

Projet de fin d'étude, promo 1999

*Modélisation multi-agents pour l'aménagement
forestier :*

*Usages multiples dans l'écosystème forestier de Didy
(Madagascar)*

Géraldine ABRAMI

17 septembre 1999

Remerciements

Pour m'avoir, grâce à son esprit d'ouverture, permis d'effectuer ce stage, je remercie mon responsable Charles Kopp.

Je souhaite ensuite remercier l'ensemble de l'équipe SMA pour son accueil. Mes maîtres de stage, Didier Babin et Christophe Le Page tout d'abord, mais aussi François Bousquet, Martine Antona et Juliette Rouchier pour leur soutien et leurs conseils. Je remercie également, parmi les membres du département Forêts Naturelles, Hélène Joly, Alain Bertrand et Gilles Milles, pour l'intérêt qu'ils ont su porter à mon travail.

Enfin, mes remerciements s'adressent plus largement à tous ceux qui m'ont aidée, d'une manière ou d'une autre, de près ou de loin, tout au long (et particulièrement à la fin!) de ce stage.

Résumé

Le développement de nouvelles techniques d'aménagement forestier tenant compte de l'ensemble des ressources et des acteurs d'un territoire conduit les forestiers à rechercher de nouveaux outils d'aide à la décision et à la négociation.

Les systèmes multi-agents (SMA) permettent d'étudier un système complexe par la modélisation des interactions entre ses entités. Ils offrent ainsi la possibilité de construire un monde virtuel qui, parce qu'il donne un regard neuf sur les mécanismes qui le régissent, est un réservoir de questions posées au monde réel. Utilisés dans le cadre de la gestion des ressources renouvelables, les SMA sont donc des outils d'appui à la discussion, et par-là d'aide à la médiation.

Un modèle multi-agents a été construit sur le cas réel de la forêt de Didy à Madagascar. Une étude bibliographique des données de terrain a permis d'en cerner les principaux acteurs et leurs usages. Parmi ces usages, trois ont été retenus pour la modélisation : culture de riz sur brûlis par les résidents de la forêt, exploitations forestières venues de l'extérieur, et pâturage des troupeaux de zébus des chefs coutumiers.

Les simulations, bâties sur le croisement de quelques comportements extrêmes de ces acteurs, permettent d'illustrer l'originalité de ce travail, qui se situe dans la prise en compte d'acteurs et de leurs comportements dans un système spatialisé de dynamiques écologiques

Abstract

Development of new forestry management techniques which allow for the whole resources and actors in a territory bring foresters to seek new tools for decision and negotiation support.

Thank to multi-agent systems (MAS), a complex system can be studied by modelling its entities interactions : MAS enable the construction of a virtual world which, by inducing a different look on its mechanisms, is a generator of questions asked to the actual world. That's why they can be used in renewable resources management as tools for discussion support.

A multi-agent model has been built on the Didy forest of Madagascar actual case. A bibliographic study of field data has resulted in pointing out its major actors and their uses. Three of these uses have been modelled : forest residents rice cultivation on cleared and burned parcels, wood exploitations, and customary chiefs zebus herds pastures.

Simulations have been built on some actors extreme behaviours crossing, to illustrate this work originality : taking into account actors and their behaviour in a spatialized system of ecological dynamics.

Table des matières

I	Introduction	1
II	Thématiques et outils du stage	4
II.1	Le contexte forestier	5
II.1.1	L'aménagement forestier à usages multiples	5
II.1.2	Madagascar et la forêt de Didy	6
II.1.3	Du besoin créé en outils nouveaux de modélisation	7
II.2	Les systèmes multi-agents	8
II.2.1	Présentation générale	8
II.2.2	La modélisation multi-agents	11
II.3	Des modèles multi-agents pour la gestion des ressources renouvelables	14
II.3.1	Intérêt et modes d'utilisation des SMA : la modélisation d'accompagnement	14
II.3.2	CORMAS, une plate-forme de simulation multi-agents dédiée à la gestion des ressources renouvelables	15
III	La construction du modèle multi-agents	16
III.1	Description des usages présents dans la forêt de Didy	17
III.2	Le modèle de Didy	18
III.2.1	Les agents	19
III.2.2	L'environnement	29
III.2.3	Les interactions	33
III.2.4	L'organisation du modèle	33
III.3	Quelques aspects de l'implémentation	35
III.3.1	Organisation d'un modèle multi-agents implanté sur CORMAS	35
III.3.2	Aspects globaux : une implémentation pour une portée plus générale du modèle	36
III.3.3	Problèmes spécifiques liés aux algorithmes de recherche de cellules	37
IV	Les simulations	41
IV.1	Vers une méthode d'observation pertinente	42
IV.1.1	De la construction de variables de sortie	42
IV.1.2	De l'importance des outils d'exploitation et d'analyse des variables de sortie	43
IV.2	Mise en place d'un plan de simulation	43

IV.2.1	Influence de l'état initial	44
IV.2.2	Calibrage du modèle	44
IV.2.3	Le plan de simulation	46
IV.3	Discussion autour des simulations	47
IV.3.1	Expression des interactions entre villages et exploitants forestiers . .	47
IV.3.2	Les divers comportements des exploitants et les configurations spatiales	48
IV.3.3	Des deux types de comportement des villages	49
IV.4	Conclusion sur les simulations	50
V	Conclusion	52
	Bibliographie	57
	Annexes	58
A	Présentation de l'équipe d'accueil	i
B	Localisation du terrain modélisé	ii
C	Diagrammes d'action et équations des villages	iii
D	Diagrammes d'action des exploitations	vii
E	Diagrammes d'état des paramètres spatiaux	x
F	Paramètres spatiaux et faciès	xiii
G	Les paramètres variables du modèle	xiv

Table des figures

1	Représentation de l'activation d'un agent dans un SMA (d'après [18])	11
2	Diagramme global de l'activité d'un village à chaque pas de temps	20
3	Diagramme global de l'activité liée aux exploitations à chaque pas de temps	24
4	Apparence du paysage des faciès dans le modèle et répartition de l'intérêt pour l'exploitation forestière à l'initialisation	34
5	Interface d'initialisation des comportements des entités de Didy	35
6	Les flèches des diagrammes de classe	37
7	Diagramme des classes spatiales de Didy	38
8	Diagramme des classes sociales de Didy	38
9	Courbes montrant l'évolution de la population d'un village ayant une poli- tique d'extension sur 200 ans	45
10	Diagramme d'état de la population dans le cas d'un village en extension . .	46
11	Etat de l'espace après une centaine de pas de simulation	48
12	Comparaison entre villages en extension (en haut) et villages en migration (en bas)	50
C.1	Modélisation du choix des tavys par les villages	iv
C.2	Modélisation de l'ajustement du seuil de satisfaction des paysans	v
D.1	Diagramme général du déroulement d'une phase de recherche d'exploitations	viii
D.2	Algorithme de recherche d'un lot par un exploitant	ix
E.1	Diagramme d'état de l'état de la végétation	x
E.2	Diagramme d'état de l'état de la fertilité	xi
E.3	Diagramme d'état de l'intérêt pour l'exploitation forestière	xii

Première partie

Introduction

Construire des plans pour la gestion à long terme d'une forêt amène à s'intéresser à des systèmes hautement complexes où dynamiques écologiques et sociales sont intimement mêlées, et d'autant plus complexes quand ces plans ont l'ambition de prendre en compte la multiplicité des usages des ressources présentes dans la forêt. Le développement de modèles informatiques prenant en compte ces différents usages dans le cadre de la recherche de nouvelles méthodes de gestion, s'il ne prétend pas prédire la solution optimale, a pour but, dans une optique d'aide à la négociation, d'apporter un regard alternatif sur ce qui pourrait être.

En effet, la modélisation d'un système vivant doit permettre d'en mieux comprendre ou d'en discuter le comportement en en construisant une image partielle simplifiée et formalisée. Or un système vivant peut toujours être compris comme un ensemble d'entités en interaction que l'on connaît avec un niveau de précision variable. Une telle vision permet de construire des modèles par une approche dite "bottom-up" : le système est décomposé en briques élémentaires qu'il ne reste plus qu'à relier pour remonter au système global.

Dans le cas d'écosystèmes ou de sociétés humaines, cette approche semble naturelle, puisqu'on a affaire à des systèmes d'individus, mais difficilement abordable par une approche classique tant il paraît incongru de poser des équations sur des entités possédant une capacité de décision propre. C'est pourquoi les systèmes multi-agents (SMA) semblent tout particulièrement adaptés : ils permettent d'identifier chacune des composantes du système à un agent informatique autonome possédant ses propres paramètres et ses propres règles de comportements. On peut ainsi s'affranchir des problèmes mathématiques posés par la non-linéarité ou l'intervariabilité des composantes mais aussi intégrer aisément et étudier l'influence de variables non chiffrées.

Ce sont ces possibilités que l'équipe de recherche en SMA du CIRAD-TERA cherche à appliquer aux systèmes vivants complexes que sont les espaces exploités par l'homme, et que le programme Forêts Naturelles du CIRAD-Forêt a voulu explorer dans le cadre de la gestion d'écosystèmes forestiers. Ainsi, ce travail, basé sur le cas de la forêt de Didy à Madagascar, pose les jalons d'un projet ambitieux qui doit aboutir au développement d'un logiciel de modélisation d'aménagement forestier prenant en compte l'ensemble des acteurs du système. Il doit répondre à trois objectifs :

- modéliser quelques grandes dynamiques naturelles et sociales de la forêt de Didy en étudiant les acteurs majeurs et leurs usages principaux, leur impact ponctuel sur l'écosystème, ainsi que les grandes lignes de processus biologiques tels que régénération de la flore ou appauvrissement des sols.
- à partir de là, donner à ces acteurs un jeu de comportements et identifier pour chacun un indicateur de satisfaction pertinent afin de mesurer leur influence.
- enfin effectuer une série de simulations croisant ces comportements afin de donner aux thématiciens une illustration des capacités de la méthode et de leur permettre d'effectuer une première évaluation des possibilités d'utilisation de systèmes multi-agents en aménagement forestier.

La démarche adoptée est une démarche exploratoire : il s'agit d'analyser un écosystème par

l'angle de vue des ressources qu'il contient et des comportements des acteurs qui prélèvent ces ressources et de commencer à mettre en place un outil qui devra permettre de mettre en oeuvre cette exploration en générant des simulations qui seront autant d'études de cas et de questions posées à l'analyse.

Après cette introduction, le mémoire exposera tout d'abord la thématique forestière qui lui a donné naissance, puis présentera l'outil choisi pour aborder certains des problèmes soulevés par cette thématique, la modélisation multi-agents, et enfin décrira l'usage qui peut être fait de ce type d'outil dans le domaine de la gestion des ressources renouvelable.

Dans la partie suivante sera exposé le modèle réalisé de la forêt de Didy : après avoir décrit l'ensemble des usages présents sur le terrain, la mise en place des hypothèses de modélisation sera présentée du point de vue des agents (les entités modélisées), de l'environnement (l'espace et le temps), des interactions (entre les agents) et de l'organisation globale (la synchronisation des agents). Pour finir, seront détaillés les aspects informatiques liés à l'implémentation de ces hypothèses.

Enfin la dernière partie s'intéressera à la phase de simulation de ce modèle, en dissertant tout d'abord sur l'observation des résultats, puis sur la méthodologie employée lors de la mise en place du plan de simulation. Une discussion autour de quelques résultats de ces simulations clora cette partie, en abordant principalement l'influence primordiale de la configuration de l'espace ainsi que la manière dont les simulations permettent de remonter aux hypothèses du modèle.

L'ensemble de ce travail s'est effectuée à partir de la plate-forme de simulation multi-agents développée par le CIRAD, appelée *CORMAS*, et dans le langage de programmation *Smalltalk*.

Deuxième partie

Thématiques et outils du stage

Cette partie présente tout d'abord la thématique forestière qui justifie ce travail, puis l'outil choisi pour répondre aux problèmes posés par la thématique, la modélisation multi-agents, pour finir sur une présentation plus précise de l'utilisation de cet outil dans le cadre de l'étude de l'interface écosystèmes - sociétés et de la gestion des ressources renouvelables

II.1 Le contexte forestier

Après avoir présenté le concept d'aménagement forestier à usages multiples, cette section décrit plus particulièrement le cas de la forêt malgache de Didy, support de terrain de ce stage, et enfin explique comment les systèmes multi-agents, par la modélisation simultanée de l'écosystème forestier et des acteurs qui y sont impliqués peuvent être des outils permettant d'aider à répondre aux problèmes posés par ce type d'aménagement.

II.1.1 L'aménagement forestier à usages multiples

L'aménagement forestier¹ des forêts tropicales se doit aujourd'hui de prendre en compte la multiplicité des acteurs d'une forêt et des ressources qu'ils exploitent.

En effet, les politiques d'aménagement ont trop longtemps été centralisées et dirigées. Or cette situation, où le pouvoir central d'administration forestière veut gérer par le contrôle total des ressources, est souvent paradoxalement à l'origine de ce qu'on appelle la *tragédie des communs*² : les ressources sont interdites d'accès mais le contrôle de cet accès est inefficace, si bien que les acteurs tels que les communautés locales, se sachant en situation précaire face à un éventuel retour de l'administration, exploitent la ressource de manière inconsidérée, sans chercher à adopter une vision à moyen ou court terme. [2]

De plus, de telles considérations d'aménagement ne prennent trop souvent en compte qu'un seul type de ressource, dont la gestion est guidée par la notion de *rendement soutenu*, i.e. la maximisation des fonctions de production de cette ressource (le bois d'oeuvre) et de protection de l'environnement, oubliant les multiples pratiques locales et les présentant

1. On retiendra deux définitions du terme "aménagement forestier" :

- Branche de la foresterie qui s'intéresse aux sciences et techniques forestières dans leurs rapports avec les principes d'ordre administratif, législatif, économique et social de la gestion des forêts.
- Application pratique des théories de cette branche à l'administration d'une forêt et la conduite des exploitations et travaux à y exécuter en vue d'objectifs à atteindre [7]

2. On parle de tragédie des communs lorsqu'une ressource est exploitée en accès libre par différents acteurs qui cherchent à maximiser leur gain et créent ainsi une situation qui aboutit à l'épuisement de la ressource

même comme la source la plus probable de dégradation du milieu. Cependant, des exemples montrent que ces pratiques peuvent participer à la fois à la mise en valeur et à la protection de la forêt et au développement économique des communautés concernées. [6]

Les états africains n'ayant plus les moyens de mener des politiques dirigistes, l'idée d'une gestion impliquant acteurs locaux et usages multiples dans une perspective d'aménagement du territoire prend peu à peu forme. Depuis le début des années 90, se développent des expériences de foresterie communautaire³ qui font que, de plus en plus, l'aménagement forestier n'est plus guidé par des notions telles que le rendement soutenu, mais par la prise en compte de la pluralité des acteurs sociaux concernés par la gestion de la forêt, de la diversité des ressources qu'ils en tirent, ainsi que du poids des autorités locales et coutumières établies [7]. On parle d'aménagement forestier à usage multiple, et c'est sur cette politique nouvelle d'aménagement que le programme *Forêts Naturelles* du CIRAD-Forêt mène certaines de ses recherches exploratoires. L'implantation réussie de marchés ruraux de bois de feu au Niger et au Mali en est un exemple, le projet de zonage de l'espace forestier gabonais en massifs dévolus à différents objectifs (exploitation commerciale, usages communautaires, écotourisme) en est un autre, l'aménagement des forêts malgaches dans un contexte tout particulier décrit au paragraphe suivant en est un troisième.

II.1.2 Madagascar et la forêt de Didy

Madagascar, où le gouvernement s'est fortement impliqué dans le courant de désengagement de l'état vis à vis de la gestion des ressources naturelles, est un lieu particulièrement favorable à ces travaux. En effet, une loi concernant la gestion locale sécurisée, appelée GELOSE a été votée en 1996. C'est un programme à l'échelle du pays qui repose sur le transfert de responsabilité de l'état vers les communautés locales par l'allocation de contrats de gestion de leur forêt. GELOSE donne donc un cadre légal pour une gestion viable à long terme des ressources renouvelables par les communautés locales et les communes. [2]

Le Cirad a mené ces dernières années de nombreuses études de terrain sur la forêt classée d'Ambolihero, et y a aussi initié les premières négociations sur l'éventualité d'un contrat GELOSE. Cette forêt de la commune rurale de Didy (on s'y référera comme à la forêt de Didy dans la suite de ce document) à l'est de Madagascar (cf. annexe B) représente un cas d'école des problèmes posés par ce nouveau type d'aménagement forestier.

Il réside dans cette région, désenclavée par la réouverture d'une piste depuis 1993 seulement, une communauté à hiérarchie coutumière dont l'autorité reste réelle et respectée. Le désenclavement récent a provoqué l'ouverture du marché et arrivée de migrants dans un terroir jusqu'alors préservé, et sur lequel des pratiques ancestrales telles que la culture sur

-
3. La FAO (Food and Agriculture Organisation de l'ONU) définit la foresterie communautaire par :
- soutenir le contrôle, la gestion et l'utilisation de la forêt et des ressources forestières par les communautés locales
 - explorer les relations sociales, économiques et culturelles entre les hommes et la forêt
 - adopter une approche décentralisée de la forêt qui reconnaît que les meilleurs régisseurs de la forêt sont ceux qui y vivent
 - créer un partenariat entre les communautés, les services forestiers et les autres parties dans un travail commun pour la gestion soutenable de la forêt et le développement rural [7]

brûlis continuent à se développer. C'est donc un terrain propice à une dégradation rapide des ressources renouvelables si n'y est pratiqué un aménagement de type multi-usages raisonné.

La forêt de Didy est divisée en territoires coutumiers, les *kijanas* consacrés au pâturage, à la cueillette et à la culture sur brûlis. Le droit coutumier accorde aux chefs de *kijana* et aux communautés ayant conclu des pactes avec ceux-ci le monopole de la collecte des multiples produits de la forêt, au nombre desquels figurent également, et avec une importance économique grandissante, récolte de miel et pêche à l'anguille, alors qu'exploitations forestières et minières munies de permis officiels s'y multiplient.

Compte tenu de tous ces éléments, l'élaboration du plan d'aménagement de ce territoire sera un travail particulièrement complexe et devra être le fruit de la négociation entre les différents acteurs concernés : chefs coutumiers, résidents de la forêt, exploitants miniers et forestiers, autorités administratives...[7]

II.1.3 Du besoin créé en outils nouveaux de modélisation

Alors que l'aménagement forestier classique axé sur un objectif unique de rendement soutenu n'a à étudier que quelques facteurs écologiques comme le diamètre de coupe du bois, l'aménagement forestier à usages multiples se trouve confronté à la prise en compte de facteurs aussi bien écologiques qu'économiques et sociaux et donc difficilement quantifiables. Les forestiers ont donc besoin d'outils leur permettant d'appréhender le monde sous des angles nouveaux et de créer des axes de discussion.

Il ne s'agit plus d'étudier dans un premier temps, de décider dans un second, puis de faire appliquer mais plutôt de diagnostiquer les potentialités de la forêt pour les divers usages envisagés avec et pour les toutes les parties prenantes afin de créer un plan d'aménagement fruit de leur négociation. Pour résoudre ces problèmes de gestion d'objectifs multiples et souvent conflictuels, le besoin ne situe donc pas tant au niveau d'un outil de prévision, qui de toute façon serait incapable de prendre en compte la variété des facteurs entrant en jeu, mais au niveau de méthodes permettant de faciliter la coordination des différents acteurs dans un processus de discussion et de prise de décision collective.

Or, si la littérature fournit de nombreux exemples d'utilisation poussée de données écologiques et spatiales dans le domaine de la foresterie (modèle spatial de repeuplement forestier [20]), modèles d'évolution de paysages ([14] [1] [23]), systèmes experts de gestion de données associés à des SIG⁴ ([36]), on y trouve par contre peu de projets où l'on cherche à inclure des facteurs humains et donc qualitatifs (un exemple intéressant est une plate-forme de simulation en logique floue pour la modélisation qualitative de systèmes de ressources naturelles [29]), et aucun incluant des systèmes multi-agents. Les deux types de méthodes sont d'ailleurs loin d'être incompatibles, et l'étude du couplage de ces deux types de modèles, quantitatifs et qualitatifs, ne pourrait qu'enrichir encore la discussion entre spécialistes des différentes disciplines impliquées.

Les systèmes multi-agents, tels que les étudie le CIRAD-TERA, permettent de bâtir

4. Système d'Information Géographique : outil couramment utilisés dans la gestion de ressources naturelle. Les SIG sont en fait des bases de données géographiques où les informations sont associées à un système de représentation spatiale, organisées en "couches" (données topologiques, données hydrométriques, emplacement d'exploitations...). De nombreuses recherches sont d'ailleurs menées sur le couplage de SIG, qui sont des systèmes extrêmement précis mais statiques, à des systèmes de modélisation

à partir d'une étude de terrain un monde artificiel aux hypothèses simplifiées qui, même s'il ne reconstruit pas la réalité, amène un regard nouveau sur les mécanismes qu'il met en jeu et crée une base solide de discussion entre les parties concernées (cet aspect sera approfondi dans la partie II.3).

Ce n'est donc pas tant les résultats de simulation qui sont importants que les hypothèses mises dans le modèle et qui sont la base de ces discussions. Ce type de modèle est d'autant plus intéressant qu'il permet, comme nous allons le voir dans la partie II.2, d'intégrer à la fois des dynamiques spatiales et sociales et donc par exemple de représenter des dynamiques créées par des superpositions d'usages sur un même espace. Or l'aménagement forestier à usage multiple, qui veut englober à la fois des problèmes économiques, sociaux et écologiques, se doit de faire collaborer des spécialistes des différentes disciplines intervenant, spécialistes ayant chacun leur regard sur le monde, et donc des priorités différentes. C'est pourquoi les SMA, en posant des questions concrètes aux théories issues de chacun de ces domaines sont aussi un outil de conciliation et de rassemblement pour une recherche interdisciplinaire et semble particulièrement adaptés aux problèmes posés par l'aménagement forestier à usage multiple.

Ce travail de modélisation devra tenter, dans un but exploratoire, de prendre en compte une partie au moins des acteurs et des usages de la forêt de Didy (nous y reviendrons plus en détail dans la partie III.2, consacrée à la mise en place des hypothèses du modèle) et de montrer ainsi comment les SMA pourraient permettre de guider les discussions dans une approche négociée d'un nouvel aménagement forestier.

II.2 Les systèmes multi-agents

Cette section présente l'outil de modélisation utilisé durant ce stage. Elle expose tout d'abord les systèmes multi-agents en général puis discute de la modélisation multi-agents en particulier.

II.2.1 Présentation générale

Les systèmes multi-agents (SMA) constituent une classe d'outils informatiques apparus dans les années 80 et issus de l'intelligence artificielle distribuée (IAD)⁵. Les SMA, définis comme des sociétés d'agents informatiques en interaction, enrichissent le domaine de l'intelligence artificielle en suggérant l'usage de métaphores sociologiques ayant trait aux notions de coopération, de négociation, de groupe ou d'équipe, etc., ou biologiques ayant trait aux notions d'auto-organisation, d'intelligence en essaim, etc. [16]

II.2.1.1 Quelques définitions

Ces définitions, qui illustrent les principales propriétés des SMA sont données dans le but d'offrir un aperçu des possibilités offertes par cet outil.

– **Agent informatique :**

5. L'IAD, qui comprend notamment les systèmes multi-experts, a pour but de résoudre des problèmes en faisant collaborer de manière parallèle des programmes informatiques ayant leurs compétences propres.

Un agent est défini comme une entité informatique autonome capable de communiquer avec d'autres agents, de percevoir partiellement au moins son environnement⁶ et les objets qui y sont situés, et d'avoir des représentations justes ou erronées sur les comportements d'une partie ou de l'ensemble des autres agents de l'environnement. Ces facultés de représentations et d'interprétation peuvent être plus ou moins développées. [3]

– **Emergence :**

Apparition dans un système multi-agents d'une dynamique collective stable qu'aucun agent n'est capable de penser. La fourmilière est l'image la plus immédiate de l'émergence : alors que l'individu fourmi réagit à peu près mécaniquement aux stimuli extérieurs, par le biais des interactions entre ses membres, la colonie de fourmi est capable d'adopter un comportement extrêmement complexe et adaptatif. [16]

L'étude de l'émergence constitue une branche importante des SMA, car au-delà de son intérêt mathématique, elle est un outil de résolution de problèmes (la solution du problème émerge des interactions entre agents), d'optimisation notamment, avec une grande économie de moyen. Elle est également utilisée en simulation dans le domaine de la mécanique des fluides par exemple (des profils de flux émergent d'interactions simples des agents-particules de fluides entre eux et avec le support de flux).

– **Agents cognitifs / agents réactifs :**

On peut distinguer deux grandes classes d'agents :

- les agents réactifs, qui ne possèdent pas de représentation interne de leur environnement et ne peuvent donc pas anticiper et se préparer aux événements futurs. Ils sont mus par de simples principes d'action / réaction. Les systèmes fortement émergents sont en général des sociétés d'agents réactifs.
- les agents cognitifs sont dotés de capacités d'analyse, de représentation et de traitement de l'information qui leur permettent d'anticiper, d'exécuter des plans, de définir des stratégies...

Si les agents cognitifs résolvent les problèmes de manière réfléchie et sans redondance, les agents réactifs sont par contre plus souples⁷. Cependant cette distinction est floue puisqu'un agent possédant seuls quelques paramètres de son environnement en mémoire lui permettant de s'adapter est déjà un peu cognitif. On verra par la suite comment certains des agents mis en place dans notre modèle se sont peu à peu complexifiés pour passer d'une réactivité pure à un début de cognition.

– **Interactions :**

Les interactions constituent le nerf central des SMA. On qualifie d'ailleurs les SMA

6. L'environnement d'un agent est par définition tout ce qui est extérieur à l'agent : l'espace dans lequel il évolue ainsi que les autres agents du système. L'espace peut être un support physique (agents web, robotique distribuée), ou virtuel et dans ce cas purement conceptuel (espace de solutions dans le cas de la résolution de problème) ou à l'image de l'espace physique (modélisation de systèmes spatialisés) ou tout simplement ne pas être (systèmes experts, agents purement communicant pour l'étude de problèmes de négociation...)

7. Les réseaux de neurones peuvent être vus comme des cas extrêmes de sociétés d'agents réactifs puisque si chaque neurone est considéré comme un agent son principe d'action réaction se borne à une simple fonction de transfert, et en effet les réseaux de neurones sont des systèmes extrêmement adaptatifs et hautement émergents!

de systèmes interactionnistes puisque leur dynamique émerge de la somme des interactions entre leurs composantes. Ainsi les SMA ne se pensent pas en terme de fonctions d'entrée / sortie ou d'évolution mais en terme de mise en place d'interactions. Par exemple il n'existe pas de fonction d'évolution de la fertilité des champs des paysans dans notre modèle, cette évolution résulte de l'action des paysans sur l'espace, de la réponse de l'espace à cette action et du comportement des paysans qui en résulte.

Ces interactions sont principalement de deux types : communications directes entre agents ou bien véhiculées par l'environnement. Dans ce dernier cas, les actions d'un agent modifient l'environnement qui est alors perçu par d'autres agents, ou par le même agent au pas de temps suivant, d'où l'interaction.

Nous verrons par la suite que ce type d'interaction est quasiment le seul présent dans le modèle de la forêt de Didy, puisqu'il est particulièrement pertinent pour modéliser des problèmes d'accès à des ressources communes, et que ces interactions se situent essentiellement dans le temps. Des interactions directes seraient plutôt à mettre en place dans des processus de gestion de conflits ou de négociation, qui n'ont pas été abordés dans ce premier travail.

Ce travail qui est une utilisation particulière des SMA ne fait pas intervenir toutes ces notions : les agents du modèle sont trop peu nombreux pour qu'on puisse véritablement parler d'émergence et leur cognitivité est très limitée. Cependant les interactions avec leur environnement génèrent des dynamiques d'un niveau supérieur aux règles qu'ils intègrent...

II.2.1.2 Fonctionnement d'un SMA

En résumé, un SMA est un système composé éventuellement d'un espace, d'un ensemble d'objets situés dans cet espace parmi lesquels certains, les agents, sont actifs, d'un ensemble de relations entre les objets, d'un ensemble d'opérations par lesquelles les agents traitent les objets et des opérateurs chargés de l'application de ces opérations et de l'évolution du système suite à ces opérations. [18]

A chaque pas de temps, les différents agents du système rafraîchissent leurs perceptions, représentations, communications et traitent cette information en fonction de leurs objectifs ou de leurs motivations. Ils déclenchent alors une ou plusieurs de leurs méthodes ainsi sélectionnées et / ou paramétrées afin de réagir sur leur environnement, entraînant de nouveaux actes de perception . C'est ainsi que le système d'interaction / réaction, qui permet l'émergence se met en place suivant un cycle représenté fig. 1 .

L'importance des interactions portées par l'environnement fait que la synchronisation / coordination des agents est cruciale dans la construction d'un système et qu'il faudra faire bien attention à respecter le parallélisme des agents si on ne veut pas fausser le système.

Les principaux domaines d'application des SMA sont : la résolution de problème, la robotique distribuée, la gestion de réseaux de télécommunication, la construction de mondes artificiels et la simulation multi-agents. L'outil utilisé durant ce stage ne constitue ainsi qu'un cas particulier d'application des SMA qui est leur utilisation à des fins d'exploration de systèmes complexes dont on modélise les constituants grâce à des agents.

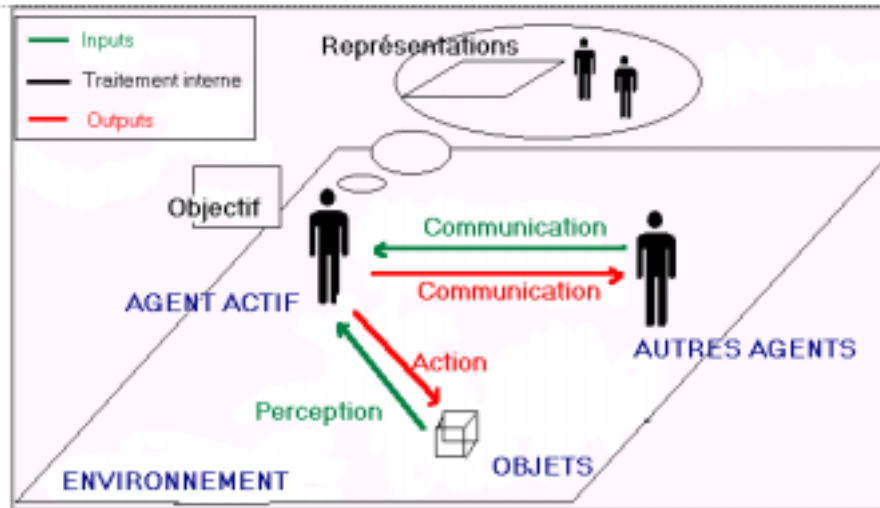


FIG. 1 – Représentation de l'activation d'un agent dans un SMA (d'après [18])

II.2.2 La modélisation multi-agents

II.2.2.1 Quelques mots sur la modélisation de systèmes complexes

On qualifie un système de complexe dès lors que sa dynamique est régie par plusieurs types d'interaction [28]. Ainsi la notion de système complexe n'appartient pas seulement au domaine de la physique mais aussi au domaine de la biologie, de l'économie, des sciences environnementales, des sciences sociales... Or, dans chacun de ces domaines, l'étude des systèmes complexes fait appel à la modélisation.

Un modèle est par définition une formalisation simplifiée d'un système qui représente de manière compacte l'ensemble des connaissances, des faits et des hypothèses issus de l'étude du système. Un modèle permet de décrire rigoureusement un système mais peut aussi permettre de prévoir son évolution ou la conséquence de modifications sur celui-ci (modèles prédictifs), ou tout simplement permettre d'expliquer ce qui se passe dans celui-ci (modèles interprétatifs), ce qui est nous le verrons l'utilisation la plus courante des modèles multi-agents dans les sciences sociales ou environnementales.[34]

On distingue les modèles physiques (maquettes), analogiques (identification d'un système à un autre), qualitatifs (verbaux) et mathématiques. Or les modèles mathématiques puisqu'ils reposent sur des équations sont classiquement les seuls à pouvoir être informatisés.

Dans le cas de systèmes complexes, et notamment de systèmes vivants, la distribution d'interactions fortes tout au travers du système fait qu'il devient très vite extrêmement difficile d'isoler des composantes et d'en tirer des équations (la recherche d'équations décrivant un système où plus de trois éléments interagissent devient très vite un travail plus que fastidieux!). Quand en plus des facteurs humains et donc qualitatifs interviennent, la modélisation mathématique a clairement trouvé ses limites. [21]

On voit donc que la modélisation informatique classique est difficilement applicable à des domaines tels que les sciences sociales ou même environnementales dès lors que l'on s'intéresse d'un peu trop près aux influences anthropiques et se noie très vite dans

les interactions multiples. La modélisation multi-agents, parce qu'elle utilise une approche distribuée résolument différente de l'approche synthétique nécessaire à la mise en équation, permet d'apporter une réponse inédite à ces problèmes. [30]

II.2.2.2 La modélisation multi-agents, généralités

Dans le modèle multi-agents d'un système, les agents sont les éléments du système qu'on choisit comme entités de plus bas niveau de ce système.

La modélisation multi-agents devient pertinente dès lors que l'on peut décrire un système comme un ensemble d'entités en interaction dans un environnement. Elle peut s'appliquer à de nombreux domaines des sciences : en physique, les agents peuvent être des molécules ou des "particules" de fluide ([31] [9] [35]); en éthologie⁸, les agents peuvent être des insectes sociaux qui s'auto-organisent[16]; en écologie, les agents peuvent être des animaux pris dans leur individualité et reproduire les équations de dynamique des population([30]), ou bien des organismes zoo-planctoniques [33] ; en économie, ils peuvent être des agents économiques qui échangent des biens à travers un marché [17]; en sociologie, ils peuvent être des individus qui coopèrent ou ne coopèrent pas et / ou négocient et reproduisent ainsi un ordre social [27] [19]

Dans tous les cas elle permet de réaliser un couplage entre des modèles individuels des entités et des modèles globaux des populations de ces entités incluant des phénomènes tels que l'hétérogénéité spatiale ou la variabilité interindividuelle, que les méthodes mathématiques classiques ne peuvent prendre en compte. De plus, les SMA permettent de réaliser facilement des modèles interdisciplinaires, puisque les théories sont incluses dans le comportement individuel des agents. C'est aussi pourquoi ils représentent un outil extrêmement prometteur dans le champ de la gestion des ressources renouvelables où l'on se situe à l'interface entre écologie, sociologie et économie (cf. II.3)

II.2.2.3 Des avantages (et des inconvénients) de la modélisation multi-agents

La modélisation multi-agents⁹, qui décrit un système par la somme de ses composantes a donc sur une approche mathématique, qui s'efforcent de décrire un phénomène de manière globale par la recherche de ses équations de fonctionnement (approche "externe"), le premier avantage de placer explicitement les interactions entre éléments du système au centre de sa démarche : les équations de fonctionnement doivent émerger des résultats des simulations. Ajouté au fait que les modèles multi-agents intègrent indistinctement paramètres numériques et qualitatifs, cela permet notamment, dans le cas de la modélisation d'écosystèmes, de transférer plus directement les données de terrain en règles de comportement. De plus cela offre une voie alternative à la voie statistique pour passer du niveau individuel au niveau global et permet ainsi d'inclure dans les modèles des variables telles que l'hétérogénéité.

L'aspect éventuellement spatialisé des SMA permet, sans résoudre les problèmes d'effets de bord, de s'affranchir du grand écueil de la modélisation mathématique que sont les conditions aux limites dès que les frontières du système deviennent irrégulières. En effet les agents ne voient la frontière que localement, et y réagissent individuellement quand ils la touchent : le problème aux limites est résolu par leurs interactions.

8. Science de l'étude du comportement des espèces animales dans leur milieu naturel

9. Les physiciens parlent de *modèles micro-analytiques*, les biologistes de *simulations individu-centrées*

Ainsi, la modélisation multi-agents amène à s'intéresser aux modes d'organisation des objets au moins autant qu'aux objets eux-mêmes et à considérer ces modes d'organisation à différents niveaux. Elle offre donc un regard nouveau sur les systèmes modélisés et permet de s'affranchir des problèmes d'étanchéité de niveaux d'analyse posés par la simulation numérique en offrant la possibilité de relier des comportements à plusieurs échelles.

La modélisation multi-agents présente cependant aussi des inconvénients. Le premier est le coût informatique élevé que génère le traitement des actions de toute une population d'agents, bien que ce coût puisse être notablement réduit par l'utilisation du calcul parallèle.

Le second, et non le moindre, est qu'il est très facile d'inclure tant de paramètres dans son modèle multi-agents (chaque type d'agent a ses propres paramètres!) qu'une exploration sérieuse, même partielle, de l'espace de ces paramètres devient irréalisable. Il est donc extrêmement difficile de réaliser des études de sensibilité sur des modèles multi-agents.

Troisièmement, un modèle multi-agents, précisément parce qu'il est construit sur l'intégration d'interactions, peut avoir capturé tant de complexité du monde réel qu'il peut être aussi difficile à comprendre que celui-ci.

Enfin, les SMA sont des systèmes émergents et peuvent donc être très sensibles, si bien que des dynamiques globales peuvent être de simples artefacts issus de détails de programmation. [22]

On voit donc que, peut-être plus encore qu'avec d'autres types de modèles, il faut être très rigoureux lors de la construction d'un modèle multi-agents et qu'il vaut mieux partir de mondes extrêmement simplifiées que l'on complexifiera peu à peu. On parle d'approche minimaliste ou de principe de parcimonie.

En résumé, les SMA permettent la construction incrémentale de maquettes informatiques : le modèle constitue une sorte de laboratoire virtuel où la simulation participe au processus de recherche... Ils ont donc les multiples avantages de l'intégration aisée de variables de types différents, de modifications et de nouveaux éléments, ainsi que de l'émergence qui permet de créer le macroscopique à partir du microscopique

La construction de mondes artificiels peut apparaître comme une forme de modélisation interprétative en ce que le chercheur ne cherche non plus à reproduire la réalité mais à en comprendre les rouages en créant des *situations - jouets* : le monde de la simulation est un monde extrêmement simplifié, voire imaginaire, qui permet de tester de manière idéale les mécanismes mis en oeuvre dans une situation donnée et leur influence sur cette situation. [18]

C'est plutôt dans cet esprit-là que sont construits les modèles appliqués en science sociale et dans lequel travaille l'équipe SMA du CIRAD (cf. chap. II.3.1). C'est également dans cette optique là qu'il faudra comprendre le modèle présenté dans ce rapport.

II.3 Des modèles multi-agents pour la gestion des ressources renouvelables

La gestion des ressources renouvelables est un domaine des sciences environnementales où les problèmes rencontrés se concentrent souvent sur l'articulation entre les dynamiques écologiques, celles des ressources, et sociales, celles des acteurs impliqués dans le prélèvement de ces ressources, dans des systèmes complexes, les territoires exploités par l'homme, où n'interviennent pas que des phénomènes quantifiables et où l'environnement est extrêmement changeant et diversifié. C'est pourquoi la recherche en outils de modélisation venant supporter la prise de décision dans ce domaine s'est orientée au CIRAD-TERA vers l'utilisation de SMA.

II.3.1 Intérêt et modes d'utilisation des SMA : la modélisation d'accompagnement

En effet, de tels systèmes sont très difficiles à analyser en raison du manque de connaissance concernant aussi bien la distribution des ressources et leur dynamique de renouvellement ou les divers comportements des usagers vis à vis de celles-ci et l'impact de ces comportements sur leur dynamique ou bien les modes d'interaction entre les usagers.

Des modèles mathématiques de bioéconomie permettent de s'intéresser à un type de ressource dans un environnement stable, de construire des systèmes d'équations paramétrées par des données de terrain et traduisant les dynamiques économiques et écologiques de cette ressource, puis de rechercher les solutions pour par exemple un rendement économique maximal de la ressource.

Mais si l'on veut considérer toute la complexité du système dans les nombreuses interactions socio-économiques qu'il comporte, de tels modèles de décision se révèlent vite insuffisants, sinon illusoire. Les modèles multi-agents, s'ils n'ont pas la prétention de représenter le système dans sa réalité, peuvent apporter une solution alternative en offrant de construire et de tester des théories par la simulation de scénarios intégrant dynamiques sociales et écologiques. [11]

Lors d'une expérience de simulation multi-agents, à partir d'une situation initiale donnée, tous les agents évoluent selon leurs règles à chaque pas de temps, si bien que leurs actions concomitantes conduisent à l'évolution de leur milieu. C'est en faisant varier les règles de ces agents, ou bien leur état initial, qu'on évalue l'importance des paramètres de ses hypothèses et qu'on parvient à mieux comprendre le système que l'on modélise. [10]

Ainsi, le but de telles expériences n'est pas de représenter fidèlement le système étudié mais de construire et de tester les théories que l'on y met en hypothèse. Même si la problématique est très simplifiée par rapport au monde réel, les dynamiques peuvent être explorées sur le long terme et dans des conditions extrêmes, ce qui peut être d'une grande aide pour l'interprétation de comportements réels. [24]

Un tel modèle doit être considéré non pas comme un modèle prédictif, ni même descriptif, mais, dans une approche cognitive, comme un outil d'exploration du monde qui est là pour enrichir les discussions et s'enrichir de ces discussions : en mettant en scène les différents acteurs concernés par la gestion des ressources étudiées, le modèle peut permettre de guider des discussions sur les connections des causes et des effets et donc d'accompagner des processus sociaux de prise de décision. On parle de modélisation d'accompagnement.

[11]

Il faut pour cela inventer des méthodes de restitution permettant de traduire de manière simple les hypothèses des simulations et d'obtenir un impact direct sur les acteurs locaux. De telles expériences ont été menées avec succès pour la gestion de périmètres irrigués au Sénégal [5] [4] et l'étude de zones de mobilité pastorales au Sahel [11] avec l'utilisation de jeux de rôles ou encore en suivi de terrains de chasse au Cameroun [26].

Tout en étant loin de cette phase de restitution, le modèle développé durant ce stage, en est à un premier stade où quelques hypothèses sont implémentées et renvoient des questions aux thématiciens sur la validité de ces hypothèses et peut constituer en cela un premier support de discussion avec les forestiers. Il faudrait encore quelques cycles de discussion - retour au modèle pour en faire véritablement un modèle d'accompagnement.

II.3.2 CORMAS, une plate-forme de simulation multi-agents dédiée à la gestion des ressources renouvelables

Computers are wonderful at turning good scientists into bad programmers.

Chris Langton [22]

La modélisation SMA est, comme on l'a vu, susceptible d'intéresser de nombreux chercheurs issus de disciplines où les outils de modélisation informatique ne sont pas forcément présents. Il faut donc permettre à ces chercheurs de construire, avec quelques notions de programmation, facilement des modèles sans se heurter à des problèmes techniques éloignés des questions de modélisation mais toujours récurrents, tels que la construction d'une interface utilisateur ou la gestion de listes d'entités intervenant dans la simulation. [22]

C'est pourquoi, à l'instar d'autres groupes de recherches (plate-forme *SWARM* du Santa Fe Institute [22]), l'équipe SMA du CIRAD-TERA a développé un environnement dédié à la modélisation des interactions entre un groupe d'agents et son environnement. *CORMAS* (*Common-Pool Resource and Multi-Agent System*), sur laquelle s'est construit le modèle de la forêt de Didy, utilise les techniques de la programmation orientée objet en fournissant à l'utilisateur une liste d'entités génériques prédéfinies ainsi qu'une grille spatiale bidimensionnelle sur laquelle évoluent ces entités. *CORMAS* gère la visualisation, l'organisation, et la synchronisation de ces entités, ainsi que les problèmes spatiaux (une cellule de la grille connaît ses voisines, ses occupants...). Lors de la construction d'un modèle, il n'y a plus qu'à spécifier ses entités en les faisant hériter des entités génériques, les doter d'au moins une méthode d'initialisation et d'une méthode de contrôle, puis de construire une méthode de contrôle global qui est appelée à chaque pas de temps et planifie les actions à effectuer par chacune de ces entités.

CORMAS est développé et se programme en Smalltalk. Ce langage, s'il n'est pas très rapide, présente le grand avantage d'être agréable d'utilisation, très facile à apprendre (on n'y rencontre pas d'entités de bas niveau) et d'être purement objet, obligeant ainsi à une programmation objet propre.

Troisième partie

La construction du modèle
multi-agents

Le contexte bibliographique et scientifique de ce travail a été exposé dans la partie précédente; cette partie est consacrée à la description du modèle de Didy. Après une brève introduction sur la méthodologie utilisée durant le stage, une première section présentera le terrain dont s'inspire le modèle, la forêt de Didy, dans son ensemble. Puis la deuxième section décrira ses hypothèses constitutives en soulignant comment les choix de modélisation ont été faits. Enfin la troisième section, un peu plus technique, présentera quelques points sensibles de l'implémentation du modèle.

La première étape du processus de modélisation a bien sûr été la prise de connaissance du système. Cet apprentissage s'est fait par la lecture systématique d'une dizaine de rapports de forestiers et d'agronomes réalisés sur la forêt de Didy et s'est complété par des discussions avec les forestiers spécialistes du terrain. Cette phase a permis de cerner les acteurs principaux, leurs usages et leurs différents comportements et de comprendre les dynamiques écologiques des ressources prélevées. A partir de là, deux à trois acteurs ont été choisis et la modélisation a pu commencer.

La construction du modèle suit un processus incrémental : à la base simpliste, il est peu à peu complexifié par diversification des paramètres de l'espace, des types d'agents et des comportements de ces agents. Plus précisément, une fois la grille spatiale mise en place, ce sont les activités des acteurs qui détermineront le type d'indices spatiaux à mettre en place.

Les concertations avec les chercheurs spécialistes du terrain permettent de valider les éléments existants et, par leurs suggestions, de passer à une étape de complexification supérieure.

Les principales difficultés, autres que les difficultés techniques liées à des problèmes d'implémentation particuliers, résident dans l'interprétation de ces suggestions venues du terrain et dans le choix des hypothèses de simplification de la réalité. En effet, les modèles les plus intéressants ne sont pas forcément les plus réalistes et sont souvent créés par quelques hypothèses très élémentaires.

III.1 Description des usages présents dans la forêt de Didy

La forêt de Didy est une forêt dense au relief irrégulier et divisée en territoires coutumiers, appelés kijanas. Chacun de ces kijanas appartient à une famille dont le chef réside la plupart du temps hors de la forêt, dans le bourg de Didy. Les chefs coutumiers utilisent traditionnellement ces territoires pour y faire pâturer leurs troupeaux de zébus durant l'été et y pratiquent parfois la culture de riz pluvial sur brûlis, le tavy. Lors des montées au kijana pour le contrôle des troupeaux, ils prélèvent ponctuellement des ressources de valeur telles que l'anguille ou le miel. Dans le droit coutumier, ils possèdent des droits de prélèvement exclusif sur leur kijana.

D'autre part, des villages abritant quelques centaines de personnes sont installées dans la forêt. Les habitants de ces villages n'ont en général pas de lien familial avec les chefs de kijanas, mais ont conclu avec celui-ci depuis plusieurs générations des pactes de sang qui leur donnent les mêmes droits de prélèvement que les chefs coutumiers et le devoir de prendre soin de leurs troupeaux et d'entretenir le kijana. Ces villageois pratiquent tous la culture des tavys pour se nourrir et acheter des produits de première nécessité à la ville. Ils utilisent également la forêt pour y prélever le bois nécessaire aux constructions et aux feux ainsi que, pour compléter leurs revenus, y pratiquer la récolte de miel et la pêche à l'anguille, ou enfin pour la cueillette des plantes médicinales ou nécessaires à leur alimentation.

A coté de ces usagers traditionnels, l'ouverture de la piste reliant Didy à la ville d'Ambatondrazaka a provoqué le développement d'activités d'exploitations forestières et minières. Ces deux types d'exploitations appartiennent dans la plupart des cas à des étrangers à la commune munis de permis officiels et qui exploitent donc leurs concessions sans se soucier du droit coutumier et des limites des kijanas, et sans en consulter ni les chefs ni les résidents voisins.

Les exploitations forestières n'emploient quasiment que des bûcherons étrangers à la commune. Ceux-ci, qui effectuent dans la forêt les prélèvements dont ils ont besoin, sont donc considérés comme des pillards par les résidents, aussi bien que par les habitants de Didy, sauf dans le cas où l'exploitation appartient à un habitant de Didy qui a reçu la bénédiction du chef de kijana.

Les exploitations minières emploient par contre beaucoup de jeunes de Didy qui y voient une source de revenu alléchante, mais qui du coup s'émancipent de l'autorité coutumière. Les résidents de la forêt ramassent ponctuellement les minéraux affleurants afin d'aller les vendre aux exploitants, mais ne s'intéressent pas à des perspectives d'embauche. [13]

Tous les éléments présents dans cette description sont intéressants dans le cadre du modèle. Cependant seules les activités de tavy, de pâturage et d'exploitation forestière, qui constituent sans doute les activités majeures menées dans la forêt de Didy ont été retenues, et considérées selon le seul point de vue du prélèvement. Tous les aspects liés à la codification des droits de prélèvement ou aux relations inter-acteurs ont finalement été laissés de coté ou à peine esquissés. Ce sont ces aspects, générateurs de rétroactions nouvelles, qu'il faudrait développer dans une éventuelle continuation du modèle, nous en discuterons plus tard.

Ainsi, le modèle de Didy sera constitué de villages cultivant leurs tavys et occupant donc peu à peu l'espace au fur et à mesure de leur croissance, de zébus se déplaçant de cellule en cellule sur la grille, et d'exploitants forestiers installés de manière transitoire sur leur concession le temps de leur permis. Les interactions entre ces différents acteurs se feront uniquement par le biais de l'espace : les terres défrichées ne pourront plus être exploitées, les villageois seront gênés par la proximité d'une exploitation...

III.2 Le modèle de Didy

Tout au long du processus de construction il a fallu effectuer de nombreux choix : choix de l'échelle temporelle et spatiale, choix des paramètres à simuler, corrélation et

degré de réalité de ces paramètres, choix des acteurs, mode d'impact de ces acteurs sur les paramètres, degré d'interaction entre les différents acteurs... Ces choix se justifient a priori par un compromis intérêt / simplicité et a posteriori par les résultats des simulations qui affinent peu à peu les hypothèses.

Afin de présenter ces choix de la manière la plus claire possible, nous avons choisi de les présenter en suivant la structure de modèle multi-agents proposée par Demazeau [15]: agents, environnement (espace et temps), interaction (entre les agents) et organisation (des agents dans le système complexe modélisé)

III.2.1 Les agents

En conséquence des activités retenues pour la modélisation, les agents y intervenant sont : les villages de la forêt qui pratiquent le tavy, les exploitants forestiers et à un moindre niveau la CIREF, l'organisme des eaux et forêts malgache qui leur accorde les permis, et enfin les zébus qui divaguent dans la forêt. La présence des chefs de kijana est implicitement représentée par le fait que l'espace a été divisé en kijanas ayant ou pas des liens avec les différents agents.

III.2.1.1 Les villages

Les villageois résidant dans la forêt de Didy ont pour activité principale la culture sur brûlis de riz pluvial (tavy). Cette culture est annuelle et se fait par défrichage puis incendie d'une parcelle afin de fertiliser le sol. Ils pratiquent également la cueillette, la récolte de miel, la coupe de bois de chauffe et de construction, la pêche à l'anguille et parfois la chasse.

Toutes ces activités sont en général exclusivement pratiquées à l'intérieur du kijana avec lequel le village est lié.

On a choisi de ne modéliser que leur activité de culture sur brûlis appelée tavy. Cependant la description de cette activité a évolué durant la construction du modèle :

- le paragraphe III.2.1.1.1 présente la dynamique de tavy telle qu'elle était dans les premières versions du modèle : les villages se contentaient de cultiver des tavys chaque pas de temps, choisis, au départ sur des critères d'accessibilité uniquement, puis plus tard sur des critères de fertilité (introduction d'une notion de régénération des sols).
- les versions suivantes ont introduit le calcul d'un indice de satisfaction lié aux tavys, puis de stratégies d'extension ou de migration décrites au paragraphe III.2.1.1.2 , ainsi que le calcul d'un indice de satisfaction lié à la préservation de la forêt environnante et devant grossièrement représenter les activités annexes des villageois (paragraphe III.2.1.1.4)
- enfin, la dernière version, qui introduit une rétroaction de la fertilité des tavys vers la croissance du village (paragraphe III.2.1.1.3), permet l'émergence d'un équilibre.

On voit donc comment le modèle se construit incrémentalement, par ajout d'hypothèses successives et diversification des comportements, depuis une situation très simple créant une dynamique d'explosion à une situation où les rétroactions entre démographie des village et fertilité des sols permettent l'apparition d'un équilibre.

Les différentes étapes de l'activité d'un village à chaque pas de temps sont données fig.2.

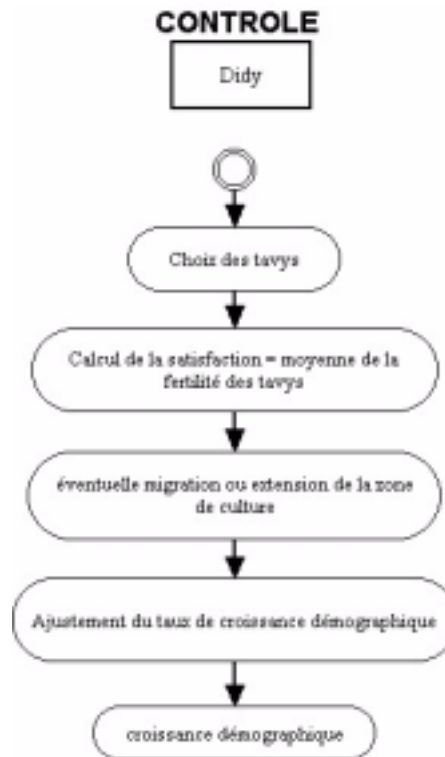


FIG. 2 – Diagramme global de l'activité d'un village à chaque pas de temps

III.2.1.1.1 Choix des tavys

Données de terrain

Les villageois de Didy gèrent leurs cultures suivant un mode communautaire : chaque année, le nombre de parcelles requis est attribué aux familles par le chef du village, puis après un an de culture, ces parcelles sont rendues à la communauté qui possède donc l'ensemble des anciennes friches. Tout se passe donc comme si une seule entité gérait et cultivait les tavys. C'est pourquoi il n'a pas été utile de modéliser les habitants du village.

Les parcelles cultivées sont choisies dans l'ensemble des friches du village, et, si besoin est, une nouvelle parcelle de forêt est défrichée.

Afin de lutter contre un défrichement excessif, la loi malgache a interdit les tavys à toute autre personne qu'aux résidents de la forêt et pour ceux-ci, la culture est réglementée : les villageois ont droit à 0.1 ha de tavy par habitant et n'ont plus le droit de défricher de forêt primaire. Si défrichement il y a il doit se faire en bas de pente et sur des pentes limitées. Les rapports précisent que vu l'éloignement des villages dans la forêt et donc le passage très peu fréquent d'organismes de contrôle, ces obligations ne sont que très peu respectées. [13]

Traduction dans le modèle

Il eut été trop fastidieux de mettre en place des profils topologiques sans recourir à un système d'information géographique. Ne possédant de données informatisées, nous avons

choisi de ne pas modéliser les pentes (le relief est simplement traduit par un coefficient d'accessibilité).

Pour ce qui est de l'interdiction de défricher de la forêt primaire, ayant choisi de partir d'un état initial où la forêt est intacte, il était impossible de la respecter dans le modèle. Cependant nous verrons que les hypothèses mises en place font que les villages finissent par occuper tout l'espace possible, s'équilibrer et ne plus brûler que des anciennes friches. Les nouveaux défrichements peuvent se faire soit exclusivement à l'intérieur du kijana (villages respectant les lois coutumières) soit indifféremment dans tout l'espace (villages ne respectant pas la loi coutumière).

Enfin nous avons choisi par commodité de fixer le nombre de tavys à 1 ha (1 cellule pour dix habitants), c'est à dire de suivre la loi. On pourrait envisager par la suite de créer une surface de tavy par habitant proportionnelle à l'enclavement du village dans la forêt afin de représenter l'influence de l'administration...

Comme le détaille l'algorithme C.1 en annexe C, les villageois du modèle commencent par regarder si leurs friches sont en nombre suffisant et suffisamment âgées. Si ce n'est pas le cas, ils cherchent des cellules fertiles et suffisamment accessibles dans un rayon raisonnable autour du village. Enfin, si ce nombre de parcelle n'est alors toujours pas suffisant, les paysans se résolvent à choisir des friches moins âgées et donc moins fertiles, ce qui ne sera pas sans conséquence sur les récoltes de l'année... Ainsi les villages ne commencent à réduire leur durée de jachère que quand ils ont occupé tout l'espace : il n'y a pas de dégradation des sols tant que tout l'espace possible n'a pas été occupé.

Cette dynamique a été mise en place dès les premières versions du modèle. Elle s'est peu à peu complexifiée en introduisant la notion de fertilité et de dégradation des sols (originellement, les villageois choisissaient leurs parcelles suivant un seul critère d'accessibilité), puis le calcul d'un indice de satisfaction, et enfin, dans les dernières versions, l'existence des stratégies de migration et d'extension que décrit le paragraphe suivant.

III.2.1.1.2 Modélisation du rendement des tavys par un indice de satisfaction

Données de terrain

Les rapports de terrain ne fournissent pas de données précises sur la dégradation des sols de tavy, ni sur la politique adoptée par les villageois face à cette dégradation. Ils évoquent juste le fait que les cultivateurs se plaignent d'une baisse de fertilité des sols dans des villages où la durée de jachère n'est plus que de trois à cinq ans alors qu'elle atteignait parfois quinze ans autrefois [32]. On y parle aussi de sols totalement épuisés après trois ou quatre cultures séparées par des jachères inférieures à quatre ans [8].

Traduction dans le modèle

La dynamique de dégradation des sols est traduite par :

- une chute de fertilité de la parcelle en tavy après culture.
- une chute irréversible des coefficients de régénération de la parcelle lorsque la durée de jachère passe en dessous d'un certain seuil.

La satisfaction des paysans vis à vis de leur culture correspond en fait à la moyenne de la fertilité des tavys mis en culture par le village durant l'année. Lorsque cette satisfaction

atteint un seuil trop bas, les villageois peuvent adopter deux comportements alternatifs :

- extension de leur rayon de culture de 250 mètres jusqu'à une limite de 4 km. Quand ce rayon limite est atteint, les villageois ne peuvent plus rien faire.
- migration d'une famille (10 personnes) vers un village où la satisfaction est élevée, ou s'il n'en existe pas vers un nouveau village qui doit être situé hors de la zone d'influence de celui-ci. Un village vidé de tous ses habitants meurt. Quand il ne peut plus se créer de nouveau village, c'est que tout l'espace est occupé (là encore l'espace peut être soit le kijana soit la grille entière). Alors il peut y avoir départ vers un village dont la satisfaction est simplement plus élevée ou s'il n'en existe pas rien ne se passe.

Ces étapes sont détaillées dans l'algorithme C.2 de l'annexe C

III.2.1.1.3 Evolution démographique des villages

Données de terrain

Les rapports fournissent un taux de croissance démographique moyen de 2 % à 3 % pour les villages de la forêt de Didy [32] mais ne donnent pas d'indication sur une éventuelle dynamique de ce taux de croissance.

Traduction dans le modèle

Le taux de croissance de la population des villages a d'abord été une constante fixée à 2.5 %. Ce n'est que dans les dernières versions qu'il a été relié dynamiquement à la fertilité des tavys : 2.5 % représente alors une croissance en situation stable, c'est à dire quand la fertilité moyenne des tavys est égale à un seuil "de stabilité". Si la fertilité moyenne diffère de ce seuil, le taux de croissance est augmenté de cette différence pondérée par un coefficient fixe. L'équation d'ajustement du taux de croissance est exposée dans l'annexe C

Cela permet de représenter un effet de mortalité accrue ou de départ des jeunes en cas de mauvaise récolte, ou de meilleur niveau de vie en cas de bonne récolte et d'engendrer ainsi des situations d'équilibre, car sans cette régulation, les populations croissent indéfiniment.

III.2.1.1.4 Autres activités des villages

Données de terrain

Les principales activités des résidents de la forêt de Didy autres que le tavy sont, comme il l'a déjà été évoqué, la coupe de bois de chauffe, la cueillette, la récolte de miel, la pêche et la chasse, activités sensibles à la dégradation du milieu naturel. Ces activités font l'objet de droits coutumiers que les villageois respectent (ils ne les pratiquent pas dans les kijanas avec lesquels ils n'ont pas de lien).

Or les rapports signalent que les villageois se plaignent des exploitations forestières précisément parce que les bûcherons prélèvent ces ressources dans leur zone d'activité sans autorisation coutumière, allant même jusqu'à piller leurs ruches. D'ailleurs, les exploitations ayant contracté des autorisations coutumières ne rencontrent pas d'hostilité de la part des villageois.

Traduction dans le modèle

Un coefficient très rudimentaire de satisfaction lié aux activités annexes a été finalement introduit. Ces activités étant des activités de collecte directe des ressources de la forêt, ce coefficient est lié à la préservation de la forêt dans la sphère d'activité du village.

D'autre part, ce coefficient est minoré d'un malus proportionnel au nombre de bûcherons présents en cas de la présence d'une exploitation forestière dans cette sphère, sauf si cette exploitation respecte le droit coutumier.

L'équation de calcul de ce coefficient est présentée dans l'annexe C

III.2.1.2 Les exploitants forestiers

Les exploitations forestières représentent le seul cas d'exploitation légale présent dans le modèle. Elles représentent une activité en plein essor dans une forêt particulièrement riche en bois d'oeuvre.

Là encore, la description de cette activité a considérablement évolué durant la construction du modèle. Chaque étape de construction s'est en fait concentrée sur la modélisation plus particulière d'un aspect de la dynamique des exploitations forestières :

- La première implémentation d'une exploitation forestière était réduite à la seule recherche de la meilleure parcelle d'exploitation de taille fixée. Cet algorithme de recherche s'est ensuite enrichi par la prise en compte d'un objectif lié à cette taille comme nous le verrons au par. III.2.1.2.2. Dans cette version, étaient également fixés la durée l'exploitation de la parcelle et le rythme d'installation des exploitants.
- Une seconde version s'est attachée à décrire plus précisément la phase d'exploitation de la parcelle. Pour cela ont été attribués à chaque exploitant un objectif à atteindre, ainsi qu'un nombre de bûcherons qui, conjugués à la taille de la parcelle, déterminent la durée et le rythme de son exploitation (voir par. III.2.1.2.3).
- Dans un troisième temps, nous nous sommes intéressés à la phase de demande d'un permis d'exploitation aux autorités administratives en créant un nouvel agent, la CIREF (Circonscription des Eaux et Forêts Régionale), qui est l'autorité administrative concernée (voir par. III.2.1.2.1)
- Enfin, la dernière phase de modélisation des exploitations forestières a constitué à créer une dynamique d'installation de ces exploitations dépendante du succès de la phase de recherche de l'année précédente, et donc, indirectement, de la disponibilité en bois de la forêt. C'est ce que décrit le par. III.2.1.2.4.

Les différentes phases de l'activité liée aux exploitations sont décrites sur le schéma fig.3

III.2.1.2.1 Demande d'un permis d'exploitation

Données de terrain

Un exploitant forestier qui souhaite ouvrir une concession doit suivre la procédure suivante : tout d'abord, il est supposé demander aux autorités locales (qui sont souvent confondues avec les autorités coutumières) une approbation sur la délimitation de son lot, ce qui comme on l'a vu est rarement le cas. Ensuite il doit demander un permis d'exploitation à l'autorité administrative concernée, la CIREF (Circonscription Régionale des Eaux et Forêts) qui envoie une équipe sur le terrain afin d'effectuer la reconnaissance du lot.

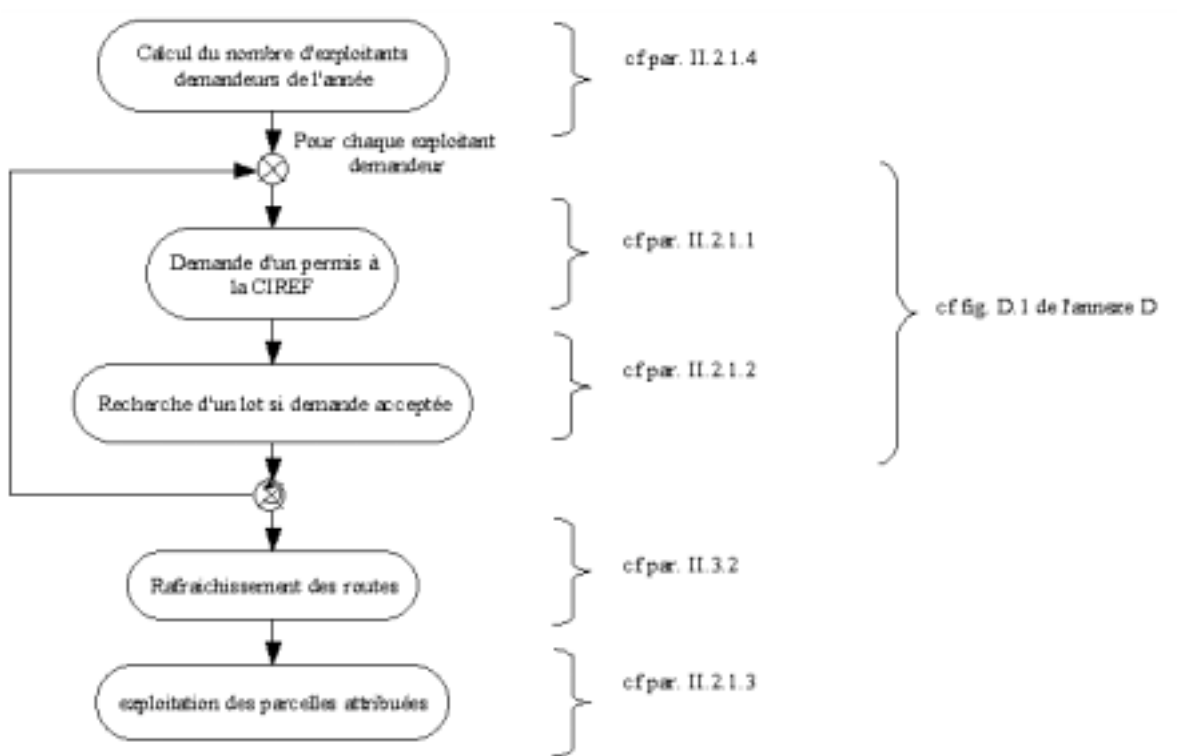


FIG. 3 – Diagramme global de l'activité liée aux exploitations à chaque pas de temps

C'est à ce moment-là que l'inventaire des arbres exploitables est dressé et que les frais d'exploitations sont estimés. Si la CIREF considère que l'exploitation est rentable, le permis d'exploitation est accordé pour la durée nécessaire à l'abattage du lot. Dans la pratique, ces comptages sont souvent faussés afin de limiter les taxes payées par l'exploitant.

Durant l'année 1995, la CIREF a reconnu plus de 8000 hectares de terrain, soit plus de 5% de la superficie totale de la forêt de Didy. [25]

Traduction dans le modèle

Dans le modèle, l'étape d'approbation par les autorités locales est ignorée. Par contre la CIREF constitue un agent du modèle. Elle est caractérisée :

- par une surface annuelle accordable maximale, qui représente le fait que les possibilités de reconnaissance annuelle de la CIREF sont limitées par le nombre d'agents de terrain qu'elle possède. Ce nombre d'agents pourrait être utilisé dans un modèle amélioré pour caractériser l'importance du contrôle exercé par la CIREF aussi bien sur les exploitants que sur les paysans, qui tricheraient moins lorsqu'il y aurait plus d'agents...

Cette surface a été fixée à un dixième de la surface de la grille.

- éventuellement par un quota de surface exploitée totale sur l'ensemble de la forêt. Une fois ce quota atteint, la CIREF n'accorde plus de permis

Les algorithmes de recherche d'un terrain par un exploitant sont les plus lourds du modèle. Ainsi, afin d'économiser du temps-machine, les étapes de la demande d'exploitation ont été inversées mais comme nous allons voir, la réalité traduite est la même : lorsqu'un exploitant virtuel veut initier une exploitation, il commence par demander à la CIREF si elle a les possibilités de reconnaître la surface qu'il compte exploiter. Si cette surface maximale a déjà été atteinte; l'exploitant échoue et disparaît, dans le cas contraire, il lance la recherche de son terrain. Si la recherche d'un terrain aboutit, cela signifie bien que l'exploitation présentée est rentable, si elle n'aboutit pas, cela revient au fait que l'exploitant a présenté un projet non rentable. Tout se passe donc comme si les exploitants présentaient leur terrain, une fois repéré, à la CIREF, qui, si elle peut encore accorder des parcelles (limite du nombre d'agents de contrôle), et éventuellement du fait que le quota soit atteint ou pas, part ou pas reconnaître la concession. Le fait que la demande de l'exploitant ne soit pas maintenue en cas de refus initial de la CIREF importe peu car des exploitants forestiers sont créés aléatoirement chaque année et sont donc indépendants les uns des autres : rien ne différencie un permis accordé du premier coup d'un permis issu d'une demande faite les années précédentes, il n'y a donc pas de raison de maintenir les demandes, ce qui ne ferait que coûter de la mémoire et compliquer le modèle.

L'algorithme décrivant cette étape est en annexe D, fig. D.1

III.2.1.2.2 Recherche d'une parcelle d'exploitation

Données de terrain

Les rapports de terrain recensent sur le massif forestier de Didy des exploitations dont la taille va de 110 hectares à 1500 hectares. Les exploitants s'intéressent presque exclusivement à une seule espèce d'arbre et prélèvent, avec un diamètre minimal d'exploitation de 40 cm, en moyenne 30 individus à l'hectare (ce qui est beaucoup!). [13]

Les discussions avec les forestiers spécialistes du terrain en ont appris un peu plus sur la manière dont ces exploitations s'installent : les exploitants arrivent en général sur un terrain vierge et ont donc à y construire une piste jusqu'à l'exploitation afin d'en ramener les produits en camion. Or la forêt de Didy est soumise à de très fortes pluies, si bien que les exploitants préfèrent construire leurs pistes sur les crêtes des massifs, où celles-ci sont moins susceptibles d'être emportées par le ravinement dû aux chutes d'eau. Une fois la piste construite, les bûcherons se déplacent à pied autour de celles-ci dans un rayon de 2.5 km ([12]) à la recherche des arbres puis effectuent l'équarrissage sur place afin d'en pouvoir ramener le produit à dos d'homme.

Traduction dans le modèle

Une première implémentation se contentait de rechercher la meilleure parcelle d'une taille donnée sur tout le territoire de la simulation. Cet algorithme commence par chercher le meilleur carré de parcelles sur le territoire concerné, puis à partir de la meilleure parcelle de ce carré, cherche la meilleure parcelle contiguë, et ainsi de suite, jusqu'à atteindre la taille demandée. Cet algorithme, qui a été pensé pour des parcelles de petite taille, perd un peu son sens lorsqu'il s'agit de rechercher des parcelles de plus de 500 cellules. De tels problèmes d'optimisation ont été rencontrés lors de la construction des routes, nous le verrons plus loin. Même s'ils n'étaient pas le sujet de mon travail, ils représentent des problèmes d'informatique ardues et ont donc pris une part importante du temps d'implémentation. Une partie leur est consacrée au III.3.3.

Dans un deuxième temps, si l'algorithme de recherche a été réutilisé, les choses se sont compliquées :

- 2 classes d'exploitants ont été créées, les petits et les gros. Les petits exploitants recherchent une exploitation ayant une taille moyenne de 100 hectares, les gros en cherchent une ayant une taille moyenne de 600 hectares (les contraintes dues à la taille de la grille de simulation font que la recherche d'une exploitation de 1000 hectares est vouée à l'échec). L'initialisation se fait aléatoirement autour de ces tailles moyennes suivant une loi normale, ce qui permet d'inclure une première variabilité entre les exploitants.

De plus, pour chaque type d'exploitant est défini un objectif moyen en nombre d'arbres à abattre. Cet objectif moyen est ce à quoi peut raisonnablement s'attendre l'exploitant, puisqu'il correspond au nombre d'arbres que contiendraient les 100 ou 600 hectares en comptant 30 arbres exploitables par hectare. Cet objectif est de même, pour chaque exploitant, initialisé aléatoirement autour de l'objectif moyen concerné. Cette deuxième initialisation aléatoire permet d'inclure une deuxième variabilité inter-exploitants en créant des exploitants "à l'aise", qui cherchent peu d'arbres sur une grande surface, et des exploitants "exigeants", qui cherchent beaucoup d'arbres sur une petite surface.

Ces objectifs permettent de sanctionner la recherche d'un terrain : si les arbres présents sur le lot des meilleures cellules trouvées ne suffisent pas à satisfaire l'objectif de l'exploitant, celui-ci échoue et disparaît. Dans le cas contraire, celui-ci a réussi et installe son exploitation sur ces cellules.

- Des crêtes ont été tracées sur la grille spatiale (nous détaillerons la manière dont a été modélisé l'espace au III.2.2.2) afin de décrire plus en avant la construction de pistes et l'installation des exploitations au bord de ces pistes. Ces pistes se dégradent dès

qu'elles ne sont plus utilisées jusqu'à leur disparition complète au bout de quelques années. Un paragraphe leur est consacré dans le III.3.3.

Ainsi, un exploitant commence par regarder si une piste en bon état existe dans la grille. Si c'est le cas il cherche tout d'abord un terrain dans un rayon de 2,5 km (rayon d'action des bûcherons) autour de cette piste. En cas d'échec, il cherche un terrain sur une crête prolongeant cette piste. En cas de réussite, il prolonge la piste jusqu'au terrain trouvé et s'installe. Dans le cas contraire, il regarde autour des crêtes qu'il n'aurait pas encore parcouru. Enfin, en dernier recours, il cherche un terrain partout où il n'a pas encore cherché, et, s'il en trouve un, construit, si les conditions d'accessibilité le permettent, une piste (qui se dégradera plus vite!) de ce terrain jusqu'à la route ou à la crête la plus proche. Cet algorithme de recherche est décrit en annexe D fig.D.2.

Bien sur, la construction d'une route n'est pas gratuite pour l'exploitant : son objectif à atteindre est augmenté d'un bonus de plus en plus important selon qu'il doit rénover une piste, la construire sur une crête, ou la construire hors d'une crête (frais d'entretien plus élevés!). Ce bonus est le même pour tous les exploitants, car on suppose qu'ils sont tous placés dans les mêmes conditions économiques.

Là encore, des problèmes spécifiques, liés au traçage des routes et à la gestion des bifurcations, de l'ordre de parcours et de la dégradation de celle-ci ont été rencontrés et seront détaillés au III.3.3.

Dernière précision, selon qu'il respecte les lois coutumières ou pas, l'exploitant peut ne travailler qu'à l'intérieur d'un kijana ou bien en ignorer les délimitations.

III.2.1.2.3 Exploitation de la parcelle

Données de terrain

Les rapports de terrain estiment qu'un bûcheron abat et équarrit en moyenne 48 arbres sur une année de travail (on rappelle que ce travail se fait à la hache et à dos d'homme...). [13]

Il est également signalé que ces techniques rudimentaires d'exploitations font que les pertes sur un arbre sont de l'ordre de 60 % (notamment les copeaux ne sont pas récupérés et seules les planches de dimension voulue sont transportées jusqu'à la route). De plus, la chute des arbres lors de leur abattage entraîne des blessures sur 70 % des arbres environnants (l'exploitation se fait par écrémage des grosses tiges et sur une ou deux espèces d'arbre seulement, si bien que la plupart des arbres d'une parcelle ne sont pas utilisés), et les nombreux copeaux issus de l'équarrissage laissés sur le sol gênent notablement la régénération des arbres après l'exploitation. [37]

Traduction dans le modèle

De même que l'exploitant a été initialisé avec une taille d'exploitation et un objectif à atteindre, il est également doté d'un nombre de bûcherons. Le nombre de bûcherons moyen d'un type d'exploitant est tel que pour l'objectif moyen d'arbres à abattre, et à raison de 48 arbres par bûcherons, l'exploitation dure 5 ans (durée moyenne d'une concession). Là encore, le nombre de bûcherons de l'exploitant est initialisé aléatoirement autour de cette moyenne, ce qui permet de créer une variabilité dans les temps d'exploitation.

Pour ce qui est de l'exploitation proprement dite, les cellules sont écrémées tour à tour suivant leur proximité à la route jusqu'à ce qu'elles ne contiennent plus d'arbres exploitables, toujours à raison de 48 arbres par bûcheron et par an. Une fois qu'une cellule a été exploitée, elle en porte le traumatisme : son état de préservation (voir par.III.2.2.2.1) est considérablement réduit, et elle se régénère moins bien durant les 10 ans qui suivent l'exploitation.

De plus, afin d'imaginer les conséquences d'une exploitation plus rationnelle, un nouveau type d'exploitant a été créé : les exploitants "doués". Ces exploitants "doués" génèrent moitié moins de dommages (état de conservation modérément réduit, retour à une régénération normale en 5 ans) et de plus ont de meilleurs rendements. Leurs objectifs (et donc taille d'exploitation et nombre de bûcherons) sont donc divisés par deux.

Enfin, les exploitants possèdent la faculté de mentir à l'administration et d'exploiter en fait plus de terrain, et plus longtemps que ce qu'ils déclarent. Cela se traduit par le fait que lors de la recherche de son terrain, même si l'exploitant ne trouve pas de quoi remplir son objectif, mais si les 2,5 km à la ronde de la piste contiennent suffisamment de bois, il s'installe quand même, prévoyant de déborder de sa surface déclarée, ainsi que par le fait qu'il continue à exploiter encore un an après la durée prévue.

III.2.1.2.4 Dynamique d'installation

Données de terrain

L'exploitation forestière de bois d'oeuvre est une activité en plein développement dans la forêt de Didy : alors que la première exploitation s'est installée en 1993, à l'ouverture de la piste, 15000 sur 130000 ha avaient été mis en concession en 1998, et déjà plus de la moitié de la forêt avait été délimitée pour exploitation future cette année-là, avec une trentaine de demandes en cours pour huit permis accordés dans l'année. [37]

Traduction dans le modèle

Il fallait donc créer une dynamique traduisant l'augmentation rapide du nombre de demandes d'exploitations tant que la forêt semble posséder des ressources forestières en abondance, et la chute de ces demandes quand celle-ci semble s'épuiser.

Pour cela, il a semblé judicieux de relier la variation du nombre de demandes d'une année au taux de demandes non abouties de l'année précédente : lorsque ce taux de refus est faible (inférieur à 50%), ce qui signifie que les perspectives d'exploitations sont nombreuses, le nombre de demandes est augmenté de 50 %; lorsque ce taux de refus est important (supérieur à 75%), ce qui signifie que les perspectives sont peu prometteuses, le nombre de demande est diminué de 25 %.

Ainsi on a modélisé une mise en exploitation sans planification, qui croît jusqu'à ce que la diminution des ressources devienne sensible.

III.2.1.3 Les zébus et les kijanas

Données de terrain

Les kijanas sont avant tout pour leurs propriétaires coutumiers des territoires dédiés au parcours pastoral de leurs troupeaux de zébus. La taille moyenne d'un kijana est de 12 km^2 , les plus grands couvrent une superficie de plus de 50 km^2 .

Les troupeaux familiaux sont regroupés au début du mois de décembre et conduits par le chef de kijana dans une clairière consacrée, généralement située au centre du territoire, où a lieu une cérémonie rituelle marquant l'entrée des zébus dans la terre ancestrale. Les zébus restent dans le kijana jusqu'au mois de mai, le temps de passer la saison des pluies. Durant cette période, ils sont alors laissés libres de divaguer où bon leur semble, un membre du kijana montant les rassembler deux à trois fois par mois afin d'éviter qu'ils ne s'éloignent trop ou ne reviennent à l'état sauvage.

Les effectifs de ces troupeaux sont d'une vingtaine de têtes, ce qui représente sur l'ensemble de la forêt de Didy une densité d'environ trois zébus au kilomètre carré, ce qui fait que la pression exercée par le pâturage sur l'écosystème est à peu près nulle.

Si la taille des cheptels subit une évolution au cours du temps, c'est dû à des motifs extérieurs à la forêt (maladies, enrichissement du chef de kijana...). Comme les zébus n'exercent pas d'influence sur la forêt, cette évolution, qui serait sans conséquence sur le modèle a été laissée de côté.

Traduction dans le modèle

Pour des raisons de commodités, et aussi parce que nous nous sommes peu intéressés aux aspects liés au droit coutumier, l'espace a été partagé en seulement 2 kijanas (ce qui représente des territoires de 50 km^2) possédant chacun leur clairière consacrée.

D'autre part, même si ce n'était pas nécessaire dans l'état actuel du modèle, un calendrier journalier se déroulant sur le pas de temps (qui est de 1 an, cf refeh) a été créé, ce calendrier pouvant servir à la synchronisation d'autres activités pluriannuelles ou présentes une partie seulement de l'année.

Ainsi, les zébus arrivent sur la grille au mois de décembre et en repartent au mois de mai. Durant cette période ils se déplacent indépendamment les uns des autres d'une cellule tous les trois jours (soit 60 fois par pas de temps : ils sont susceptibles de s'éloigner de 6 km de leur point de départ, ce qui est un chiffre plausible puisque dans la réalité ils sont périodiquement rassemblés).

Quand un zébu se déplace, il sélectionne parmi les cellules qui l'entourent celles qui sont suffisamment accessibles et qui ne sont ni en tavy (il y a des barrières) ni en exploitation (il y a du bruit). Dans 75 % des cas il choisit alors parmi celles-ci celle qui est la plus à découvert, et sinon en choisit une au hasard. Ceci permet de représenter la tendance des zébus à choisir des zones herbeuses tout en évitant qu'ils reviennent tout le temps à la même cellule. De plus, un zébu n'ira pas sur une cellule si elle est entourée uniquement de cellules à découvert car ceux-ci restent à proximité de zones où ils peuvent se cacher. Enfin, selon le type de comportement choisi, les zébus pourront ou pas traverser les routes.

III.2.2 L'environnement

Pour décrire l'environnement dans lequel évoluent les agents du modèle, nous commencerons par parler des échelles de temps et d'espace choisies, puis nous exposerons comment les différents paramètres spatiaux ont été définis en fonction des usages modélisés et comment ces paramètres ont pu être initialisés par rapport à un paysage.

III.2.2.1 Mise en place des échelles du modèle

L'attribution d'une échelle spatiale et d'une échelle temporelle constitue une étape majeure de la construction d'un modèle multi-agents. Ce choix doit se faire suivant une double contrainte de finesse de simulation et d'observabilité. Il faut donc le faire après avoir cerné les acteurs et les dynamiques principales pour rechercher la dynamique importante ayant la plus petite échelle.

Ainsi, le pas temporel a été fixé à un an car c'est la durée d'une campagne de culture de tavy. C'est de plus aussi le temps sur lequel peut se faire le bilan des activités d'exploitation forestières dans les rapports de terrain. Des phénomènes à échelles plus courtes mais de moindre importance (déplacement des zébus) seront lancés plusieurs fois dans le pas de temps.

La résolution spatiale (surface représentée par une cellule de la grille spatiale) choisie est d'un hectare car c'est la taille moyenne d'une parcelle de tavy. Prendre une résolution plus fine aurait posé des problèmes de représentation des dynamiques spatiales qui ne deviennent intéressantes que sur quelques-uns kilomètres : la taille de la grille de cellules serait devenue trop importante. Choisir une résolution plus importante aurait été plus adapté à la représentation des exploitations forestières qui se comptent plutôt en dizaines d'hectares, mais la dynamique des tavys n'aurait plus été visible.

Cependant, des objets appelés agrégats constituent des ensembles de cellules et permettent ainsi de manipuler des entités spatiales de granularité plus élevée que la cellule. Ces entités étant des agents, elles peuvent effectuer toutes les tâches purement spatiales liées à un territoire (recherche de cellules ou de frontière, mémoire de routes...) et ainsi répondre aux demandes des autres agents.

La grille utilisée pour les simulations est, pour des raisons de contraintes en temps de calcul, une grille de 100*100 cellules, ce qui représente donc 10000 hectares, soit moins d'un dixième de la forêt de Didy. Nous verrons par la suite que la taille réduite du territoire simulé pose des problèmes d'échelle, notamment au niveau des exploitations forestières, lors des simulations.

III.2.2.2 Modélisation de l'espace

Cette partie entend expliquer la manière dont ont été choisis les paramètres caractérisant les cellules. Si elle vient seulement maintenant, c'est que, dans un tel modèle, donner un paramètre à une cellule n'a de sens que dans la mesure où ce paramètre influence un usage, et / ou est modifié par un usage. Ainsi, les attributs des entités spatiales telles que les cellules sont créés au fur et à mesure de la construction du modèle, au gré des usages introduits. C'est là tout l'intérêt de ce type de modélisation, qui est incrémentale. Comme il est facile d'aller modifier les méthodes d'un agent afin qu'il prenne en compte un nouveau paramètre (il suffit d'ajuster une règle de comportement, ou au besoin d'en rajouter une), ceci ne pose pas de problème au niveau de la programmation.

III.2.2.2.1 Les paramètres spatiaux et leurs liens aux usages

Le premier paramètre spatial à avoir été défini est un paramètre qualitatif d'état de la végétation, `etatVeg` : forêt primaire, forêt secondaire (forêt ayant subi une modification anthropique importante), forêt exploitée, forêt éclaircie (forêt après exploitation), tavy, friche (cellule après tavy) et rien (emplacement d'un village). Une cellule en friche ou en

forêt éclaircie devient forêt secondaire au bout de quinze ans. Le diagramme d'état de **etatVeg** est joint en annexe E, fig.E.1

Ce paramètre, s'il permet de visualiser immédiatement les modifications apportées à la forêt par les différents agents, ne permet par contre pas d'affecter les choix des agents en matière d'action sur une cellule plutôt qu'une autre (et de créer ainsi une rétroaction du paysage vers les agents, et donc une interaction entre agents via l'environnement). Pour cela il faut, en fonction de leurs critères de choix, définir des paramètres évaluant un niveau de qualité pour chacune de leurs activités : les villages choisiront leurs tavy en fonction de la fertilité et de l'accessibilité d'une cellule, et effectueront leurs activités annexes là où la forêt est le mieux préservée, les exploitants forestiers placeront leurs exploitations là où la quantité de bois est la plus importante, les zébus feront leurs déplacements en fonction du couvert forestier et de l'accessibilité.

En conséquence, cinq nouveaux paramètres ont été créés : **fertilite**, **intExplFor**, **couvert**, **biodiversite** et **accessibilite**. Les quatre premiers sont liés à la végétation et possèdent donc une dynamique de régénération, le dernier est plutôt lié au relief et est donc fixe dans la plupart des cas. Ces cinq paramètres sont des nombres compris entre 0 et 1. Nous allons maintenant examiner chacun de ces paramètres en détail.

Le coefficient de fertilité d'une cellule traduit sa qualité en tant que sol pour un tavy. Il intervient dans le choix des villages lors de la mise en culture, puisque ceux-ci choisiront, parmi les cellules suffisamment accessibles, les plus fertiles. En retour, lorsqu'une cellule est cultivée un an, sa fertilité est réduite de moitié, puis, lorsqu'elle est laissée en jachère, sa fertilité se régénère de manière linéaire jusqu'à retrouver sa valeur initiale. Tant que la cellule n'a pas subi de jachères trop courtes, ce retour à une valeur maximale se fait en 6 ans après un an de culture. Par contre, si la cellule subit deux cycles de culture trop rapprochés (en l'occurrence à 3 ans d'intervalle dans le modèle), ses capacités de régénération sont irréversiblement réduites, et le retour à une fertilité maximale devient donc plus long. Cela permet de traduire les phénomènes d'épuisement des sols dont parlent les paysans de la forêt de Didy. Les exploitations forestières n'ont bien sûr pas de conséquence sur la fertilité des sols. Le diagramme d'état de **fertilite** est joint en annexe E, fig.E.2

Le coefficient d'intérêt pour l'exploitation forestière d'une cellule représente le nombre d'arbres exploitables présent sur cette cellule. Quand une cellule a été exploitée (ou qu'elle a été défrichée pour un tavy), ce coefficient devient nul. Nous avons vu au par. 3 que les exploitations forestières laissent des séquelles importantes après leur passage. C'est pourquoi l'année qui suit l'exploitation, la cellule ne se régénère pas. Puis ses capacités de régénération se remettent à augmenter de manière linéaire pour retrouver leur valeurs normales au bout de dix ans. Les valeurs des paramètres du modèle font qu'une cellule retrouve son intérêt pour l'exploitation forestière initial en 50 ans.

Les cycles de cultures trop proches auront également des conséquences irréversibles sur la régénération de ce coefficient.

Le diagramme d'état de **intExplFor** est joint en annexe E, fig.E.3

Le couvert d'une cellule traduit grossièrement la densité de végétation présente sur la cellule. Ce coefficient n'influence que les divagations des zébus, qui préfèrent les cellules les moins couvertes (et donc plus pâturables), mais restent toujours à proximité de zones où le couvert est suffisamment important. Ce coefficient devient nul lors d'une mise en tavy et est fortement réduit après exploitation forestière. Après avoir été mis à zéro, le

couvert d'une cellule revient à sa valeur initiale en 30 ans. Cependant, sa régénération subit également les traumatismes dus à la surcultivation et au passage des exploitations.

Le coefficient de "biodiversité" d'une cellule, qui porte ce nom essentiellement par commodité, traduit l'état de préservation de sa faune et de sa flore. Il n'intervient que dans le calcul du coefficient de satisfaction des villages vis à vis de leurs activités secondaires (pêche, chasse, récolte de miel...), qui ne peuvent avoir lieu que dans une nature préservée. De même que le couvert, il est annulé lors d'une mise en tavy et fortement réduit après exploitation, et sa régénération est sujette aux mêmes traumatismes que celles du couvert et de intérêt pour l'exploitation forestière. Ce coefficient traduisant le retour à un écosystème normal, il ne retrouve sa valeur initiale après avoir été mis à zéro qu'au bout de cent ans.

Enfin, le coefficient d'accessibilité traduit la manière dont la cellule est accidentée. C'est un pis aller à l'intégration d'une carte topologique dans le modèle. Il se présente sous forme directionnelle : une cellule a , dans chacune de ses quatre directions, une accessibilité différente, et qui est la même que celle de la cellule contiguë dans la direction opposée. Cela permet de représenter de manière plus réaliste les contraintes intervenant lors d'activités de parcours de la forêt. Ainsi, un zébu ne prendra que les directions où l'accessibilité dépasse un certain seuil, et de même, un exploitant ne pourra tracer sa route hors d'une crête que dans les directions où l'accessibilité est suffisante (avec un seuil plus élevé que pour un zébu!). Enfin, ce coefficient intervient mais de manière globale (moyenne des quatre accessibilité directionnelles) dans le choix des tavys par les villages qui eux non plus n'iront pas cultiver une cellule dont l'accessibilité est trop réduite.

La seule activité ayant une influence sur l'accessibilité est la construction d'une route car elle suppose quelques opérations de terrassement. Ainsi une cellule d'une route est très accessible, mais toutefois, dès que la route n'est plus entretenue (i.e. si elle ne mène plus à aucune exploitation), cette accessibilité se dégrade.

Il est à noter que nous n'avons pas parlé de l'influence de la construction d'une route sur les autres coefficients. En effet, l'échelle choisie pour les cellules (100m*100m) au regard de l'étroitesse des pistes forestières (2 à 3 m) fait que l'on peut considérer cette influence comme négligeable.

III.2.2.2 Création d'un paysage : introduction des faciès

Nous avons parlé de l'évolution des paramètres spatiaux et de leurs interactions avec les agents du modèle. Reste à soulever une question qui est celle de leur initialisation : créer une forêt uniforme n'aurait pas eu de sens, et les initialiser de manière totalement aléatoire n'aurait pas été très réaliste, puisque ces différents facteurs sont corrélés, ni très intéressant si l'on veut observer la manière dont les différents acteurs occupent l'espace.

Bien sur, un tel problème n'aurait pas eu à se poser dans l'hypothèse où l'on aurait disposé des données de terrain correspondantes sur SIG. Cependant, si l'on considère que la collecte de telles données sur une surface suffisamment importante et à la résolution de l'hectare n'est de toute façon sans doute pas possible, on comprend qu'il fallait trouver une manière de relier ces variables à un indice synthétique à la fois facilement identifiable et représentatif de ces différents paramètres.

Le travail de M. Terrier [37] sur les faciès botaniques de la forêt de Didy a apporté la réponse voulue à ce problème. En effet, celui-ci, par échantillonnage des espèces présentes

et des types de sols, a identifié six classes d'unités phytoécologiques qu'il a relié à des faciès topologiques. Grâce aux descriptions qu'il en fait, il a alors été possible d'établir un lien entre ces faciès et chacun des paramètres spatiaux utilisés. Les six types de faciès sont :

- Versant concave (**Vcc**) : c'est le faciès présentant les contraintes les plus faibles. Il représente les flancs de collines sur leurs parties concaves qui sont souvent en pente douce et retiennent l'eau et les sols. C'est donc un faciès fertile, relativement accessible
- Versant convexe (**Vcv**) : c'est un des faciès à plus fortes contraintes. Il représente les flancs de collines sur leurs parties convexes qui sont souvent escarpées et donc très sensibles à l'érosion.
- Sommet aigu (**Sa**) : c'est le faciès portant le plus de contraintes, puisqu'il représente les sommets de colline sans replat.
- Sommet obtus (**So**) : C'est un milieu difficile mais moins contraignant que les deux précédents. Il représente les sommets de colline aplatis et qui retiennent donc mieux le sol.
- Bas-fond (**Bf**) : C'est un faciès peu contraignant, puisqu'il représente les fonds des vallées entre les collines, mais que l'engorgement rend plus difficile à exploiter que Vcc
- Marécage forestier (**Mf**) : il est constitué de zones de stagnation de l'eau dans les bas-fonds. Aucune germination n'y est possible.

Pour chaque type de faciès a ainsi été fixé une valeur moyenne pour chacun des coefficients. Il a alors suffit de créer une carte de faciès vraisemblable (attribution d'un type de faciès à chaque cellule) puis d'initialiser chaque cellule, suivant son faciès, par tirage aléatoire normal autour des valeurs moyennes des coefficients correspondantes. Ainsi, on peut créer un paysage réaliste qui présente une double hétérogénéité : hétérogénéité suivant le type de faciès et hétérogénéité à l'intérieur d'un type de faciès (variabilité interindividuelle). Les cartes de la fig.4 montrent le paysage qui a été créé, ainsi qu'un exemple de répartition des coefficients qui en découle.

Le tableau F.1 en annexe F, qui a pu être dressé d'après [37], récapitule les caractéristiques des faciès et les valeurs moyennes des coefficients correspondantes.

III.2.3 Les interactions

Le modèle ne présente en fait pas d'interaction directe entre les agents : les seuls envois de messages entre agents sont des demandes des villages ou des exploitants vers les kijanas ou vers le territoire lors des recherches de tavys ou de lots forestiers.

Toutes les interactions sont véhiculées par l'espace : les zébus ne peuvent traverser ni tavys, ni exploitations, ni, éventuellement, routes; les villages ne peuvent construire de tavys dans des parcelles en exploitation, et les exploitants ne peuvent plus trouver de lots sur des parcelles défrichées. Nous discuterons plus amplement de la signification de ces interactions et des conséquences qu'elles génèrent au par.IV.3.1 de la partie consacrée aux simulations.

III.2.4 L'organisation du modèle

Les différents éléments du modèle ayant été décrits, nous pouvons maintenant nous intéresser à la manière dont celui-ci est initialisé et contrôlé dans le temps.

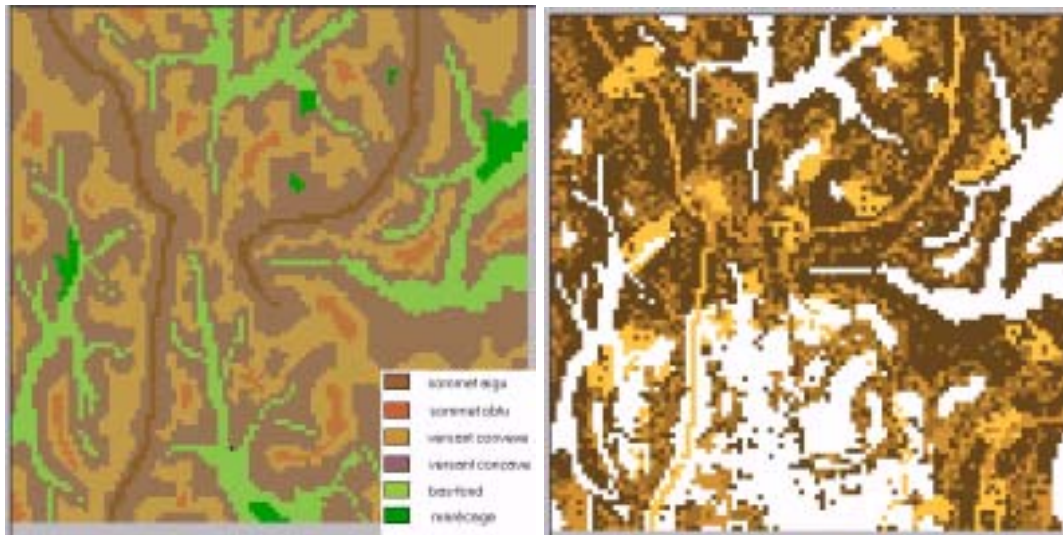


FIG. 4 – Apparence du paysage des faciès dans le modèle et répartition de l'intérêt pour l'exploitation forestière à l'initialisation

(l'intérêt est plus fort quand le marron est plus foncé).

III.2.4.1 Mise en place de l'état initial

Lors de l'initialisation du modèle :

- Une interface d'entrée (fig.5) permet de choisir les comportements des agents et de créer des fichiers de sortie.
- Les paramètres spatiaux des cellules sont recalculés en fonction des faciès, mais il est possible de conserver les mêmes paramètres afin d'effectuer plusieurs simulations sur exactement le même espace. Tout le territoire est à l'état de forêt primaire.
- Un village est placé aléatoirement dans un bas-fond avec une population initiale de trente personnes (l'ensemble des friches du village se met alors en place dans les dix premiers pas de temps). Cette population initiale peut bien sûr être modifiée mais trente personnes est un bon compromis pour à la fois faire apparaître des dynamiques rapidement et partir d'une population assez réduite. Là encore, il est possible de garder en mémoire l'emplacement initial du village pour plusieurs simulations successives.

Nous ne détaillerons pas les autres étapes où les variables des différents agents (taille des troupeaux, nombre d'agents de la CIREF...) sont initialisées.

III.2.4.2 Synchronisation des agents

A chaque pas de temps, et successivement :

- Les cellules changent d'état (deviennent tavy ou friche ou exploitation...) avec toutes les modifications de paramètres que cela implique. Les campagnes des agents durant l'année sont donc effectives l'année suivante.
- Le calendrier se déroule : les zébus montent en pâturage, divaguent puis repartent. C'est ici que des activités pluriannuelles seraient insérées.



FIG. 5 – Interface d'initialisation des comportements des entités de Didy

- Les villages calculent leurs indices de satisfaction (résultat de l'année en cours), rafraîchissent leur population grâce au taux de croissance ajusté sur leur satisfaction culturelle, puis sélectionnent le nombre de tavys correspondant à leur population pour l'année suivante.
- Les exploitants exploitent leurs lots.
- Le nombre de demandes d'exploitation est calculé en fonction du nombre de refus de l'année précédente, et le nombre d'exploitants requis est initialisé. Alors chaque exploitant effectue sa demande à la CIREF et part éventuellement à la recherche de son lot. Quand il le trouve, il le marque pour la mise en exploitation l'année suivante et signale au modèle si il a construit une route.
- Le modèle, qui gère la base de données géographique rafraîchit les routes : il construit les routes qui doivent l'être, et provoque l'entretien de celles qui sont parcourues et la dégradation de celles qui ne le sont plus.
- Les exploitants dont le permis est achevé disparaissent.
- Les variables d'observation choisies sont stockées dans le fichier de sortie

III.3 Quelques aspects de l'implémentation

Après une rapide présentation de la structure générale d'un modèle de *CORMAS*, cette section revient présente quelques problématiques liées au modèle plus spécialement informatiques.

III.3.1 Organisation d'un modèle multi-agents implanté sur CORMAS

Un modèle de *CORMAS* est constitué de trois grandes unités :

- Une grille spatiale de cellules bidimensionnelles sur laquelle les agents évoluent. Dans

notre cas, cette grille représente donc une parcelle de la forêt de Didy.

Les cellules de cette grille sont des objets sur lesquels on reporte toute l'information spatialisée : par exemple chaque cellule de la grille aura son propre état de végétation, son propre indice de fertilité, etc...

Chacune de ces cellules connaît également par défaut sa localisation, ses voisines, et, s'il y en a, les entités qui sont situées dessus.

- Un ensemble d'agents qui sont en fait des classes possédant leurs propres méthodes d'initialisation et d'évolution. La création d'un agent dans CORMAS se fait par héritage de l'une des quatre classes d'agents prédéfinies :
 - la classe **Agent**, qui est la classe mère des autres. Elle regroupe les fonctionnalités d'intégration au noyau du modèle.
 - la classe **AgentSitué**, qui permet de créer des agents pouvant se placer sur une cellule de la grille. Un agent situé connaît, la cellule sur laquelle il est et possède des méthodes lui permettant de se déplacer dans la grille.
 - la classe **AgentCommunicant**, qui permet de créer des agents capables de communiquer avec les autres grâce à l'envoi de message. Un agent communicant possède une boîte aux lettres où sont stockés les messages qu'il reçoit.
 - la classe **AgentSituéCommunicant**, qui regroupe les fonctionnalités des deux précédentes.

Il existe aussi une classe d'agents inertes, ou objets.

- Un organe de contrôle global qui est la seule classe connaissant à priori tous les agents du système et qui possède l'horloge du système : elle permet d'effectuer toutes les opérations de supervision du modèle.

C'est la méthode d'initialisation de cette classe qui est appelée à la remise à zéro du modèle, et sa méthode de contrôle qui est exécutée à chaque pas de temps. Les agents règlent leur propre évolution mais leur coordination est donc centralisée.

Ainsi, l'implémentation d'un modèle se déroule en trois phases distinctes :

- Définition des différents agents : pour chaque agent, paramétrisation, définition des règles de comportements et d'action et écriture d'une méthode de contrôle définissant les actions à entreprendre à chaque pas de temps.
- Définition de l'espace : affectation des paramètres spatiaux aux cellules et écriture des méthodes d'évolution de ces paramètres
- Mise en place de l'initialisation et du contrôle global : écriture des méthodes réglant l'état initial du modèle ainsi que la synchronisation des agents.

Cette structure permet la construction incrémentale des modèles : il suffit d'aller modifier les méthodes d'initialisation et de contrôle global pour incorporer de nouveaux agents, et il est facile d'ajouter des règles de comportement ou d'action à un agent puisque son évolution est encapsulée dans sa méthode de contrôle.

III.3.2 Aspects globaux : une implémentation pour une portée plus générale du modèle

Afin d'expliquer les aspects globaux de l'implémentation du modèle, nous commencerons par présenter les diagrammes des classes des agents de Didy. La fig.6 présente la signification des différents types de flèches.



FIG. 6 – Les flèches des diagrammes de classe

Le diagramme des classes spatiales (fig.7) donne une représentation synthétique de l'organisation des objets spatiaux du modèle, ainsi que de leurs principales classes et méthodes. Ainsi, on peut voir qu'une superclasse, **Agregat_Didy** a été créée pour tous les agrégats du modèle. Cette superclasse regroupe toutes les méthodes de construction de frontière, de recherche de cellules ou de groupes optimaux de cellules, et de tracé de routes. Les agrégats qui en héritent sont de trois types :

- **TerritoireSimulation** est constitué de l'ensemble des cellules et connaît les différents kijanas.
- **Agregat_KIjana** s'occupe de gérer les recherches de tavys du village.
- **Agregat_ExplFor** est la classe qui constitue les lots d'exploitants. C'est elle qui gère son installation et signale au modèle les routes qu'elle utilise.

Le diagramme des classes sociales du modèle, donne de même une représentation synthétique de l'organisation des agents. On remarque que tous les agents du modèle héritent d'un même superclasse abstraite, **Agent_Didy**. Cette classe a été créée essentiellement en vue de possibilité d'extension et de généralisation du modèle : elle dote chaque classe d'agent d'une variable, **classKnowledge**, contenant ses droits d'accès à chaque type de ressource (quand on crée une nouvelle classe d'agent, il faut penser à initialiser cette variable de classe), et chaque agent de variables que sont le respect des deux types de lois, coutumière et officielle, et d'une méthode **exploiter**. Ainsi, quand un agent veut exploiter une ressource, il consulte le type de droits qu'il a dessus, et selon son degré de respect de la loi qui y est associé, choisit d'exploiter légalement ou illégalement, ou de surexploiter cette ressource. Il faudrait cependant pousser un peu plus loin la modélisation des différents droits d'accès pour que cette fonctionnalité devienne vraiment utile.

D'autre part, **Agent_Didy**, fournit également la variable de classe **ClassCpt**, qui mémorisera le type de comportement adopté par les agents durant la simulation.

Enfin, on remarquera que **Village** est une classe d'agents situés communicants, **ExploitantFor** et **CIREF** d'agents simplement communicants, et **Zebu** d'agent simplement situés.

III.3.3 Problèmes spécifiques liés aux algorithmes de recherche de cellules

Cette section présente les points sur lesquels se sont présentées les difficultés informatiques majeures. Ces difficultés se sont posées lorsque la modélisation a fait appel à

des fonctionnalités de recherche de cellules (recherche du meilleur lot pour les exploitants, traçage d'une route d'un point à un autre avec contraintes d'accessibilité) et de gestion d'ensembles de cellules ordonnées (gestion des routes).

III.3.3.1 La recherche du meilleur lot

Lors de la recherche d'un lot par un exploitant, l'objectif était de rechercher dans un espace donné (disque autour de la route) l'ensemble de cellules de taille voulue ayant un intérêt forestier optimal.

Pour cela, on sélectionne le meilleur carré de cellules de l'espace. A partir de la meilleure cellule de ce carré, on cherche alors récursivement dans un voisinage d'étendue deux (voisins immédiats et voisins immédiats de ces voisins) la meilleure cellule jusqu'à arriver à la taille voulue. Si l'ensemble obtenu atteint l'objectif de l'exploitant, le lot est sélectionné, sinon la recherche reprend plus loin.

Cette méthode n'est pas très économique et n'optimise pas toujours la recherche puisqu'à chaque pas la vision ne se fait que dans un voisinage de deux cellules. Il eut été intéressant de développer un algorithme génétique dans lequel les individus auraient été des partitions de l'espace constituées du nombre de cellules voulues et chaque individu aurait eu pour fonction d'adaptation son intérêt forestier total. Les meilleurs individus seraient alors croisés (constitutions de nouveaux ensemble de cellules composés du mélange des cellules de deux individus efficaces) et le processus arrêté lors de l'obtention de l'intérêt voulu (réussite) ou au bout d'un nombre maximal de générations (échec).

III.3.3.2 Construction des routes

La construction d'une route peut se faire deux manières : en suivant une crête, ou en joignant un point à un autre.

Dans le premier cas, l'algorithme, dans les détails duquel nous n'entrerons pas, l'algorithme, qui remonte les crêtes cellule par cellule, impose que les crêtes soient tracées à la main en prenant bien garde à ce que, sauf en cas de bifurcation, chaque cellule de la crête n'aie que deux voisines appartenant à celle-ci. En effet, si celui-ci rencontre un voisinage plus important, il l'interprète comme une bifurcation et initialise deux routes à partir de cette supposée bifurcation. Si la bifurcation n'en est pas une, le processus de prolongation des routes ne se fait plus correctement.

Dans le second cas après avoir trouvé le point de route ou du crête le plus proche du lot (par extensions successives des voisinages de ce lot jusqu'à rencontrer une route ou une crête), et la cellule du lot la plus proche de ce point (par la même méthode), nous nous sommes donnés une contrainte supplémentaire qui est que la route ne peut suivre que les chemins permis par l'accessibilité directionnelle des cellules. Là encore le problème a été résolu de manière récursive : à partir d'une cellule, la voisine accessible et non parcourue la plus proche de l'arrivée est sélectionnée, et ainsi récursivement jusqu'à parvenir au point d'arrivée. En cas d'impasse, la récursivité permet de remonter jusqu'au point où il est possible de sortir de l'impasse, et une nouvelle direction est choisie à partir de ce point. Si on remonte ainsi jusqu'au point de départ, c'est qu'il n'existe pas de chemin possible de ce point jusqu'au point d'arrivée, et un autre point de départ est alors choisi sur la crête ou sur la route. Si l'algorithme ne trouve aucun chemin, le lot est déclaré inaccessible et est abandonné.

Cette méthode trouve forcément un chemin s'il en existe un, mais n'optimise pas la longueur de la route. En effet, il faudrait pour cela explorer l'ensemble des chemins possibles, ce qui eut été trop coûteux du point de vue informatique avec un tel algorithme. Un traitement en calcul parallèle pourrait donc l'améliorer notablement.

III.3.3.3 Gestion des routes

Une route est une suite ordonnée de cellules présentant la caractéristique supplémentaire qu'à chaque cellule est associé un chiffre qui est le nombre d'années écoulées depuis sa dernière utilisation, i.e. depuis la dernière fois qu'elle a mené à une exploitation.

L'ensemble des routes est stocké dans une base de donnée de l'organe de contrôle du modèle. Quand on parle de rafraîchissement des routes, c'est donc de l'inclusion de nouvelles routes dans cette base de données, mais aussi du rafraîchissement de cet "âge" que l'on parle.

Le rafraîchissement de l'âge des routes est géré par le fait que chaque exploitation connaît la route qui y mène et envoie à chaque pas de temps cette information à l'organe de contrôle afin qu'il réactualise sa base de données.

L'inclusion de nouvelles routes pose problème à partir du moment où une nouvelle exploitation signale comme nouvelle une route qui est en fait la prolongation d'une route déjà existante. Pour éviter que la base de données n'aie de routes en double, le modèle regarde pour chaque nouvelle route si sa première cellule est également la première cellule d'une route déjà existante. Si c'est le cas, et si la nouvelle route est plus longue que l'ancienne, alors elle la remplace. En cas de bifurcation, il n'y a pas de nouveau problème suscité car la bifurcation est considéré comme le début de deux nouvelles routes.

Quatrième partie

Les simulations

Après avoir présenté le modèle dans la partie précédente, nous allons à présent nous intéresser aux questions posées par sa simulation.

Le premier problème à prendre en compte lors d'une simulation est le choix de variables de sorties et d'outils d'observation. Nous commencerons donc par discuter de ces aspects dans une première section. Nous décrirons ensuite la méthodologie adoptée pour construire le plan de simulation, pour enfin aborder une discussion sur la portée générale du modèle par le commentaire de quelques résultats issus des tests.

IV.1 Vers une méthode d'observation pertinente

IV.1.1 De la construction de variables de sortie

Une caractéristique majeure des systèmes multi-agents est la facilité avec laquelle on peut générer une très grande quantité d'information. En effet, l'aspect individu-centré des simulations permet d'accéder aisément à n'importe quel paramètre des différents agents et de créer tout aussi aisément de nouveaux indices d'observation. Ceci représente un atout certain dans une perspective pluridisciplinaire d'utilisation du modèle puisqu'on peut générer quasi-instantanément des courbes à la demande des spécialistes.

Mais cette quantité énorme d'information a son revers qui est le problème posé par le choix d'indices d'observation pertinents lors des tests. Pour cela, il faut mener une réflexion, selon la finalité que l'on veut donner à son modèle :

- autour de ce que l'on veut montrer : comment renvoyer aux données du terrain.
- autour de ce qui émerge : comment remonter aux hypothèses de modélisation.

Afin d'aborder ces questions, nous avons choisi en guise d'illustration, pour chaque agent du modèle, quelques indicateurs qui nous ont semblé pertinents :

- La dynamique des villages est guidée par la culture des parcelles de tavy, dont les résultats exercent une rétroaction sur la croissance démographique des dits villages. C'est pourquoi la variable d'observation la plus pertinente au niveau des villages nous a semblé être leur population (moyenne et totale), appuyée par leur satisfaction culturelle et le nombre de cellules appropriées (cultivées ou en friche) qui peuvent venir compléter, ou expliquer, les renseignements fournis par la population.

La courbe de la satisfaction liées aux activités annexes sera également étudiée.

- Au niveau des exploitants, pour lesquels il n'existe pas à proprement parler d'indice de satisfaction, il nous a semblé que, la croissance de leur nombre étant conditionnée par la présence de cellules propices à l'exploitation en quantité, un épuisement des ressources se traduirait par la baisse de ce nombre d'exploitants qui a donc été choisi comme indicateur. La surface totale de cellules exploitées ainsi que la surface moyenne d'une exploitation ont également été sélectionnées en appui à cet indicateur.

- Enfin, pour les zébus dont la seule action est d'aller divaguer là où ils peuvent passer, il est apparu que le nombre moyen de cellules parcourues pendant l'année par un zébu serait un bon indicateur d'une éventuelle atteinte à leur territoire.

Ces indicateurs doivent être critiqués et remis en cause par les spécialistes. Leur construction se fait de manière incrémentale, à partir de leurs réflexions sur les premières propositions.

IV.1.2 De l'importance des outils d'exploitation et d'analyse des variables de sortie

Nous avons vu comment il était aisé de disposer d'une infinités de variables de sortie. Un nouveau problème est alors posé par la construction d'outils de stockage et d'analyse des données. Par exemple, il devient vite difficile d'effectuer des prises d'indices sur chaque agent d'une classe, surtout si ces agents peuvent naître et mourir durant la simulation, car cela implique de disposer d'espaces de stockage dynamiques et pouvant prendre en compte chaque agent dans son individualité. Autre exemple, si l'on veut s'intéresser à des aspects tels que la variabilité inter-individuelle sur une classe d'agent, on doit pouvoir utiliser des outils statistiques permettant d'effectuer des analyses de variance sur des matrices.

CORMAS fournit plusieurs sorties :

- une grille de cellules représentant l'espace de la simulation. On peut observer ces cellules sous différents angles grâce à des méthodes de point de vue qui permettent d'attribuer des couleurs à différentes valeurs du ou des paramètre(s) voulu(s). Mais cette sortie est limitée par l'impossibilité de stocker et donc d'observer plusieurs points de vue à la fois ou de revenir dans le temps. C'est donc une sortie purement visuelle qu'on ne peut malheureusement pas utiliser en analyse. Il faudrait pouvoir effectuer des "screenshot" programmables sans être obligé de garder en mémoire les grilles de l'ensemble des attributs présents sur le point de vue, ce qui représente un coût en mémoire rédhibitoire. On pourrait ainsi appliquer des analyses en traitement d'image aux sorties spatiales.
- Une sortie graphique permettant de générer des courbes. Cependant cette sortie manque de souplesse et d'ergonomie, si bien que le couplage dynamique avec un tableur de type *Excel* est prévu dans le développement de *CORMAS*. Les courbes présentes dans ce rapport ont été générées en remplissant à chaque pas de temps des fichiers lisibles par un tableur des variables voulues, et, en raison du nombre important de simulations effectuées, en créant des macros pour le traitement et la mise en page graphique de ces données. Un outil d'observation relativement pratique a ainsi été obtenu, mais qui est loin d'avoir la souplesse que pourrait créer un couplage plus dynamique.
- Enfin, *CORMAS* dispose d'une sortie axée sur la visualisation des communications entre agents dont nous ne parlerons pas, puisque cette sortie s'utilise essentiellement pour l'analyse de processus de négociation, qui n'ont pas été abordés dans ce modèle.

IV.2 Mise en place d'un plan de simulation

Le scénario d'une simulation est défini par l'ensemble des valeurs données aux paramètres variables du modèle. Selon la finalité que l'on veut donner aux simulations, on peut

alors définir deux types de variables : des variables de calibrage, que l'on doit tester et fixer à des valeurs donnant des résultats vraisemblables dans le cadre choisi, et des variables de tests proprement dite, dont on étudie plus particulièrement l'incidence sur l'évolution de la simulation.

Pour ce qui est du calibrage, il est évident, au vu de l'abondance des paramètres du modèle, qu'il est impossible d'effectuer une étude de sensibilité classique qui testerait l'influence des variations, indépendantes et simultanées de chacun de ces paramètres. Il est donc nécessaire de commencer par faire un bilan de ces paramètres variables du modèle afin de tenter d'en discerner les plus importants pour le calibrage.

Pour ce qui est des tests, nous avons choisi d'étudier le modèle sous l'angle des comportements des acteurs. C'est donc le croisement de ces différents comportements qui, une fois le modèle calibré, constituera le plan des scénarios de simulation.

IV.2.1 Influence de l'état initial

Afin d'évaluer l'influence des jeux de comportements choisis, et même avant de pouvoir calibrer, il faut commencer par évaluer l'influence des différents paramètres aléatoires, en particulier l'emplacement initial du village et la distribution des paramètres spatiaux des cellules. En effet les premières séries de simulation ont donné des résultats assez différents pour un même jeu de paramètres de calibrage : il a donc fallu savoir si ces disparités venaient des différences dues aux initialisations aléatoires ou si elles venaient de la simulation elle-même.

Afin de s'entendre, on pourrait parler d'état initial pour désigner l'état de la simulation après application des méthodes d'initialisation aléatoires des paramètres et de paramétrage initial pour désigner une simulation avant application de ces méthodes : pour un même paramétrage, les états initiaux seront différents.

Pour tester donc l'influence de l'état initial pour un même paramétrage initial, des séries de 10 simulations avec même état initial ont été effectuées sur 200 pas de temps pour différents paramétrages. Les résultats vis à vis des villages ont été exactement les mêmes : les villages occupent de manière rationnelle qui est toujours la même l'espace qui leur est attribué. La simulation est par contre très sensible à l'emplacement initial du village, de même qu'elle est très sensible à la taille de la grille. Cela est une première conclusion illustrant le caractère primordial des configurations spatiales dans de tels modèles.

Il faudra donc calibrer et tester les comportements pour un même état initial et non pas pour un même paramétrage initial. Les exploitations forestières qui sont initialisées aléatoirement au cours de la simulation sont elles moins sensibles à cet état initial.

IV.2.2 Calibrage du modèle

Un bilan des principaux paramètres variables des différents types d'agents est donné en annexe G

Après avoir effectué une présélection des paramètres a priori intéressants, il faut, pour différentes valeurs de chacun de ces paramètres, effectuer plusieurs simulations afin de déterminer pour quelles valeurs de ces paramètres les résultats des simulations sont plus utilisables.

On peut alors établir quelques classes de scénarios et passer à l'interprétation.

Les paramètres des cellules peuvent être considérés comme des paramètres structuraux,

définissant le contexte de la simulation et remplaçant une vraie carte (ils peuvent être considérés comme des paramètres de réglage). Il pourrait être intéressant de voir comment le modèle réagit à différents contextes environnementaux mais il faut bien faire des choix. Ils ont donc été laissés à leurs valeurs de défaut.

Les paramètres de calibrage des exploitants sont ceux qui déterminent l'évolution du nombre de leurs demandes d'année en année. Cependant les quelques tests effectués n'ont pas montré de différence notable dans la manière dont évoluent les indicateurs de sortie. Là aussi, ils ont donc été laissés à leur valeurs par défaut.

L'influence des zébus étant nulle sur le modèle, nous n'avons pas effectué de test de calibrage sur leurs paramètres.

Les paramètres des villages, du fait de la rétroaction mise en place de la fertilité des cultures sur le taux de croissance démographique, sont par contre plus intéressants. Ainsi, nous avons étudié l'influence des variations de `TxModifCrois`, qui paramètre l'importance de cette rétroaction, et de `seuilFertStab`, qui paramètre le seuil autour duquel elle intervient (cf fig. C.2). Les courbes de la fig.9 illustrent ces influences.

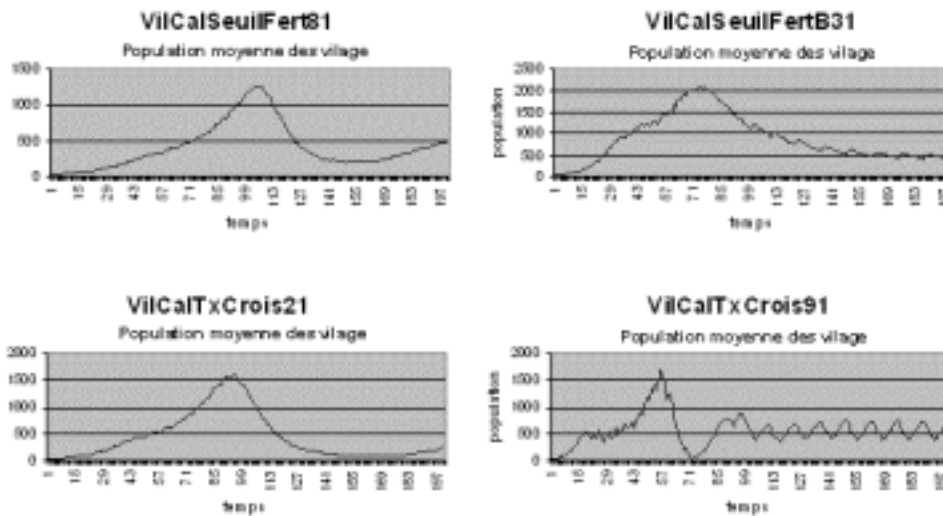


FIG. 9 – Courbes montrant l'évolution de la population d'un village ayant une politique d'extension sur 200 ans

Les courbes `VilCalSeuilFert81` et `VilCalSeuilFert31` sont obtenues pour `seuilFertStab` égal respectivement à 0.8 et à 0.3; `VilCalTxCrois21` et `VilCalTxCrois91` pour `TxModifCrois` égal respectivement à 0.2 et 0.9.

La première remarque à faire est que la population des villages suit dans tout les cas deux régimes d'oscillations superposées :

- un premier régime de grandes oscillations amorties tendant vers une valeur d'équilibre située autour de 500 personnes (ce qui est plus que les populations moyennes apparaissant dans les rapports mais est cohérent du fait que les villageois du modèle poussent leurs tavys plus loin que dans la réalité). Ce régime est du à une première phase d'occupation maximale des sols suivie d'une phase de perte de fertilité des

sols due à l'augmentation rapide de la population puis d'une stabilisation progressive autour de la population pouvant être supportée par les sols épuisés.

- un second régime d'oscillations plus courtes (période d'environ 20 ans) plus ou moins prononcées et qui est due aux cycles d'ajustement du taux de croissance que l'on peut observer sur le schéma fig.10 : les oscillations apparaissant sur les courbes sont en fait les oscillations entre les cycles 1 et les cycles 2 de ce diagramme d'état; la population augmente jusqu'à basculer en cycle 2 à la saturation des sols puis baisse jusqu'à repasser en cycle 1 quand les sols ne sont plus saturés...

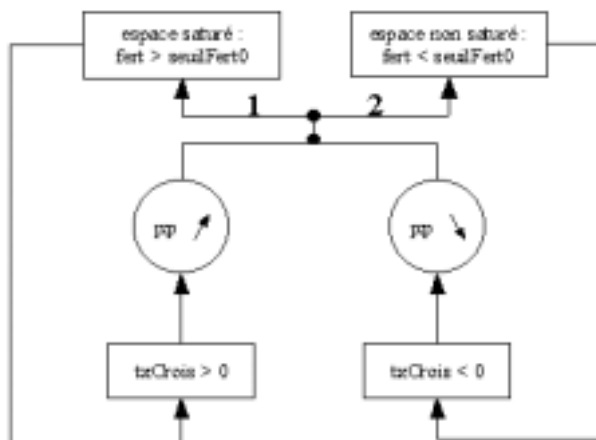


FIG. 10 – Diagramme d'état de la population dans le cas d'un village en extension

Finalement, les paramètres ont été choisis de manière à provoquer le régime le plus stable possible, ce qui semblait plus cohérent : seuil de fertilité élevé et taux de modification de la croissance bas.

IV.2.3 Le plan de simulation

Nous nous sommes placés dans l'optique d'illustrer le comportement du modèle dans un environnement fixé mais avec des agents se comportant différemment. Pour cela, deux comportements caricaturaux types ont été choisis pour chaque classe d'agent afin de donner des exemples d'évolution du modèle dans une configuration particulière, ce qui doit permettre aux thématiciens d'en évaluer les applications possibles. Le modèle doit permettre d'identifier des comportements et leurs conséquences et de les critiquer pour les remettre en cause et éventuellement en proposer de nouveaux. Voici ces comportements:

- Les villages: Extension de la zone de culture ou migration vers un autre village quand satisfaction trop basse.
- Les exploitants forestiers : Rendement normal ou rendement amélioré (exploitations plus petites et dommages moins importants)
- Les zébus : possibilité de traverser les routes ou pas
- La CIREF : Avec limitation par nombre d'agents ou pas
- Le modèle en général : Respect des territoires coutumiers ou pas pour tous les agents

Si la réalité voulait que les différents agents d'une même classe aient chacun des comportements différents, nous avons choisi d'effectuer des tests où tous ont le même type de

comportement, afin de bien mettre en relief l'incidence de ce comportement sur le modèle.

La phase de test du modèle a donc été constituée de séries de simulations croisant l'ensemble de ces comportements, soit des séries de $2^5 = 32$ simulations, chaque série s'effectuant à partir du même état initial.

IV.3 Discussion autour des simulations

Les quelques situations de choix évoquées dans la section précédente lors de la phase de calibrage illustrent bien la richesse des différentes paramétrisations possibles du modèle et des sujets de discussion qu'il peut entraîner. On voit comment l'observation des courbes de sorties permet de souligner les relations de cause à effets incluses dans les hypothèses de modélisation et de mieux comprendre la manière dont fonctionne le modèle, et par là-même la portion de complexité de la réalité qu'on y a introduite. C'est ce genre de questions qu'ont soulevé les résultats des simulations sur comportements croisés, et nous allons voir à travers quelques exemples comment ces questions se sont en fait souvent ramenées à une problématique liée à la configuration de l'espace, mais aussi, à travers l'exemple des villages, combien un simple changement de règle peut faire émerger une philosophie d'utilisation de l'espace totalement différente.

IV.3.1 Expression des interactions entre villages et exploitants forestiers

Dans cet exemple, nous allons nous intéresser à la comparaison de trois types de simulations :

- celles où les villages évoluent seuls
- celles les exploitations forestières évoluent seules
- celles où les deux acteurs évoluent ensemble, avec les mêmes comportements que dans le cas isolés.

Or les courbes observées pour chacun des agents dans le cas isolé et dans le cas mixte sont semblables : il n'y a pas d'interaction entre villages et exploitants qui apparaissent dans les simulations.

On pouvait s'attendre au fait que les villages ne soient pas influencés par les exploitations car, alors que les villages s'approprient définitivement l'espace qu'ils exploitent, les exploitations ne se l'approprient que pour quelques années et sans porter atteinte à la fertilité des sols, si bien que les villages peuvent occuper l'espace laissé libre par l'exploitation dès qu'elle disparaît. Par contre, une exploitation ne pouvant certainement plus s'installer sur l'espace occupé par un village, celui-ci ne laissant jamais aux arbres le temps de repousser, il est plus surprenant que les exploitations ne subissent pas non plus d'influence. En fait, il s'avère que les villages s'installant dans les bas-fonds, et les exploitants privilégiant les pourtours des crêtes, les deux dynamiques ne se gênent pas mutuellement, comme on peut le voir sur la figure 11.

Ceci amène à se poser la question de la manière dont s'expriment les interactions mutuelles entre agents : dans ce modèle, elles sont portées uniquement par l'espace (an gros, une cellule exploitée par l'un ne peut plus être exploitée par l'autre), et la configuration spatiale choisie fait que ces interactions ne s'expriment en fait jamais, comme elles pourraient le faire dans une configuration différente ou avec des contraintes d'installation différentes.

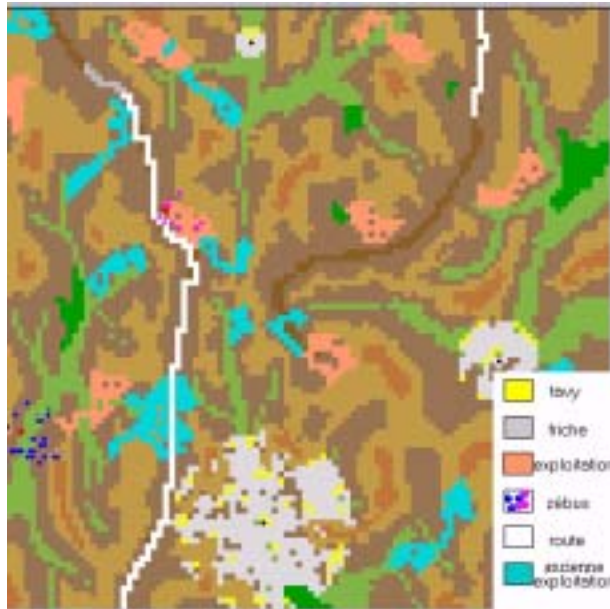


FIG. 11 – *Etat de l'espace après une centaine de pas de simulation*

IV.3.2 Les divers comportements des exploitants et les configurations spatiales

L'observation des résultats issus des divers comportements des exploitants est un autre exemple qui, peut-être plus encore que le précédent, illustre comment une configuration spatiale particulière, en forçant les actions des agents, peut parvenir à annihiler la variété des règles que l'on a introduit dans le modèle.

Il s'avère que les simulations effectuées sur le paysage présenté fig. 4 n'ont montré aucune différence entre elles que les exploitants soient petits, gros, aient un rendement amélioré ou pas, et subissent ou pas le contrôle de la CIREF. Or, si on observe la taille moyenne des exploitations, on peut remarquer que dans tous les cas, elle ne dépasse que rarement cinquante cellules. En effet, en voulant créer un paysage réaliste sur une grille finalement trop réduite, on a morcelé les surfaces susceptibles d'être exploitées de telle manière que les exploitants peuvent très rarement trouver de gros lots, ce qui rend nul l'effet de leurs comportements possibles, et échouent donc fréquemment dans la recherche de leurs exploitations, ce qui rend nul l'effet du contrôle de la CIREF.

Afin de vérifier cette hypothèse, et d'observer si des comportements alternatifs amenaient des résultats différents, on a construit un espace uniforme de cellules à fort intérêt pour l'exploitation forestière. Ainsi, l'influence de la configuration spatiale est levée.

Les résultats sur cet espace uniforme ne permettent toujours pas de discerner l'influence du comportement des exploitants, mais permet par contre d'observer l'influence du contrôle de la CIREF. Ceci nous amène à revenir aux hypothèses du modèle :

- La différence entre exploitations améliorées et normal réside dans le fait que les exploitants améliorés cherchent des exploitations plus petites et réduisent la période de régénération réduite après exploitation de dix ans à cinq ans. Puisqu'on n'observe

pas de différence, on peut en conclure que ces comportements, de la manière dont ils sont implémentés, ne sont pas significatifs. En effet, les différences de taille des exploitations sont sans doute annulées par l'initialisation aléatoire des exploitants, alors que l'amélioration dans les dommages fait à la flore est trop transitoire (il revient en gros à avancer de quelques années la régénération; il deviendrait plus visible s'il conduisait à une meilleure dynamique de régénération sur une plus longue période).

- L'influence du contrôle de la CIREF existe, mais pas où on l'attendait, en régulation du nombre d'exploitants. En fait la seule influence visible est que le contrôle de la CIREF favorise l'installation d'exploitations en moyenne plus petites. En effet, le contrôle de la CIREF se fait en déclarant un nombre maximal de cellules à inspecter chaque année: quand ce contrôle existe, il ne peut donc s'installer d'exploitations dépassant cette taille, et quand plusieurs exploitations ont déjà utilisé une partie de cette taille durant l'année, il ne reste plus de la place que pour une petite exploitation. On n'observe par contre pas d'effet de meilleure viabilité, et dans les deux cas les exploitants forestiers ne sont jamais en situation de saturation de l'espace. Cela est sans doute dû au fait qu'avec les hypothèses d'augmentation et de régression du nombre de demandes présentes, même sans contrôle de la CIREF, les exploitants s'autorégulent (il y en a moins quand il commence à être difficile de trouver des lots, et plus seulement quand cela redevient facile).

On peut donc conclure qu'il faudrait effectuer d'autres tests de calibrations sur la dynamique d'installation des exploitants afin de voir si on peut créer des différenciations accrues entre les comportements en changeant des paramètres tels que le taux de multiplication ou de diminution des demandes.

IV.3.3 Des deux types de comportement des villages

Intéressons-nous maintenant aux différences apparaissant entre villages en extension et villages en migration. Pour cela nous comparerons les résultats de simulation effectués sur 500 pas de temps avec chacun des deux types de village. Les courbes sont présentées fig.12.

Observons tout d'abord les courbes de population moyenne: dans le cas où le village suit une politique d'extension, nous voyons qu'après un pic où il épuise en fait tous ses sols, sa population finit par se stabiliser autour de 500 habitants. Dans le cas d'une politique de migration, le village n'étend pas sa zone de culture, d'où des pics moins élevés, et transfère une partie de sa population dans un autre village plus favorisé dès que les sols commencent à s'épuiser. Il se crée ainsi une rotation entre les villages qui fait que la population moyenne finit par osciller autour de 50 habitants par village.

Si l'on observe la population totale et la satisfaction culturelle, il semble pourtant que cette politique soit moins efficace, bien qu'elle répartisse a priori mieux la charge des tavys sur l'ensemble de l'espace. Elle crée en tout cas une situation largement moins stable. Cela est sans doute dû à un artéfact du modèle qui fait que les villages ont tendance à croître très rapidement dans une première phase et n'autostabilisent leur croissance que bien plus tard. Lorsqu'au lieu de s'adapter à l'espace qu'il a occupé, un village expulse une partie de ses habitants vers un autre espace, la baisse brusque de sa population fait, qu'au lieu de s'orienter vers une modération de sa croissance démographique afin de retrouver un rapport population / surface de tavys correct, il ne baisse que très peu son rythme

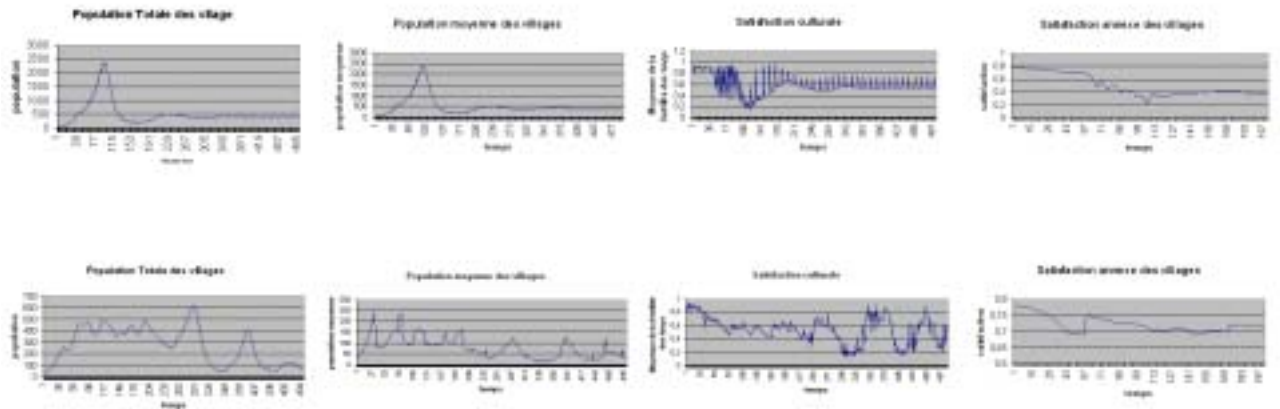


FIG. 12 – *Comparaison entre villages en extension (en haut) et villages en migration (en bas)*

de croissance (le rapport se rétablissant plus vite et donc la population se remettant à augmenter plus vite), et finit par épuiser totalement ses sols et disparaître en laissant des sols qui ne se régénèrent plus. Ainsi, les villages en extension, qui savent modérer leur croissance, présentent un comportement émergent de vision à long terme de leur espace, alors que les villages en migration, qui se scindent sans vraiment se préoccuper de ralentir leur croissance, adoptent un comportement résultant dans une vision à court terme: ils vont jusqu'au bout des possibilités de l'espace facilement exploitable qui les entoure, puis partent ailleurs quand il n'y a plus rien à en tirer. Ainsi, même s'ils occupent plus d'espace, ils l'épuisent plus vite.

Par contre, si l'on observe les courbes de satisfaction annexes, qui sont en fait liées à la préservation de l'espace disponible dans un grand cercle autour du village, on voit que les villages en extension, qui ont consacré une majeure partie de leur espace à la culture ont laissé peu de place à leurs activités annexes de collecte des produits de la forêt. Les villages en migration, qui ne cherchent pas à étendre leurs cultures, se préservent en fait un espace pour leurs activités annexes.

On peut donc voir dans ces comportements les caricatures d'un comportement de type sédentaire, où les villageois mettent plus d'efforts dans leurs tavy (ils acceptent de cultiver plus loin du village) et se désintéressent des autres ressources de la forêt, et d'un comportement de type nomade, où les villageois pratiquent le tavy tant qu'il rapporte en continuant à prélever les autres ressources, et migrent quand les terres à leur portée immédiate sont épuisées.

IV.4 Conclusion sur les simulations

Les quelques aspects du modèle présentés à travers ces exemples de simulation sont une illustration des diverses questions (questions sur les relations entre les agents et les configurations spatiales, questions sur la portée d'un comportement, questions sur les dynamiques cachées derrière un algorithme) que peut poser un modèle tel que celui de Didy. On parle bien de questions, et non de conclusions, car les simulations d'un modèle

multi-agent, parce qu'elles créent des émergences, sont des réserves de sens à donner aux hypothèses du modèle, puisqu'elles créent un point de vue neuf sur celles-ci, permettant de les reformuler, de les affiner, et ainsi, pas à pas, de débrouiller la complexité du petit monde recréé dans la machine.

Cinquième partie

Conclusion

L'étude des rapports de terrain concernant la forêt de Didy a permis de construire un modèle en incluant principalement deux types d'acteurs, les villageois et les exploitants forestiers, et leurs usages principaux, respectivement la culture de riz sur brûlis et l'abattage d'arbres, et de placer ces acteurs dans un environnement virtuel mais dont les dynamiques sont similaires à celles du terrain.

Les simulations pratiquées ont permis d'illustrer, à travers quelques configurations caricaturales des comportements de ces acteurs, les possibilités offertes par un tel modèle en matière de remise en question du monde artificiel simulé par la dissection de ses mécanismes. C'est précisément la dissection de ces mécanismes, et donc la discussion des hypothèses introduites dans le modèle, qui doit permettre de donner aux spécialistes des domaines simulés les moyens à la fois d'enrichir le modèle par leurs suggestions et d'adopter un point de vue différent sur le monde réel.

La construction de ce modèle a constitué un premier pas à la fois dans le monde de l'intelligence artificielle et des multi-agents, et dans le monde des sciences de l'homme. Il a donc ses limites, qui sont nombreuses et importantes, mais il est issu de l'enrichissement continu de connaissances nouvelles.

Ainsi, on peut considérer ce modèle comme une première version d'un environnement de modélisation adaptable aux diverses situations que l'on pourrait rencontrer sur le terrain puisqu'en jouant sur les paramètres, les agents présents et / ou le moment de leur arrivée, on peut déjà simuler des situations bien différentes les unes des autres. Malgré notre volonté de construire un modèle le plus simple possible, cette version du modèle exhibe une trop grande complexité qui noie quelque peu les mécanismes de fonctionnement dans l'abondance d'informations et de paramètres. Il était en effet difficile de saisir les mécanismes essentiels d'un terrain qu'on ne connaît que virtuellement. La première étape dans la continuation de ce travail de modélisation serait donc de effectuer un retour sur l'ensemble de ses hypothèses, et peut-être même de le remettre à plat et de le reconstruire, afin de le simplifier et de le recentrer sur les suggestions venues des spécialistes.

Une des caractéristiques principales du modèle tient au fait que les comportements des agents envers les ressources s'expriment directement, et que les interactions s'expriment en conséquence uniquement par l'accès à l'espace. Nous avons vu comment la portée de ces interactions peut être limitée par la configuration de l'espace, qui prime souvent sur les comportements des agents. C'est pourquoi il serait maintenant intéressant d'étudier plus particulièrement l'instauration d'interactions directes entre agents qui engendreraient un nouveau niveau de rétroaction. Ainsi, par exemple, avec les hypothèses en place, les différents acteurs n'ont que des interactions négatives entre eux. Ce n'est pas le cas : les rapports signalent que si les habitants de la forêt se plaignent de vol dû à la présence des exploitations forestières, ils reconnaissent que l'ouverture des pistes leur permet de vendre à meilleur prix leurs produits et de s'alimenter plus facilement en produits de première nécessité. C'est en incluant de telles hypothèses de rétroaction positive que l'on se rapprocherait des objectifs de l'aménagement forestier à usage multiple : conciliation d'intérêts, superposition d'usages sur un même espace.

Enfin, de nombreux éléments (horloge interne au pas de temps, classe d'agent abs-

traite prenant en compte ses droits d'accès aux différentes ressources...) sont en place pour permettre l'adaptation du modèle à d'autres exemples de terrain, et par là-même sa généralisation : c'est en modélisant différents exemples que l'on arrive à construire progressivement un environnement suffisamment général pour être qualifié de plate-forme générique.

Le modèle est loin de représenter la complexité de la superposition des usages multiples dans une forêt : c'est un premier pas conceptuel vers une recherche plus poussée. Les divers éléments évoqués précédemment pourraient constituer le coeur d'un travail de thèse qui, en se rapprochant du terrain, permettrait d'approfondir les voies esquissées par ce projet et d'aller vers un outil opérationnel d'aide à la décision.

Cet outil, couplé à des SIG (validité du terrain) ainsi qu'à des modèles dynamiques de peuplements forestiers plus fins en cours de développement au CIRAD (validité des dynamiques écologiques) devrait permettre à terme de pouvoir effectuer des études d'impact, écologique, économique ou social en concertation avec les populations lors de l'établissement de contrats de gestion locale, mais aussi, par sa grande flexibilité d'entamer des réflexions sur une utilisation plus routinière des modèles en tant qu'outils de suivi et d'aide à la gestion de l'écosystème.

Bibliographie

- [1] service canadien des forêts AFT. – Prototyping a system for lanscape design. – <http://www.aft.pfc.forestry.ca/Projects/ProSysLandDesign.html>, 1999.
- [2] D. BABIN et A. BERTRAND. – Comment gérer le pluralisme : subsidiarité et médiation patrimoniale. – *Unasylva*, 49(194), 1998.
- [3] O. BARRETEAU. – *Un système multi-agents pour exploiter la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et modes d'organisation*. – PhD Thesis, Université de Paris VI, 1998.
- [4] O. BARRETEAU et F. BOUSQUET. – SHADOC : un SMA représentant les modes d'organisation dans un système irrigué. – *Actes du Coloque de la SFER, Nov. 98*, 1998.
- [5] O. BARRETEAU et F. BOUSQUET. – Systèmes multi-agents et viabilité des systèmes irrigués. – *4ème colloque africain sur la recherche en informatique : CARI'98 Dakar Sénégal, 12-15 octobre 1998*, 1998.
- [6] F. BERKES, D. FEENY, B.J. MCCAY, et J.M. ACHESON. – The benefits of the commons. – *Nature*, 340(13):91–93, 1989.
- [7] A. BERTAND, D. BABIN, et R. NASI. – Mais où est donc cet aménagement forestier durable que chacun cherche désespérement des tropiques humides aux zones sèches? – *Bois et forêts des tropiques*, (260), 1999.
- [8] A. BERTRAND et J.L. LAMALADE. – Les dynamiques des systèmes agraires et les les dynamiques des tavy sur la facade orientale de Madagascar. – In S. RAZAFIARISON et S. AUBERT (sous la direction de), *Les dynamiques des tavy à l'oeuvre dans le sud de l'Ankay*. CIRAD -FOFIFA, Oct 1998.
- [9] J.P. BOON. – Lattice gas automata : theory, implementation, simulation. – *Journal of statistical physics*, 1992.
- [10] F. BOUSQUET, O. BARRETEAU, C. MULLON, et J. WEBER. – An environmental modelling approach: the use of multi-agent simulations. – *Advances in environmental modeling*, Submitted.
- [11] F. BOUSQUET, P. D'AQUINO, J. ROUCHIER, M. REQUIER-DESJARDINS, A. BAH, R. CANAL, et C. Le PAGE. – Rangeland herd and herder mobility in dry inter-tropical zones: multi-agent systems and adaptation. – In *VI International Rangeland Congress: People and Rangelands: building the future, Townsville, Australia*, 1999.
- [12] R. Sanchez CERRAJERO et M.N. RAZAFINDRAKOTO. – Les faciès botaniques de la forêt d'Ambolihero à Didy (Madagascar) : relations possibles avec les influences anthropiques. – Rapport technique, CIRAD - FOFIFA, 1998.

- [13] B. CHARBONNIER. – Limites et dynamiques coutumières dans la forêt classée d’Ambolihero, à l’intérieur de la cuvette de Didy, S.E. d’Ambatondrazaka. – Mastère en foresterie, ENGREF, 1998.
- [14] département AMIS CIRAD. – Programme modélisation des plantes (AMAP). – <http://www.cirad.fr/presentation/programmes/amap.shtml>, 1999.
- [15] Y. DEMAZEAU. – From cognitive interactions to collective behaviour in agent-based systems. – In *1st international conference on multi-agent systems, AAAI, San Francisco*, Jun 1995.
- [16] A. DROGOUL. – *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes - Une étude de l’émergence de structures d’organisation dans les systèmes multi-agents.* – PhD Thesis, Université de Paris VI, 1993.
- [17] J.M. EPSTEIN et R. AXTELL. – *Growing artificial societies: social sciences from the bottom up.* – MIT Press, Cambridge, MA, 1996.
- [18] J. FERBER. – *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective.* – InterEditions, Paris, 1995.
- [19] N. GILBERT et K.G. TROITZSCH. – *Simulation for the social scientist.* – Open University Press, 1998.
- [20] S. GOURLET-FLEURY. – *Modélisation individuelle spatialement explicite de la dynamique d’un peuplement forestier de forêt dense tropicale humide.* – PhD Thesis, 1992.
- [21] B. GUERRIEN. – La société, objet complexe et changeant. – *Pour la science, les mathématiques sociales, dossier hors-série*, jul 1999.
- [22] D. HIEBELER. – The SWARM simulation system and individual-based modeling. – In *Decision support 2001: Advanced Technology for natural resources management*, Sept 1994.
- [23] University of Illinois at Urbana-Champaign IMAGING SYSTEMS LABORATORY, Dept. of landscape architecture. – SmartForest-II, a forest management and visualization tool. – <http://www.imlab.uiuc.edu/SF2/smfor.html/overview>, 1999.
- [24] W. JAGERN, M.A. JANSEN, et C.A.J. VLEK. – Consumats in a commons dilemma. – *Environmental and Traffic Psychology, University of Groningen, The Netherlands*, <http://www.ppsw.rug.nl/cov/index.htm>, 1999.
- [25] J.L. LEMALADE. – Dynamiques et stratégies des acteurs pour l’utilisation du terroir et de ses ressources (le fonctionnement des systèmes agraires du firaisampokontany de Didy, fivondranana d’Ambatondrazaka). – Mémoire de fin d’étude, Ecole supérieure des Sciences Agronomiques de Tananarive, 1996.
- [26] C. LEPAGE, F. BOUSQUET, A. TAKFORAN, et I. BAKAM. – Simulations on virtual worlds: understanding the interaction between ecological and social dynamics. – In *Planetary Garden, 1st international symposium on sustainable ecosystem management*, March 1999.
- [27] M.W. MACY. – Social order in artificial worlds. – *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASS/1/1/4.html>, 1(1), 1998.
- [28] G. NICOLIS et I. PRIGOGINE. – *Exploring complexity.* – W.H. Freeman Co., New York, 1989.
- [29] R.L. OLSON, D.L. SCHMOLDT, et D.L. PETRESON. – A qualitative simulation framework in smalltalk based on fuzzy arithmetics. – In *Proceedings, Statistics, mathematics and Computers. IUFRO XX World Congress*, 1996.

- [30] C. Le PAGE. – *Biologie des populations et simulations individus-centrées*. – PhD Thesis, Université de Paris VI, 1996.
- [31] E. PERRIER. – Modélisation du fonctionnement hydrique des sols. Passage de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. – In C. MULLON (sous la direction de), *ed Seminofr 4, le transfert d'échelles*. Orstom, 1991.
- [32] E.D. RAKOTOARIOSOA, J.L. RANDRIAMALA, et P. Diarra ZOUMANA. – Système agraire et dynamique de défrichement a Sahaviavy-Fito. – Rapport technique, CIRAD / FOFIFA, 1998.
- [33] E. RAMAT, P. PREUX, L. SEURONT, et Y. LAGADEUC. – Modélisation multi-agents de systèmes naturels, réflexions générales et application en biologie marine. – <http://www.lisc.clermont.cemagref.fr/Projetlabo/Multi-agentsinfos/SMAGET/Interventions/ramat/ramat.html>, 1998.
- [34] J. ROTHENBERG. – The nature of modeling. – In L.E WIDMAN, K.A. LOPARO, et N.R. NIELSEN (sous la direction de), *Artificial Intelligence, simulation and modeling*. Wiley Interscience, 1989.
- [35] F. SCHWEITZER. – Active brownian particles: artificial agents in physics. – In *Stochastic dynamics*. LNPI 484, 1997.
- [36] SEGID/SEIDAM. – Systèmes Experts pour une gestion intelligente des données. – <http://www.aft.pfc.forestry.ca/SEIDAMf.html>, 1999.
- [37] M. TERRIER. – Les faciès botaniques de la forêt d'Ambolihero. Leurs critères de localisation et leur description scientifique. Relation avec les usages coutumiers. – Mémoire de fin d'étude, ENGREF, 1998.

Annexes

Annexe A

Présentation de l'équipe d'accueil

Le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) a été créé en juin 1984 du rassemblement des laboratoires français de recherche en agronomie tropicale. Ses thèmes de recherche, axés sur l'aide au développement, recouvrent l'agriculture, l'élevage, la foresterie, l'agro-alimentaire, l'agroindustrie, ainsi que l'étude des sociétés rurales.

Ce stage a été effectué sous la tutelle de deux des départements du CIRAD : le département Territoires, Environnement et Acteurs (TERA) et le département Forêts, programme Forêts naturelles.

Programme forêts naturelles du CIRAD-Forêt

Le CIRAD-Forêt mène ses recherches suivant trois axes : l'étude des arbres et des plantations, l'étude du bois, et enfin l'étude des forêts naturelles. Ce dernier axe concerne l'étude de la diversité génétique et de la croissance et de la régénération des massifs forestiers aussi bien que la mise au point de modes d'aménagements innovateurs tels que l'aménagement à multi-usages qui forme la thématique de ce stage.

Equipe multi-agents du CIRAD-TERA

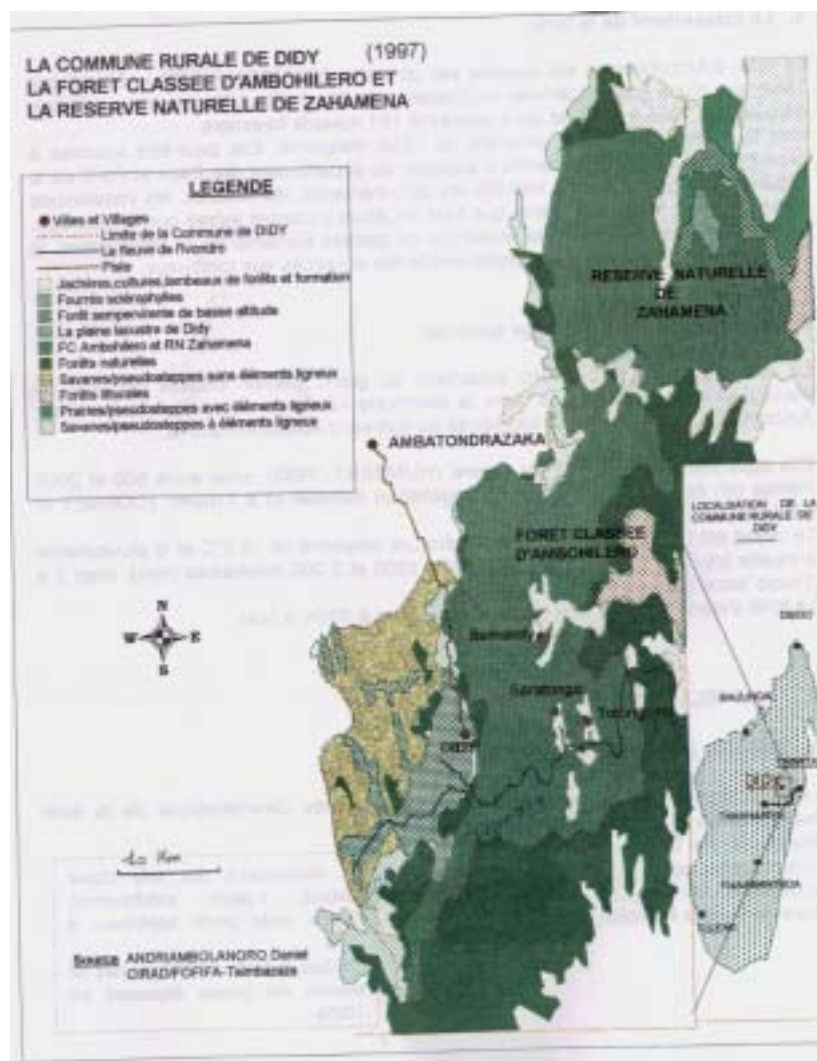
Le CIRAD-TERA étudie de manière pluridisciplinaire les dynamiques sociales et spatiales des territoires ruraux à travers les stratégies, les réglementation, les modes d'exploitation des ressources...

Au sein de TERA, l'équipe multi-agents, dirigée par François Bousquet, cherche plus spécifiquement à accompagner les processus de prise de décision en matière de gestion des ressources, en développant des modèles multi-agents concernant l'accès, l'usage et la répartition de ces ressources et qui permettent d'explorer les systèmes complexes que sont les espaces exploités par l'homme.

A cette fin, elle développe depuis trois ans une plate-forme de simulation multi-agents, *Cormas*, qui, parce qu'elle permet de se situer à l'échelle du comportement individuel, est un outil novateur de modélisation, et donc de compréhension, des interactions entre dynamiques sociales et naturelles d'un écosystème.

Annexe B

Localisation du terrain modélisé



Annexe C

Diagrammes d'action et équations des villages

A propos de l'algorithme C.2: quand les villageois effectuent un changement de stratégie (migration ou extension), leur seuil de satisfaction qui crée ce changement de stratégie est abaissé de 0.2. C'est un artifice informatique (mais qui pourrait traduire le fait que les paysans essaient de limiter leurs besoins avant de se résoudre à changer de comportement) afin de ne pas qui permet de ne pas envahir l'espace d'un seul coup puisqu'il faut laisser un peu de temps au sol pour sentir l'effet de la stratégie. Ce seuil se met à remonter de 0.5 les années où la satisfaction l'a dépassé. Il faut donc quatre années de satisfaction supérieure au seuil pour qu'il retrouve son niveau initial.

Evolution démographique

Le taux de croissance démographique est réajusté chaque année suivant la formule :

$$txCrois = txCroisStab + txModifCrois * (seuilFertilStab - satisfTavy)$$

où :

$txCrois$ est le taux de croissance démographique actuel

$txCroisStab$ est le taux de croissance en période de stabilité. Il est égal à 2.5%

$txModifCrois$ est le facteur d'amplification de l'ajustement

$seuilFertilStab$ est la fertilité moyenne pour lequel le village a son taux de croissance à 2.5%

$satisfTavy$ est la fertilité moyenne des cultures de l'année.

Ceci permet de créer des situations d'équilibres dans l'évolution des villages.

Satisfaction annexe

La méthode `calculeSatifAutre` de `Didy` calcule `satifAutre`, coefficient de satisfaction lié aux activités annexes d'un village de la manière suivante :

$$satifAutre = biodMoy(1 - malus)$$

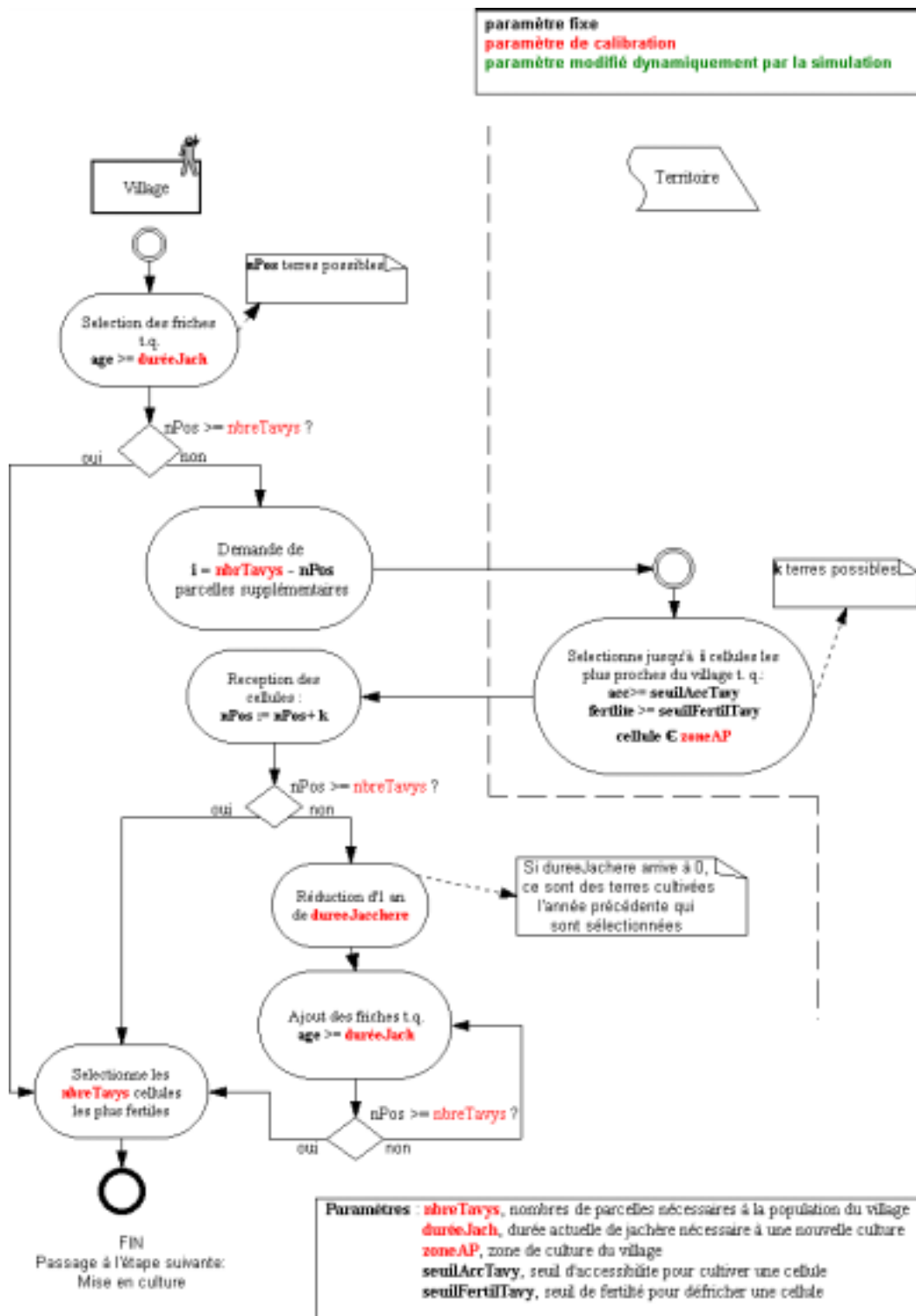


FIG. C.1 – Modélisation du choix des tavys par les villages

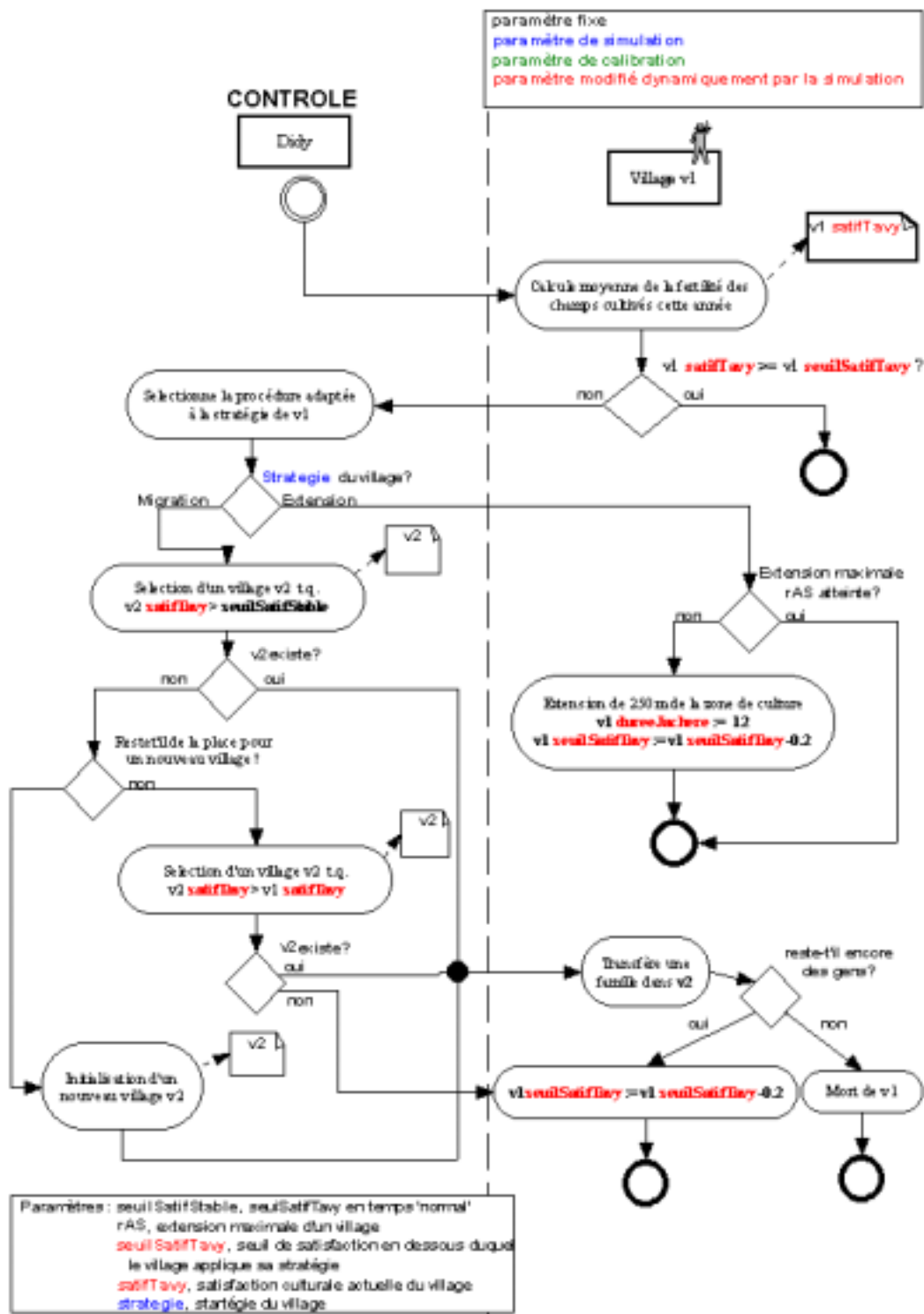


FIG. C.2 – Modélisation de l'ajustement du seuil de satisfaction des paysans

avec

$$malus = \begin{cases} 0.1 * \frac{nbrBuch * population}{tailleZone^2} & \text{si } \frac{nbrBuch * population}{tailleZone^2} \leq 10 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

biodMoy est le coefficient de biodiversité moyen des cellules contenues dans la sphère d'activité du village.

malus est le malus lié à la présence d'exploitations dans la zone d'activité du village.

nbrBuch est le nombre de bûcherons total des exploitations présentes dans la zone d'activité.

tailleZone est la taille de la zone d'activité du village.

pop est la population du village

En effet, le malus doit être proportionnel à la densité de bûcherons dans la zone ainsi qu'à la densité de population du village (importance de la ponction de ressources). Les expériences montrent qu'il est la plupart du temps compris entre 1 et 10. C'est pourquoi il est limité à 10, puis divisé par 10, afin d'être ramené à un coefficient compris entre 0 et 1. Ce calcul n'est supposé refléter aucune réalité, c'est juste une opération permettant d'évaluer l'importance de la présence de bûcherons.

Annexe D

Diagrammes d'action des exploitations

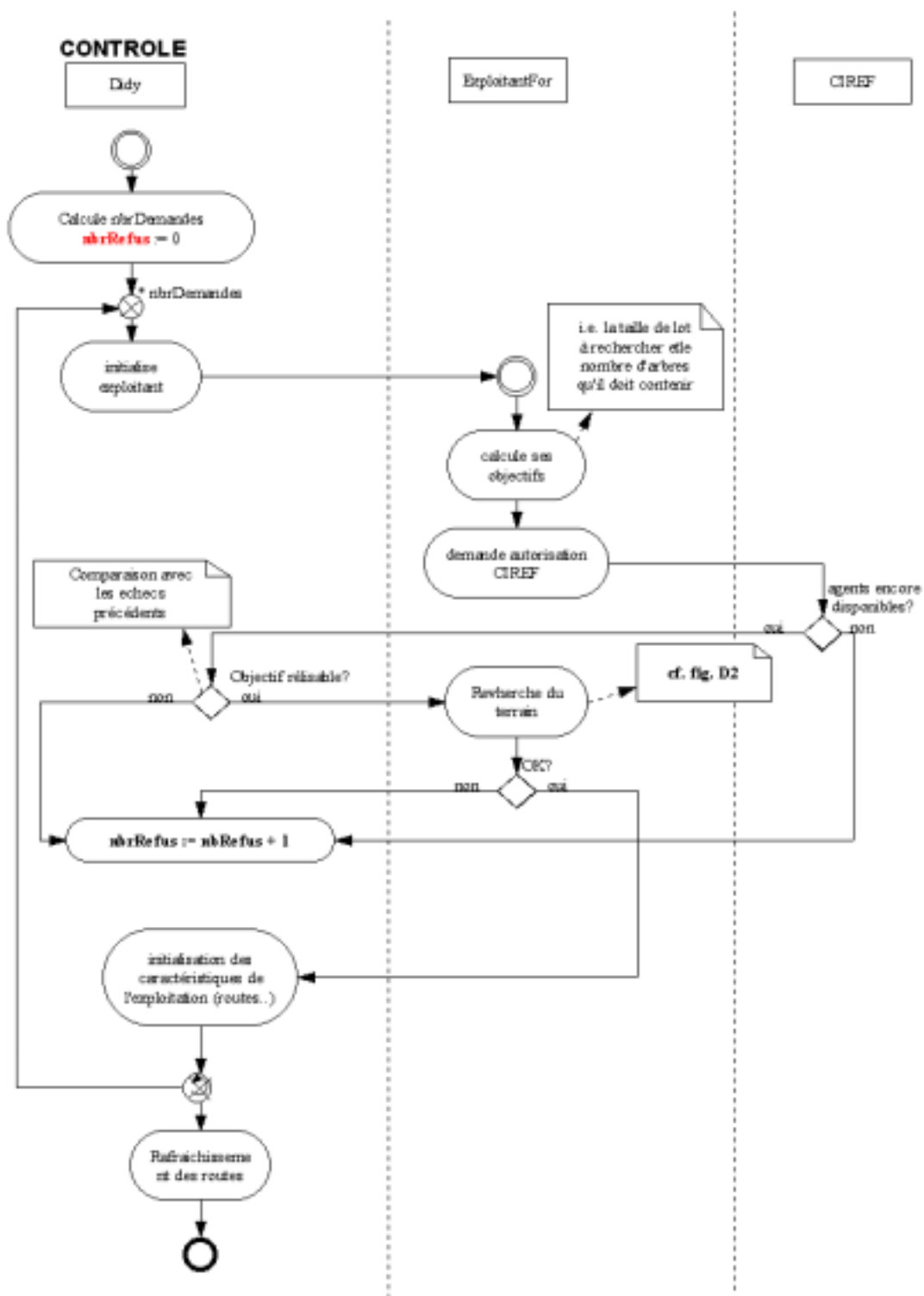


FIG. D.1 – Diagramme général du déroulement d'une phase de recherche d'exploitations

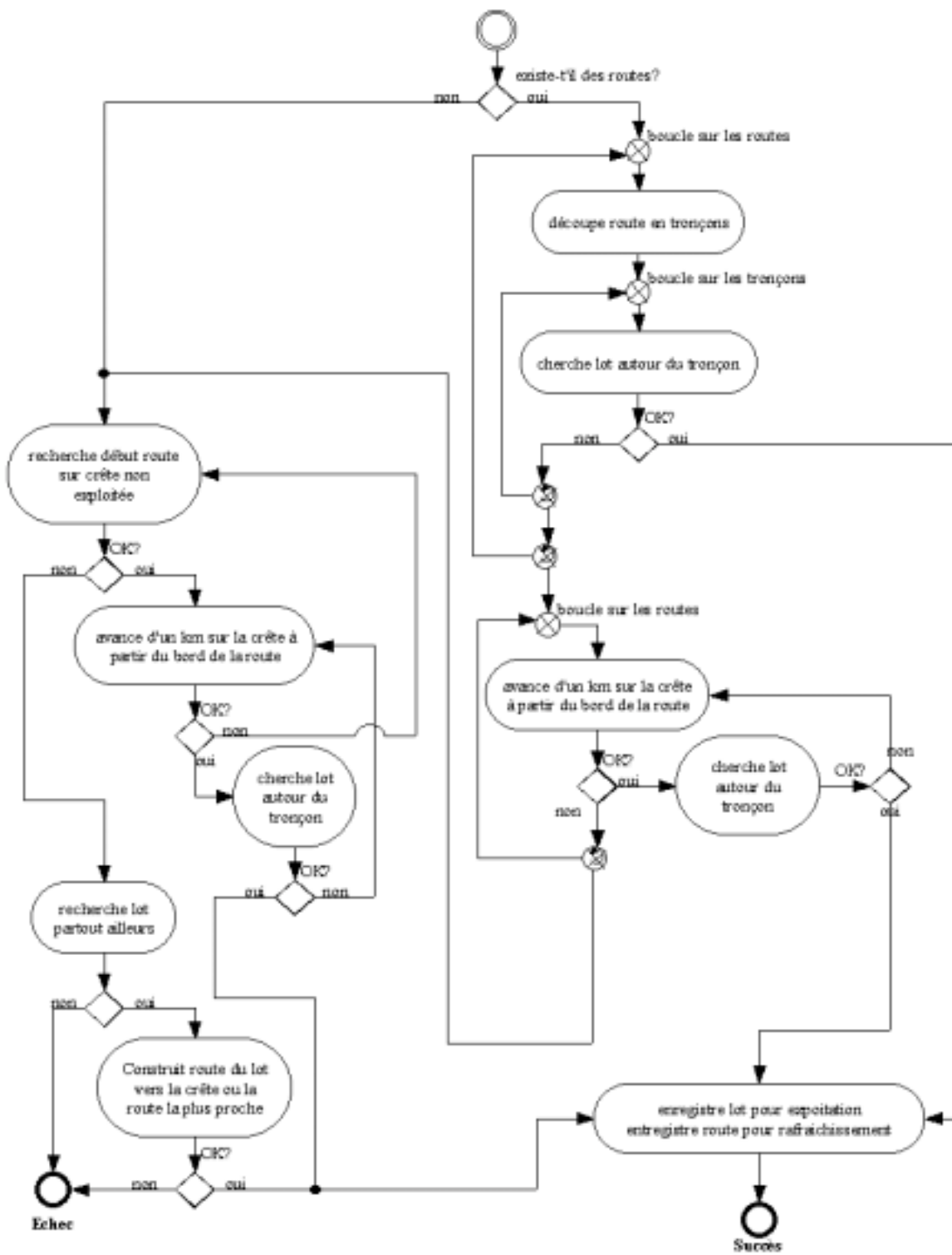


FIG. D.2 – Algorithme de recherche d'un lot par un exploitant

Annexe E

Diagrammes d'état des paramètres spatiaux

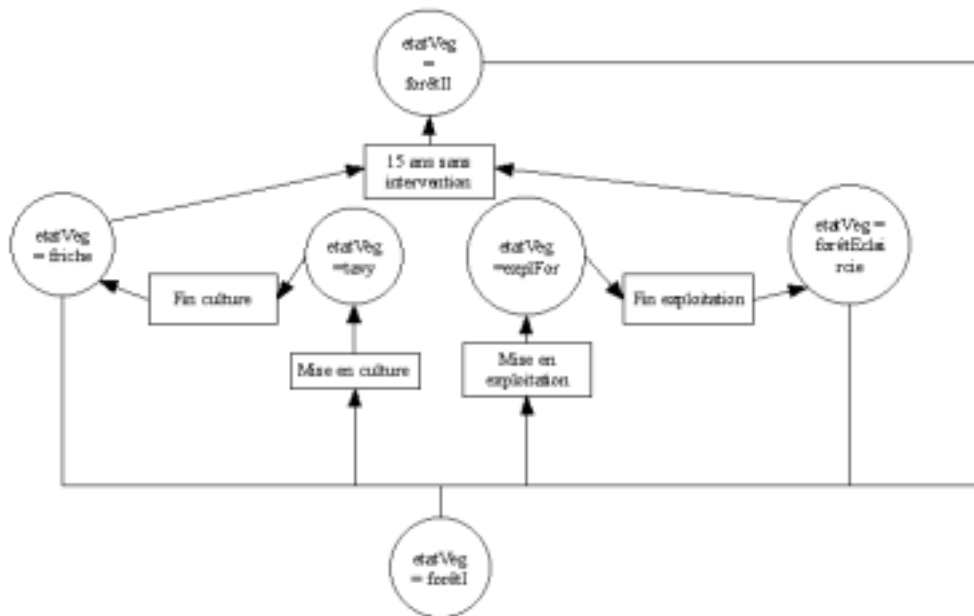


FIG. E.1 – Diagramme d'état de l'état de la végétation

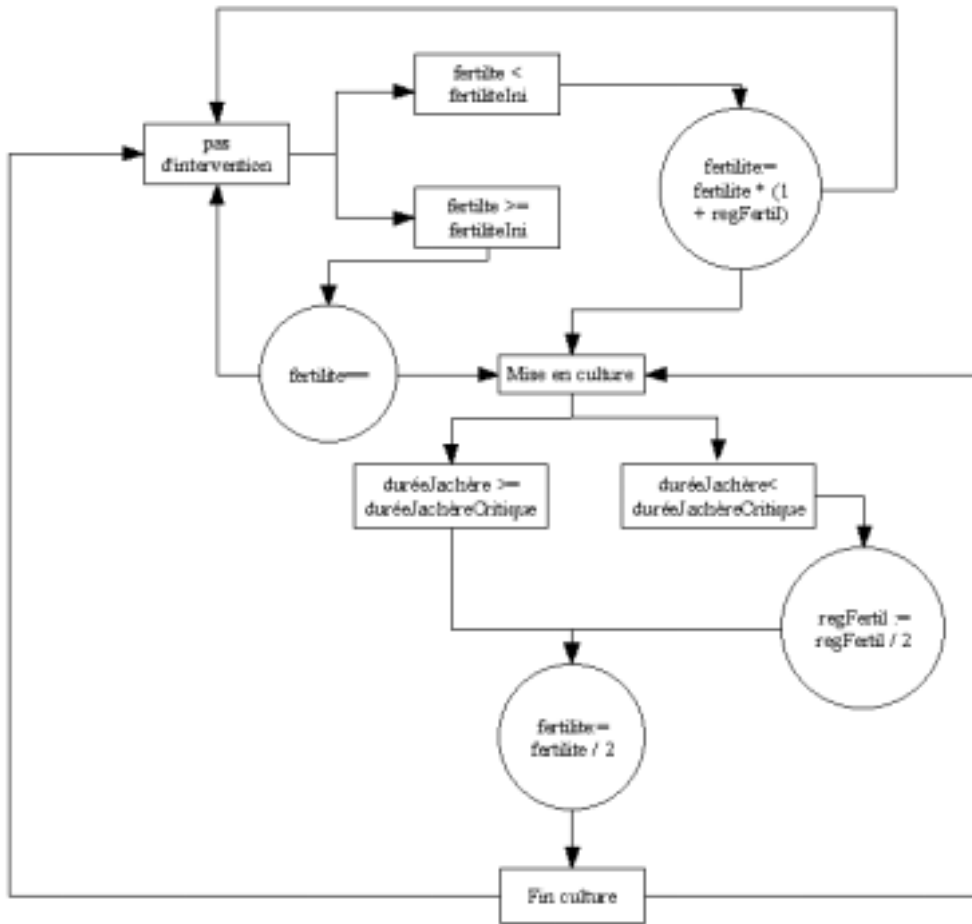


FIG. E.2 – Diagramme d'état de l'état de la fertilité

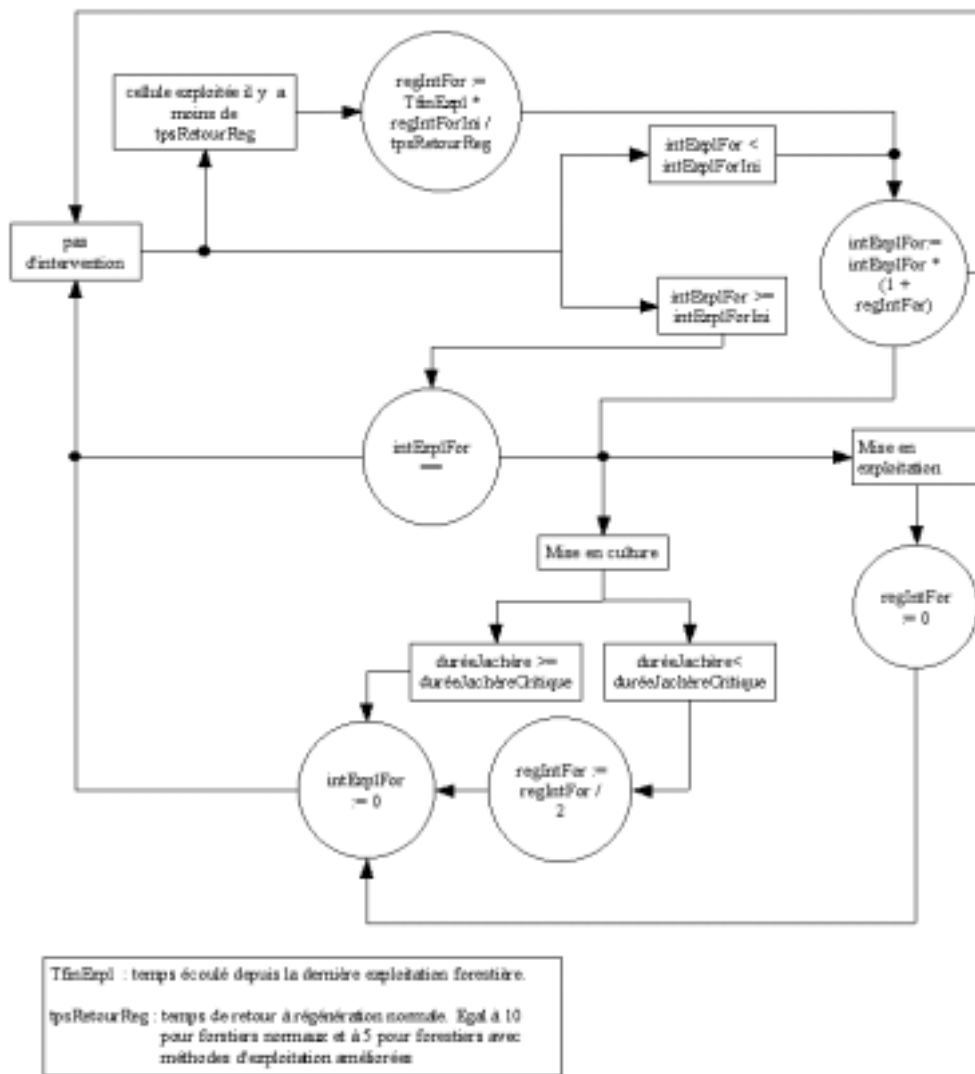


FIG. E.3 – Diagramme d'état de l'intérêt pour l'exploitation forestière

Annexe F

Paramètres spatiaux et faciès

Faciès	Pourcentage d'espèces représentées : biodiversite = 1 pour le pourcentage maximal, puis règle de trois pour les autres faciès	Qualité des sols : fertilité	Nbre d'arbres exploitables à l'hectare (calculé par nbre moyen d'arbre de l'espèce exploitée * pourcentage d'arbres de diamètre supérieur à 40 cm) : intExplFor = 1 pour le nbre maximal, puis règle de trois pour les autres faciès	Pentes : accessibilite
Vcc	60% (maximum) : biodiversite = 1	sols profonds et relativement riches : fertilitite = 1	31 (maximum) soit intExplFor = 1	douces : accessibilite = 0.5
Sa	47.8%, soit biodiversite = 0.8	sols peu profonds, secs et pauvres : fertilitite = 0.5	20 soit intExplFor = 0.7	fortes : accessibilite = 0.35
So	47.1%, soit biodiversite = 0.79	sols peu secs et pauvres, mais profonds : fertilitite = 0.7	0 soit intExplFor = 0	assez douces : accessibilite = 0.4
Vcv	35.5%, soit biodiversite = 0.59	sols peu profonds, secs et pauvres : fertilitite = 0.5	27 soit intExplFor = 0.85	fortes : accessibilite = 0.35
Bf	42.7%, soit biodiversite = 0.71	sols profonds et riches mais engorgés : fertilitite = 0.9	0 soit intExplFor = 0	presque absentes : accessibilite = 0.75
Mf	/, soit biodiversite = 0	sols inondés : fertilitite = 0	0 soit intExplFor = 0	absentes : accessibilite = 0.85

TAB. F.1 –

Annexe G

Les paramètres variables du modèle

Cette annexe dresse un petit bilan des paramètres quantitatifs variables du modèle. Ces paramètres sont pour la plupart des variables de classe des agents et se modifient donc facilement dans une méthode de classe `initClassVar` que possède chaque agent.

Pour chacun de ces agent, sont présentés tout d'abord les paramètres réglant leur initialisation, puis les paramètres réglant leur dynamique.

Paramètres des cellules

Les paramètres initiaux des cellules sont essentiellement les attributs liés au faciès (`fertilite`, `intExplFor...`): pour chacun de ces attributs, centre et écart du tirage aléatoire normal dépendant du faciès, ainsi que coefficient de régénération sont initialisés dans la méthode de classe `initClassVars` de la classe `Cellule_Didy`. Seul l'attribut `couvert`, indépendant du faciès est initialisé dans la méthode `init0` de `Cellule_Didy`. La modification de ces paramètres permettra donc de changer la structure initiale du paysage.

Parmi ces paramètres initiaux, il y a également l'échelle spatiale d'une cellule, `TaillePatch`.

Les paramètres d'évolution sont :

- Baisse de fertilité suite à un an de tavy: C'est la variable de classe `chuteFertTavy`.
- Traumatisme lié à une exploitation forestière: La variable de classe `TpsRetourReg` représente le temps de retour à la normale (retour linéaire) des coefficients de régénération des différents paramètres attaqués (représente blessure sur végétation environnante).
- Traumatisme dû à surcultivation

Là 2 variables de classe: `DureeJachereCritique`, durée de jachère pour laquelle la régénération commence à décroître et `TxDegRegFert`, facteur de décroissance de cette régénération

Village

Le seul paramètre initial variable de `Village` est sa population initiale, `popIni`, initialisée dans la méthode `initialize` de `Village`.

Les paramètres d'évolution sont classés en :

- Choix des tavy

Cette action est paramétrée par des seuils d'accessibilité et de fertilité, respectivement `seuilAccTavy` et `seuilFertStab`. Ce dernier paramètre est utilisé à la fois pour choisir des nouveaux tavys suffisamment fertiles, pour adapter la croissance des villages à la fertilité des cultures en cours, et pour signaler une extension ou une migration du village.

- Croissance démographique

Elle dépend des variables `txCroisStable`, qui est le taux de croissance pour une satisfaction culturelle égale à `seuilFertStab`, et `txModifCrois`, qui paramètrent le degré d'adaptation de la croissance aux variations de fertilité par rapport à ce même `seuilFertStab`.

Exploitants forestiers

Les paramètres initiaux sont ceux déterminant les critères de sélection de l'exploitant (superficie de l'exploitation, objectif en nombres d'arbres exploitables et nombre de bûcherons). Ces critères sont calculés par tirage aléatoire normal autour d'un centre qui est initialisé dans la méthode de classe `initClassVars` de `ExploitantFor`. La variabilité inter-bûcheron qui dépend donc de l'écart-type de ces tirages est également déterminé dans cette méthode.

Les paramètres d'évolution peuvent être classés en :

- Construction d'une route:

2 types de paramètres sont impliqués:

- Surcoûts dû à la construction de la route
- Seuil d'accessibilité pour construction d'une route hors d'une crête: c'est le variable de classe `SeuilAccRoute`.

- Variation du nombre d'exploitants d'année en année :

Déterminée par 4 facteurs que sont:

- le seuil de demandes abouties à partir duquel le nombre de demandes augmente
- le coefficient de cette augmentation
- le seuil de demandes non abouties à partir duquel le nombre de demandes diminue
- le coefficient de cette diminution

Les zébus

Le seul paramètre initial lié aux zébus est la taille des troupeaux.

Les paramètres d'évolution sont ceux qui déterminent les cellules sur lesquelles les zébus vont divaguer. Ils sont initialisés dans la méthode de classe `initClassVars` de `Zébu` et au nombre de deux :

- `SeuilAcc`, seuil d'accessibilité d'une cellule pour un zébu
- `seuilCouvertMax`, couvert nécessaire dans une au moins des cellules voisine pour qu'un zébu pénètre sur une cellule.

La CIREF

Les paramètres variables de la CIREF se réduisent au nombre d'agents disponibles pour la reconnaissance des terrains et à l'éventuel quota (pourcentage maximal de cellules exploitées) appliqué.