

Université Cheikh Anta DIOP de Dakar (UCAD)



Ecole Supérieure Polytechnique

Groupe de Formation Doctorale (GFD)



Mémoire de Master 2 Recherche-Systèmes Complexes (SYSCOM)

Option : Informatique

Titre :

Un Système Multi-Agent pour simuler la distribution spatiale des apports de fumure organique par les troupeaux de bovins en terroir villageois agro-pastoral

Présenté par :

Mamadou SANE

Sous la direction de :

Maitre de stage :

Dr Jonathan VAYSSIERES, agro-zootecien modélisateur, CIRAD Umr SELMET, Sénégal

Encadrant DGI, ESP :

Pr Alassane BAH, informaticien, UCAD Umi UMMISCO, Sénégal



Université Cheikh Anta DIOP de Dakar (UCAD)



Ecole Supérieure Polytechnique

Groupe de Formation Doctorale (GFD)



Mémoire de Master 2 Recherche-Systèmes Complexes (SYSCOM)

Option : Informatique

Titre :

Un Système Multi-Agent pour simuler la distribution spatiale des apports de fumure organique par les troupeaux de bovins en terroir villageois agro-pastoral

Présenté par :

Mamadou SANE

Sous la direction de :

Maitre de stage :

Dr Jonathan VAYSSIERES, agro-zootecien modélisateur, CIRAD Umr SELMET, Sénégal

Encadrant DGI, ESP :

Pr Alassane BAH, informaticien, UCAD Umi UMMISCO, Sénégal



Remerciements :

Je rends grâce à DIEU, le tout miséricordieux, pour m'avoir permis de réaliser ce document.

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadreurs à savoir mon maître de stage Jonathan VAYSSIERES, le Professeur Alassane BAH et Myriam GRILLOT pour leur disponibilité et leurs précieux conseils tout au long de ce mémoire.

Mes vifs remerciements sont adressés particulièrement au Directeur du CIRAD et à ses collaborateurs pour leur soutien matériel et moral.

Je remercie vivement mes parents pour leur inconditionnel amour, leur soutien et leurs bénédictions.

J'adresse mes sincères remerciements aux responsables du master SYSCOM et à tous les enseignants qui ont participé à la réussite de ce master.

J'associe, dans mes remerciements, les enseignants de l'unité de formation et de recherche de sciences appliquées et de technologie de l'université Gaston Berger (UGB) de Saint-Louis pour mes premiers pas d'initiation à la formation de la recherche.

Je remercie l'ancienne promotion du master et aussi mes collègues de travail pour leur soutien et conseils utiles.

Les membres de ma famille à savoir mes frères et sœurs, mes cousins et cousines et tous mes amis sont associés dans mes remerciements.

Je dédie ce mémoire à mon papa BOCAR SANE

Un Système Multi-Agent pour simuler la distribution spatiale des apports de fumure organique par les troupeaux de bovins en terroir villageois agro-pastoral

Résumé :

Les ruminants divagants déterminent le fonctionnement et la durabilité des écosystèmes agro et sylvo-pastoraux en Afrique Sub-saharienne. En vue d'étudier les transferts de fertilité orchestrés par les troupeaux dans ces écosystèmes, le travail propose un Système Multi-Agent (SMA) permettant de simuler la distribution spatiale des apports de fumure organique par les troupeaux de bovins en terroir villageois agro-pastoral.

Le modèle issu de cette étude est relativement simple et générique puisqu'il permet d'étudier ces écosystèmes dans divers contextes pédo-climatiques.

L'originalité de ce modèle est basée sur une représentation fine des déplacements et des activités des troupeaux au cours des saisons et à un pas de temps horaire. Le troupeau a été assimilé à un agent réactif et cognitif disposant d'une représentation globale de son environnement.

Pour l'instant le modèle a été testé sur un environnement théorique de type chorème décomposé de 5 unités paysagères : habitats, champs de case, champs éloignés, jachères et parcours. Deux scénarios climatiques correspondant à deux zones agro-écologiques du Sénégal ont été simulés.

A terme, il est prévu d'utiliser ce modèle et divers chorèmes pour tester l'effet de la structure du paysage sur la productivité globale de l'écosystème et de remplacer le chorème par un Système d'Information Géographique (SIG) représentant une situation réelle en vue de valider le modèle sur la base de données observées.

Mots clefs : modélisation multi-agents, terroir villageois agro-pastoral, troupeau de bovins, fumure organique, divagation, Afrique Sub-saharienne

A multi-agent system to simulate the spatial organization of manure inputs by cattle herds in agro-pastoral village landscapes

Abstract:

The free-grazing ruminants determine the functioning and the sustainability of agro and sylvo-pastoral ecosystems in Sub-Saharan Africa. In order to study the nutrient transfers orchestrated by herds in these ecosystems, this work offers a Multi-Agent System (MAS) to simulate the spatial distribution of manure excreta by cattle herds in agro-pastoral villages. This model is relatively simple and enough generic to study these ecosystems under various climatic contexts.

The originality of this model is based on a fine representation of movements and activities of herds over seasons on an hourly time step. The herd is represented as a reactive and cognitive agent having a broad representation of its environment.

For now the model was tested on a theoretical environment, called “choreme”, composed by 5 landscape units: housing, hut fields, bush fields, fallows and rangelands. Two climate scenarios corresponding to two agro-ecological zones of Senegal were simulated.

In the medium term, it is planned i) to use this model to simulate various theoretical environment, i.e. “choremes”, to test the effect of landscape structure on the overall productivity of the ecosystem, and ii) to replace “choremes” by a GIS representing a real environment in order to validate the model on the basis of observed data.

Keywords: Multi-agent modeling, agro-pastoral village, herd of cattle, manure, free-grazing, Sub-Saharan Africa

Table des matières

1. Introduction	9
1.1. Problématique et enjeux	9
1.2. Objectif général	9
1.3. Plan du mémoire	10
2. Matériel et Méthode	10
2.1. Etat de l'art de l'approche multi-agents pour modéliser le comportement spatial des troupeaux en systèmes d'élevage extensifs	10
2.1.1. Introduction	10
2.1.2. Les objectifs de modélisation et de simulation.....	12
2.1.3. Les différentes unités paysagères représentées dans les modèles.....	14
2.1.4. Les types d'agents et leurs capacités utilisés pour représenter les différents acteurs qui interviennent dans chacun des modèles	15
2.1.5. Les différentes règles de déplacements des troupeaux	16
2.1.6. Conclusion	18
2.2. Etude de cas	19
2.2.1. Terroir agro-pastoral : Haute Casamance ou Bassin arachidier	19
2.3. Outils utilisés	20
2.3.1. Formalise UML.....	20
2.3.2. Plateforme de modélisation et de simulation agents GAMA.....	20
3. Modèle de simulation du rôle des troupeaux dans l'organisation spatiale des flux et des stocks de biomasse et matière organique	21
3.1. Modèle conceptuel	21
3.1.1. Architecture générale	21
3.1.2. Composante décisionnelle : comportement spatial et alimentaire du troupeau	23
3.1.3. Composante Biophysique.....	25
4. Résultats des simulations du modèle	27
4.1. Les deux scénarios comparés	27
4.2. La répartition spatiale des restitutions de bouses simulées selon la saison {SP, SS}	28
4.3. Variation saisonnière de la production de fèces totale	29
4.4. Production de biomasse totale à l'échelle du terroir	30

5. Conclusion et perspectives	32
5.1. Conclusion	32
5.2. Perspectives	33
6. Références bibliographiques :	34
7. Annexes	38
Annexe 1 : Principales caractéristiques des travaux de modélisation du comportement spatial des troupeaux de ruminants par l'approche système multi-agents (SMA)	38

1. Introduction

Les animaux d'élevage, plus précisément les ruminants conduits en extensifs, sont des acteurs importants du fonctionnement et de la durabilité des écosystèmes agro-pastoraux et sylvo-pastoraux. Ces animaux consomment une partie de la biomasse produite par les plantes cultivées ou/et la végétation naturelle (graminées, arbustes, arbres) et restituent des déjections (bouses, urines) permettant ainsi d'accroître la fertilité des sols et la productivité des plantes (Baudron *et al.*, 2014). En systèmes extensifs, les animaux sont mobiles et sont libres une bonne partie du temps Ils orchestrent ainsi d'importants transferts de fertilité dans l'espace (Manlay, 2000). Le comportement spatial des animaux est déterminé par son environnement ; un environnement qui évolue au cours des saisons et d'une année à l'autre en fonction, entre autres, du climat et des actions des animaux (consommations, restitutions de biomasses).

La dynamique de ces multiples interactions troupeau-environnement est complexe et nécessite d'être analysée en vue d'améliorer la durabilité des écosystèmes agro-pastoraux et sylvo-pastoraux.

1.1. Problématique et enjeux

Une récente analyse de la FAO souligne une productivité insuffisante des systèmes (agro)pastoraux pour répondre à la demande mondiale et leurs impacts environnementaux négatifs sur les sols et l'atmosphère (Steinfeld *et al.*, 2006). On constate aussi une restructuration de l'espace, dans les terroirs villageois, conditionnée par la pression démographique. Les parcours et les forêts classées ont tendance à disparaître car ils sont progressivement défrichés et mis en culture. Les jachères sont de plus en plus courtes, voire disparaissent. L'espace est donc de plus en plus exploité de façon intensive laissant de moins en moins place aux troupeaux divagants et contraignant de plus en plus leurs déplacements.

Les transferts de fertilité sont donc profondément perturbés remettant significativement en cause le fonctionnement et la durabilité des systèmes agricoles.

1.2. Objectif général

D'un point de vue général, les modèles représentent le comportement spatial et alimentaire des troupeaux de ruminants dans divers systèmes et divers environnements tels que :

- une prairie hétérogène en zone tempérée (Baumont *et al.*, 2002),
- un territoire agro-sylvo-pastoral en zone tropicale sub-humide (Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011; Cambier *et al.*, 2005; Chirat, 2010)
- et un territoire sylvo-pastoral en zone intertropicale sèche (Canal *et al.*, 1998).

Au-delà de la construction de modèles de simulation de la divagation des troupeaux, la majorité des auteurs ont des objectifs spécifiques de modélisation.

L'objectif de ce travail est de créer un modèle de simulation de l'effet du comportement spatial d'animaux sur les transferts de fertilité en terroirs villageois. Il a

une visée générique pour pouvoir étudier ces transferts de fertilité dans divers contextes pédo-climatiques en Afrique Sub-saharienne.

Ce modèle doit ainsi permettre de simuler la distribution spatiale des restitutions de bouses et urines par les animaux selon leurs déplacements quotidiens au sein de territoires agricoles. Il devra tenir compte de diverses organisations spatiales.

1.3. Plan du mémoire

Dans ce document, la première partie portera sur la présentation du matériel et des méthodes utilisés. Dans cette partie nous avons d'abord fait un état de l'art de l'approche multi-agent pour simuler le comportement spatial d'animaux d'élevage. Il s'agira également dans cette partie de décrire la zone étudiée et les outils de modélisation mobilisés. L'étape suivante va consister à la présentation du modèle. La dernière partie met l'accent sur les premiers résultats de simulation.

2. Matériel et Méthode

2.1. Etat de l'art de l'approche multi-agents pour modéliser le comportement spatial des troupeaux en systèmes d'élevage extensifs

2.1.1. Introduction

La modélisation est une voie privilégiée pour étudier les systèmes complexes (Bryant and Snow, 2008; Malézieux *et al.*, 2001). Un modèle est une représentation abstraite de la réalité qui peut servir à comprendre le fonctionnement d'un système étudié (Bousquet *et al.*, 2002; Coquillard *et al.*, 1997). Il existe différentes approches de modélisation qui permettent de décrire le fonctionnement d'écosystèmes incluant des animaux d'élevage tels que la programmation linéaire (Louhichi *et al.*, 2004; Nidumolu *et al.*, 2008), les modèles stochastiques (Pleasant *et al.*, 1997), les modèles stock-flux (Vayssières *et al.*, 2009), les techniques de Markov (Nielsen *et al.*, 2004), l'approche systémique et multi-agent (Bah *et al.*, 2006; Bommel *et al.*, 2010a, 2010b), etc...

L'approche système multi-agents (SMA) nous apparait particulièrement pertinente pour comprendre le rôle des troupeaux dans le fonctionnement d'écosystèmes puisqu'elle permet de représenter un système dans toute sa complexité en incluant la variabilité dans le temps et dans l'espace du comportement d'animaux en interaction avec leur environnement, et l'utilisation que ces animaux font d'une végétation hétérogène et évolutive (Baumont *et al.*, 2002; Coquillard *et al.*, 1997).

Parmi les travaux qui mobilisent l'approche multi-agents pour modéliser le comportement d'animaux, nous en retiendrons dix que nous avons plus particulièrement étudiés pour leur diversité en termes de formalismes, de systèmes étudiés et de contextes pédoclimatiques (Baumont *et al.*, 2002; Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011; Bonnefoy *et al.*, 2001; Cambier *et al.*, 2005; Canal *et al.*, 1998; Chirat, 2010; Dumont and Hill, 2001; Henane *et al.*, 2010; Mechoud *et al.*, 2000). Une description détaillée de chaque travail est disponible en Annexe 1. La totalité de ces références concerne des systèmes anthropisés, agro ou sylvo-pastoraux. Nous pensions également pouvoir identifier quelques avancées méthodologiques du côté

des travaux en systèmes naturels, mais au final la modélisation SMA est encore peu mobilisée pour simuler le comportement spatial des mammifères terrestres sauvages même si elle fait référence concernant la modélisation du comportement des insectes sociaux (Drogoul, 1993).

Cette revue de la littérature a pour objectif de proposer une grille de lecture des différents travaux de modélisation en vue de faciliter la construction future de SMA représentant le fonctionnement d'écosystèmes comportant des animaux d'élevage conduits en extensif.

Les quatre principaux concepts de cette grille (objectif, environnement, agents, règles) sont articulés et représentés de façon imagée en Figure 1. Elle doit permettre d'aider les modélisateurs à mettre en cohérence leurs objectifs de modélisation (première partie de ce chapitre) avec des choix de formalisme concernant :

- i) la représentation de l'environnement dans lequel évoluent les animaux (deuxième partie),
- ii) la distinction faites entre les différents acteurs, ou agents, (troisième partie) et,
- iii) la définition des règles guidant les déplacements des animaux (quatrième partie).

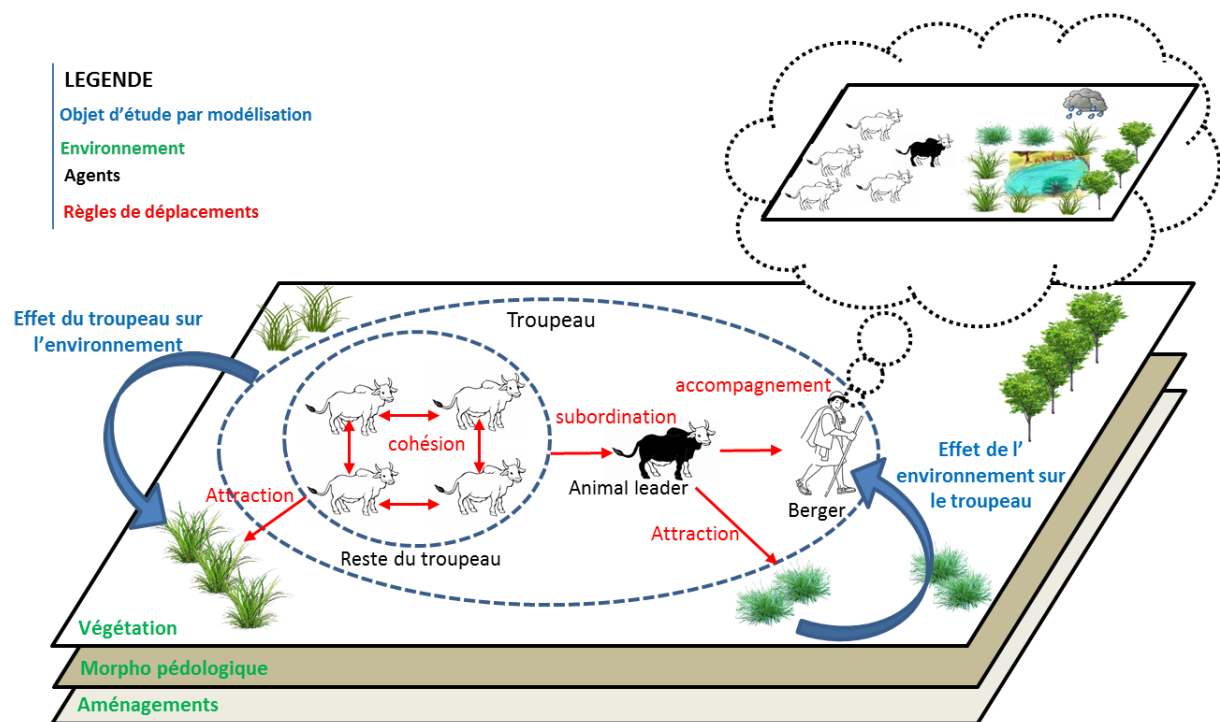


Figure 1. Modèle conceptuel du fonctionnement d'un écosystème agro ou sylvo-pastoral distinguant les objectifs de modélisation (en bleu), les agents composant le troupeau (en noir), son environnement (en vert), et les règles guidant ses déplacements (en rouge) (Sané *et al.*, 2015)

2.1.2. Les objectifs de modélisation et de simulation

Au-delà de la construction de modèles de simulation de la divagation des troupeaux, la majorité des auteurs ont des objectifs spécifiques de modélisation. La plupart des modèles représentent les interactions troupeaux-environnement mais ils s'intéressent plus particulièrement soit :

- i) à l'impact des troupeaux sur leur environnement,
- ii) à l'effet de l'environnement sur les troupeaux
- iii) à une représentation du comportement spatial des troupeaux en vue d'en prédire leur alimentation et leur performances.

Ces trois types d'objectifs sont décrits successivement ci-dessous.

- représenter l'influence du comportement du troupeau sur son environnement (Baumont *et al.*, 2002; Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011; Bonnefoy *et al.*, 2001; Mechoud *et al.*, 2000) :

Les animaux par leurs activités, transforment l'environnement qui leur fournit les ressources dont ils ont besoin. Dans la catégorie des modèles où l'on étudie l'action du comportement du troupeau sur son environnement, différents types d'influences sont plus spécifiquement étudiées. Certains modèles placent alors la représentation et l'étude de la dynamique des ressources renouvelables comme objet central d'étude. Ces modèles simulent par exemple la dynamique des stocks de carbone à l'échelle d'un territoire. Ce type de modèles permettent de montrer la participation des animaux à la fertilité des sols par la redistribution de la matière organique (bouses et urines) dans le paysage (Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011).

D'autres modèles se focalisent sur le processus de pâturage, c'est à dire les relations entre les animaux et les ressources fourragères. Afin de comprendre ce processus et simuler l'impact des différentes modalités de pâturage, Baumont *et al.*, mettent en place un simulateur pour représenter de manière la plus réaliste possible, l'utilisation et l'évolution d'une prairie permanente par un troupeau (Baumont *et al.*, 2002). Mechoud *et al.*, simulent le fonctionnement de l'estive et cherchent à comprendre l'effet de troupeaux sur la régénération de la forêt (Mechoud *et al.*, 2000).

- représenter l'influence de l'environnement sur le comportement du troupeau (Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011; Canal *et al.*, 1998; Chirat, 2010; Dumont and Hill, 2001) :

Certains auteurs ont utilisés les systèmes multi-agents (SMA) pour modéliser le comportement d'animaux d'élevages divagants aux travers des saisons et sous différents régimes climatiques (années sèches à pluvieuses). Il s'agit par exemple de mesurer l'impact du changement climatique sur la dynamique du territoire étudié via une modification du comportement des animaux, et une adaptation des pratiques des éleveurs.

En effet, le climat conditionne largement les activités des animaux, car ce facteur fait varier la production de fourrage et influence les déplacements des animaux selon la disponibilité et la localisation des ressources en fourrage et en eau. En plus de son

effet sur les cultures, il permet d'étudier l'impact du changement climatique sur le fonctionnement et la dynamique du territoire (Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011). Dans ces travaux, les auteurs définissent deux scénarios : un premier où la pluviosité est stable et un deuxième où la pluviosité diminue de façon continue dans le temps (Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011). D'autres auteurs se sont focalisés sur la saison sèche pour décrire le comportement des troupeaux. C'est le cas de Chirat qui se focalise surtout en milieu de saison sèche puisque la libre pâture débute pleinement durant cette saison (Chirat, 2010). L'évolution extrême des conditions climatiques (forte sécheresse) peut rendre l'environnement défavorable à la survie des troupeaux. Dans certains travaux, les auteurs mettent en évidence la rationalité de l'éleveur dans ses décisions stratégiques en fonction des changements de l'environnement. C'est le cas de Canal *et al.*, dont le but des simulations est de définir les caractéristiques en termes de mémoire, communication et stratégies, des troupeaux les mieux adaptés à l'environnement sahélien (Canal *et al.*, 1998).

D'autres travaux essaient de comprendre l'influence des ressources abiotiques (aménagements) et biotiques (ressources fourragères) de l'environnement et parfois de leur importance respective en termes de surface sur le comportement des animaux. C'est dans cette optique que, Dumont et Hill évaluent l'efficacité de la recherche de la nourriture des moutons en fonction de la taille de l'environnement (Dumont and Hill, 2001). D'autres travaux croisent les facteurs biotiques et abiotiques. C'est le cas de Chirat qui détermine lesquels des éléments du parcours biotiques (ressources fourragères) et abiotiques (aménagements) polarisent les troupeaux selon des facteurs de pratique des éleveurs et des facteurs propres aux troupeaux (Chirat, 2010).

- prédire l'alimentation et les performances du troupeau (Baumont *et al.*, 2002; Cambier *et al.*, 2005; Canal *et al.*, 1998; Chirat, 2010; Henane *et al.*, 2010; Dumont and Hill, 2001) :

Dans ces travaux qui visent à évaluer avec justesse les performances des troupeaux, la modélisation du comportement alimentaire du troupeau est associée à celle du comportement spatial. En effet le comportement spatial est utilisé pour mieux prédire l'alimentation, et donc les performances, des animaux d'élevage.

Typiquement Chirat en décrivant les circuits quotidiens des troupeaux de bovins en libre pâture sur parcours agropastoral tropical, veut représenter les choix de déplacements (Chirat, 2010). Dans son modèle, Chirat y associe, les choix de consommation des troupeaux ainsi qu'un processus d'ingestion, de vitesse variable, pour représenter le comportement alimentaire des troupeaux. D'autres auteurs tels que Baumont *et al.*, simulent les différentes phases comportementales (ingérer, boire, ruminer, se reposer) de chaque animal du troupeau (Baumont *et al.*, 2002). Ils mettent l'accent sur les capacités de l'animal à choisir les types de fourrages à consommer selon leur qualité et quantité (Baumont *et al.*, 2002; Cambier *et al.*, 2005; Dumont and Hill, 2001; Henane *et al.*, 2010).

2.1.3. Les différentes unités paysagères représentées dans les modèles

La modélisation spatialisée d'un système passe nécessairement par la modélisation de l'environnement dans lequel évoluent les différentes entités dont les comportements sont simulés (Belem, 2005). Un environnement est un espace (temporel et généralement spatial) dans lequel évoluent les agents ou les acteurs du modèle. C'est un élément essentiel dans la modélisation du comportement spatial et alimentaire des troupeaux. Il est porteur de ressources biotiques (ressources fourragères) et abiotiques (aménagements) qui font l'objet d'usages multiples par les acteurs qui interviennent dans ces types de modèles, ici les troupeaux. En effet ces troupeaux consomment une partie de la biomasse produite par les ressources fourragères et utilisent les aménagements pour s'abreuver (points d'eau), pour ruminer (zones d'ombrage), se reposer (parcs), etc. L'environnement est aussi le lieu où se déroulent les interactions entre les acteurs du modèle.

Deux manières de représenter l'environnement de modélisation sont utilisées dans les modèles étudiés :

i) certains auteurs représentent l'environnement dans toute sa diversité spatiale afin de se rapprocher d'une situation réelle. Ainsi, ils prennent en compte son hétérogénéité spatiale (sol, végétation). Pour augmenter le réalisme des simulations et tenir compte des contraintes spatiales sur le comportement des individus, ces travaux utilisent des données SIG basées sur la carte morpho-pédologique de leur zone d'étude (Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011; Chirat, 2010; Cambier *et al.*, 2005),

ii) d'autres auteurs au contraire, simplifient au maximum l'environnement (réduction de l'hétérogénéité) et créent un environnement théorique. Il est alors représenté sous forme de grille fermée (Bonney *et al.*, 2001; Canal *et al.*, 1998; Dumont and Hill, 2001; Henane *et al.*, 2010). Ces auteurs s'intéressent généralement plus au comportement du troupeau (capacités sociales des animaux et capacités individuelles) qu'au fonctionnement global de l'écosystème.

Certains travaux décrivent l'environnement dans un sous-modèle à part du système étudié avant de le coupler avec les autres sous-modèles. C'est le cas de Baumont *et al.*, qui simulent le fonctionnement d'un couvert prairial plurispécifique, défini par des communautés végétales appelées faciès (Baumont *et al.*, 2002). Dans ce modèle, un fichier carte gère la répartition spatiale de la végétation à l'échelle de la parcelle.

Les différents types d'unités paysagères représentées se distinguent généralement par les types de sols, les types de végétations et les unités d'aménagements. Leur degré de diversité dépend des objectifs des auteurs et de leur volonté de réalisme et/ou simplification.

Peu d'auteurs ont évoqué les types de sols dans leurs modèles. Belem *et al.* (2005 ; 2011) les différencient en fonction de leur caractère propice à telles ou telles cultures ; ce qui lui permet de se rapprocher de la réalité dans son objectif d'étude de la fertilité des sols (Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011).

D'autres auteurs ont choisi de distinguer les types de végétation (arbustes, herbacés, arbres, etc.) afin de tenir compte des préférences alimentaires des animaux (Baumont *et al.*, 2002; Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011; Cambier *et al.*, 2005; Chirat, 2010; Mechoud *et al.*, 2000).

Lorsque des aménagements sont représentés, il s'agit surtout des éléments influençant le déplacement des troupeaux : points d'eau, prairies, chemins, etc. (Baumont *et al.*, 2002; Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011; Cambier *et al.*, 2005; Canal *et al.*, 1998; Chirat, 2010; Mechoud *et al.*, 2000).

2.1.4. Les types d'agents et leurs capacités utilisés pour représenter les différents acteurs qui interviennent dans chacun des modèles

Dans cette partie, nous nous intéressons au nombre et aux types d'agents distingués dans chaque modèle. Un agent est défini comme une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et son environnement, et qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et de ses interactions avec les autres agents (Ferber, 1995) Par autonomie, on peut comprendre que l'agent peut agir seul (figure 2). Les troupeaux peuvent être assimilés à des agents dans un SMA. Ils peuvent en particulier agir sans l'intervention directe d'autres agents, sans l'intervention d'humains par exemple.

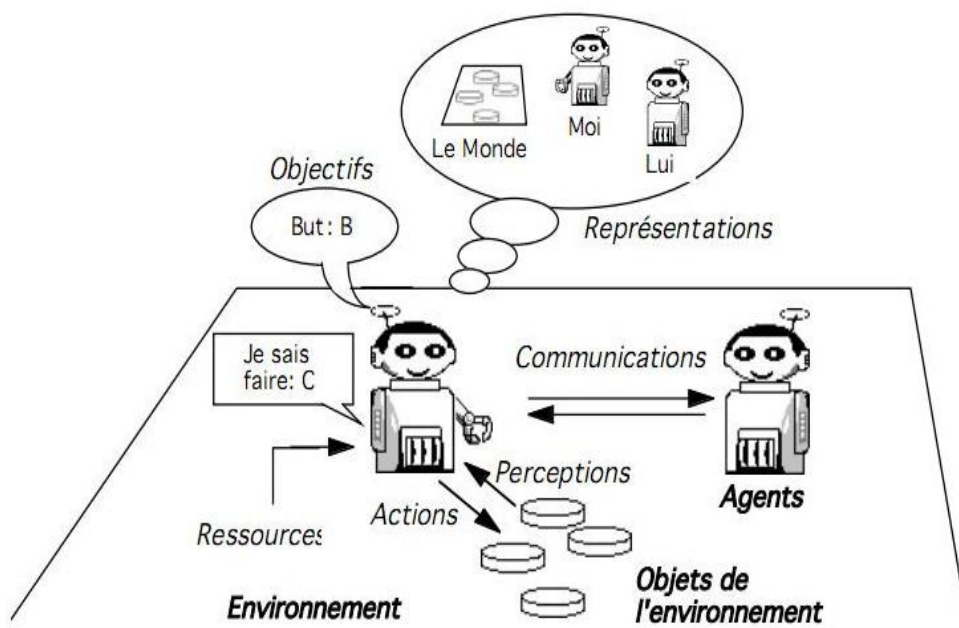


Figure 2. Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement et les autres agents (Ferber, 1995)

Dans le cas de la divagation des troupeaux, les principaux agents utilisés dans les modèles sont : les agents réactifs et les agents cognitifs.

Les agents réactifs n'ont pas de mémoire c'est-à-dire ne prennent pas en compte leurs états antérieurs pour agir. Ils ont très peu de capacités de représentation, de

raisonnement et réagissent à des stimuli provenant de leur environnement. Les systèmes d'agents réactifs nécessitent un grand nombre d'agents. Dans les cas des troupeaux il s'agit des animaux composant le troupeau (Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011).

Les agents cognitifs sont des agents complexes qui utilisent leur mémoire dans leur prise de décision. Ils ont une représentation explicite de leur environnement. Les systèmes d'agents cognitifs nécessitent généralement moins d'agents. En effet le troupeau peut-être globalisé en un seul agent, sans distinguer tous les individus.

La plupart des travaux ne représentent qu'un seul type d'agents actifs dans leurs modèles : le troupeau dans son entièreté, sans ou avec le berger. On parle alors d'approche «troupeau-centrée» (Chirat, 2010). Dans ces modèles, les troupeaux sont les entités phares car ils sont le sujet d'étude et la simulation de leur comportement est nécessaire pour atteindre les objectifs de simulation.

Quand le troupeau n'est pas accompagné d'un berger, il peut être représenté comme un agent réactif. Le troupeau fonctionne alors par stimulus réponse et a un objectif principal de satisfaction de ses besoins en fourrage et en eau qui sont des ressources distribuées dans l'environnement. C'est le cas du modèle de Belem, où 314 agents troupeaux sont représentés sur les 628 agents actifs ; les autres étant les exploitants possédant chacun un troupeau (Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011). Dans le modèle de *Mechoud et al.*, on distingue deux types de troupeaux : un troupeau de vaches et un troupeau de chevaux ; les deux troupeaux sont représentés par des agents réactifs (Mechoud *et al.*, 2000).

Le plus souvent le troupeau est représenté comme un agent cognitif. Il n'intègre pas (Baumont *et al.*, 2002; Chirat, 2010; Dumont and Hill, 2001) ou intègre un berger (Bonney *et al.*, 2001; Canal *et al.*, 1998). Dans ce dernier cas, on parle alors de couple « berger-troupeau » comme un agent cognitif (Bonney *et al.*, 2001; Canal *et al.*, 1998). Le nombre d'agents distingués est variable ; il varie de 3 (Chirat, 2010), 20 (Canal *et al.*, 1998) à 40 troupeaux (Bonney *et al.*, 2001). Quant à Dumont et Hill, il représente quatre groupes de trois brebis (Dumont and Hill, 2001).

Dans certains modèles, les auteurs distinguent deux types d'agents. Parmi ces deux types d'agents, l'un est cognitif et l'autre réactif (Cambier *et al.*, 2005). Cambier *et al.*, décrivent l'animal leader du troupeau comme un agent cognitif et le reste du troupeau comme un agent réactif (Cambier *et al.*, 2005).

D'autres modèles distinguent trois types d'agents : le berger, l'animal leader du troupeau et le reste du troupeau. Dans ces modèles une organisation hiérarchique existe entre les trois agents. Le berger vient en premier ensuite le leader du troupeau et enfin le reste du troupeau (Henane *et al.*, 2010). Dans ce modèle, le berger et le leader du troupeau sont des agents cognitifs et le reste du troupeau est un agent réactif (Henane *et al.*, 2010).

2.1.5. Les différentes règles de déplacements des troupeaux

La mobilité des troupeaux est l'une des propriétés les plus importantes des modèles traitant du comportement spatial et alimentaire des troupeaux. Bon nombre d'auteurs

mettent en avant la particularité du formalisme retenu dans leurs modèles pour justifier l'originalité de leurs travaux.

Des études menées sur les règles sociales au sein des troupeaux (Dumont and Boissy, 1999) et sur la préférence alimentaire des ruminants (Dumont, 1996) ont permis d'avoir des avancées significatives sur la définition des règles régissant le déplacement des troupeaux. Un bon nombre d'auteurs se sont alors inspirés du modèle des Boids (Cambier *et al.*, 2005; Chirat, 2010; Henane *et al.*, 2010). Ce modèle simule le déplacement et la coordination d'un groupe d'individus selon la cohésion, la séparation et l'alignement (Reynolds, 1999).

A partir de cela, quatre règles de déplacements sont définies par les auteurs : la cohésion, la séparation, la subordination au leader du groupe et la recherche de nourriture.

La cohésion fait qu'un animal ne va pas s'éloigner à plus d'une certaine distance du troupeau (Baumont *et al.*, 2002). Les facteurs sociaux (cohésion, leadership) et la capacité de l'animal à se séparer de son troupeau au pâturage dépendent de plusieurs facteurs comme la préférence alimentaire des animaux. Cette dernière est permise par la capacité des animaux de mémoriser les sites alimentaires de qualité et disposant de fourrages en quantité (Baumont *et al.*, 2002; Cambier *et al.*, 2005; Dumont and Hill, 2001; Henane *et al.*, 2010).

Certains auteurs s'affranchissent des contraintes sociales de subordination entre les animaux mais prennent en compte la cohésion des troupeaux et la préférence alimentaire (Chirat, 2010; Mechoud *et al.*, 2000).

Dans les modèles de Belem, seule la préférence alimentaire guide le déplacement des troupeaux. Les troupeaux sont attirés par certaines parcelles plus attractives que d'autres qui sont ouvertes au pâturage et qui disposent de plus de fourrage en termes de quantité (Belem, 2005; Belem *et al.*, 2011).

Dans la catégorie des modèles qui représentent le couple « berger-troupeau » ou qui distinguent l'agent « berger » (cf. section précédente), il est possible de distinguer différentes stratégies d'éleveurs concernant les déplacements des troupeaux (Bonney *et al.*, 2001; Canal *et al.*, 1998) :

- dans le modèle de Canal *et al.*, le berger décide du déplacement du troupeau selon sa stratégie individuelle. C'est-à-dire, il peut choisir de guider le troupeau vers une (des) ressource(s) préférentielle(s) (Canal *et al.*, 1998),

- dans le modèle de Bonney *et al.*, les décisions du berger, en plus de sa stratégie individuelle d'orientation vers des ressources préférentielles, tiennent compte de contraintes environnementales, c'est-à-dire si les sites alimentaires sont ouverts au pâturage ou non. De plus le déplacement du troupeau de chaque berger prend également en compte des règles collectives prises avec d'autres bergers concernant la localisation de leurs troupeaux (Bonney *et al.*, 2001).

2.1.6. Conclusion

En somme, la mise en perspective de ces dix travaux de modélisations complémentaires et différents en termes de systèmes étudiés et de formalismes, permet de retenir un certain nombre de leçons méthodologiques en vue du développement futur de modèles destinés à étudier la dynamique du fonctionnement d'écosystèmes agro ou sylvo-pastoraux intégrant des troupeaux conduits en extensif.

Une des caractéristiques fortes de ces écosystèmes est l'importance des interactions troupeau-environnement du fait surtout de la forte mobilité des animaux. L'approche SMA apparaît particulièrement appropriée pour représenter et analyser ces interactions, même si, selon les travaux, l'accent est plutôt mis sur l'influence du troupeau sur son environnement ou réciproquement l'influence de l'environnement sur le troupeau.

Concernant la représentation de l'environnement des troupeaux (l'espace), deux options s'offrent au modélisateur :

- i) soit une représentation théorique volontairement simplifiée,
- ii) soit une représentation qui se veut réaliste grâce à l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG).

La première représentation permet un niveau d'abstraction et de généralité plus élevé, alors que la seconde permet de se rattacher à des études de cas et valider des simulations.

Concernant les agents distingués, 3 niveaux de complexité sont possibles. Le plus simple considère un agent unique «troupeau» (agrégat d'individus) intégrant ou pas un berger. Sans berger le troupeau est un agent purement réactif. Avec berger on parle d'agent «troupeau-berger» ; ce dernier agent est de type cognitif. Le second niveau distingue un leader animal au sein du troupeau qui est un agent cognitif contrairement au reste du troupeau. Enfin le niveau de complexité le plus élevé distingue un 3ème agent, le berger, qui est un agent cognitif tout comme le leader animal. Le principal avantage de distinguer plusieurs agents dont des agents cognitifs est d'accroître le réalisme des simulations du comportement spatial.

Plus on distingue de types d'agents, plus les règles guidant les déplacements des troupeaux sont nombreuses. Dans le cas d'agents purement réactifs, les règles d'attraction/répulsion aux ressources (préférences alimentaires) et aménagements sont suffisantes. Quand un agent leader est intégré, s'ajoute un certain nombre de règles sociales de type subordination et cohésion. L'intégration d'un berger nécessite en plus une organisation hiérarchique du type «berger>leader>reste du troupeau». Cette dernière permet de représenter les décisions de localisation du troupeau prises par le berger et une éventuelle coordination entre bergers.

Le niveau de modélisation le plus complexe n'est pas nécessairement le plus pertinent. Dans la perspective de futurs travaux de modélisation, les auteurs recommandent de bien avoir conscience des différentes options possibles et de retenir la plus appropriée selon leur objectif de modélisation et de simulation.

2.2. Etude de cas

2.2.1. Terroir agro-pastoral : Haute Casamance ou Bassin arachidier

Deux zones études ont été sélectionnées afin de couvrir la diversité des systèmes agricoles et climatiques.

La première zone est située aux alentours de Kolda en Haute Casamance. Le climat est de type soudanien avec des précipitations variant entre 900 et 1100 mm. On distingue différents groupements morphopédologiques telles que la forêt, la savane et les aires cultivées. Au sein de ses groupements se dégagent des unités écologiques telle que par exemple la savane herbacée ou la savane arbustive pour un écosystème de savane, ou bien une parcelle de maïs pour l'aire cultivée. On peut encore distinguer différents couverts dans une de ces unités de végétation. Le terroir présente un système agraire assez proche du modèle traditionnel basé sur un transfert de fertilité des parcours vers les cultures, transfert orchestré par les troupeaux (Manlay, 2000). L'élevage de bovins de type Ndama domine. En saison sèche (SS : début Octobre à fin mai), les troupeaux sont attachés la nuit (parc) sur les champs pour le fumage. Ils sont lâchés en libre pâture le matin après la traite. Pendant la saison des pluies, les animaux sont gardés et parqués en forêt, éloignés des cultures.

La seconde zone se situe entre Fatick et Diourbel dans le Bassin arachidier en zone climatique soudano-sahélienne. On observe également des précipitations variant entre 500 et 900 mm. La période pluvieuse, appelée hivernage ou saison des pluies (SP : de juillet à fin octobre), se démarque nettement de la saison sèche (SS : début Novembre à fin juin). L'importance des ressources hydriques a favorisé l'implantation de groupements végétaux. Ces potentialités reposent sur des formations végétales diversifiées. La végétation naturelle est de type arbustive à arborée. L'agriculture concerne surtout l'arachide et le mil. Depuis 2003, la culture du maïs et du niébé est encouragée pour la diversification des produits vivriers mais seul le niébé se développe réellement compte-tenu des contraintes de pluviométrie. L'élevage concerne les bovins, ovins et caprins. La race dominante de bovins est de type Zébu Gobra.

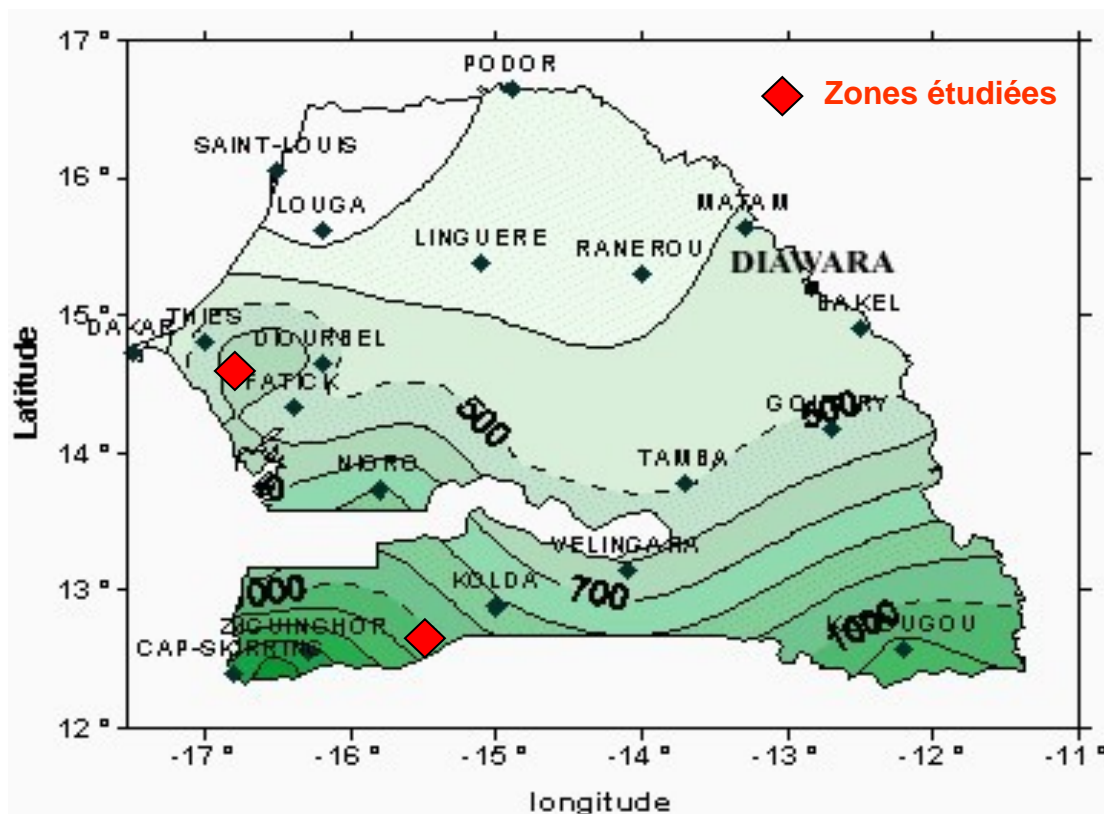


Figure 3. Localisation des 2 zones étudiées selon un zonage climatique (Vayssières et al., 2013)

2.3. Outils utilisés

2.3.1. Formalise UML

Nous utilisons ArgoUML qui est un logiciel libre de création de diagrammes Unified Modelin, Langage unifié pour la modélisation objet. Il est utilisé dans ce travail pour la description de notre modèle multi-agents. Sa force relève de sa capacité à modéliser de manière claire et précise la structure et le comportement d'un système indépendamment de toute méthode ou de tout langage de programmation (Muller and Gaertner, 2000).

2.3.2. Plateforme de modélisation et de simulation agents GAMA

GAMA est une plateforme de simulation qui vise à fournir aux experts sur le terrain, aux modélisateurs et aux informaticiens, un environnement complet de modélisation et de simulation de développement pour la construction de simulations multi-agents spatialement explicites. Il a été développé par l'équipe de recherche Modélisation Simulation Informatique (MSI) situé au sein de l'Institut de la Francophonie pour L'Informatique (IFI), Hanoi, et une partie de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) / L'université Pierre et Marie Curie (UMPC) international Unité de recherche-Unité de Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes Complexes (UMMISCO)) depuis 2007. Il permet dans ce présent travail, de construire un modèle de simulation de la distribution spatiale des apports de fumure organique par les troupeaux de bovins dans un terroir villageois agro-pastoral.

3. Modèle de simulation du rôle des troupeaux dans l'organisation spatiale des flux et des stocks de biomasse et matière organique

Dans cette partie nous construisons notre modèle en commençant par représenter l'organisation des entités (modèles statiques) grâce à un diagramme de classe. Nous expliquons ensuite comment est modélisé l'environnement, les agents troupeaux. Enfin nous décrivons les deux composantes du modèle.

La première composante est décisionnelle. Elle modélise le comportement spatial et alimentaire des troupeaux. Quant à la seconde, elle est biophysique et modélise l'ingestion de fourrages par le troupeau, la production de déjection et la croissance de la végétation qui dépend de la pluie et de l'apport de fumure organique.

3.1. Modèle conceptuel

3.1.1. Architecture générale

Le diagramme de classe ci-dessous simule le comportement spatial et alimentaire d'un troupeau sur un terroir villageois agro-pastoral. Les entités représentées sont encapsulées dans les classes, conformément à l'approche objet. Quatre entités se distinguent : l'unité de végétation, le troupeau, le climat et le temps.

L'unité de végétation est une construction de l'environnement du troupeau et est composée de cellules de végétation qui disposent d'un attribut type de couvert qui peut prendre les valeurs suivantes : habitat, champs de case, champs éloignés, jachères, parcours et points d'eau (mares ou puits).

Le climat est une entité réactive que nous avons divisée en 3 saisons qui sont : la saison des pluies (SP), la saison sèche froide (SSF) et la saison sèche chaude (SSC). Dans le contexte de Kolda, chaque saison dure 4 mois. La pluviométrie est un attribut du climat qui varie en saison des pluies et qui est nulle en saison sèche froide comme chaude.

L'entité temps nous a permis de calculer à chaque pas de temps (une heure) un ensemble de variable «horloge» : l'heure courante, le mois, la saison et l'année.

Le comportement du troupeau résulte d'une succession de décisions à différentes échelles spatio-temporelles. Il est à la fois influencé par le climat et son environnement. Par exemple le comportement du troupeau varie selon la saison (en saison pluvieuses, le troupeau n'a pas accès aux champs proches qui sont en culture. Par contre en saisons sèches il pâture les résidus de récoltes. Le troupeau connaît son environnement c'est-à-dire qu'il connaît les différents types de couverts et leur positionnement. Il est capable aussi de percevoir les cellules de végétation les plus proches.

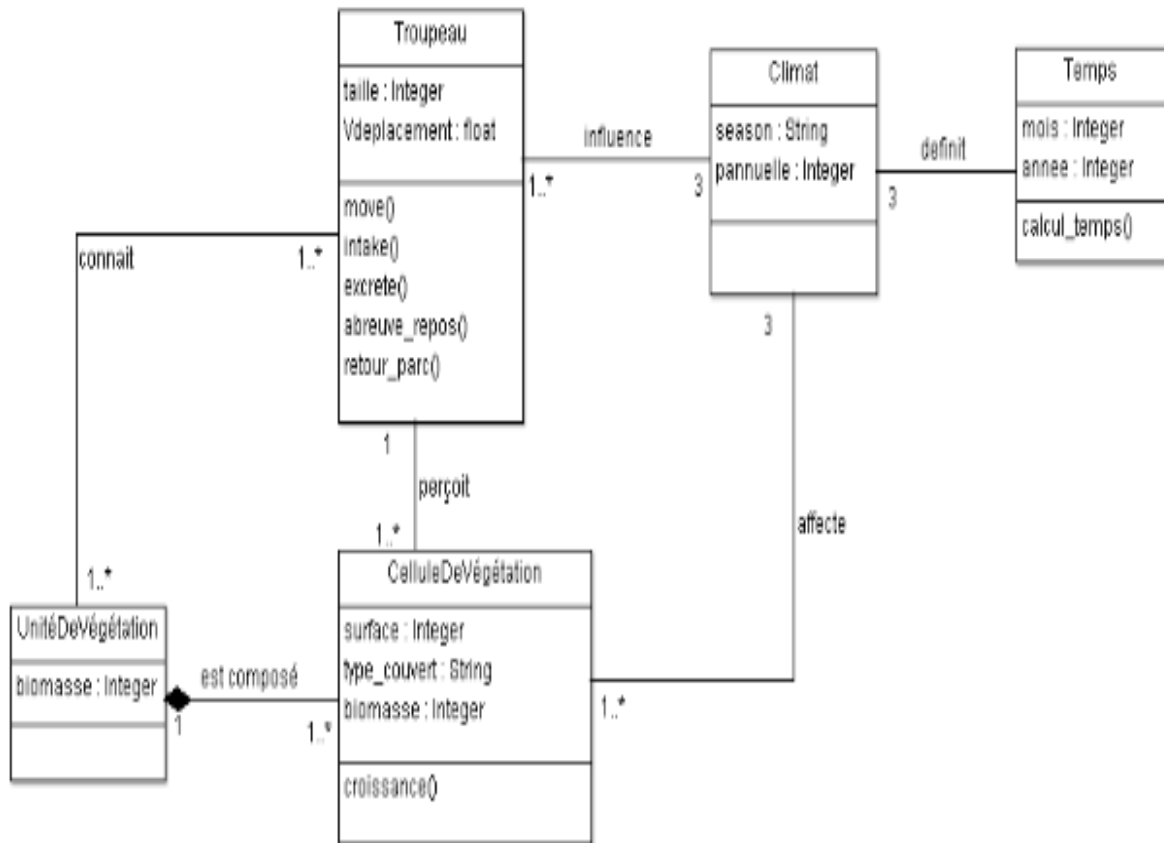


Figure 4. Diagramme de classe du modèle de simulation du comportement spatial et alimentaire d'un troupeau de bovin dans un terroir villageois agro-pastoral.

3.1.1.1. Environnement

L'environnement est représenté par une grille fermée de 50 x50 cellules de taille identique (voir figure 5). Chaque cellule est caractérisée par sa taille (1 hectare), la quantité de biomasse qui s'y trouve (en fonction du type de couvert), son type de couvert (habitat, champ de case, champ éloigné, jachère, parcours, ou point d'eau). Ces différents éléments définissent l'état d'une cellule.

Dans cette étude un environnement théorique a été schématisé sous la forme d'un «chorème» (Brunet, 1980). Ce dernier est une simplification de la réalité qui vise à représenter toute la complexité du territoire à l'aide de formes géométriques. Même s'il semble simplificateur, le chorème a été réalisé de façon rigoureuse et il tient compte de toute la dynamique présente sur le territoire étudié.

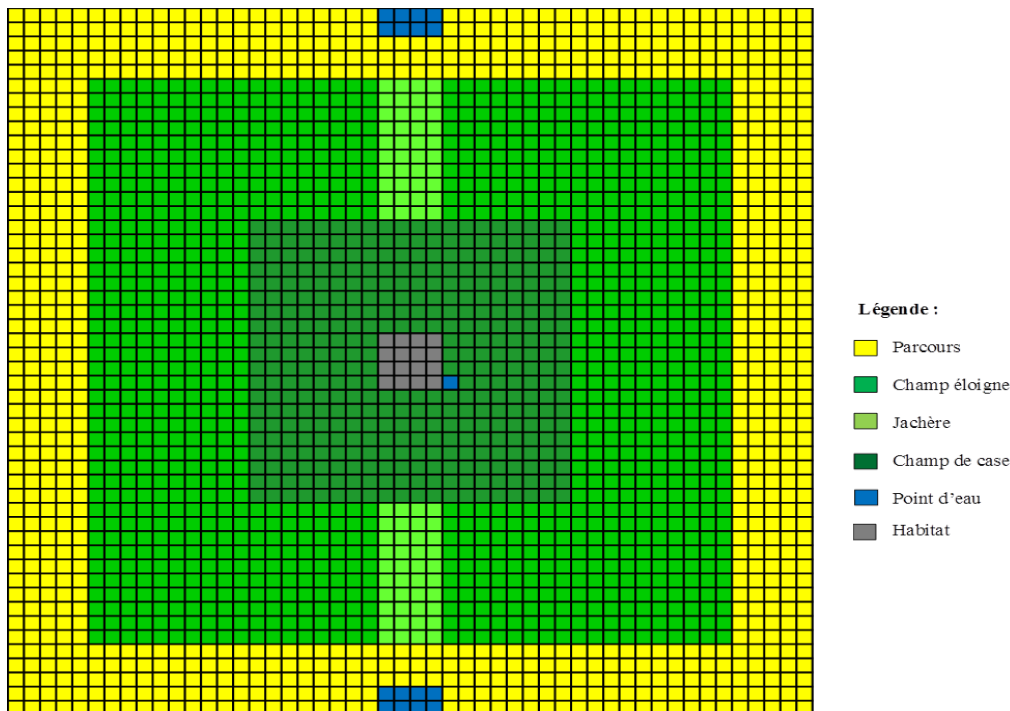


Figure 5. Représentation théorique d'un environnement en terroir villageois agropastoral

3.1.1.2. Agent

Le troupeau joue un rôle important dans l'organisation spatiale des flux et stocks de biomasse et de matière organique. Par ses activités, en même temps qu'il consomme la biomasse dans les cellules de végétation, le troupeau restitue des bouses et de l'urine dans son environnement.

Ainsi, le rôle du troupeau dans la distribution spatiale de matière organique met en évidence les éléments suivants : l'ingestion du fourrage (biomasse), la production de déjections et la mobilité réglant la distribution spatiale de l'ingestion et des déjections.

Afin de modéliser son comportement en tenant compte des contraintes climatiques et environnementales (spatiales), le troupeau est considéré comme un agent réactif capable de se déplacer. C'est aussi un agent cognitif puisqu'il dispose en plus d'une représentation globale de son environnement.

3.1.2. Composante décisionnelle : comportement spatial et alimentaire du troupeau

La composante décisionnelle modélise le comportement spatial et alimentaire du troupeau. Elle a été construite sur la base du modèle conceptuel conçu à partir des suivis de troupeaux de Chirat (Chirat, 2010).

La Figure 6 représente l'enchaînement des activités d'un troupeau. Les conditions initiales sont un départ du troupeau à 7 heures, un passage attendu à la mare vers 13 heures et un retour au parc de nuit à partir de 18 heures. Le troupeau se trouve initialement au parc de nuit qui est une cellule de type jachère en saison des pluies,

de type champ de case en saison sèche froide ou chaude. Si l'heure courante de la simulation est égale à 7 heures, le troupeau se déplace vers l'un des couverts selon la saison. L'activité principale du troupeau est la recherche de la nourriture. A chaque fois, il choisit s'il doit consommer de la biomasse soit dans sa propre cellule soit dans une cellule voisine qui dispose de plus de biomasse. Cela est possible grâce à sa capacité de perception et à la représentation globale de son espace. Ensuite, il s'alimente jusqu'à ce qu'il soit l'heure de s'abreuver. S'il est l'heure de s'abreuver, le troupeau va à la mare la plus proche et se repose (et rumine) en même temps jusqu'à ce qu'il soit l'heure de quitter le lieu de s'abreuver. En saison sèche, il peut aller au puits qui se trouve aux alentours de l'habitat ; puisque les mares dans les parcours sont sèches. En quittant la mare, le troupeau reprend son activité principale jusqu'à l'heure de retour au parc de nuit. Il s'agit d'une cellule aléatoire choisie par le troupeau où il pourra passer la nuit. L'excrétion est continue c'est à dire qu'à chaque pas de temps le troupeau excrète des bouses et de l'urine qu'il soit en train de s'alimenter, s'abreuver, se déplacer ou se reposer.

Le comportement du troupeau est différent selon la saison. En saison des pluies (SP), le troupeau n'a pas accès aux champs de cases et éloignés qui sont en culture. La journée, il se déplace au sein des jachères et des parcours où il va mener ses activités. La nuit il est parqué dans sur les jachères. En saison sèche (SS), saison de «vaine pâture», le troupeau mène ses activités dans les champs de case en saison sèche froide et dans les champs éloignés en saison sèche chaude. En saison sèche, le parc de nuit se trouve dans les champs de cases.

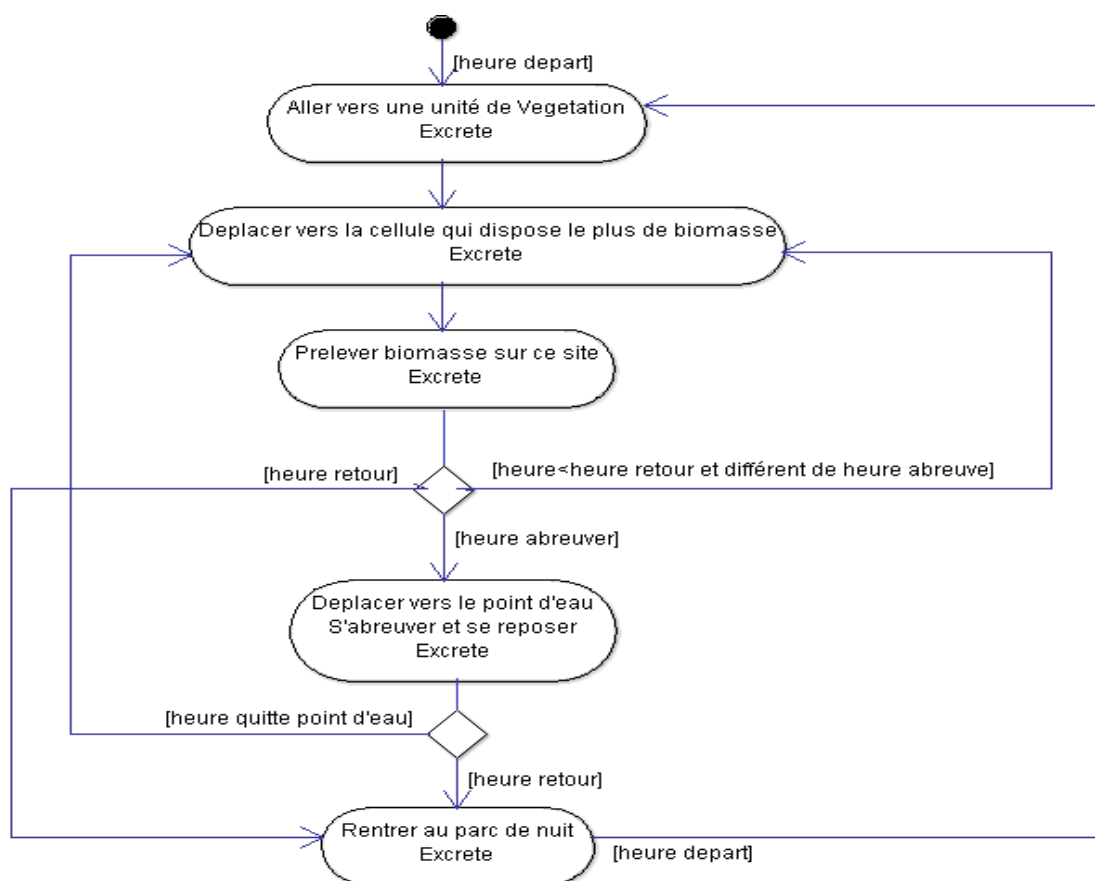


Figure 6. Diagramme d'activité d'un troupeau

3.1.3.Composante Biophysique

La composante biophysique modélise la production de la biomasse c'est-à-dire la réponse de la végétation à la pluie et aux apports de fumure organique par les animaux. Elle permet aussi de quantifier l'ingestion de biomasse et la production de déjections quotidiennes par le troupeau.

3.1.3.1. Réponse de la végétation à la pluie et aux apports de fumure organique

Pour modéliser ce phénomène nous avons calculé la vitesse de croissance de la végétation pendant la saison des pluies qui est de quatre (4) mois. Pour cela nous avons utilisés deux équations affines (E_p : équation linéaire et E_f ; voir Figures 7 et 8).

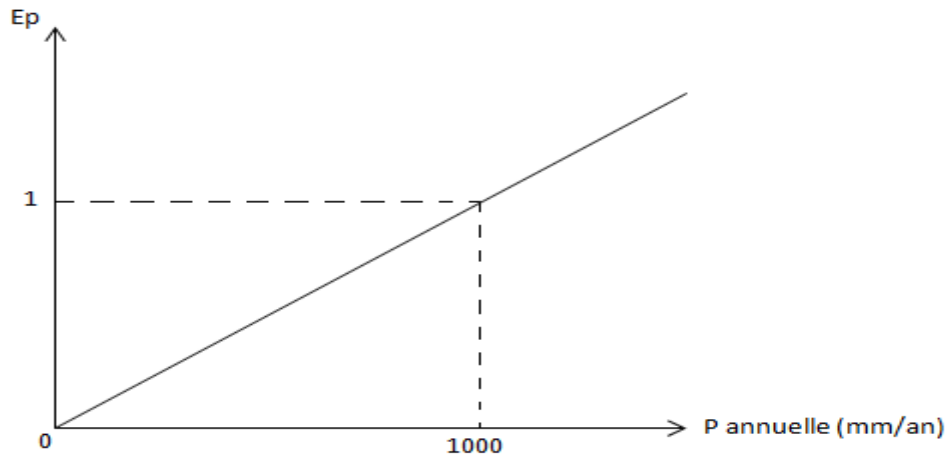


Figure 7. Courbe de l'effet pluviométrie (Grange, 2015)

$$E_p = 0,001 \times P \text{ annuelle}$$

E_p : effet de la pluie (sans dimension)

P annuelle : pluviométrie annuelle

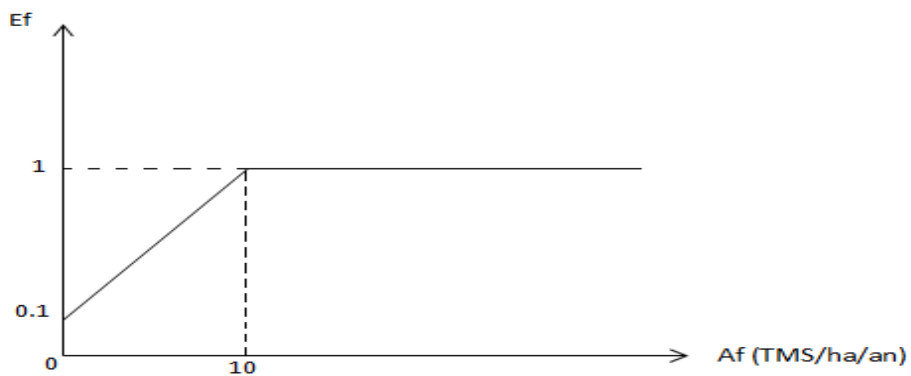


Figure 8. Courbe de l'effet fumure (Grange, 2015)

$$E_f = 0,09 \times A_f + 0,1$$

E_f : effet de la fumure organique (sans dimension)

A_f : apport de la fumure organique pendant un an.

$$V_c = (1/D) \times E_p \times E_f \times C_{theo}$$

Vc : vitesse de croissance (en kilogramme Matière Sèche par jour, kgMS/j)

D : durée de la saison des pluies (j)

Ctheo : Croissance théorique = constante qui est égale à 5000 kgMS/an

3.1.3.2. Ingestion de fourrages et production de déjections

L'ingestion de fourrages et la production de déjections sont deux processus biophysiques qui sont liés.

L'ingestion de la biomasse est une fonction qui dépend de la taille du troupeau aussi de la quantité de biomasse disponible dans la cellule où il se trouve.

Ving = min [T × Ving_animal, biomasse]

Ving : vitesse d'ingestion du troupeau (kgMS/h)

T : taille du troupeau (Unité Bovin Tropical, UBT)

Ving_animal : vitesse d'ingestion d'un animal (kgMS/h)

Biomasse : quantité de biomasse disponible sur la cellule de végétation où le troupeau se trouve à l'instant t (kgMS)

La production de déjections est une fonction de l'ingérer. Le troupeau excrète la moitié de ce qu'il a ingéré le jour d'avant.

Vex = ((1/2) × Qing) / T

Vex : vitesse d'excrétion du troupeau (kgMS/UBT/j)

Qing : quantité de biomasse ingérée le jour d'avant (kgMS/j)

4. Résultats des simulations du modèle

4.1. Les deux scénarios comparés

Dans notre modèle, nous avons défini un troupeau de 625 têtes correspondant à un chargement animal de 0.25 UBT/ha à l'échelle globale du terroir (2500 ha).

Ainsi nous avons simulés deux scénarios qui correspondent aux deux grandes zones pédo-climatiques du Sénégal (cf. description zones d'étude). Le premier scénario correspond à une zone semi-aride (Bassin arachidier) avec une pluviométrie faible et le second scénario à une zone sub-humide (Haute Casamance) avec une pluviométrie élevée.

L'objectif est de comparer les deux scénarios sur la base des variations de production de fèces et l'évolution de la production de biomasse totale à l'échelle du terroir.

4.2. La répartition spatiale des restitutions de bouses simulées selon la saison {SP, SS}

Les simulations nous permettent de considérer la répartition dans l'espace des déjections animales comme une résultante du comportement spatial des troupeaux selon la saison. Les figures 9 et 10 décrivent la répartition de la fumure organique dans l'espace, en SP et en SS respectivement. Le point blanc représente le troupeau et les points noirs correspondent aux apports en déjections du troupeau ; plus la largeur des points est importante plus l'apport à l'hectare est important.

Ces simulations nous permettent de constater que pendant la saison des pluies, le troupeau excrète en dehors des zones cultivées, c'est à dire dans les parcours et les jachères (voir figure 9). Par contre en saison sèche (SS), le troupeau excrète principalement en zones cultivées, dans les champs de case en SSF et dans les champs éloignés en SSC (voir figure 10). La localisation des lieux de parage (décidés par l'éleveur) est une variable importante de la répartition spatiale de la fumure organique.

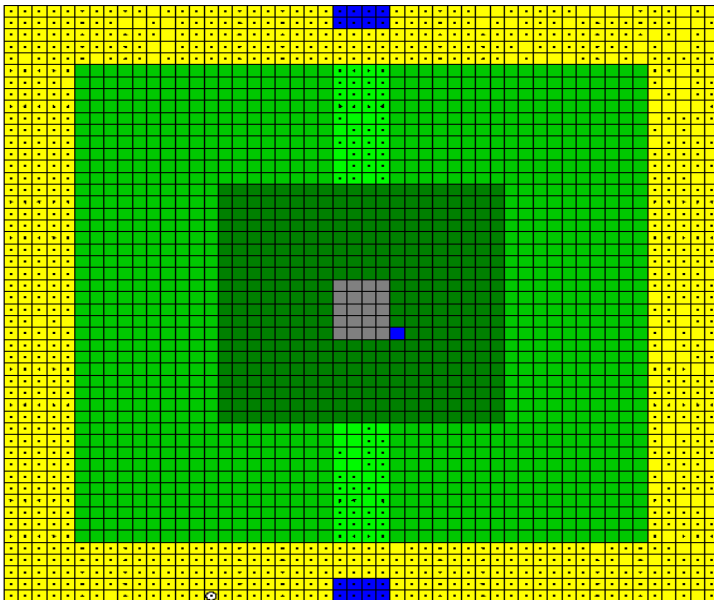


Figure 9. Répartition spatiale de fumure organique en saison des pluies (SP)

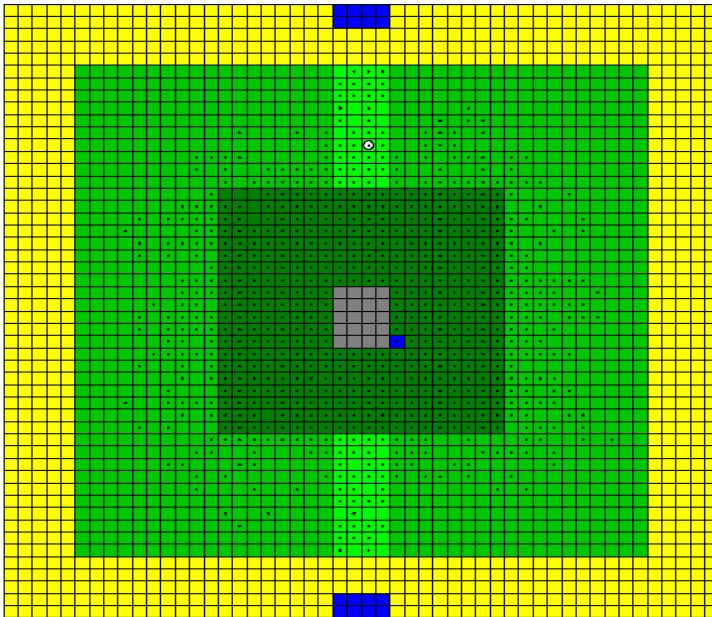


Figure 10. Répartition spatiale de fumure organique en saison sèche (SSF et SSC)

4.3. Variation saisonnière de la production de fèces totale

Les figures 11 et 12 décrivent la variation saisonnière de la production de fèces moyenne par bovin en kilogramme de matière sèche par unité bovin tropical (en kgMS / UBT).

On constate, dans les deux figures, une fluctuation de la production de fèces moyenne due à des variations saisonnières de disponibilité en biomasse. En effet, le troupeau excrète plus en saison des pluies qu'en saison sèche. Cela s'explique par le fait qu'en saison des pluies, il y a une croissance importante de la biomasse, donc plus de fourrage disponible pour les animaux. Mais pendant la saison sèche, on remarque une stabilité à partir de la fin de la saison des pluies jusqu'en fin de saison sèche froide correspondant à la période de «vaine pâture» c'est-à-dire au moment où les champs sont ouverts au pâturage et les animaux consomment les résidus de récoltes. En saison sèche chaude, l'excrétion du troupeau décroît progressivement jusqu'au retour des pluies car la disponibilité en biomasse diminue avec l'avancement de la saison sèche.

On notera également une croissance progressive de la production de fèces d'une année à une autre. Cela s'explique par le fait que la production des fèces pendant l'année précédente participe à l'augmentation de la biomasse de l'année en cours et donc à l'augmentation de la production de fèces de l'année en cours, et ainsi de suite. Il est probable que nous arrivions à un plateau au bout de 5 à 10 ans de simulation correspondant à une situation d'équilibre au sein de l'écosystème.

On constate que cette augmentation d'une année sur l'autre de la production de fèces est plus importante sous un régime sec (X 2.5, figure 11) que sous régime pluvieux (X 2, figure 12).

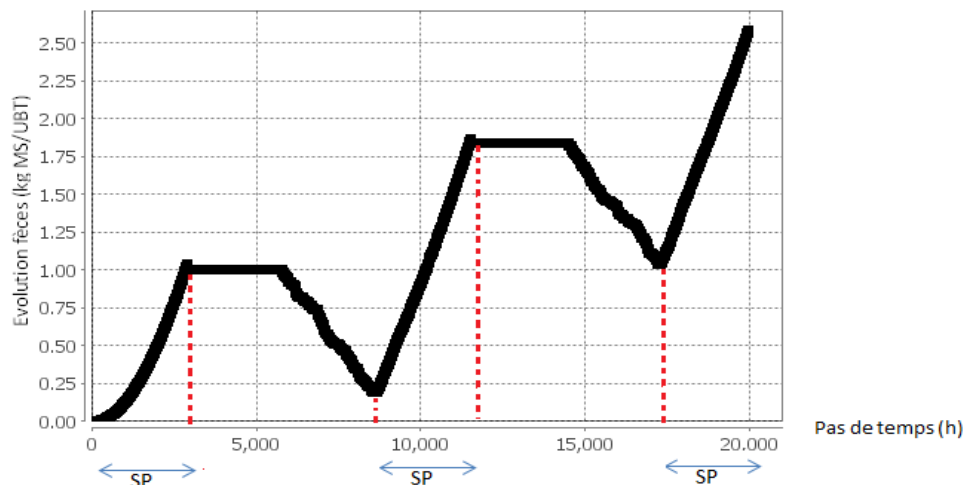


Figure 11 : l'évolution des fèces disponible au cours du temps en régime sec (300 mm/an)

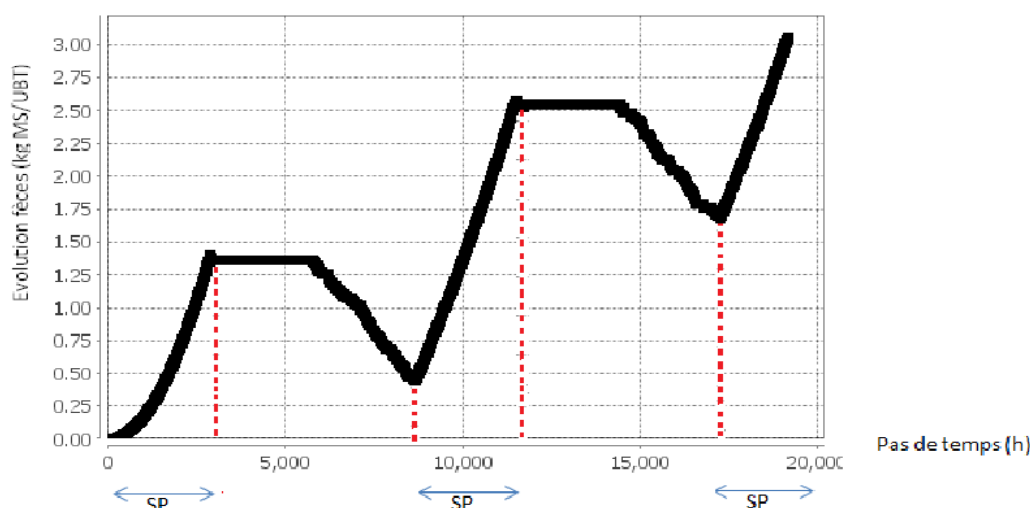


Figure 12 : l'évolution des fèces disponibles au cours du temps en régime pluvieux (1000 mm/an)

4.4. Production de biomasse totale à l'échelle du terroir

Les figures 13 et 14 décrivent l'évolution du stock de biomasse totale sur pied à l'échelle du terroir (en kg MS).

Dans les deux figures, on constate une variation saisonnière due à l'effet de la pluie et du troupeau. On remarque une forte croissance de la biomasse en saison des pluies qui est conditionnée par l'effet de la pluie et par la production de fèces du troupeau qui est également plus importante pendant cette période.

On notera également une croissance progressive de la biomasse d'une année à une autre. Cela s'explique par l'effet de l'apport de la fumure organique par le troupeau

de l'année d'avant. Plus il y a de biomasse disponible plus la quantité de fèces produites est importante et donc plus la biomasse produite est importante, etc.

Enfin on retrouve comme pour la production de fèces des différences importantes entre les 2 scenarios pluviométriques. On constate que le pic d'abondance en biomasse en zone sub-humide est 3.6 plus élevé qu'en zone semi-aride. Cela est dû à l'effet combiné de pluies et d'apport de fèces plus importants en zone sub-humide.

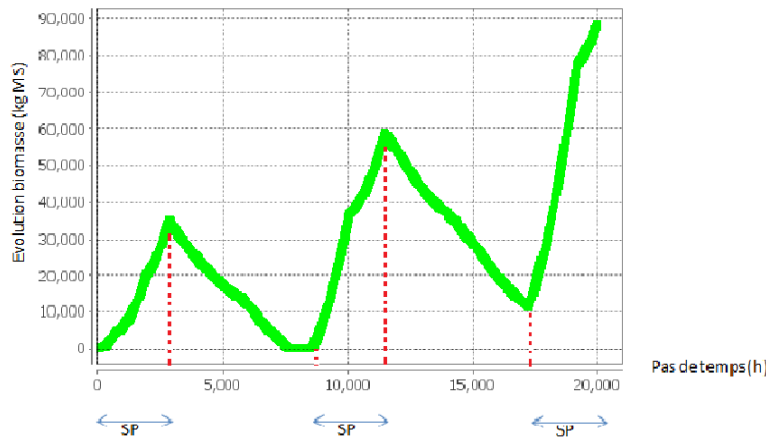


Figure 13 : l'évolution de la biomasse sur pied disponible au cours du temps en régime sec (300 mm/an)

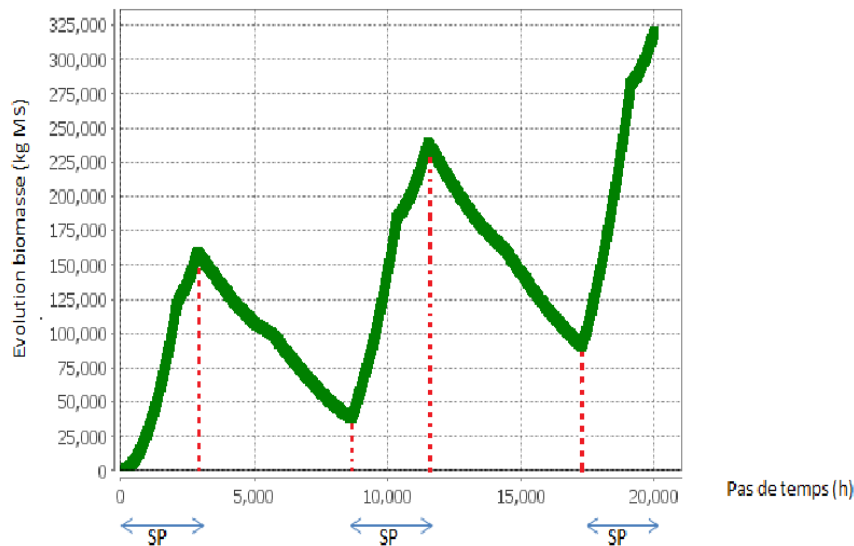


Figure 14 : l'évolution de la biomasse sur pied disponible au cours du temps en régime pluvieuse (1000 mm/an)

5. Conclusion et perspectives

5.1. Conclusion

La finalité d'une telle simulation multi-agent est d'aider à comprendre l'importance des systèmes d'élevages extensifs dans le fonctionnement et la durabilité des systèmes agricoles en Afrique de l'Ouest. Plus précisément, elle nous a permis de comprendre le rôle des ruminants divagants dans l'organisation spatiale des flux et des stocks de biomasse végétale et de matière organique à l'échelle d'un terroir villageois agro-pastoral.

L'une des principales originalités du modèle de simulation construit ici est la finesse avec laquelle le comportement spatial et alimentaire des troupeaux de bovins est décrite et représentée. En effet c'est un processus qui est largement sous-considéré dans les modèles décrivant le fonctionnement de terroirs villageois agro-pastoraux. L'état de l'art sur l'approche multi-agent pour modéliser le comportement spatial des troupeaux est le facteur clé de cette étude. A partir de l'étude de dix travaux de modélisation complémentaires et différents en termes de systèmes étudiés et de formalismes, cette revue de la littérature nous a aidé à concevoir la composante décisionnelle du modèle, à savoir quand, comment, et où les troupeaux se déplacent, s'alimentent, s'abreuvent et se reposent.

Concernant la représentation de l'environnement, une représentation théorique d'un village agro-pastoral a été faite en tenant compte de l'organisation spatiale en auréoles concentriques largement observées et décrites en Afrique de l'Ouest. Quant au troupeau, il est considéré comme un agent réactif disposant d'une représentation globale de son environnement et pouvant accomplir ses activités qui sont : le déplacement seul, le déplacement avec pâturage, l'abreuvement, le repos. L'excrétion est une sixième activité considérée dans notre modèle comme une «activité reflexe» ; c'est-à-dire que le troupeau excrète à chaque pas de temps de la simulation.

Une première série de simulations montre l'importance du régime climatique sur la biomasse végétale disponible et donc sur la production de fumure organique à l'échelle du terroir. Passant d'une pluviométrie annuelle de 300 à 1000 mm on multiplie par 3.6 la production de biomasse et donc potentiellement on va accueillir 3.6 fois plus d'animaux qui vont fertiliser plus efficacement les cultures. Le modèle souligne également la répartition spatio-temporelle des déjections animales. On retrouve bien, que l'essentiel des déjections sont déposées sur les jachères en SP (4 mois sur 12) et sur les champs proches en SS (8 mois sur 12). La présence de ruminants dans le terroir permet donc:

- i) d'accentuer l'effet positif des jachères sur le renouvellement de la fertilité des sols et
- ii) d'entretenir un système d'auréoles de fertilité caractérisé par un gradient de fertilité décroissant avec l'éloignement des parcelles aux habitations.

5.2. Perspectives

Deux perspectives principales nous semblent prioritaires, la première concerne l'approfondissement des potentiels d'exploration du modèle, la seconde concerne la validation du modèle.

A propos d'exploration par simulation, le modèle prend non seulement en compte le contexte climatique (pluviométrie annuelle, dates de la saison des pluies et des saisons sèches), mais aussi l'organisation spatiale de l'environnement (positionnement des points d'eau, des parcs de nuit et des jachères). Ici seul l'effet du climat a été simulé, mais nous envisageons d'utiliser ce modèle pour évaluer l'effet de la structure globale du paysage sur la capacité d'accueil du terroir en animaux et sur la production globale de biomasse végétale du terroir villageois dans une perspective de sécurité alimentaire. Quelques exemples de scénarios envisagés sont :

- i) l'étude des effets de la répartition spatiale des jachères lorsqu'elles sont regroupées pour former un couloir entre les champs de case et les parcours ou réparties de façon aléatoires dans l'espace sans coordination par les agriculteurs,
- ii) l'étude des effets de l'importance relative des parcours et des jachères par rapport aux zones cultivées.

A propos de validation du modèle, l'intégration d'un Système d'Information Géographique (SIG) au modèle pourrait augmenter le réalisme des simulations et nous permettre de confronter ces simulations à des situations observées sur le terrain. Par exemple nous disposons d'un SIG du terroir villageois agro-pastoral de Saré Yoro Bana (Sud du Sénégal), d'une description fine du comportement spatial et alimentaire des troupeaux présents (Chirat, 2010) et d'un inventaire détaillé des stocks/flux de biomasse, nutriments et carbone à l'échelle du terroir (Manlay, 2000 ; Vigan, 2013; Vigan *et al.*, 2014).

6. Références bibliographiques :

- Bah, A., Toure, I., Leclerc, G., 2006. Modélisation et Simulation Multi-agents : Concepts, Méthodes et Outils (Synthèse bibliographique), Projet ADD-TRANS. Pôle Pastoral Zones Sèches.
- Baudron, F., Delmotte, S., Corbeels, M., Herrera, J.M., Tiftonell, P., 2014. Multi-scale trade-off analysis of cereal residue use for livestock feeding vs. Soil mulching in the Mid-Zambezi Valley, Zimbabwe. *Agricultural Systems*.
- Baumont, R., Dumont, B., Carrère, P., Perochon, L., Mazel, C., Force, C., Prache, S., Louault, F., Soussana, J.F., Hill, D., Petit, M., 2002. Développement d'un modèle multi-agents spatialisé d'un troupeau de ruminants pâturant une prairie hétérogène. *Renc. Rech. Ruminants, Paris 9*, 69–72.
- Belem, M., 2005. 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. Université Paris Dauphine.
- Belem, M., Manlay, R.J., Müller, J.-P., Chotte, J.-L., 2011. CaTMAS: A multi-agent model for simulating the dynamics of carbon resources of West African villages. *Ecological Modelling 222*, 3651–3661.
- Bommel, P., Bah, A., Etienne, M., Leclerc, G., Monteil, C., Toure, I., 2010. Vers un métamodèle pour analyser les systèmes d'élevage extensifs et leurs interactions avec les territoires. *Cahiers Agricultures 19*, 143–151.
- Bommel, P., Bonaudo, T., Barbosa, T., da Veiga, J.B., Pak, M.V., Tourrand, J.-F., 2010. La relation complexe entre l'élevage et la forêt en Amazonie brésilienne: une approche par la modélisation multi-agents. *Cahiers Agricultures 19*, 104–111.
- 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. *L'Espace géographique 13*–25.
- Bousquet, F., Le Page, C., Müller, J.-P., 2002. Modélisation et simulation multi-agent, in: Le Maitre, C. (Ed.), *Deuxièmes Assises Nationales Du GdR I3*. pp. 173–182.
- Brunet, R., 1980. La composition des modèles dans l'analyse spatiale. *Espace géographique 9*, 253–265.
- Bryant, J.R., Snow, V.O., 2008. Modelling pastoral farm agro-ecosystems: A review. *New Zealand Journal of Agricultural Research 51*, 349–363.
- Cambier, C., Ickowicz, A., Maury, M., Manlay, R., 2005. Modèle de comportement spatial de troupeaux de bovins pour la gestion d'un terroir.
- Canal, R., Bah, A., Bousquet, F., D'Aquino, P., 1998. Les systèmes multi-agents génétiques. Application à l'étude de la mobilité pastorale en zone intertropicale sèche.

- Chirat, G., 2010. Description et modélisation du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours, en zone tropicale sèche. Montpellier SupAgro.
- Coquillard, P., Hill, D.R., Sime-Ngando, T., 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes: des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Masson Paris.
- Dumont, B., 1996. Préférences et sélection alimentaire au pâturage. INRA Productions Animales 9, 359–366.
- Dumont, B., Boissy, A., 1999. Relations sociales et comportement alimentaire au pâturage. PRODUCTIONS ANIMALES-PARIS-INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE- 12, 3–10.
- 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, 201–215. Doi:10.1016/S0304-3800(01)00274-5.
- Drogoul, A., 1993. De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Université Paris VI.
- Ferber, J., 1995. Les systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective. Inter-Editions.
- Grange G., (Vayssières J., Thiam M.B.), 2015. Suivi du cycle de l'azote en fermes réelles – Cas du système zébu-mil-arachide dans le bassin arachidier au Sénégal. Mémoire de Master II SupAgro, Montpellier, 70 p.
- Henane, I., Said, L.B., Hadouaj, S., Ragged, N., 2010. Multi-agent based simulation of animal food selective behavior in a pastoral system, in: Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications. Springer, pp. 283–292.
- Louhichi, K., Alary, V., Grimaud, P., 2004. A dynamic model to analyse the bio-technical and socio-economic interactions in dairy farming systems on the Réunion Island. Animal research 53, 363–382.
- Malézieux, E., Trébuil, G., Jaeger, M., 2001. Modéliser les agroécosystèmes. Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision, CIRAD-INRA, pp. 17–33
- Manlay, R., 2000. Dynamique de la matière organique à l'échelle d'un terroir agro-pastoral de savane ouest-africaine (sud-Sénégal). ENGREF (AgroParisTech).
- Mechoud, S., Hill, D., Campos, A., Orth, D., Carrere, P., Micol, D., Poix, C., Michelin, Y., Coquillard, P., Dumont, B., 2000. Simulation Multi-Agents de l'entretien du paysage par des herbivores en moyenne montagne.
- Muller, P.-A., Gaertner, N., 2000. Modélisation objet avec UML. Eyrolles Paris.
- Nidumolu, U.B., Lubbers, M., Alary, V., Lecomte, P., van Keulen, H., 2008. Modelling complex livestock-agricultural systems at a regional scale: a case study in La Réunion, in: 2008 Australian Agronomy Conference. pp. 21–25.

- Nielsen, H.M., Groen, A., Pedersen, J., Berg, P., 2004. Stochastic simulation of economic values and their standard deviations for production and functional traits in dairy cattle under current and future Danish production circumstances. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A-Animal Science* 54, 113–126.
- Pleasants, A.B., Wake, G.C., McCall, D.G., Watt, S.D., 1997. Modelling pasture mass through time in a managed grazing system subject to perturbations resulting from complexity in natural biological processes. *Agricultural Systems* 53, 191–208.
- Reynolds, C.W., 1999. Steering behaviors for autonomous characters, in: *Game Developers Conference*. pp. 763–782.
- Sané M., Vayssières J., Grillot M., Bah A., Ickowicz A., 2015. Etat de l'art de l'approche multi-agents pour modéliser le comportement spatial des troupeaux en systèmes d'élevage extensifs. In: Gaye I.D. & Corniaux C. (Eds), *La mobilité au cœur des sociétés et des systèmes pastoraux*. PPZS, Dakar, Sénégal, 17 pp.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., Haan, C. de, others, 2006. *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Vayssières J., Faye A., 2013. EFEFAECES « Elevage, Fertilité des sols et Economie des Fermes Agriculture-Elevage sous contraintes Climatiques et Environnementales au Sénégal ». Descriptif Projet Waapp, ISRA, CIRAD, IRD, 30 p.
- Vayssières, J., Guerrin, F., Paillat, J.-M., Lecomte, P., 2009. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises Part I–Whole-farm dynamic model. *Agricultural Systems*
- Vigan A., Vayssières J., Masse D., Manlay R., Sissokho M., Lecomte P., 2014. Sustainable intensification of crop production in agro-sylvo-pastoral territories through the expansion of cattle herds in Western Africa. Proceedings of the international conference “Livestock, Climate Change and Food Security », Madrid, Spain, 19-20 May, p 127.
- Vigan A., 2013. Trajectoire sur 15 ans et durabilité du terroir agro-pastoral de Sare Yero Bana : une approche par les flux de biomasse et d'azote. Mémoire de Master II ISA, Lille, 79 p.

7. Annexes

Annexe 1 : Principales caractéristiques des travaux de modélisation du comportement spatial des troupeaux de ruminants par l'approche système multi-agents (SMA)

Références	Type de modélisation utilisée	Objectifs de recherche et de modélisation	Données spatiales	Types et nombre d'agents représentés	Règles de déplacements des agents	Plateforme utilisée
	Les différents modules/sous modèles	Différents scénarios	<ul style="list-style-type: none"> - Types de sols, - unités d'aménagements - types de végétations 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre d'agents distingués lors des simulations -Capacité des agents : R=Représentation de l'environnement M=Mémorisation P=Perception C=Communication Différents degrés de R, M, P et C : globale = capacité totale locale = capacité limité aucune = pas de capacité 		<ul style="list-style-type: none"> - Pas de temps de simulation - Durée totale de la simulation
<ul style="list-style-type: none"> -Belem, M., 2005 -Belem, M., <i>et al.</i>, 2011 	SMA Agent troupeau : modèle de prélèvement de la biomasse, de dépôt de la matière	<ul style="list-style-type: none"> -Représenter et étudier la dynamique des ressources renouvelables. -Simuler la dynamique des stocks de carbone à l'échelle du terroir. -3 pour le taux de 	<ul style="list-style-type: none"> -données importées depuis un SIG 24462 points donc 24462 cellules (taille cellule : 1 ha) 25 cellules minimum par 	<ul style="list-style-type: none"> -1 agent : Troupeau= agent réactif -628 agents actifs : 314 exploitants 314 troupeaux -Troupeau : R, M, C = les 3 (aucune) 	Par attraction (attiré par les cellules disposant de plus de fourrage)	<ul style="list-style-type: none"> -CORMAS -mois -pas fixée

	<p>organique et de croissance de la population animale</p> <p>La végétation : des modèles de croissance de la biomasse</p>	<p>croissance de la population humaine</p> <p>-3 pour les besoins monétaires de l'exploitant</p> <p>-2 pour la pluviométrie</p>	<p>exploitation</p> <p>-lithosols, sols ferrugineux, sols hydro morphes, bas-fonds</p> <p>-forêt, culture, plantation, jachère, bâtie, parc d'animaux, point d'eau</p> <p>-herbacées, arborées et arbustives, les racines, les résidus de récoltes</p>	<p>P = globale</p>		
<p>Cambier, C., et al., 2005</p>	<p>SMA</p>	<p>-comprendre les modalités de l'utilisation du pâturage.</p> <p>-concevoir et formaliser un modèle de simulation multi-agent applicable à la divagation des troupeaux</p> <p>-pas explicite</p>	<p>-parcelles carrées de 20m de côtés d'environ 3km².</p> <p>-types de sols pas mentionnés</p> <p>-culture arachide, point d'abreuvement ou marre, lieu de parcage au piquet</p> <p>-végétation haute</p>	<p>-2 agents :</p> <p>Le leader= agent cognitif</p> <p>Reste du troupeau= agent réactif</p> <p>-pas mentionné</p> <p>-Le leader : R, M, P, C = les 4 (globale)</p> <p>-Troupeau : R, M, P, = les 3 (locale) C = aucune</p>	<p>-Cohésion</p> <p>-Séparation</p> <p>-Subordination au leader</p> <p>-Recherche de nourriture</p>	<p>-CORMAS</p> <p>-pas mentionné</p> <p>-pas mentionnée</p>

<p>Canal, R., et al., 1998</p>	<p>SMA génétiques= (SMA classique + algorithmes génétiques= techniques d'optimisation)</p> <p>-permet de créer une nouvelle génération d'agents qui seront considérés comme une meilleure solution au problème</p>	<p>-définir les caractéristiques de mémoire, communication et stratégie, des troupeaux les mieux adaptés à l'environnement sahélien.</p> <p>-pas explicite</p>	<p>-Une grille (pas de taille)</p> <p>-types de sols pas mentionnés</p> <p>-l'eau, le pâturage "moyen" et deux fourrages plus rares et une "ressource sociale", le village.</p> <p>-types de végétation pas explicités</p>	<p>-1 agent : « Pasteur-Troupeau » : agent cognitif</p> <p>- 20 troupeaux</p> <p>-« Pasteur- troupeau » : R, M, P, C= les 4 (globale)</p>	<p>Pasteur décide du déplacement du troupeau (choisit quel type de ressource l'animal doit consommer selon la disponibilité de la ressource)</p> <p>-les facteurs cohésion, subordination au leader, séparation,... n'ont pas été évoqués</p>	<p>-CORMAS</p> <p>-365 jours</p> <p>- 10 ans (= 10 itérations)</p>
------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------

<p>Baumont, R., <i>et al.</i>, 2002</p>	<p>SMA 3 sous-modèles ont été développés :</p> <ul style="list-style-type: none"> -végétation : simule la répartition et l'évolution de la végétation -animal : simule pour chaque animal du troupeau son comportement alimentaire : ingérer, boire, ruminer, se reposer -spatial : simule les déplacements des animaux à l'échelle de la parcelle 	<ul style="list-style-type: none"> -Représenter l'utilisation de la prairie son évolution. -Comprendre la relation animal- plante. -Simuler l'impact de différentes modalités -on fait varier la qualité du couvert végétal ... 	<ul style="list-style-type: none"> -0,1 mètre carré par cellule hexagone (nombre de cellules non mentionné) -un fichier « carte » aléatoire gère la répartition de la végétation -types de sols pas mentionné -un point d'eau, une aire de repos, des sites alimentaires pour l'animal -végétatif vert (graines et feuilles vertes), végétatif sec (graines et feuilles sèches) 	<ul style="list-style-type: none"> -1 agent Animal : agent cognitif -pas mentionné -Animal : R, M, P, C= les 4 (globale) 	<ul style="list-style-type: none"> -Utilisation de sa mémoire spatiale. -Non simulé : -cohésion (distance d'éloignement de l'animal au troupeau limitée) -leadership (l'animal peut prendre la capacité de changer de site de pâturage) 	<ul style="list-style-type: none"> -LINUX -pas mentionné -pas mentionnée
-----------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Bonnefoy, <i>et al.</i>, 2001</p>	<p>SMA</p>	<p>-décrire les interactions entre le parcours de troupeaux conduits par des bergers et une ressource forestière, -simuler l'usage de la forêt par une communauté de bergers chacun ayant un troupeau.</p> <p>2 scenarios distincts :</p> <p>-le « berger » fait paître son troupeau dès qu'il rencontre la ressource (l'agent n'a aucune représentation de la forêt)</p> <p>- les capacités de représentation de l'agent sont augmentées et il utilise sa mémoire pour pâturer</p>	<p>- 686 cellules regroupées en 11 bosquets -grille fermée 50*50 cases chacune possédant 8 voisins</p> <p>-types de sols pas mentionnés</p> <p>-savane, forêt, bosquet, village</p> <p>-types de végétations pas explicités</p>	<p>-1 agent : « Berger et troupeau » : agent cognitif</p> <p>- 40 « berger et troupeaux » de taille identique</p> <p>-« Berger et troupeau » : R, M, P, C : les 3 (locale)</p>	<p>Aléatoire : selon sa stratégie, son voisinage forestier et les décisions collectives.</p>	<p>-CORMAS</p> <p>-pas mentionné</p> <p>-pas mentionnée</p>
--------------------------------------	------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------

Chirat, G., 2010	SMA	<p>-représenter le comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours (approche troupeau-centrée)</p> <p>Simulation des effets : -taille du troupeau -leur positionnement au départ (parc de nuit par rapport au point d'eau)</p>	<p>-carte pixélisée : 315 unités de végétation (agrégats de cellules unitaires carrées)</p> <p>-types de sols pas mentionnés</p> <p>-parc de nuit, point d'eau,</p> <p>-plateau (forêt), glacis cultivé, bas-fonds (rizières), palmeraie.</p>	<p>-1 agent : Troupeau : agent cognitif</p> <p>-3 agents troupeau selon leur distance au point d'eau et leur taille : Petit troupeau (très proche) Grand troupeau (éloigné) Petit troupeau (distance extrême) : s'est trouvé invalidé deux fois plus souvent.</p> <p>-Troupeau : R, M, P : les 3 (globale) C : aucune</p>	<p>-Cohésion -attraction aux ressources (disposant de plus de fourrages) -préférence alimentaire</p>	<p>-CORMAS</p> <p>-5 minutes</p> <p>-pas fixée</p>
---------------------	-----	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------

Henane, I., et al., 2010	SMA Spatial : distingue 3 espaces (visible, accessible, mémorisé)	<p>- présenter un modèle du comportement de l'animal dans le système pastoral en tenant compte de la sélection de la nourriture et du comportement grégaire</p> <p>2 scénarios sans le berger :</p> <p>-l'agent troupeau pait en suivant l'animal leader</p> <p>-les animaux paissent individuellement sans aucune relation de subordination</p>	<p>900 cellules de 30 m*30 m</p> <p>-types de sols pas mentionné</p> <p>-plante, sol nu</p> <p>-pas d'aménagements</p> <p>-3 types de plantes avec niveaux de sélectivités différents</p>	<p>-3 agents :</p> <p>Berger : agent cognitif Leader animal : agent cognitif Reste du troupeau : agent réactif</p> <p>- 20 animaux</p> <p>-Berger : R, M, P, C : les 4 (globale)</p> <p>Leader animal : R, M, P, C : les 4 (globale)</p> <p>Reste du troupeau : P : (locale) R, M, C : les 3 (aucune)</p>	<p>-Cohésion -Séparation -Subordination au leader -Recherche de nourriture</p>	<p>-CORMAS</p> <p>- 3min</p> <p>-1 journée (= 240 itérations)</p>
-----------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------

<p>Mechoud, et al., 2000</p>	<p>SMA</p>	<p>-comprendre l'interaction entre l'évolution de la végétation, les déplacements et les actions des animaux en pâture. - simuler le fonctionnement de l'estive</p> <p>-le nombre de vaches et de chevaux par parcelle -les distances, par race, à partir de laquelle un animal ressent le besoin de s'éloigner ou de se rapprocher d'un de ses congénères.</p>	<p>Par cartographie GPS</p> <p>-types de sols pas mentionnés</p> <p>-points d'attractions (lieux de couchage, points d'eau)</p> <p>-facies (bois, zone humide), chemins arbustes et broussailles</p>	<p>-2 agents : vache : agent réactif cheval : agent réactif</p> <p>-le nombre d'agent est paramétrable</p> <p>-Vache : R, P, C : les 2 (locale) M : aucune</p> <p>Cheval : R, P, C : les 2 (locale) M : aucune</p>	<p>-Cohésion -Recherche de nourriture</p>	<p>-Java Virtuel Machine (à travers World Wide Web)</p> <p>-1 mois</p> <p>-pas mentionnée</p>
------------------------------	------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Dumont, B., Hill, D.R.C., 2001</p>	<p>SMA -le modèle est individu-centré</p>	<p>-modéliser le comportement spatial du mouton -évaluer l'efficacité de la recherche alimentaire en fonction des capacités des moutons (mémoire, attraction sociale) et de l'environnement -changement de l'attraction entre les animaux, surfaces de recherche, capacités de mémorisation</p>	<p>Carte de petites plaques carrées Entre 40x40m² et 240x240m² -types de sols pas mentionnés - deux types de sites : pauvre et riche en aliments (bols) -types de végétations pas mentionné</p>	<p>-1 agent : Troupeau (de brebis) : agent cognitif -4 groupes de 3 brebis -Troupeau : R, C, P : les 3 (globale) M : locale</p>	<p>-ciblage -attraction forte (lors de la pâture) -Recherche de nourriture (attraction faible)</p>	<p>-LINUX -1 min (analyse par tranches de 30min) -12 jours</p>
---------------------------------------	-----------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------