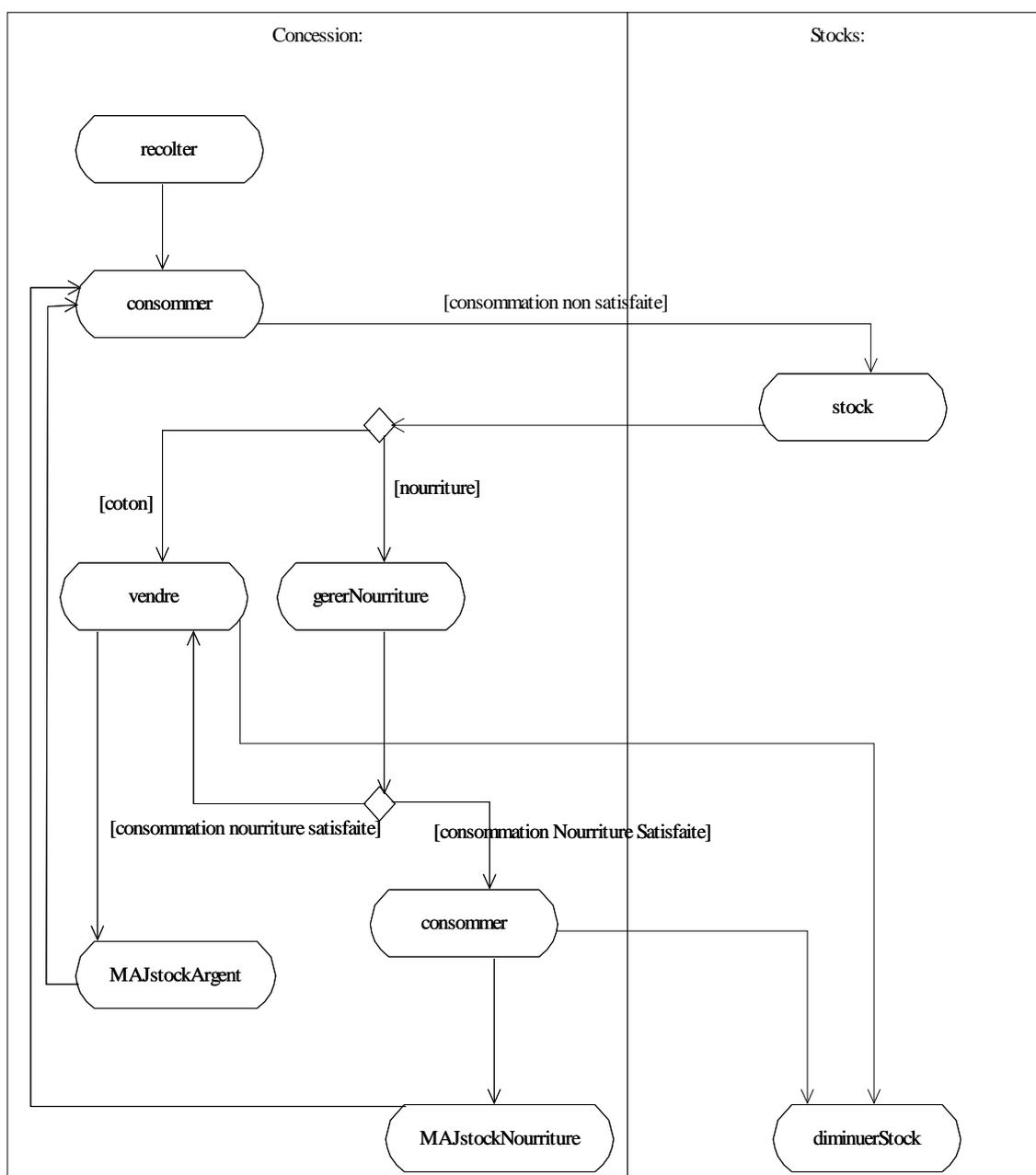


Figure 19 : récolte

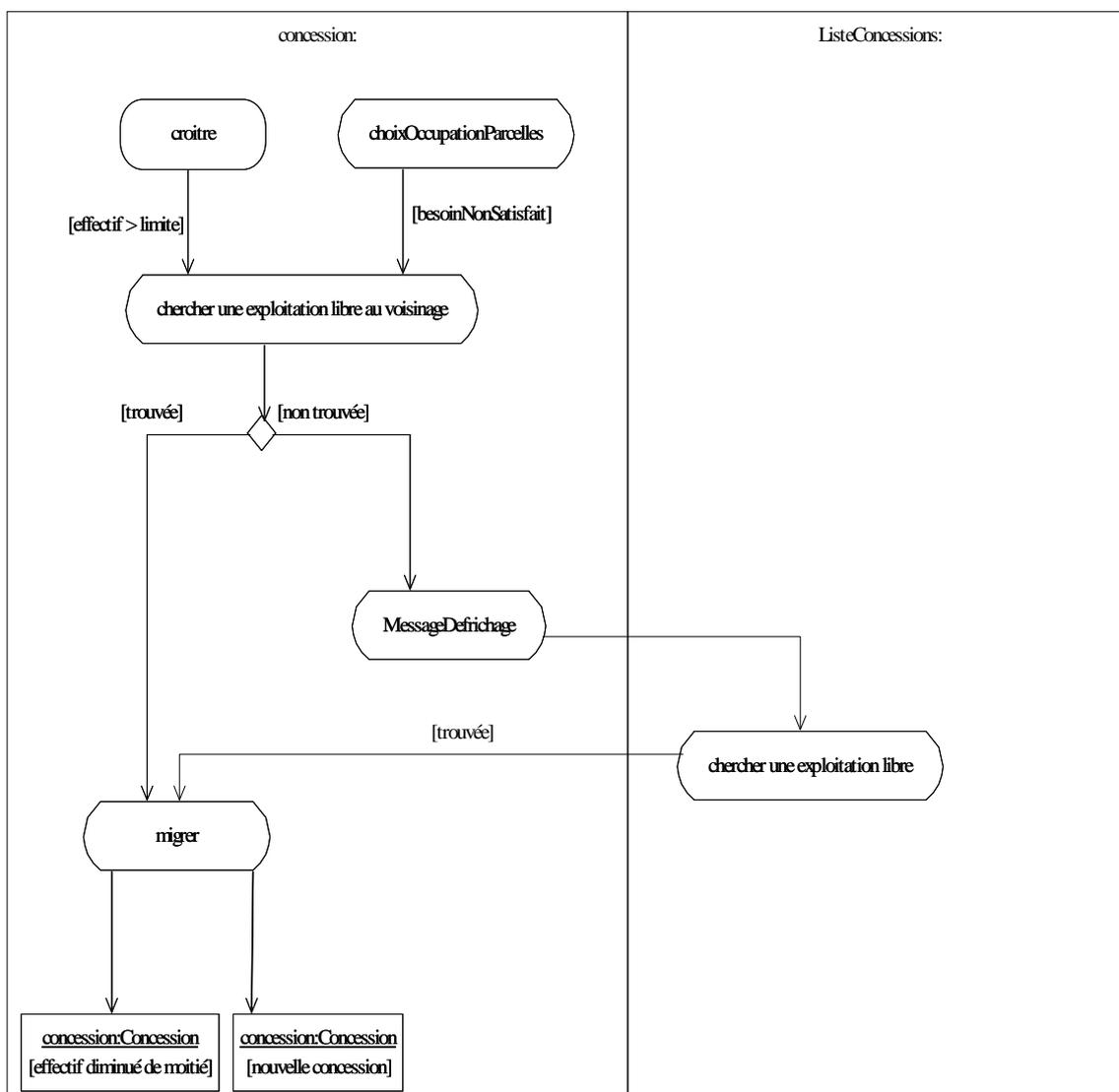
La gestion des récoltes (figure 20)

Il s'agit ici de la gestion des récoltes. Pour les cultures vivrières une partie des stocks est consommée pour satisfaire les besoins alimentaires ou vendue pour satisfaire les besoins monétaires. Mais lorsqu'il s'agit d'une culture de rente (coton par exemple), tout le stock est vendu pour satisfaire les besoins en argent.

*Figure 20 : gestion des récoltes*

La migration

La concession cherche au voisinage de son domaine des parcelles libres. Si elle trouve un domaine libre alors elle migre sur ce dernier, sinon elle envoie un message aux autres concessions. Lorsqu'une concession trouve des parcelles libres à son voisinage, cette dernière envoie un message à la concession demandant. Une partie de la concession s'installe alors sur le domaine ainsi trouvé.

*Figure 21 : La migration*

5 STRUCTURE ORGANISATIONNELLE

La méthodologie proposée s'appuie sur la modélisation informatique des Systèmes Multi-Agents (SMA). Ces modèles représentent les actions individuelles, les interactions entre les acteurs qui peuvent être autonomes et les conséquences de ces interactions sur la dynamique du système (Teles citant Barreteau, 98). Guerrin et al (1998) distinguent deux types d'entités (Manlay et al, 1998).

- **Les agents** qui sont des entités réelles ou virtuelles, dont les comportements sont autonomes, évoluant dans un environnement, capables de le percevoir, d'y agir dessus et d'inter agir avec les autres agents (Boissier citant Demazeau, 96). Ce sont ici, les cultivateurs et les troupeaux.
- **Les objets situés**, qui ne possèdent pas d'autonomie de décision mais qui peuvent statiquement contraindre d'autres entités.

L'environnement sur lequel les agents évoluent est ici le terroir. Selon ces différentes définitions, la figure ci-après (figure 22) donne une représentation du paysage agricole à simuler.

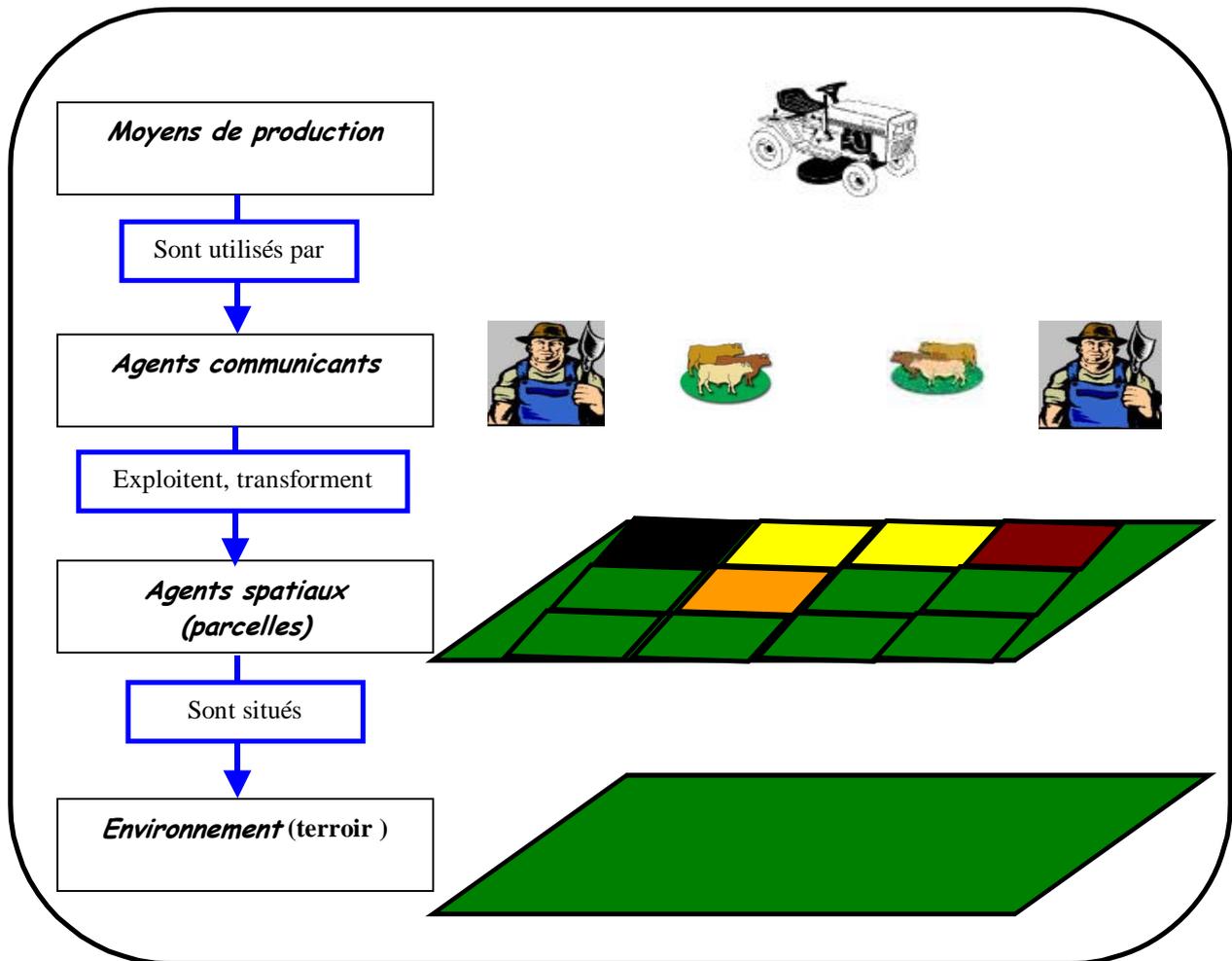


Figure 22 : la structure du paysage agricole

5.1 LA STRUCTURE SPATIALE DES AGENTS

Pour une meilleure représentation de l'environnement de simulation, trois (3) niveaux ont été définis pour la représentation des agents spatiaux (figure 23) :

- ❑ Au premier niveau, nous avons les *parcelles* (cellules)
- ❑ Au deuxième niveau, les *domaines* qui sont des agrégations des objets du premier niveau.
- ❑ Au troisième niveau, le *terroir* qui est un ensemble des objets de premier niveau (forêt, champs...) et des objets de deuxième niveau (les concessions).

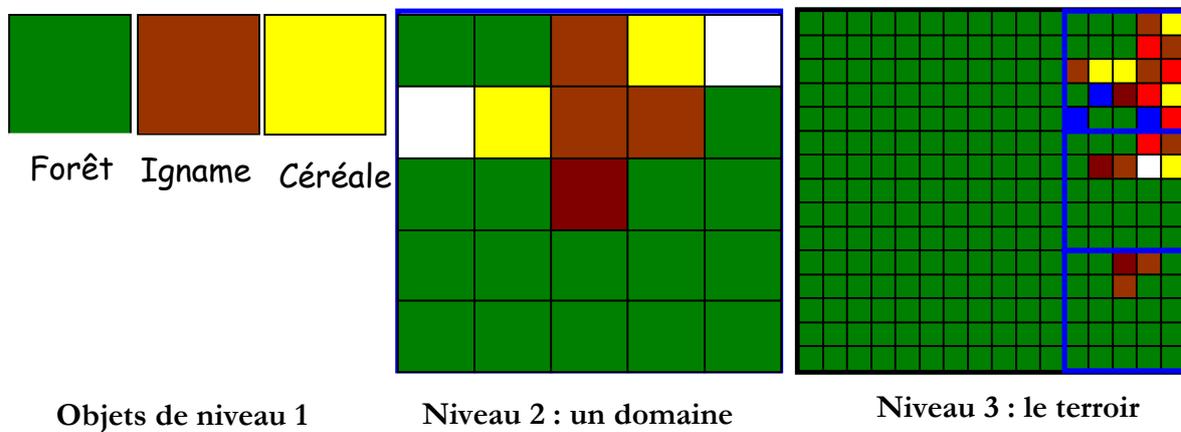


Figure 23 : la structure spatiale de l'environnement

CORMAS permet la représentation spatiale des entités. Ainsi des classes ont été définies en **CORMAS** pour la représentation des entités spatiales. La figure ci-dessous (figure 24) présente le schéma d'héritage des entités spatiales de **CORMAS** avec notre modèle :

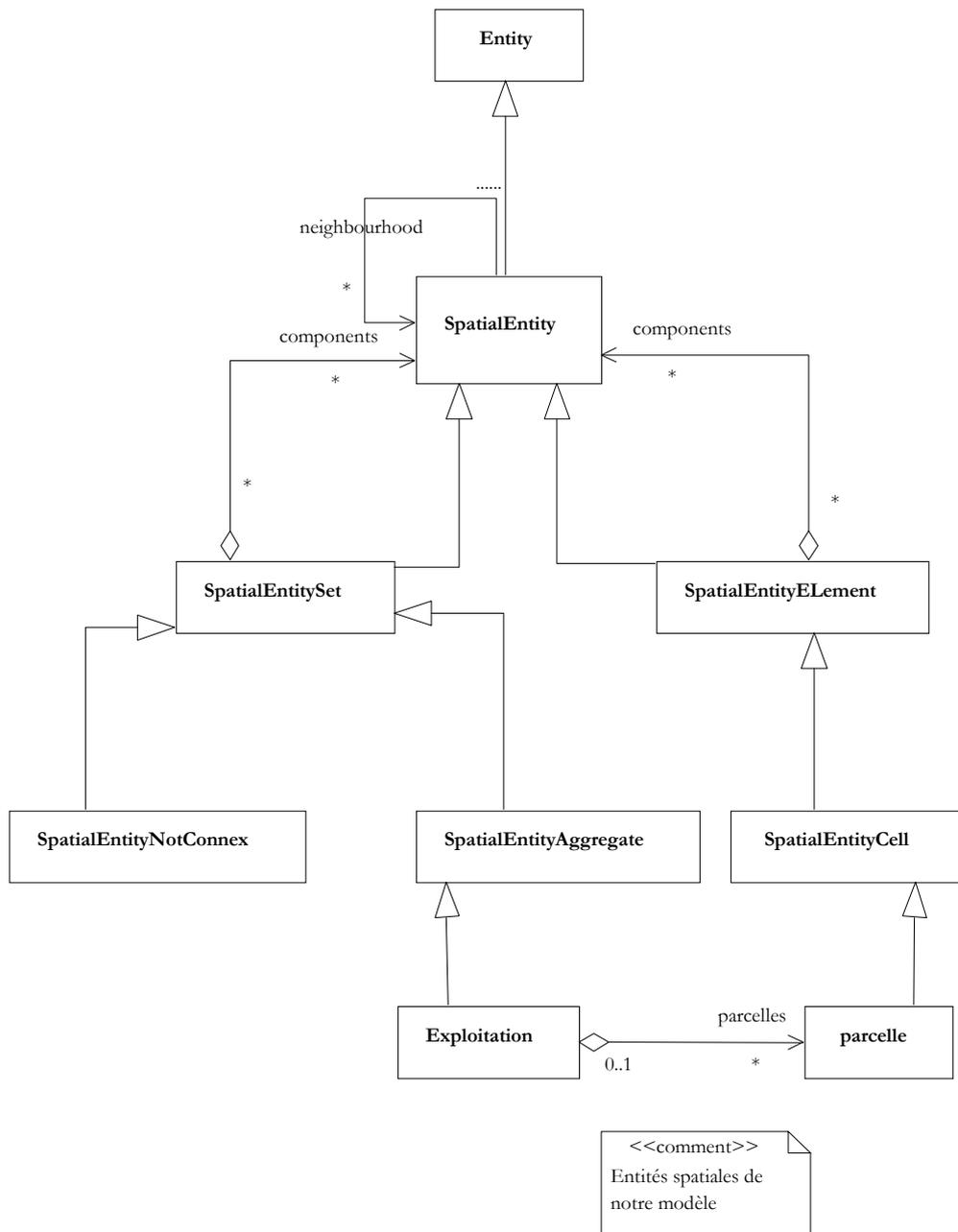


Figure 24 : le schéma d'héritage des entités spatiales

Le troisième niveau (*Terroir*) de notre modèle correspond à la grille de cellules de *CORMAS*. La grille de cellules est l'espace d'interaction entre les agents du modèle.

Cette représentation spatiale des entités permet une gestion aisée de l'espace de simulation pour le programmeur. Ainsi, certaines entités spatiales peuvent être regroupées pour former d'autres

entités spatiales (les agrégats). On peut regrouper des entités *Parcelle* pour obtenir une entité *Domaine*. Cette dernière entité délimite un espace donné qui correspond au champ d'action d'une concession.

5.2 LES AGENTS ACTIFS ET PASSIFS

Nous distinguons deux types de concessions dans le modèle ; celles occupées par les autochtones et celles occupées par les migrants qui diffèrent par les techniques agricoles utilisées. Chaque concession possède une collection, fixe ou non, de parcelles traitées comme des entités localisées. Une parcelle peut être non cultivée, cultivée (en plantes annuelles ou pérennes) ou bâtie. Elle est caractérisée par son sol, la densité de sa végétation (herbes, arbustes), et sa fertilité (qui dépend du sol et de l'historique cultural). Chaque concession possède aussi un troupeau d'animaux bovins qui modifie les caractéristiques de la parcelle (biomasse herbacée, fertilité). Ainsi, concession, parcelles, domaine, troupeau correspondent aux objets de base de notre modèle.

Il existe plusieurs types de cultures qui diffèrent par les caractéristiques suivantes : fertilité requise, perte de fertilité liée à la mise en oeuvre, rendement, prix de vente, prix d'achat. L'environnement de simulation est également constitué de plusieurs types de sols (sols profonds, sols peu profonds...) qui ont un impact sur la fertilité d'un sol donc sur la viabilité d'une parcelle.

Ces différents objets que nous venons de décrire ont une importance capitale pour le modèle. Ainsi pour prendre en compte ces différents éléments, nous avons défini d'autres types objets appelés agents passifs en plus des agents spatiaux (*Parcelle, Domaine*) et agents communicants (*Concession*) que nous avons décrit plus haut. Ce sont entre autres :

- ❑ *Occupation* caractérisant un type de culture donné ;
- ❑ *ListeTypesOccupation* gérant la liste des types de culture ;
- ❑ *Sol* caractérisant un type de sol ;
- ❑ *ListeTypesSol* correspondant à la liste des types de sol
- ❑ *TypeConcession* définit les types de concession ;
- ❑ *ListeTypesConcession* caractérisant la liste des types de concession ;
- ❑ *Scénario* permettant de définir les scénarios à simuler.

Aussi, pour des raisons d'ergonomie et de convivialité du modèle, la classe *EcranScenario* a été définie pour servir d'interface d'utilisation comportant un panneau de contrôle des différents paramètres de la simulation permettant à l'utilisateur de tester différents scénarios de simulation.

5.3 LE SCHEMA DES AGENTS DU MODELE

Ces différents objets décrits nous permettent de construire le diagramme de classes de notre modèle (*figure n°25*).

Le diagramme de classes décrit les relations qui existent entre les différentes entités du modèle (*voir annexe 2*)

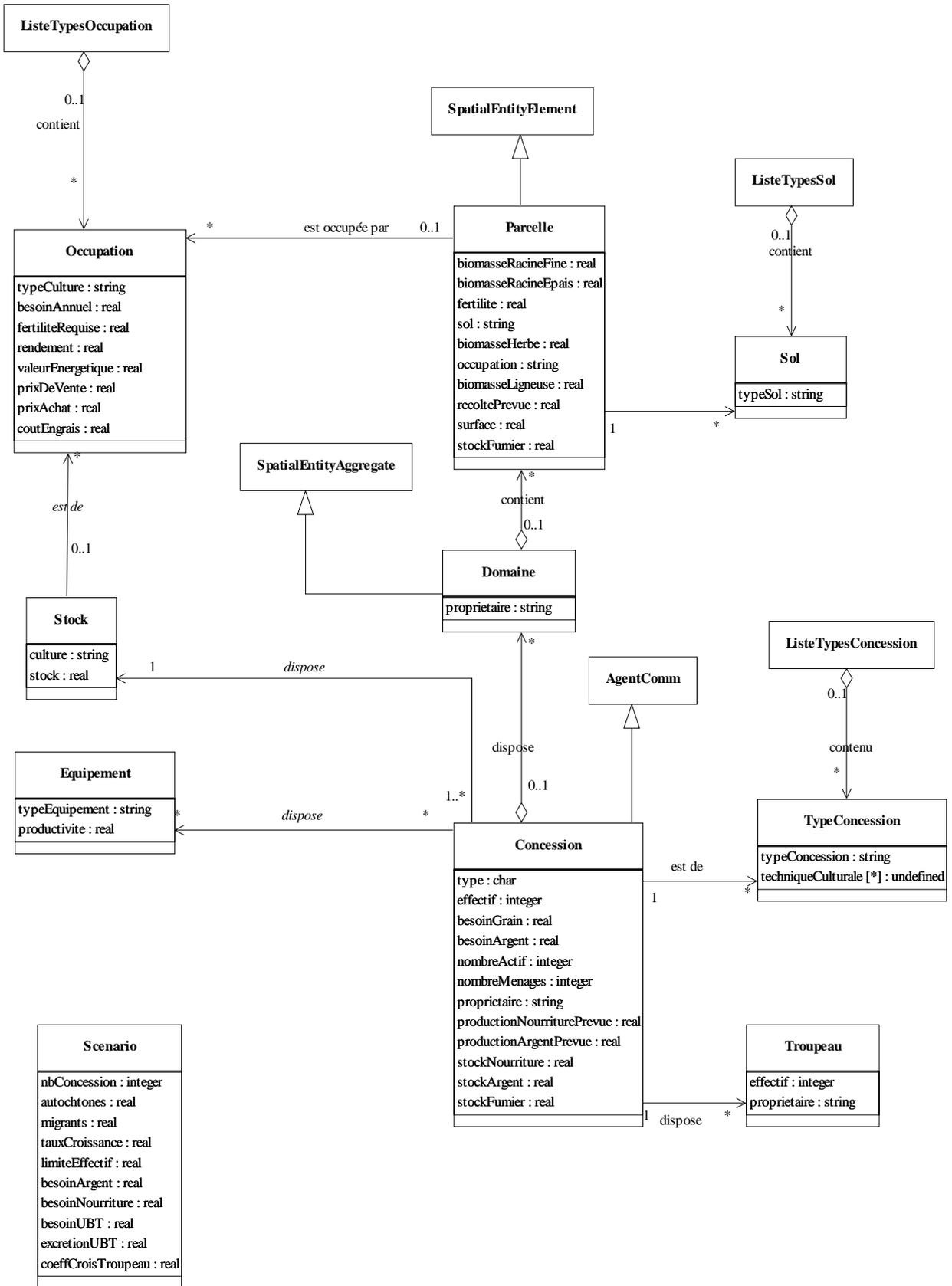


Figure 25 : Diagramme de classes

DESCRIPTION DES CLASSES

Parcelle

Attributs	Description	Type	Objectif
occupation	Définit si la parcelle est cultivée (annuelle ou pérenne), en jachère ou une forêt ou un bâti	chaîne de caractères	
proprietaire	Le propriétaire de la parcelle	chaîne de caractères	
fertilite	Le niveau de fertilité de la parcelle	réel	
sol	Le type de sol (profond ou peu profond)	chaîne de caractères	
biomasseLigneuse	Biomasse ligneuse	réel	
biomasseHerbe	Biomasse herbacée	réel	
biomasseLitière	La biomasse litière	réel	
biomasseRacineFine	La biomasse racine fine	réel	
biomasseRacineEpaisse	La biomasse racine épaisse	réel	
cSol	Stock de carbone du sol		
surface	La surface de la parcelle	réel	
recoltePrevue	La récolte prévue dans des conditions normales	réel	
stockFumier	La fumure apportée sur la parcelle	réel	

Tableau 2 : tableau descriptif de la classe Parcelle*Domaine*

La classe **Domaine** correspond à l'ensemble des parcelles d'une concession. il est une agrégation de la classe **Parcelle**.

Attributs	Description	Type	Objectif
proprietaire	Le propriétaire des parcelles	chaîne de caractères	

Tableau 3 : Tableau descriptif de la classe Domaine

Concession

Définit l'ensemble des individus occupant une habitation.

Attributs	Description	Type	Objectif
exploitant	Le propriétaire du domaine	chaîne de caractères	Croître, cultiver, défricher, vendre, migrer, élever troupeau
type	Définit le type de la concession (migrant, autochtone)	chaîne de caractères	
effectif	Le nombre de personnes dans la concession	entier	
nombreActifs	Le nombre d'actifs dans la concession	entier	
besoinNourriture	Le besoin en nourriture	réel	
besoinArgent	Le besoin en argent de la concession	monétaire	
productionNourriturePrevue	La production de nourriture prévue pour l'année	réel	
productionArgentPrevue	La production d'argent prévue dans l'année	réel	
stockNourriture	La quantité de nourriture stockée	réel	
stockArgent	L'argent disponible	réel	
stockFumier	La fumure de la concession	réel	
stocks	Les stocks des récoltes (coton, igname, céréale...)	Une liste de stock	

Tableau 4 : Tableau descriptif de la classe Concession

Stock

Décrit un stock donné (le type de stock et la quantité stockée).

Attributs	Description	Type	Objectif
culture	Le type de culture stocké	chaîne de caractères	
stock	La quantité stockée	réel	

Tableau 5 : Tableau descriptif de la classe Stock

Troupeau

La classe ***Troupeau*** donne la description des troupeaux.

Attributs	Description	Type	Objectif
proprietaire	Le propriétaire du troupeau	chaîne de caractères	Croître, paître, se déplacer, excréter
effectif	L'effectif du troupeau	entier	

Tableau 6 : Tableau descriptif de la classe Troupeau

Occupation

La classe **Occupation** décrit les types des cultures effectuées dans le terroir.

Attributs	Description	Type	Objectif
typeCulture	Le type de la culture	chaîne de caractères	Faire croître sa biomasse, apporter du carbone, prélever du carbone
fertiliteRequise	La fertilité requise pour sa mise en culture	réel	
recoltePrevue	La quantité de type de culture produite par une parcelle dans des conditions normales	réel	
rendement	Le rendement de la culture par hectare	réel	
valeurEnergetique	La valeur énergétique de la culture	réel	
prixDeVente	Le prix de vente	réel	
prixAchat	Le prix d'achat de la culture	réel	
coutEngrais	Le prix d'achat d'engrais destiné à la culture	réel	

Tableau 7 : Tableau descriptif de la classe Occupation

ListeTypeOccupation

Décrit la liste des types d'occupation.

Attributs	Description	Type	Objectif
listeOccupation	La liste des types d'occupation	Une liste	

Tableau 8 : tableau descriptif de la classe ListeTypeOccupation

TypeConcession

La classe **TypeConcession** définit les types de concessions et les techniques de cultures pratiquées par les concessions de même type.

Attributs	Description	Type	Objectif
typeConcession	Le type de concession	chaîne de caractères	
successionCulturale	La succession culturelle pratiquée par les concessions de même type	Liste de types culture	

Tableau 9 : Tableau descriptif de la classe TypeConcession

ListeTypesConcession

Décrit la liste des types de concession.

Attributs	Description	Type	Objectif
listeConcession	La liste des types de concession (migrant, autochtone)	Une liste	

Tableau 10 : Tableau descriptif de la classe ListeTypesConcession

Sol

La classe ***Sol*** décrit les types de sol.

Attributs	Description	Type	Objectif
typeSol	Le type de sol (peu profond, profond)	chaîne de caractères	

Tableau 11 : Tableau descriptif de la classe sol

Scenario

La classe *Scenario* permet de définir les paramètres d'une simulation donnée.

Attributs	Description	Type	Objectif
nbConcession	Le nombre de concession initial	entier	Permet de spécifier les paramètres d'une simulation
tauxCroissance	Le taux de croissance démographique des concessions	réel	
limiteEffectif	La limite des effectifs des concessions	entier	
autochtones	Le nombre de concession des autochtones	réel	
migrants	Le nombre de concession des migrants	réel	
besoinArgent	Le besoin en argent d'une personne	réel	
besoinNourriture	Le besoin en nourriture d'une personne	réel	
besoinUBT	Le besoin alimentaire d'une unité de bétail	réel	
excretionUBT	L'excrétion d'une unité de bétail	réel	
coeffCroisTroupeau	Le taux de croissance démographique des troupeaux	réel	
pluviositeNormale	La pluviosité normale	réel	
variabilitePluviosite	La variance de pluviosité	réel	

Tableau 12 : Tableau descriptif de la classe Scenario

6 SIMULATION

6.1 LA CONFIGURATION INITIALE DE L'ESPACE

Taille de la grille : La taille de la grille est de 25x25 cellules

La répartition initiale des cellules :

Les cellules sont réparties de deux manières :

- Agrégats de taille régulière (5x5) : les domaines ont les mêmes tailles ;
- Agrégats de taille irrégulière : les domaines n'ont pas les mêmes tailles.

Les figures suivantes représentent les deux (2) types de répartitions des cellules :

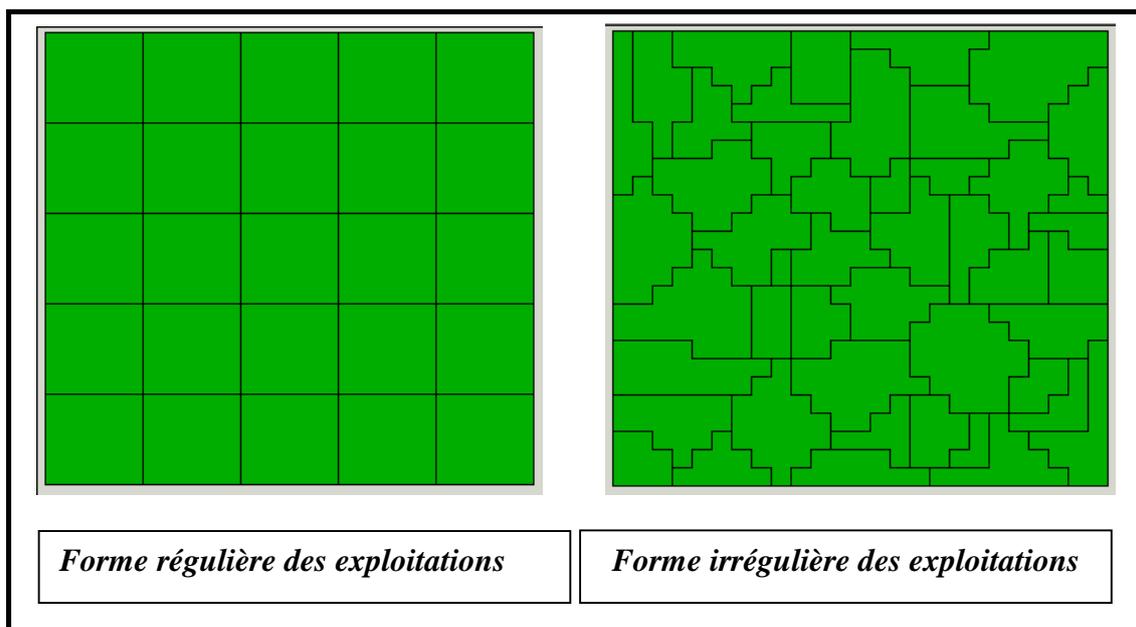


Figure 26 : Les types de répartition des cellules

Initialisation des états de cellules

La végétation initiale est la forêt naturelle sur toute parcelle (cellule) non appropriée. Les états d'occupation des cellules sont indiqués par des couleurs différentes. La couleur blanche et noire indique le type de sol (sol profond et sol peu profond). Sur chaque parcelle bâtie, figure un petit rectangle (blanc pour migrant ou noir pour autochtone) qui correspond à une concession donnée.

De même la végétation initiale est la forêt pour tout domaine non approprié. Les couleurs des domaines indiquent les types de concession (migrant, autochtone, forêt).

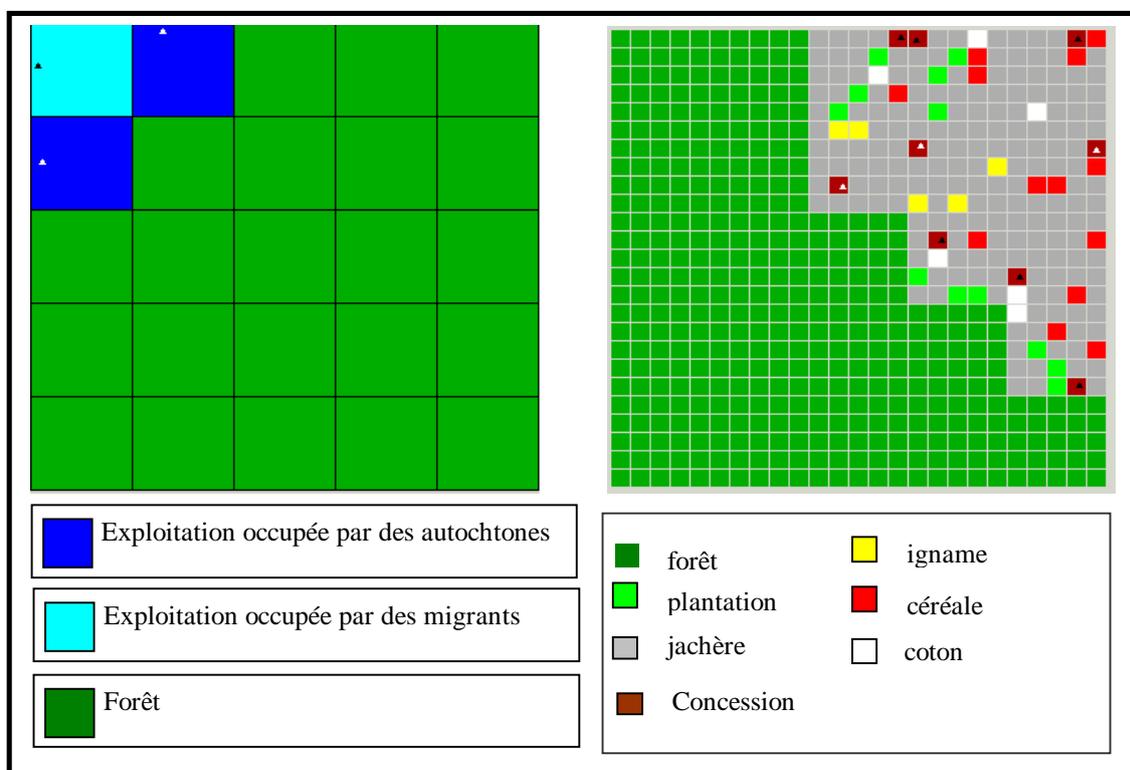


Figure 27 : configuration de l'espace de simulation

6.2 LA DESCRIPTION DES INDICATEURS DE SUIVI

Notre modèle se veut un outil simple de simulation du bilan en carbone d'un terroir virtuel. Il permet à l'utilisateur d'analyser la sensibilité du modèle à différents paramètres (croissance démographique, fertilité du sol, rendement des cultures, événements inattendus ...) en suivant plusieurs variables indicatrices.

Les simulations

Les simulations sont menées sur un pas de temps. Chaque pas de temps correspond à une année civile.

Les paramètres initiaux

Les paramètres initiaux correspondent aux données entrées par l'utilisateur pour analyser la sensibilité du modèle. Ce sont :

- La densité de la population ;
- La répartition entre autochtones et migrants ;
- Les types de cultures ;
- Les successions culturales ;
- La pluviosité normale ;
- Le prix des intrants ;
- L'effectif initial du troupeau ;
- La densité spatiale maximale d'animaux que l'on peut maintenir sur le terroir ;
- Le besoin alimentaire et monétaire par habitant.

Le suivi des résultats

Les résultats correspondent aux données en sortie du modèle.

- Les stocks de carbone ;
- Les flux de carbone ;
- Les effectifs animaux ;
- Le niveau de la population ;
- L'effectif des migrants et des autochtones
- L'effectif des parcelles cultivées ;

- L'effectif des parcelles en jachère ;
- La pluviosité ;
- Le stock d'argent ;
- Le stock de nourriture sur le terroir ;
- La biomasse prélevée par les animaux ;
- La fumure apportée par les animaux ;

Ces différentes données sont exportables sous le tableur Excel pour permettre à l'utilisateur d'effectuer des études de sensibilité du modèle, des résumés sous forme de tableau pour insertion dans du texte et archivage.

6.3 LE PARAMETRAGE ET LE SUIVI DE LA SIMULATION

6.3.1 LE PARAMETRAGE

Le paramétrage du modèle s'effectue à travers des interfaces.

Les paramètres généraux

Les paramètres généraux sont saisis à partir de l'écran principal (figure 28). Ainsi l'utilisateur peut entrer les paramètres à analyser à partir de cet écran. En plus de cet écran, l'utilisateur peut recourir à l'interface de paramétrage de **Cormas** pour spécifier le nombre de pas de temps, le fichier de sortie, les méthodes à utiliser etc. (*annexe 2*).

The screenshot shows a software window titled "Menu Général" with several input fields for simulation parameters. The parameters are organized into four main sections:

- Concession:**
 - Nombre: 4
 - Autochtones: 60%
 - Migrants: 40%
 - Effectif initial: 10
 - Limite: 20
 - Taux de croissance: 0,001
- Caractéristiques d'un individu:**
 - Besoin alimentaire: 10 t/an
 - Besoin en argent: 10 t/an
- Parcelles:**
 - Surface: 0
- Pluviosité:**
 - Pluviosité: 1 m/an
 - Variabilité: 0,8 m/an
- Troupeau:**
 - Bésain UBT: 2,5 t/an
 - Excrétion UBT: 2
 - Croissance: 0

At the bottom of the window, there are four buttons: "Culture", "Concession", "Ok", and "Fermer".

Figure 28 : Ecran principal

Définition des types de culture

La définition des types de culture s'effectue à travers l'interface « TypeCulture ». L'utilisateur peut créer un type de culture donné avec toutes les caractéristiques liées à celle-ci (rendement, fertilité requise, prix de vente, prix d'achat etc.) (figure 29).



Figure 29 : Ecran de définition de types d'occupation

Définition des types de concession avec les successions culturelles

Les types de concession et la technique culturale liée à chaque concession sont définis à partir de l'interface suivante :

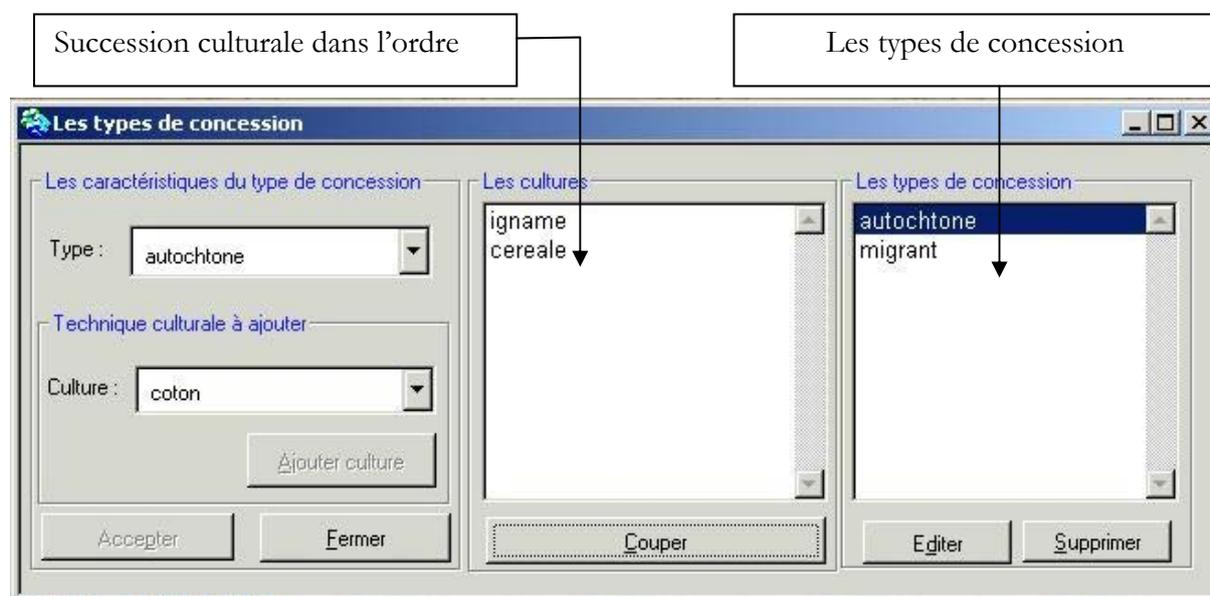


Figure 30 : Ecran de définition des types de concession

Dans la liste à gauche (les cultures), nous avons la succession culturale (dans l'ordre) du type de concession sélectionné dans la liste à droite (Les types de concession).

6.3.2 LE SUIVI DE LA SIMULATION

Le modèle construit permet à l'utilisateur de suivre l'exécution du problème pas à pas. Il a la possibilité de lire les différentes actions du modèle (figure 32) et les données en sortie de la simulation (figure 31).

Il est également possible de suivre la simulation à partir des graphiques (figure 33 et figure 34). La figure 33 représente la croissance de la population générale du terroir avec celle des autochtones et des migrants.

La figure 34 représente les courbes d'occupation des parcelles. Nous constatons que la taille de la forêt diminue au profit des surfaces cultivées.

Les résultats de la simulation

Resultats de la simulation

Fermer

18	131.389	13.0	0.1392	10.1714	45.4728	61526.5	0.0032	55.6442	3343.14	0.8	0.052
19	141.53	14.0	0.1472	10.1815	45.5183	61501.9	0.0032	55.6998	3737.02	0.8	0.056
20	151.682	15.0	0.1536	10.1917	45.5638	75800.6	0.0048	55.7555	6696.89	1.0	0.059
21	161.844	16.0	0.16	10.2019	45.6093	61947.3	0.008	55.8113	4524.76	0.8	0.062
22	172.015	17.0	0.1696	10.2121	45.8899	61467.1	0.0096	56.102	4918.62	0.8	0.065
23	182.197	18.0	0.1808	10.2223	46.0533	61434.8	0.0112	56.2757	5286.61	0.8	0.068
24	192.39	19.0	0.1888	10.2325	46.1582	61400.5	0.016	56.3908	5667.49	0.8	0.072
25	202.592	20.0	0.1968	10.2428	46.2339	61363.2	0.0192	56.4766	6054.81	0.8	0.075
26	212.805	21.0	0.2048	10.253	46.2948	61324.4	0.024	56.5479	6445.36	0.8	0.078
27	233.037	23.0	0.216	10.2633	51.3485	61265.2	0.0272	61.6118	7071.52	0.8	0.086
28	243.28	24.0	0.2288	10.2735	51.4036	61217.9	0.0304	61.6771	7463.93	0.8	0.089
29	263.544	26.0	0.2416	10.2838	56.4568	61149.2	0.0336	66.7406	8090.74	0.8	0.097
30	273.817	27.0	0.256	10.2941	56.5142	61091.7	0.0368	66.8083	8483.19	0.8	0.100
31	304.121	30.0	0.2736	10.3044	61.5712	60999.4	0.04	71.8755	9109.74	0.8	0.107
32	314.435	31.0	0.2896	10.3147	61.6333	60925.1	0.0432	71.948	9901.78	0.8	0.115
33	344.78	34.0	0.3088	10.325	66.6952	60817.2	0.0448	77.0202	10527.8	0.8	0.121

Figure 31 : : Ecran de suivi des résultats

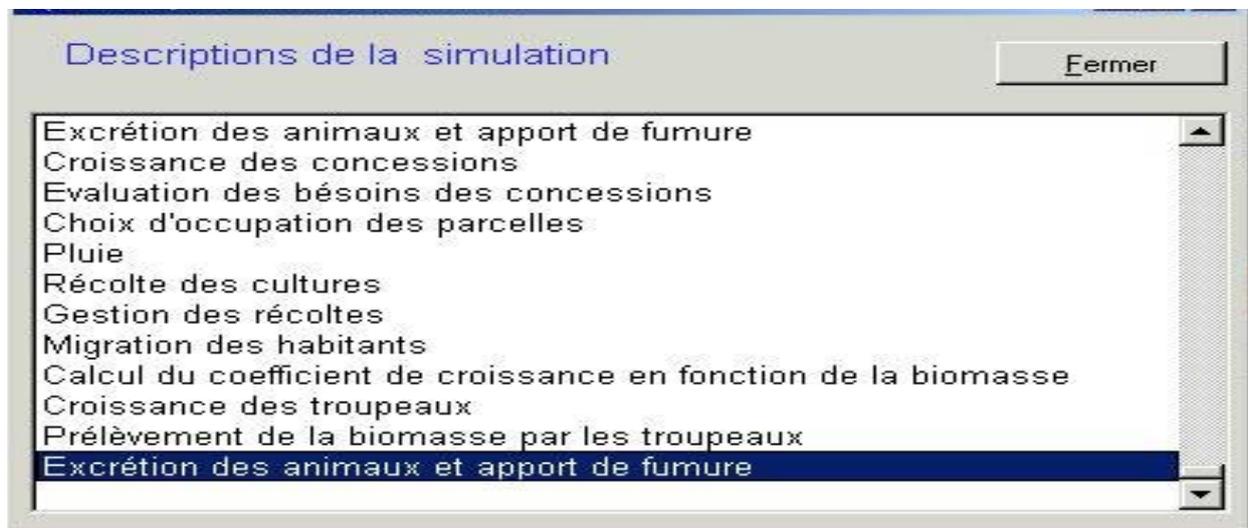


Figure 32 : Ecran de suivi des simulations

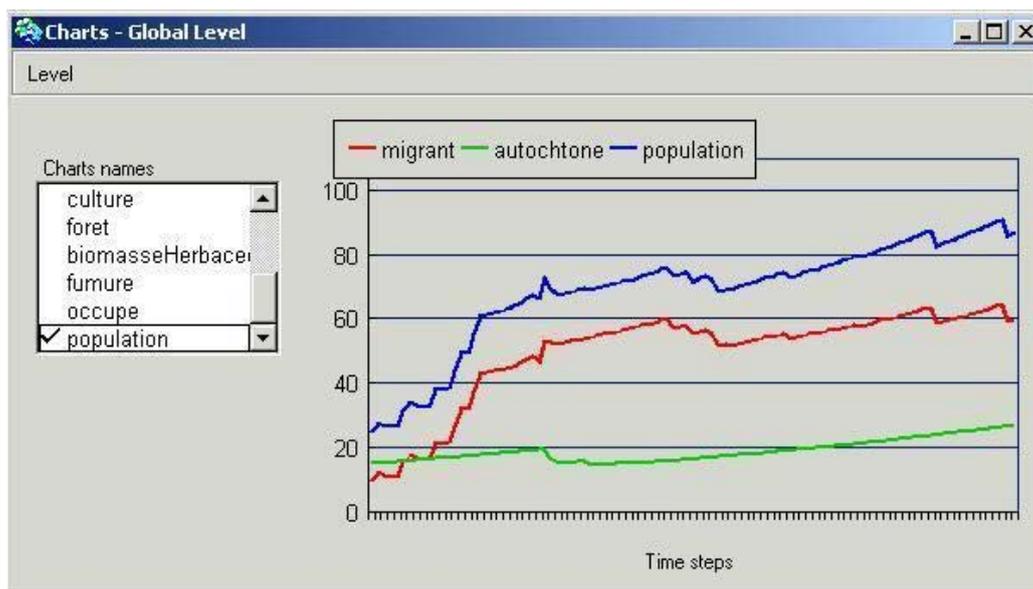


Figure 33 : courbes de croissance de la population

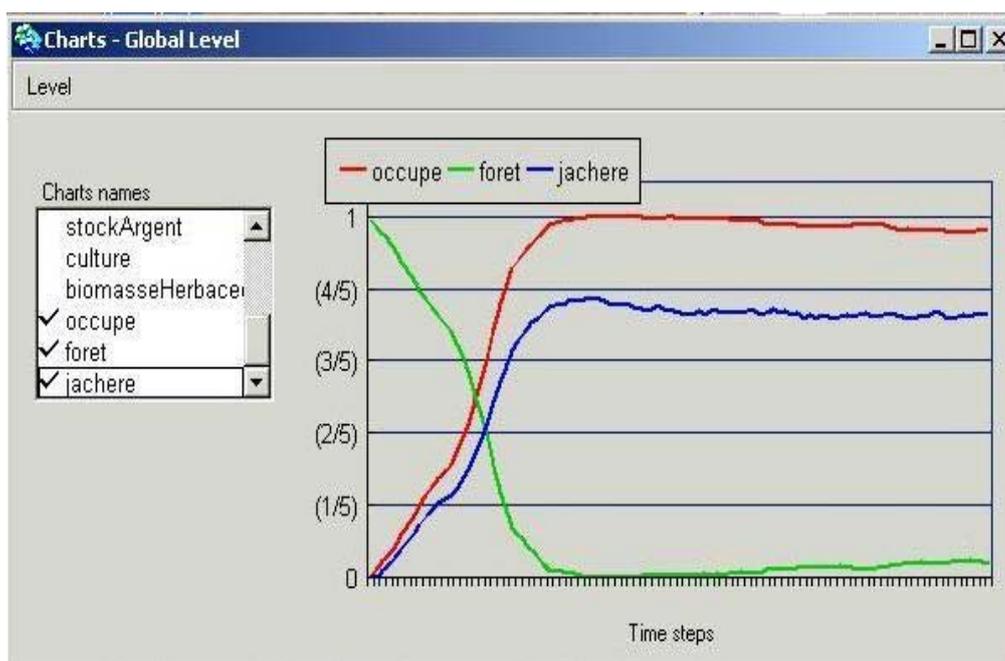


Figure 34 : courbes d'évolution de l'occupation des parcelles

Cette partie du document fut consacrée à la présentation de l'environnement de travail. Il faut noter qu'il manque une analyse des résultats produits validation. Le modèle **MIROT** pour la simulation de la dynamique du carbone à l'échelle du terroir se veut un outil d'investigation et de recherche d'où les difficultés de validation du modèle.

7 BILAN GENERAL

7.1 CONDITIONS GENERALES DU TRAVAIL

Le projet *MIROT* fait l'objet d'une thèse de mon maître de stage actuellement en cours. Tous les paramètres les plus pertinents qui peuvent influencer le fonctionnement du modèle n'étant pas encore identifiés sur le terrain, la compréhension du système est incomplète et le modèle présenté ici est un prototype.

La simulation multi-agents est un concept de modélisation particulièrement adapté à l'étude de la dynamique des interactions entre ressources et sociétés prenant en compte la dimension spatio-temporelle (Bousquet, 2001). Le modèle étudié ne s'inscrit pas forcément dans un domaine informatique donc dans le domaine de connaissance de l'informaticien. Cela nécessite une large contribution de l'utilisateur dans la conception du modèle pour aboutir à une solution adéquate. C'est le cas du modèle *MIROT* qui s'inscrit dans le domaine agro-écologique.

L'arbre ne doit pas cacher la forêt, même si nous avons connu des difficultés pendant ce stage, il faut aussi noter que beaucoup de facilités nous ont été offertes. A savoir le voyage effectué sur Dakar auprès de Pr. Christophe CAMBIER, Maître de Conférence à l'Université Paris 6. En plus les moyens matériels et financiers ont été mis en place pour mener à bien ce stage.

7.2 PERSPECTIVES

7.2.1 LES PERSPECTIVES A COURT TERME

Actuellement, le système simule précisément la dynamique du carbone dans le système sol-plante. L'importance des motivations économiques et du contexte macro-économique dans les décisions de gestion de l'espace des exploitations rendent nécessaire l'introduction d'un module plus détaillé des transactions économiques. Il faudra aussi prendre en compte l'impact de l'équipement agricole de la concession sur la productivité des cultures.

Le comportement spatial des animaux (trajectoire de divagation) n'est pas simulé dans le modèle actuel, ce qui ne permet pas une simulation fine de leur impact sur le bilan en carbone. Il faudra donc introduire dans le modèle un module correspondant.

L'eau conditionne également les activités agricoles (le pâturage, la culture, la migration etc.) de tout terroir, et doit être prise en compte dans le modèle.

L'utilisation des bois pour le chauffage et les feux de brousse ont un impact très important sur la disponibilité de la biomasse, la teneur en carbone dans le sol et donc la productivité des parcelles. Elle doit aussi être modélisée.

Le modèle n'ayant pas été finalisé, nous proposons de revenir terminer le modèle dans le cadre d'un contrat si toute fois l'IRD le trouve nécessaire.

7.2.2 LES PERSPECTIVES A LONG TERME

Pour être un peu plus proche de la réalité, l'interfaçage du modèle **MIROT** avec un système d'information géographique pourrait être pris envisagée. Cela permettra d'exporter des données sur un système d'information géographique (SIG) et de les traiter. Les informations résultantes de ces traitements pourront être transférées vers des systèmes de gestion de bases de données (SGBD) et système d'information géographique (SIG) (celui du projet « Front Pionnier de Migration » par exemple). Le couplage du modèle avec un SIG est possible avec **CORMAS** qui offre des outils pertinents pour cela. Enfin le modèle **Mirot** pour la simulation de la dynamique du carbone à l'échelle du terroir se veut un outil d'investigation, un outil de recherche.

CONCLUSION

Les systèmes multi-agents sont un véritable outil pour simuler et comprendre les systèmes complexes d'interaction entre des processus écologiques et des dynamiques sociales. La modélisation de SMA a pour objectif d'analyser un système complexe et de le représenter par des agents indépendants en interaction. Ainsi, les SMA permettent de simuler des expériences difficiles voire impossibles à mener au laboratoire, d'où la qualification de laboratoires virtuels. La modélisation des SMA s'accompagne d'une série de simulations qui ont pour objectif de comparer le modèle avec le résultat du système étudié.

Malgré son grand intérêt, la modélisation par SMA n'est pas la solution miracle et n'est pas applicable à tous les problèmes de modélisation. Il faut aussi noter qu'il n'existe pas de support informatique générique pour le développement des SMA. On utilise souvent des langages de programmation orientée objet ou des outils de développement dédiés à un type d'application. De même, il n'existe pas de norme méthodologique pour le développement des SMA (Nils FERRAND, 2001).

Sur le plan professionnel, ce stage aura été pour moi une occasion d'initier des contacts avec le monde de la recherche. Ce stage m'a également permis d'approfondir mes connaissances sur la modélisation des systèmes multi-agents, sur l'« approche objet » et d'apprendre l'outil **Cormas** qui est une plate-forme pertinente pour le développement des SMA.

A l'issue de ce stage, nous laissons à l'IRD, un prototype de modèle de simulation de la dynamique du carbone à l'échelle du terroir. Nous espérons qu'à l'avenir, cet outil pourra être utilisé comme un outil d'investigation et de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographiques

- [Aiello, 1997] Antoine Aiello « *Environnement Orienté Objet de Modélisation et de Simulation à Evénements Discrets de Systèmes Complexes* », Thèse de Doctorat, Université de Corse, UFR Sciences et Techniques, 1997.
- [Bousquet, 2001] « *Modélisation d'accompagnement Simulation multi-agent et gestion des ressources naturelles renouvelables* ». Mémoire pour obtention de l'Habilitation à diriger les recherches de l'université de Lyon 1. Soutenue le 22 mars 2001
- [Bousquet et al,] François Bousquet, Christophe Le Page, Jean Pierre Müller, « *Modélisation et simulation multi-agents* »,
- [Ferber, 1995], Jacques Ferber « *Les systèmes multi-agents* », Inter-Editions, 1995
- [FERRAND, 2001] Nils FERRAND « *Modélisation et systèmes multi-agents* », Cemagref LISC
- Lardon Sylvie, Bommel Pierre, INRA-SAD Montpellier, Robert Lifran, INRA-ESR Montpellier : « *La transformation de l'espace par les activités forestières : Formes des objets et évaluation des dynamiques* », 2000
- [Manlay, 1999] Raphaël Manlay, Christophe Cambier, Alexandre Ickowicz, Dominique Masse « *Modélisation de la dynamique du statut d'un terroir ouest-africain par un système multi-agents (Sénégal)* »
- Olivier Boissier Cours SMA-DEA-CCSA « *Système multi-agents* » Université de Savoie - ENSM.SE Année 2001-2002
- [Teles, 1999], Vanessa TELES, « *Construction de réservoirs acquifères alluviaux pour modèle génétique de mise en place des sédiments* », Thèse de doctorat à l'Université de Paris 6, Pierre et Marie Curie.
- Tony Garneau et Sylvain Delisle, Département de mathématiques et d'informatique Université du Québec à Trois-Rivières ; « *Programmation orientée-agent : évaluation comparative d'outils et environnement* »,
- **L'intelligence artificielle distribuée et les systèmes multi-agents**
Exposé par LEMLOUMA Tayeb et BOUDINA Abdelmadjid 14 pages

Adresses de liens web importants

- free.uml.fr : UML, le langage de modélisation unifié
- cormas.cirad.fr
- www.mit.edu/~vteles/
- www.c3.lanl.gov/~rocha/complex/csm.html
- <http://www.ecs.soton.ac.uk/~nrj/abse.html>
- http://www.cert.fr/fr/dprs/activites/genie_log/conceptsObjet/
- http://www.cert.fr/fr/dprs/activites/genie_log/conceptsObjet/
Introduction au monde des objets : les concepts
- www.fao.org/docrep/W4442F/w4442f17.htm
- www.credit-suisse.ch/fr/ourworld/publikation/orientierung/media/pdf/108/pdf_pub_108_c.pdf
ATLAS DE L'ÉCOLOGIE, Dieter Heinrich et Manfrer Hergt
- <http://www.cnam.fr/depts/te/dso/lecture/lemoine.htm>
- <http://valvassori.free.fr/text/glossaire/glossaire.php3>
- http://www.lisc.clermont.cemagref.fr/Labo/activite_recherche/projets/Projets_en_cours/MultiAgents/pressma.htm
- <http://www.cybergeographie.presse.fr/modelis/bousquet/bousquet.htm>

F. Bousquet, D. Gautier

Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches « spatiale » et « acteurs »

CIRAD-GREEN : Gestion des ressources Renouvelables,
Environnement INRA-SAD : Systèmes Agraires et Développement

ANNEXES

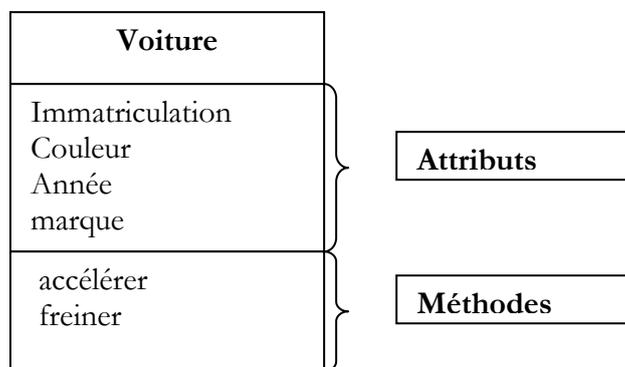
ANNEX-1 : LE CONCEPT D'OBJET

La classe

Une classe est un type de données abstrait, caractérisé par des propriétés (attributs et méthodes) communes à des objets et permettant de créer des objets possédant ces propriétés.

Classe := Attributs + Méthodes + Instanciation

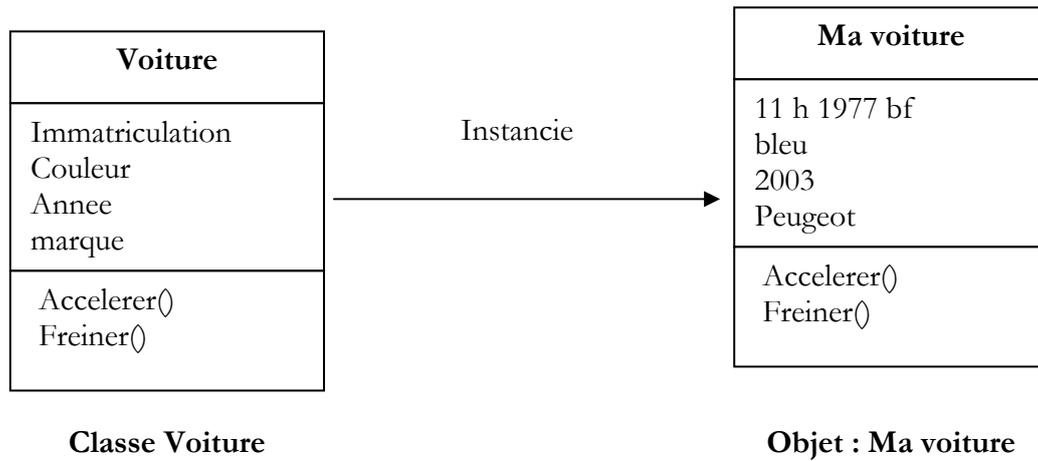
Exemple :

L'objet

- Abstraction du monde réel ;
- Entité possédant une identité et état (information) caractérisé par un ensemble d'attributs ;
- Offrant des services /opération pour examiner/modifier son état (comportement) ;
- Un objet est une instances de classe (une occurrence d'un type abstrait).

Objet := Identité + Etat + Comportement

Exemple :



Ma voiture une instance de la classe Voiture :

état = 11 h 1997 (immatriculation), bleue (couleur), 2003 (année), Peugeot (marque)

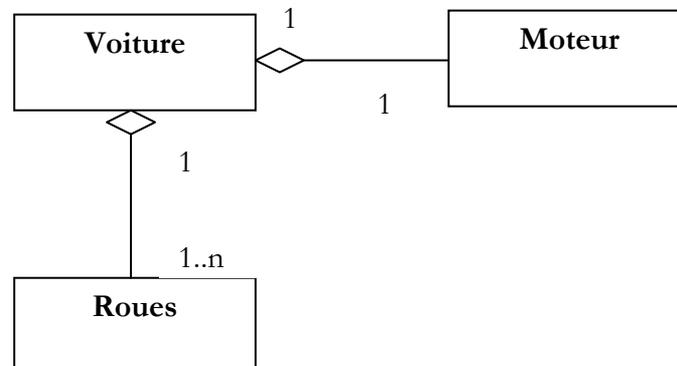
Comportement = accélérer, freiner

Agrégation

Il s'agit d'une relation entre deux classes, spécifiant que les objets d'une classe sont des composants de l'autre classe.

L'agrégation permet d'assembler des objets de base, afin de construire des objets plus complexes.

Exemple :



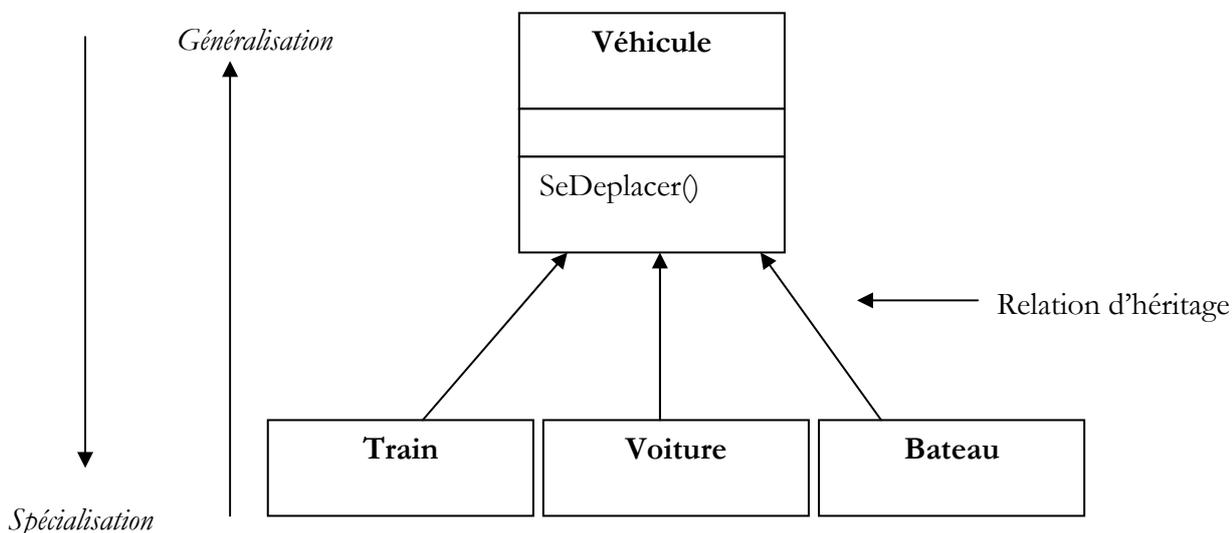
Encapsulation

- Elle consiste à masquer les détails d'implémentation d'un objet, en définissant une interface ;
- L'interface est la vue externe d'un objet, elle définit les services accessibles (offerts) aux utilisateurs de l'objet ;
- Les objets communiquent par envoi de message.

Héritage

- L'héritage est un mécanisme de transmission des propriétés d'une classe (ses et méthodes) vers une sous-classe ;
- Une classe peut être spécialisée en d'autres classes, afin d'y ajouter les caractéristiques spécifiques ou d'en adapter certaines ;
- Plusieurs classes peuvent être généralisées en une classe qui les factorise, afin de regrouper les caractéristiques communes d'un ensemble de classes ;
- Plusieurs classes peuvent être généralisées en une classe qui les factorise, afin de regrouper les caractéristiques communes d'un ensemble de classes.

Exemple :



Le polymorphisme

Le polymorphisme représente la faculté d'une méthode à pouvoir s'appliquer à des objets de classes différentes.

Le polymorphisme augmente la généricité du code.

ANNEX-2 : ECRANS DE PARAMETRAGE DE CORMAS

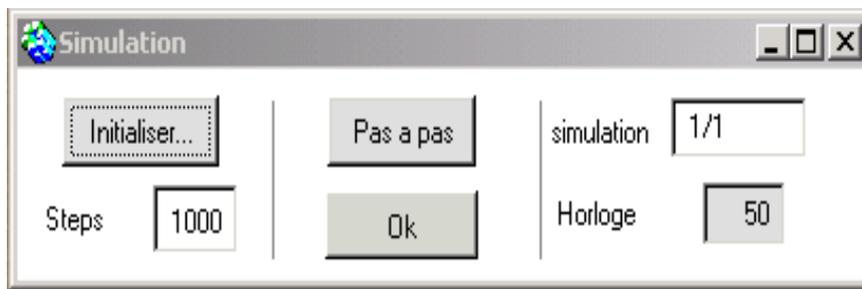


Figure 35 : Ecran de paramétrage et d'initialisation de Cormas

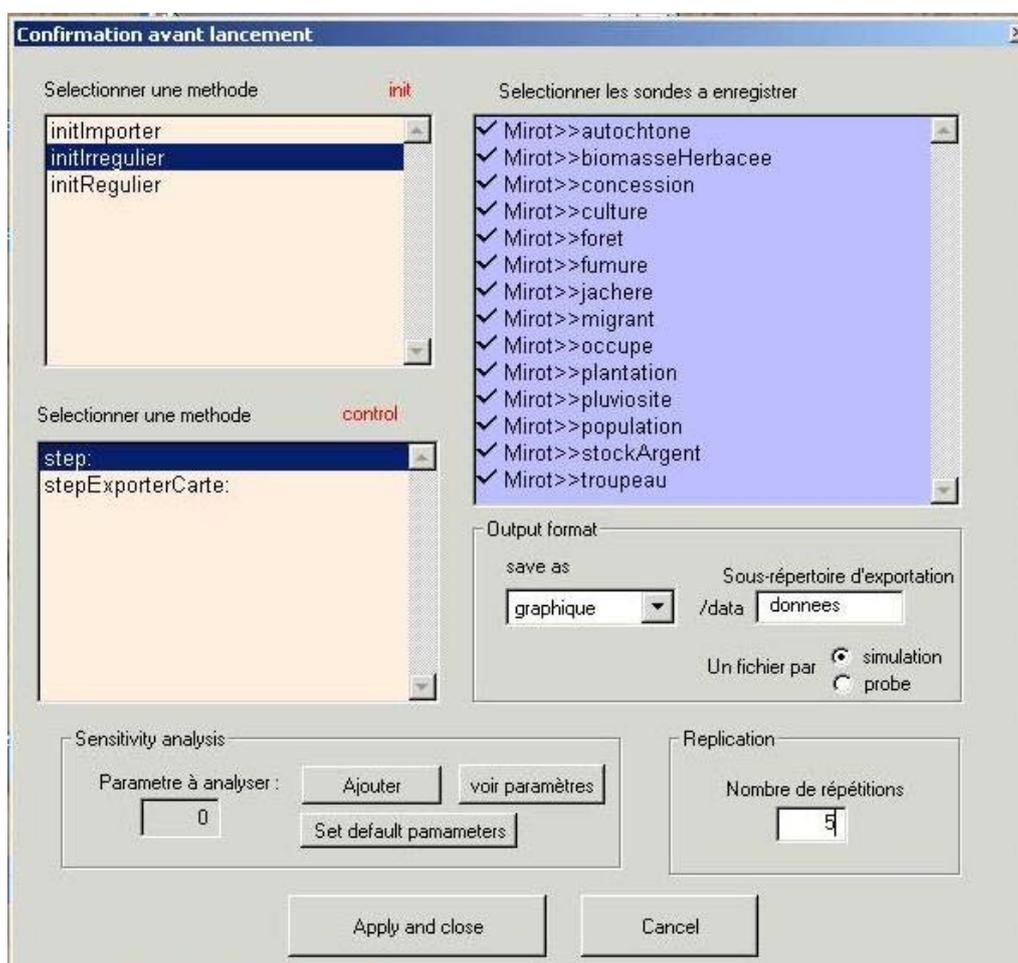


Figure 36 : Ecran de confirmation et de lancement