

# *L'anticipation dans les systèmes multiagents destinés à la modélisation de phénomènes sociaux complexes*

Application à la modélisation des fronts pionniers amazonniens

Mémoire de stage de Master II « Intelligence Artificielle et Décision »  
réalisé à Brasilia de Mars à Aout 2007

Bruno BONTE

Travaux réalisés pour le **CIRAD** (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) en partenariat avec le laboratoire de sécurité environnementale de l'université de Brasilia.



# Table des matières

---

<b>Table des matières.....</b>	<b>3</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>5</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>7</b>
<b>Partie 1: La construction du modèle Solimões.....</b>	<b>9</b>
Méthodologie suivie: une approche ComMod .....	9
Le modèle .....	11
Résultats et discussions .....	19
<b>Partie 2: De l'intérêt de l'anticipation dans les modèles ComMod .....</b>	<b>22</b>
Une évolution « agents réactifs » -> « agents cognitifs »?.....	22
Choix du type d'anticipation .....	22
<b>Partie 3: L'anticipation dans le modèle TransAmazon.....</b>	<b>26</b>
Le modèle TransAmazon.....	26
L'implémentation de l'anticipation .....	30
<b>Partie 4: Limites et perspectives.....</b>	<b>36</b>
Problèmes de calibration .....	36
Une ouverture: la décomposition des « stratégies » des agents.....	36
Construction et résolution de l'arbre de décisionnel.....	37
Utilisation d'autres méthodes d'anticipation que les arbres de décisions: les Processus Décisionnels Markoviens .....	38
<b>Conclusion .....</b>	<b>40</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>42</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>44</b>
Annexe 1: Diagramme de classes général du modèle Solimões .....	46
Annexe 2: Visualisations des sorties du modèle Solimões.....	48
Annexe 3: Une interprétation du modèle formel de Solimões (UML).....	49
Annexe 4: Questionnaire pour la collecte de données liées à l'anticipation.....	53
Annexe 5: Une réponse originale au questionnaire sur l'anticipation .....	60



## ***Remerciements***

---

Je tiens tout d'abord à remercier Paulo Celso Gomes qui a rendu ce stage possible, m'a aidé et appuyé tout au long du stage. Il s'est toujours intéressé de près à mes questionnements même lorsqu'ils sortaient de son domaine de compétences. Muito obrigado Paulo.

Je tiens également à remercier Jean-Pierre Briot et Pierre Bommel qui m'ont encadré, me faisant profiter de leur expérience, même à distance, et m'ont toujours soutenus.

Ensuite, un grand merci à l'ensemble de l'équipe de Manaus, qui m'ont appris beaucoup sur l'Amazonie et ses problèmes et m'ont accueilli très chaleureusement. Un grand merci particulièrement à Sandra, Irosch, Ivanilce et Sylvia.

Je remercie grandement tous les experts que j'ai contacté au sujet d'Uruara et particulièrement Jean-François Tourrand et Manuela Vieira qui se sont réellement penchés sur mes questions.

Enfin, je salue l'ensemble des professeurs et étudiants du département d'ingénierie mécanique dans lequel j'étais hébergé et les remercie de l'accueil qu'ils m'ont fait.



## Introduction

---

Ce rapport présente les travaux réalisés dans le cadre d'un stage de master 2 « intelligence artificielle et décision » à l'université Paris 6. Le stage lui-même est né d'une collaboration entre l'université Pierre et Marie Curie, le CIRAD (Centre Français de Coopération Internationale en Recherche Agronomique et Développement) et le laboratoire de sécurité environnementale de l'université de Brasilia (LabSAM).

L'origine du stage vient de la volonté d'étudier l'application de techniques agent et décision à un type particulier de modélisation: la modélisation d'accompagnement. La modélisation d'accompagnement (« ComMod ») fait intervenir la démarche de modélisation elle-même dans un processus d'aide à la prise de décision collective (Bousquet & al., 1999). Il ne s'agit pas ici d'améliorer la décision mais plutôt de rendre le processus de décision davantage transparent et équitable, le plus fréquemment dans des problèmes de gestion de ressources partagées.

Les systèmes multi-agents étant grandement utilisés dans les démarches ComMod pour leur capacité à simuler des systèmes sociaux complexes, l'objectif de ce stage est d'y enrichir la définition des comportements des agents tout en respectant les contraintes de la modélisation d'accompagnement. Ainsi, ce stage a consisté à étudier dans quelle mesure les agents de ces modèles pouvaient être dotés de comportements anticipatifs.

Il est difficile d'étudier l'approche ComMod sans se baser sur un cas concret. Afin de pouvoir à la fois avoir une bonne compréhension de cette approche et une matière consistante pour construire des agents anticipatifs, mon travail s'est scindé en deux parties: la réalisation du modèle *Solimões* dans le cadre d'une approche ComMod, et la définition d'un comportement anticipatif chez les agents du modèle *TransAmazon* déjà existant.

Le lecteur trouvera ainsi un rapport composé de quatre parties. Dans la première partie nous présentons la modélisation d'accompagnement à travers la description du travail réalisé sur la construction du modèle *Solimões*. Dans la deuxième, nous discutons l'intérêt d'utiliser des méthodes d'anticipation dans ce type de modélisation. Dans la troisième partie, nous présentons le travail réalisé sur une implémentation d'une méthode d'anticipation dans le modèle *TransAmazon*. Enfin, dans la quatrième et dernière partie, nous expliquons les limites de notre implémentation et proposons des perspectives pour l'utilisation de l'anticipation dans les modèles ComMod.

Pour ne laisser aucune ambiguïté, nous soulignons que ce rapport relate une expérience de modélisation dans un cadre particulier et ne prétend pas apporter de contribution originale à la théorie de la décision ou à l'informatique.





# Partie 1: La construction du modèle Solimões

---

## Méthodologie suivie: une approche ComMod

### *L'approche ComMod*

ComMod pour « modélisation d'accompagnement » (Companion Modeling en anglais) caractérise une démarche particulière d'aide à la prise de décision collective. Il ne s'agit pas ici d'améliorer la décision mais plutôt de rendre le processus de décision davantage transparent et équitable.

La plupart des démocraties du monde évoluent vers une décentralisation de la gouvernance pour arriver à placer la prise la décision au plus proche possible des intéressés. Le plus souvent les décisions importantes peuvent alors être prises par un petit groupe de représentants des parties mises en cause, avec l'aval d'un médiateur représentant l'administration responsable.

Le bon fonctionnement de ce type de gouvernance suppose qu'un certain nombre de conditions soient remplies. Notamment, elle requiert un même niveau de participation de chacune des parties dans la décision. Il n'y a pas de décideur se préoccupant de chacune des parties et assurant leurs intérêts respectifs. Ainsi, les différents décideurs doivent être capables, à la fois de comprendre les intérêts des autres et de défendre efficacement leurs propres intérêts.

L'idée de l'approche ComMod est de faire réaliser un modèle multi-agents du problème de décision à l'ensemble des décideurs, afin de trouver un langage commun où sont exprimés les enjeux de chacun et les différents points de vues. La construction du modèle elle-même fait partie de la démarche et aide à la participation. Les problèmes de décisions sont souvent des problèmes complexes et la démarche de modélisation d'accompagnement consiste à co-construire de manière séquentielle une série de modèles du sujet, permettant à chaque fois aux décideurs/modélisateurs de mieux comprendre le problème qu'ils ont à résoudre. La démarche préconise une alternance modèle / jeu de rôle, de manière à mettre les acteurs en situation et à permettre à tous d'assimiler les hypothèses du modèle (Etienne & al., 2003). Nous nous concentrerons ici sur la construction du modèle.

Le terme ComMod a une dizaine d'années. Il est vaste et s'enrichit et se précise encore aujourd'hui. Nous n'espérons pas ici en faire le tour mais seulement donner une idée simple de la manière dont nous le comprenons pour ce rapport. La définition donnée ci-dessus est simpliste et pour de plus amples détails nous vous conseillons la lecture de la « charte » :

(<http://cormas.cirad.fr/ComMod/fr/charter>).

Ce qui nous intéresse spécifiquement ici dans l'approche ComMod, est la place et l'utilisation du modèle. D'après nous elle est multiple et nous allons ici nous contenter de parler du rôle du modèle *Solimões*.

### **Le contexte de réalisation du modèle Solimões**

Ce modèle naît d'une collaboration entre le CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), une institution brésilienne basée à Manaus : l'INPA (Institut de Recherches sur l'Amazonie) et une institution Brésilienne basée à Brasilia: le Labsam (Laboratoire de Sécurité environnementale de l'université de Brasilia).

Cette collaboration rentre dans le cadre d'un projet déjà en place depuis 1987 et actuellement chapeauté par l'INPA, qui s'intitule « PRODESAS » : 'Pour le Développement Durable du Haut Solimões'. Le fleuve Solimões est un des deux fleuves (avec le Rio Negro) qui se rencontrent un peu en aval de la ville de Manaus pour former le fleuve appelé Rio Amazone au Brésil. Le « haut Solimões » désigne une petite région d'Amazonie continentale brésilienne, frontalière avec le Pérou et la Colombie (*Figure 1*).

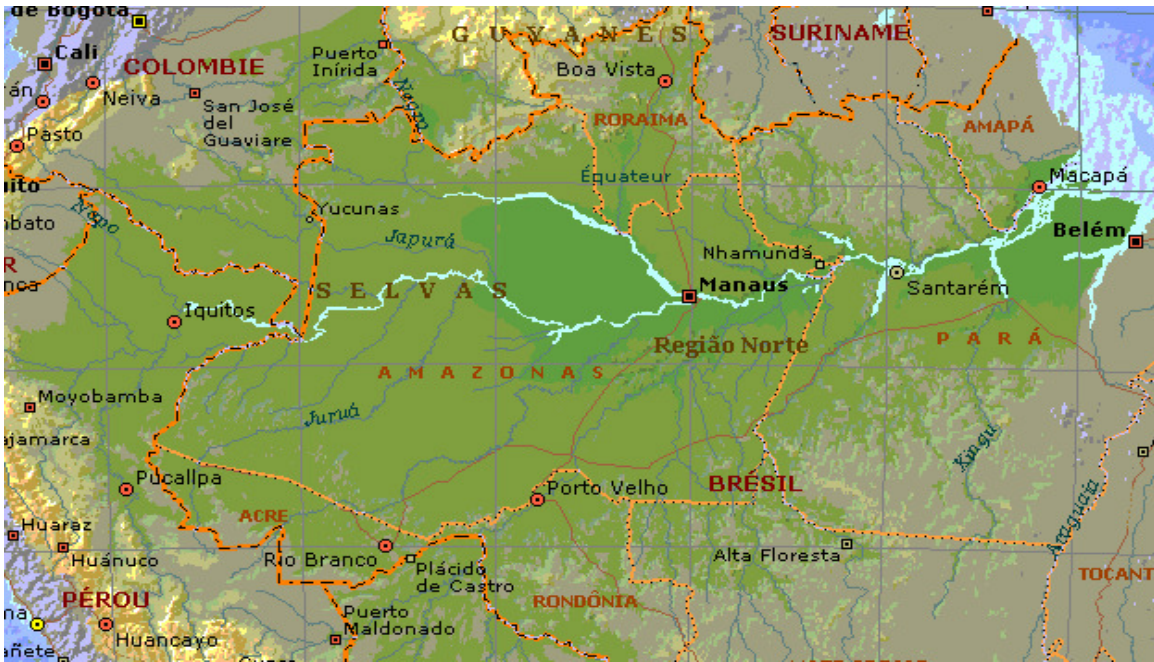


Figure 1: Carte de situation de Benjamin Constant

Ces années de travail sur le terrain ont créé des conditions pour que le développement puisse être conçu et exécuté avec la participation active des acteurs : en l'occurrence les communautés indigènes du Haut Solimões. L'intervention exige donc à présent pour l'agent de développement une bonne compréhension de la réalité des populations au développement desquelles il prétend contribuer, en leurs reconnaissant une vision propre de leurs problèmes et aspirations et, d'autre part, une attitude d'ouverture au dialogue et une disponibilité pour l'apprentissage.

C'est donc ici le constat d'un manque d'interaction entre l'agent de développement et les acteurs locaux qui nous ont dirigés vers une approche ComMod.

Bien sûr, une question de recherche et des destinataires ont été définis pour ce modèle. Cependant, comme on peut le voir dans la partie suivante, la question est très vaste, voire vague. Il s'agit en fait de représenter tout ce qui touche à la production d'une communauté indigène du Haut Solimões. En prenant en compte les externalités en terme d'impact sur le paysage (occupation du sol) et sur les familles individuelles. En fait, ce premier modèle a davantage la fonction de susciter des questions sur les problèmes et aspirations des communautés que d'apporter une réponse sur la question officielle (posée par le projet PRODESAS) sur la coordination des ventes sur le marché commun.

Il s'agit d'un modèle multi-agents assez complexe dans le sens où il fait intervenir un grand nombre de paramètres. Il va servir d'outil d'aide à la discussion et l'idée est que l'on puisse l'orienter vers une direction ou une autre selon les questions que l'on veut discuter. Pour faire une analogie avec un outil plus simple, non dynamique par exemple, il nous semble qu'il serait équivalent d'arriver avec une carte grossière sur laquelle seraient présentés les éléments qui nous paraissent importants pour régler notre question. Une fois la question réglée, le fond de la carte reste disponible pour discuter d'autres problèmes, quitte à enrichir la carte autant que nécessaire ou à y redéfinir certains éléments.

# Le modèle

## **Présentation**

Il s'agit d'un modèle générique d'une communauté traditionnelle du Haut Solimões pour comprendre son mode de production et plus particulièrement sa relation au marché de la ville voisine: Benjamin Constant, que l'on peut voir sur la carte de la page précédente (*Figure 1*).

Le centre de décision du modèle est la « famille » nucléaire (2 adultes et 1 à 5 enfants et adolescents). La capacité de production d'une famille dépend des paramètres suivants:

- Les contraintes environnementales (saison, rivière, vitesse de régénération de la forêt)
- La situation de la famille (main d'oeuvre & terres disponibles)

L'idée serait d'utiliser ce modèle par la suite pour caractériser la production d'une communauté ainsi que ses besoins en terme d'accès au marché (pour la vente) et de créer un lien entre la production d'une communauté, la situation des familles qui la composent et l'évolution du paysage (utilisation et couverture végétale des sols).

Pour des motifs didactiques, nous pouvons diviser le travail de modélisation ComMod en trois étapes. Premièrement, l'élaboration d'un modèle conceptuel, ensuite, à partir de ce modèle, la construction du modèle informatique puis celle du jeu de rôle.

Il n'est pas question ici de jeu de rôle puisque seul le modèle informatique a été développé. Nous nous concentrerons sur la construction du modèle conceptuel et décrirons brièvement son implémentation informatique.

Le modèle à réaliser est un modèle multi-agents. C'est à dire que l'on va modéliser un environnement dynamique dans lequel vont évoluer des « agents » que l'on aura dotés d'un comportement. Ce type de modèle est couramment (voire systématiquement) utilisé dans les démarches ComMod. Il permet d'exhiber les fonctionnements modélisés dans leur complexité et est particulièrement bien adapté à un transfert en Jeu de Rôle (JdR), les agents du modèle devenant les joueurs du JdR.

On note que la définition du terme « agent » dans ces modèles est très particulière. Il désigne toute entité dynamique représentant une entité (réelle) considérée comme un centre de décision par les modélisateurs/décideurs. On verra dans notre modèle par exemple que l'entité représentant la « mairie » est un agent, ainsi que celle représentant la « famille nucléaire ». L'individu par contre, membre de la famille, n'est pas un agent car nous ne comptons pas arriver à un niveau de détail où on représenterait le comportement d'un individu particulier.

Nous insistons sur ce point car il va peut-être paraître choquant de voir qu'un ensemble très hétérogène d'entités rentre dans notre classe « agent ». Ces entités peuvent parfois avoir des structures très différentes. Aucune ontologie d'agent précise n'a été définie ni respectée. Par exemple, on ne va pas pour chaque agent rencontrer systématiquement l'ensemble des buts qu'il doit réaliser ou l'ensemble des ressources dont il dispose. Certains types d'agents peuvent ainsi avoir des structures et des comportements plus simples que certains éléments de l'environnement.

Cependant, cette dénomination peut être expliquée. Tout d'abord, le modèle trouve son intérêt dans la discussion qui entoure sa construction et sa présentation. Or c'est dans ces discussions que les comportements et structures de ces « agents » doivent être définis. Les acteurs représentés eux, lorsque l'on va s'enquérir de leur comportement, vont avoir plus de facilité à décrire leur monde à leur manière qu'à travers une ontologie compliquée. Ensuite, le modèle conceptuel réalisé pour l'implémentation du modèle informatique va en partie être repris pour la mise en place du Jeu de Rôle correspondant. Ces agents vont alors devenir des joueurs, qui sont de véritables acteurs.

Nous distinguerons deux modèles conceptuels. Un modèle conceptuel formel traduit en UML (Unified Modeling Language) que nous avons construit lors de ce stage et qui sera après ensuite

traduit en code informatique presque automatiquement. Et un modèle conceptuel informel (que nous désignerons comme modèle conceptuel tout court) qui est une analyse et une synthèse du fonctionnement de ces villages, qui avait été réalisée antérieurement au stage, en prévision toutefois d'une approche ComMod sur le sujet.

Le modèle informel, est décrit dans l'article (Gomes et al. 2006). Ce premier modèle informel a été construit de manière participative. Une méthode de collecte de données participative (par opposition à experte) est une méthode qui permet aux populations étudiées de participer au choix des données qui vont être recueillies ou non. C'est à dire que, moyennant un certain cadre indispensable, le chercheur ne va pas récolter une liste de valeurs précise, mais plutôt chercher à répondre à des questions ouvertes en s'assurant qu'il a bien tous les éléments en main.

En l'occurrence, dans notre cas, les questions qui nous intéressent ont été: pouvez-vous dessiner une carte de la communauté? Et: quelles sont vos activités, quand et où ont-elles lieu? Les figures ci-dessous présentent les résultats obtenus (Figures 2 à 4).

Ainsi, un souci dans la réalisation du modèle conceptuel formel a été de rester cohérent avec ces travaux. Pour cette raison, nous avons un pas de temps mensuel bien qu'un pas de temps semestriel eu suffi pour ce que nous désirions représenter. De même, nous avons représenté explicitement les activités réalisables et les lieux où elles pouvaient être réalisées.



*Figure 4: Calendrier des Activités de la communauté de São João*

### **Le modèle formel**

Nous présenterons le modèle conceptuel formel en deux parties: l'environnement puis les agents.

#### **1. L'environnement**

On distingue trois types d'entités dans la définition de l'environnement des agents. Tout d'abord les entités spatiales, qui constituent notamment un support topologique pour l'ensemble du système. Ensuite les entités situées, qui constituent ici le véritable environnement naturel. Enfin, les entités de l'environnement social ou économique.

#### **Les entités spatiales**

L'environnement représenté est constitué de tous les éléments liés à la production du village. La figure suivante est une copie d'écran de la visualisation de l'évolution du paysage pendant une simulation du modèle implémenté. On y voit une vue d'ensemble de l'environnement spatial. (*Figure 5*).



Illustration 5: visualisation de l'environnement de Solimões lors d'une simulation

Au niveau conceptuel, on peut voir que nous avons choisi d'utiliser un environnement spatial sous forme de grille plutôt que sous forme de vecteurs. Nous avons fait ce choix car il correspond bien à l'utilisation du sol par les familles qui plantent généralement des surfaces de 1/4 d'hectare à 1 hectare.

Nous avons quatre types d'entités spatiales, cellules de la grille, représentant quatre types de sol: un sol inondé en permanence, qui constitue le lit de la rivière, un sol inondé périodiquement (en bleu sur la carte), que nous appellerons la plage (praia en portugais, en beige sur la carte), un sol sec extérieur au village (de jaune à vert foncé sur la carte) et un sol sec interne au village (le sitio, en rose sur la carte).

### Les entités situées

Les seules entités situées du modèle sont les entités de « couverture végétale » et la rivière. Elles correspondent à des parcelles de végétation de la surface d'une cellule de notre grille (0.25 ha). Elles sont de 5 types différents et sont situées sur des cellules de plage (champs-bas-fond) ou sur des cellules de sol sec externe au village (champ-sol-sec, champ abandonné, jachère, forêt). Ces couverts végétaux sont chacun dotés d'une dynamique propre.

Les champs-bas-fond représentent la végétation que l'on rencontre sur les zones inondables de cette région. Le fleuve Solimões est chargé de sédiments et chaque année, sa crue détruit la majeure partie des plantes des surfaces entièrement inondées et dépose une nouvelle couche de sol fertile sur ces surfaces. Ainsi, toutes les cellules « plages » sont chaque années (après chaque crue) recouvertes de champs-bas-fond quasiment vierges et fertiles. Dans notre modèle cela apparaît par le fait que ces couverts n'évoluent pas d'une année sur l'autre.

Les couverts de sol-sec par contre évoluent au cours du temps. Ils constituent un automate cellulaire qui évolue chaque année et représente (de manière très caricaturale) la dynamique de la forêt. Nous ne rentrerons pas dans la description détaillée de cette dynamique mais expliquerons simplement qu'une cellule de l'automate peut se trouver dans quatre états différents (les quatre couverts de sol sec) et va évoluer selon l'ordre de la figure ci-dessous (*Figure 6*) en fonction de ses conditions de voisinage au cours de l'année. Une intervention extérieure est nécessaire pour passer de Forêt à Champs-Sol-Sec: la cellule doit être déboisée par un agent famille. Nous avons







moins détaillé dans ce type de démarche. Dans notre cas, comme cela se voit bien au niveau de l'agent famille, nous avons privilégié une approche descriptive riche en détails (Edmonds & Moss, 2004). Tout d'abord, les ressources de la famille ne sont pas représentées sous une forme monétaire mais sous la forme d'une réserve des produits les plus importants à la famille. Ensuite, nous avons décomposé le comportement de la famille sous la forme de réalisation « d'activités » chacune bien détaillée selon ses caractéristiques. Le diagramme de classes ci-dessous représente le modèle formel ainsi construit (Figure 7).

En parallèle à ce comportement lié à la production (pas de temps mensuel), nous avons implémenté un comportement « démographique » (pas de temps annuel) qui fait évoluer la composition de la famille d'une manière que nous ne développerons pas ici. Chaque famille est composé d'un ensemble de membres qui consomment et qui travaillent. Mensuellement, la main d'oeuvre disponible est recalculée en tenant compte d'un nombre de jours d'arrêt pour cause de maladie, tiré aléatoirement pour chaque membre actif.

Enfin, le protocole d'attribution des bourses gouvernementales a été reproduit pour l'attribution des bourses aux agents.

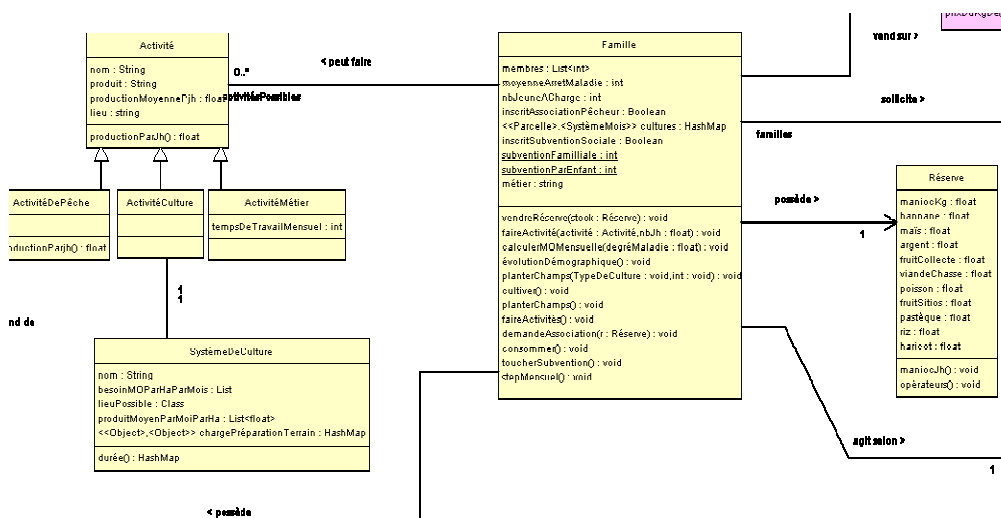


Figure 7: structure de l'agent Famille du modèle Solimões

Tout d'abord, ces décompositions permettent de coller au travail participatif effectué dans les communautés. Notamment, elles permettent d'utiliser explicitement le diagramme Activités/lieux présenté dans le modèle informel (Figure 3). Mais également, dans une optique de comportement intelligent anticipatif des agents, de leur permettre de réfléchir sur les activités à réaliser en sachant pour chacune, les ressources qu'elle nécessite (en terme de main d'oeuvre) et les produits qu'elle rapporte, l'agent sachant de quels produits il dispose.

Le comportement dynamique des agents familles est relativement complexe. Chaque agent calcule ses besoins en fonction de ses membres et réalise les activités qui lui permettront de maintenir sa réserve au dessus de ses besoins. Chaque fin de mois, l'agent consomme ses besoins, moyennant, si il ne possède pas les ressources nécessaires, un protocole de survie allant de la vente de produits excédentaires à la demande d'aide à l'association.

## **L'association villageoise**

L'association villageoise réelle, présente dans quasiment toutes les communautés de Benjamin Constant suite aux actions de PRODESAS n'a que très peu d'activités. L'entité Association de notre modèle représente en fait la solidarité entre les familles qui, elle, est très importante. Il s'agit d'une simple redistribution d'un fonds commun aux familles étant le plus dans le besoin.

## **La mairie**

La mairie n'a qu'un rôle très limité dans notre modèle, comme dans la réalité. Elle se contente de renflouer la trésorerie de l'association lorsque celle-ci dépasse un certain seuil. Cette aide respecte un protocole proche de celui observé en réalité (un certain nombre d'appels avant d'obtenir une réaction effective).

## **Résultats et discussions**

### ***Implémentation du modèle sous la plate-forme Cormas***

#### ***1. La plate-forme Cormas***

Cormas est une plate-forme de modélisation multi-agents que certains considèrent comme une plate-forme de modélisation orientée sous la forme d'une classe de langage objet, les caractéristiques de l'entité étant les attributs de la classe et ses compétences étant ses méthodes. Les entités (les instances des classes) sont ensuite gérées par le simulateur de Cormas d'une manière qui est également à définir par le modélisateur.

Cormas guide le modélisateur en lui proposant d'une part une structure minimale sous forme de classes/type d'entités élémentaires que le modélisateur doit spécialiser pour créer son propre modèle (citons les classes « EntitéSpatiale », « Agent », « AgentSitué », « EntitéPassive », ...) (Le Page & Bommel, 2004). De plus un certain nombre de protocoles sont déjà implémentés ou au moins prévus (citons la communication entre agents, le déplacement dans un espace en deux dimensions, la vue des entités ayant une existence physique, ...).

Peut être justement en raison de son ouverture et du langage de programmation utilisé (SmallTalk), la plate-forme Cormas, créée par le CIRAD en 1999 (Le Page et al., 2000) a été largement exportée et est utilisée par de nombreux chercheurs de tous horizons et nationalités.

#### ***2. Le modèle***

Tout d'abord nous avons implémenté le modèle décrit ci-dessus sur la plate-forme Cormas, l'implémentation étant quasiment identique au modèle conceptuel formel présenté et c'est pourquoi nous ne nous attarderons pas dessus. Le diagramme de classes complet du modèle est présenté en annexe [Annexe 1].

Le modèle résultant nous permet de faire des simulations sur environ 10 ans avec un grain de temps de un mois. On note qu'un important travail de calibration a dû être réalisé avant de pouvoir le présenter.

Un modèle de ce type, dynamique, est construit pour tester/discuter des scénarios (Simon, 2006). Nous avons plusieurs scénarios en tête mais n'en avons implémenté aucun autre qu'un scénario stationnaire, préférant attendre des avis extérieurs sur le sujet.

### ***Présentation du modèle aux chercheurs du projet PRODESAS***

Ce modèle pouvait en l'état être présenté à différentes personnes avec des buts différents:

- Soit directement aux communautés concernées à Benjamin Constant, communautés qui

avaient directement participé à sa construction par la construction du modèle informel. Cela aurait permis d'avoir un retour sur notre interprétation des discussions qui avaient eu lieu lors du premier contact.

- Soit aux orientateurs du projet PRODESAS à Manaus afin de discuter avec eux de la manière dont ils peuvent utiliser une approche ComMod sur leur terrain et des différentes orientations qu'ils imaginent pour le modèle en fonction de nouvelles questions de recherches qui peuvent émerger.

Pour des raisons davantage logistiques que scientifiques nous avons choisi la deuxième option qui convenait tout aussi bien à nos attentes pour ce modèle. Cette présentation a demandé un effort de synthèse important pour pouvoir présenter notre modèle de façon à la fois claire et détaillée.

Plusieurs visualisations ont été définies [Annexe 2], mais surtout nous avons, sans changer le code du modèle, changé l'ensemble de l'organisation de notre modèle UML pour un modèle que nous pensons plus clair et équivalent [Annexe 3]. L'idée de ce changement était de pouvoir représenter un maximum d'informations sur un diagramme de classes. Cette dernière modification, est la conséquence d'une remarque à ce sujet de Pierre Bommel, informaticien de l'équipe Green ayant une dizaine de modèles ComMod à son actif, qui a bien voulu se pencher sur mon modèle et me donner son avis. Elle est un peu difficile à justifier mais nous nous y essayons dans les paragraphes qui suivent car la question nous semble intéressante.

Comme nous l'avons dit, la modélisation sous Cormas fonctionne de la manière: un type d'entité = une classe. Ainsi, pour tout concept que l'on veut représenter dans notre modèle et qui correspond à une « chose », un « objet » dans la réalité, on doit définir une nouvelle classe qui va nous permettre, en l'instanciant, de faire « exister » l'entité (ou les entités) correspondante(s) dans notre modèle. Or ici, nous tenons à décortiquer le raisonnement de nos agents et avons donc introduit le concept « d'activité » dans notre modèle. Et ces activités ne correspondant à aucun objet physique, nous avons défini une classe dont les instances sont les descriptions d'activités parmi lesquelles l'agent doit choisir et qu'il utilise pour faire ses calculs. Cette classe n'est jamais instanciée au cours de la simulation, elle l'est seulement à l'initialisation où elle permet simplement de définir l'ensemble des activités réalisables par les agents.

Or une « activité », si elle ne correspond à aucun « objet » existant, contient bien une forme d'existence ayant un début, une fin et même une localisation. Ainsi, instancier la classe « Activité » à chaque fois que l'activité est effectuée et faire « vivre » l'instance pour la durée de la tâche correspond beaucoup plus au paradigme de modélisation Cormas « type d'entité = classe » que le fait d'instancier en fait des descriptions de comportement comme nous le faisons initialement, ce qui peut fonctionner en programmation objet mais devient peu expressif en terme de modélisation.

Nous nous sommes permis d'insister sur ce point parce que justement l'ensemble du modèle et notamment cette question d'activités fut extrêmement bien reçue, comprise et assimilée par le groupe de chercheurs très hétérogène à qui nous l'avons présenté à Manaus. Il s'agissait de chercheurs d'horizons très différents, anthropologie, sociologie, statistiques, agronomie et biodiversité et les discussions ont menées vers certaines questions de recherches jugées intéressantes par l'ensemble du groupe et qui sont autant de perspectives pour la suite du modèle Solimões.

### ***perspectives pour le modèle Solimões***

Parmi les propositions d'exploitation du modèle qui ont été faites, les deux qui mèneront le plus probablement vers des exploitations concrètes sont la question de la durabilité de l'environnement et la question de la sécurité alimentaire. A titre d'exemple, nous développons ici la première proposition, faite par Sandra Noda, anthropologue à l'UFAM (Université Fédérale d'Amazonie), qui porte sur la durabilité de l'installation des communautés.

Le but est d'essayer d'estimer la vitesse d'altération du capital « environnement » des communautés traditionnelles en question. Il faut savoir que ces communautés étaient jusqu'à peu des communautés nomades qui se déplaçaient à une fréquence assez lente mais régulièrement.

Or l'augmentation de la population, notamment due à l'immigration de communautés péruviennes, ainsi que le développement des villages (éducation, santé) tendent à sédentariser les communautés. Sandra Noda pense que les communautés de Benjamin Constant perdent ainsi beaucoup du potentiel de l'environnement qui les entoure en le surexploitant. D'après le Dr Noda, l'évolution de l'âge moyen des zones de jachère proches du village serait un indicateur extrêmement parlant pour discuter la dégradation de cet environnement. En effet, il traduit une baisse de fertilité des sols (des jachères de plus en plus jeunes signifieraient une exploitation de plus en plus intensive) mais également une baisse des connaissances et de l'appréhension que les habitants ont de la forêt vierge et qui diminue d'année en année avec la disparition de certaines espèces végétales et animales de leur environnement proche.

Peu de modifications sont nécessaires pour considérer cette question dans Solimões. Bien-sûr il faudrait introduire une mesure des âges des parcelles de jachère et envisager une représentation de la répartition géographique des jeunes jachères. Ceci sera quasiment immédiat. L'autre point, plus délicat, sera de considérer que l'agent va devoir préférer installer une parcelle proche à une parcelle éloignée. Ce qui l'indiffère pour l'instant mais est naturellement vrai dans la réalité et à l'origine de la pression existante autour du village.

Une solution serait d'une part que les caractéristiques de l'activité culture dépendent de la distance à laquelle se trouve la parcelle cultivée, demandant par exemple plus de main d'oeuvre pour une parcelle éloignée. D'autre part, il faut que l'agent puisse choisir de couper une jachère à l'âge qu'il désire (actuellement, il doit attendre qu'elle soit mature), moyennant une baisse de production du champ implanté.

Cette question, ainsi que les autres, demandent un nouveau travail d'investigation, de synthèse et de programmation. Un travail de « mestrado » (entre master et doctorat au Brésil) va débiter à l'université utilisant et développant le modèle Solimões pour travailler sur les problèmes de sécurité alimentaire.

## Partie 2: De l'intérêt de l'anticipation dans les modèles ComMod

---

### Une évolution « agents réactifs » -> « agents cognitifs »?

J. Ferber, dans (Ferber, 95) distingue les agents cognitifs des agents réactifs selon qu'ils utilisent une représentation symbolique explicite du monde ou une représentation sub-symbolique, c'est-à-dire intégrée dans les capacités sensorimotrices de l'agent. On note que Ferber ne prend pas en compte le fait que l'agent ait un comportement « réflexe » ou téléologique dans sa discrimination entre cognitif ou réactif mais qu'il utilise cette caractéristique pour distinguer des sous-classes de ces deux premières familles.

Quand il aborde la notion d'anticipation, Ferber explique qu'il s'agit peut-être de la distinction essentielle entre l'agent cognitif et réactif. La représentation que l'agent cognitif a du monde lui permet de construire un plan « dans sa tête » pour anticiper et planifier ses actions.

Les agents habituellement utilisés dans les modèles Cormas sont des agents ayant un comportement réflexe et le plus souvent des agents davantage réactifs que cognitifs. Leur comportement est régi par des règles qui doivent pouvoir être explicitées à des humains de part le besoin de transparence inhérent à la modélisation d'accompagnement. Ainsi, chaque variable utilisée dans ces règles de décisions (perception de l'état interne de l'agent ou du monde qui l'entoure) doit correspondre à un symbole compréhensible. Cependant, ces règles de décisions sont très simple et n'utilisent qu'une faible part de la perception de l'agent. Ferber laisse un espace indéfini entre agent cognitif et agent réactif et les agents Cormas se situent là.

L'apport de cette capacité d'anticipation aux agents Cormas, demande qu'on les dote d'une représentation symbolique du monde suffisamment précise pour que l'agent puisse travailler sur des prévisions de ce monde symbolique et dirige indéniablement ces nouveaux agents vers des agents purement cognitifs.

### Choix du type d'anticipation

#### ***Les contraintes***

Dans une démarche de modélisation d'accompagnement, il est important de pouvoir à tout moment comprendre et justifier les comportements des agents au sein du modèle.

Il faut à tout prix éviter l'effet « boîte noire » de manière à ce que toutes les personnes impliquées dans la construction du modèle puissent comprendre les hypothèses responsables des sorties du modèle.

Traditionnellement, les agents des modèles ComMod évoluent selon un ensemble de règles de décisions fixes qu'ils appliquent systématiquement et qui régissent l'ensemble de leurs comportements. Dans les modèles les plus évolués, l'agent peut changer un ensemble de règles de décisions pour un autre (appelés « stratégies »).

Ce type de codage est en effet bien adapté à l'approche ComMod. Idéalement, chaque règle est discutée avec les acteurs modélisés ou au moins justifiée par des méthodes d'analyse du discours. Si un doute subsiste ou si différentes règles de décisions incohérentes coexistent, des règles plus ou moins caricaturales sont définies. En regroupant des règles de décisions cohérentes, on obtient les différentes stratégies qui doivent elles mêmes pouvoir être identifiées comme des comportements (ou des caricatures de comportements) observés sur le terrain.

#### ***Les différents types d'anticipation***

Le concept d'anticipation est relativement large. Originellement les premiers travaux sur

l'anticipation sont dus aux psychologues et biologistes qui cherchaient à expliquer les comportements adaptatifs et parfois complexes de certains animaux (Stinkwich, 2003).

En 1985, le biologiste Robert Rosen propose un modèle général de l'anticipation. La définition qu'il introduit fait la liaison entre connaissances du futur et prise de décision à l'instant présent : « Un système anticipatif est un système qui contient un modèle prédictif de lui-même et/ou de son environnement lui permettant de changer son état en fonction des prédictions sur les instants futurs » (Rosen, 1985).

Tout système autonome se trouve dans un environnement dynamique et l'intérêt des actions qu'il effectue se trouve dans le futur. On peut donc dire que tout système autonome anticipe.

Pour des raisons que nous avons expliquées plus haut, même en considérant tout comportement de système autonome comme anticipatif, nous allons nous intéresser uniquement à ceux qui explicitent cette anticipation sur plusieurs pas décisionnels et, lorsque possible, à ceux qui sont prédictifs. Entendons comme comportements prédictifs, ceux qui construisent une prédiction du monde futur par opposition à des comportements simplement anticipatifs qui se contentent de fournir l'action menant au futur le plus favorable.

Comme exemple de codage de comportement implicite on peut citer un système de classeurs construit par un algorithme génétique. Ce système fournit bien, pour chaque situation, l'action à effectuer pour arriver au meilleur résultat (ou même au résultat ayant le meilleur potentiel dans le cas d'une décision sur plusieurs pas de temps). Ce type de méthode a d'ailleurs déjà été utilisé pour la construction de modèles alternatifs au modèle économique classique (Rejeb, 2005). Toutefois, il ne justifie pas le choix de cette action (estimation du gain futur, risque encouru) et prédit encore moins l'état du monde conséquent.

Cette contrainte d'explicitation nous dirige vers la théorie de la décision et plus précisément les modèles décisionnels existants en décision dynamique. Nous présentons dans les paragraphes suivants les deux méthodes les plus utilisées répondant à nos critères: les arbres de décisions et les processus décisionnels markoviens.

## **1. Les arbres de décisions**

La définition rigoureuse d'un arbre décisionnel dans le sens de la décision dynamique est la suivante:

*« Un arbre de décision  $T$  est un arbre pour lequel les noeuds sont partitionnés en trois sous-ensembles disjoints : les noeuds de décision  $N_d$  (dessinés en rectangles), les noeuds de chance  $N_c$  (dessinés en cercles) et les conséquences  $C$  qui sont les feuilles de l'arbre de décision et auxquels sont attribuées des utilités. »*

Dans la plupart des cas, la décision est prise dans l'incertain (i.e. on ne sait pas avec certitude ce qui va se passer) et le plus simple est de considérer une décision dans le risque (incertain probabilisé). Il faut arriver à prendre en compte dans la décision l'utilité de l'état recherché, mais également le comportement de l'agent face au risque.

L'arbre de décision, s'il pose plusieurs problèmes, est une méthode explicite et prédictive.

L'exemple suivant, tirée de la thèse de Paul Weng en théorie de la décision (Weng, 2007) illustre bien l'arbre de décision.

La **figure 8** présente un exemple très simple. Les carrés représentent les noeuds décision, les cercles représentent les noeuds chance. Au noeud racine  $D_1$ , le décideur a le choix de l'action Haut ou Bas. L'action Bas rapporte un gain nul. En revanche, l'action Haut amène le décideur à une case chance où il a une probabilité de  $3/4$  de se trouver dans une nouvelle situation de décision (noeud  $D_2$ ) et une probabilité de  $1/4$  de perte de  $-1$ . Au noeud  $D_2$ , il a le choix entre deux actions Haut et Bas. L'action Haut amène à une perte de  $1$ , tandis que l'action Bas offre de manière équiprobable un gain de  $3$  ou une perte de  $1$ .

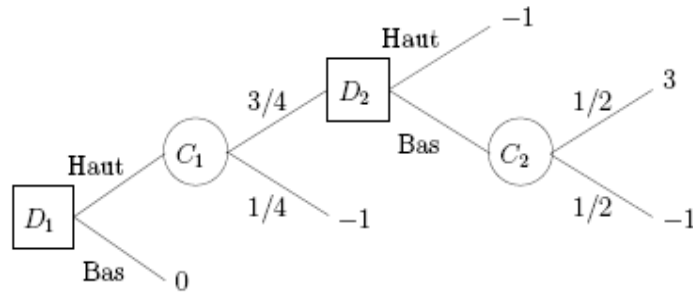


Figure 8 arbre décision simple (tiré de (Weng, 2007))

### 3. Les processus décisionnels markoviens

Les processus décisionnels markoviens (MDP) utilisent une représentation du monde sous la forme d'un uplet  $\langle S, A, T, R \rangle$ . Il est constitué des éléments suivants:

- $S \{s_1, \dots, s_n\}$ : un ensemble fini d'états
- $A \{a_1, \dots, a_m\}$ : un ensemble fini d'actions
- $T(s, a)$ : une loi de transition, qui à chaque état  $s_i$  et action  $a_j$ , associe une distribution de probabilité sur l'ensemble des états  $S$  correspondant à la probabilité d'arriver dans chacun des états ( $T(s_0, a) (s_1)$ ) après avoir effectué l'action  $a_j$  dans l'état initial  $s_i$
- $R(s,a)$ : Une fonction de récompense immédiate, qui traduit les préférences des agents en attribuant une note à chaque couple  $(s,a)$ .  $R(s,a)$  correspond au gain engendré par la réalisation de l'action «a» dans l'état «s».

Résoudre un MDP sur un horizon  $H$  (fini dans le cas qui nous concerne) consiste à trouver, pour chaque pas de temps (temps restant avant d'atteindre l'horizon) et pour chaque état, l'action à réaliser pour arriver à la stratégie (série états/actions) optimale sur l'ensemble du chemin parcouru.

Il s'agit d'une méthode puissante pour les problèmes de décision dynamiques séquentiels dans l'incertain. Aujourd'hui de nombreux travaux sur le sujet permettent d'utiliser cette méthode de manière assez générique qui considère par exemple différentes représentations de l'incertain ou des préférences (Weng, 2006), (Perny et al., 2005).

De plus, des travaux sont également en cours pour l'utilisation de PDM dans un cadre multi-agents, c'est à dire lorsque un ensemble d'agents anticipent une entreprise commune. Certains formalismes ont déjà été mis au point sur cette question, comme Dec-POMDP encore en développement (Thomas & al., 2006) et l'utilisation des MDP multi-agents commence à être testée sur des applications concrètes de modélisation (Chavès & Boutellier, 2005).

#### Les méthodes retenues

Tout d'abord, nous avons voulu utiliser des arbres décisionnels car c'est la méthode que les modélisateurs et destinataires des modèles vont appréhender la plus facilement. Ainsi les deux modélisateurs respectifs des modèles *Solimões* et *TransAmazon* ont préféré travailler dans un premier temps avec des arbres décisionnels dont le fonctionnement était quasi immédiat pour eux. Nous aurions aimé utiliser des Processus Décisionnels Markoviens (PDM) parce que c'est la méthode de planification la plus simple et parce qu'elle permet un apprentissage des croyances des agents sur la fonction de transition. Cependant, les thématiciens avec qui nous travaillions, ne connaissant pas cette méthode et y voyant des sources d'obscurantisme du modèle, nous n'avons

développé que les arbres de décision par souci de transparence.

Une des différences entre les arbres de décision et les PDM est que l'on ne peut pas apprendre dans les arbres de décision. Ainsi, les « croyances » sur l'évolution du monde vont être des données d'entrées qu'il va falloir trouver sur le terrain modélisé ou auprès des experts. Alors qu'avec les PDM, les agents vont pouvoir « apprendre » ces valeurs en fonction des autres agents. On utilisera pour cela un apprentissage par renforcement préalable à la simulation. Notre but étant d'obtenir un modèle décisionnel raisonnable et pas d'étudier les caractéristiques de l'apprentissage des agents.

Une autre différence importante est que la représentation en PDM est beaucoup plus compacte que celle utilisant un arbre de décision et va donc permettre d'étudier des systèmes plus complexes.



## Partie 3: L'anticipation dans le modèle TransAmazon

### Le modèle TransAmazon

#### ***Cadre général du sujet modélisé: l'Amazonie de la Transamazonnière***

L'état du Para a une surface de 1 248 042 km<sup>2</sup> (un peu plus de deux fois la France métropolitaine) étant le deuxième plus grand état du Brésil après l'Amazonie. Son territoire est divisé en 143 municipalités distribuées dans 6 « mésorégions » et 22 « microrégions » homogènes, définies selon les critères de l'institut brésilien de géographie et de statistiques (IBGE). La population actuelle est estimée autour de 6 millions d'habitants et les villes les plus peuplées sont Belem, Santarem, Maraba, Altamira et Itaituba. Certaines de ces municipalités ont une surface supérieure à de nombreux états brésiliens, jusqu'à la taille de certains pays et cette dimension territoriale est un premier grand handicap à toute politique de gestion environnementale dans l'état.

La municipalité de Uruara elle-même couvre environ 10.500 km<sup>2</sup> (un peu plus petit que l'île de France) et est traversée par 105 km de la route transamazonienne (Figure 9). D'après l'IBGE, elle comptait 18.200 habitants en 1990 et en compterait aujourd'hui autour de 45.000 (IBGE, 2002) parmi lesquels, deux tiers résident dans des régions rurales dans quelques 3.000 exploitations agricoles et le reste dans la ville de Uruara. La majeure partie de la population (70%) est considérée comme très pauvre et le taux de mortalité est élevé et croissant (passant de 0,24 en 97 à 0,54 en 2001).

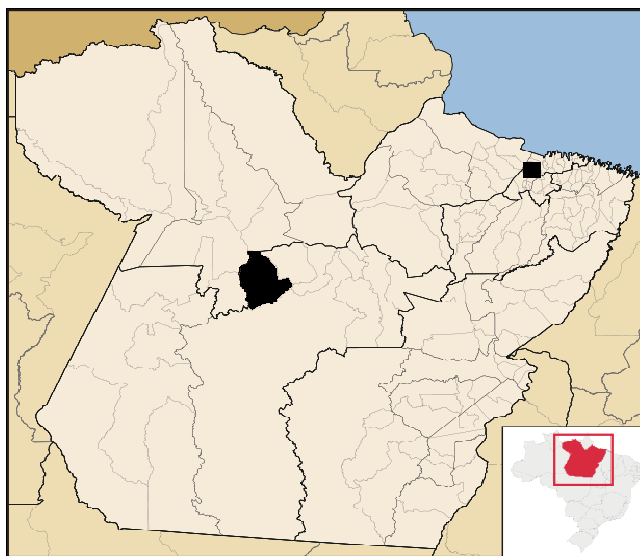


Figure 9: Carte de l'état du Para et de la commune d'Uruara

Depuis les 30 ans de son histoire agricole, la région de la Transamazonie a vu une alternance de cultures prédominantes se succéder: les cultures annuelles (jusqu'à 1977), le cacao (à partir de 74), le bois (à partir de 80), le poivre et le café (à partir de 84), l'élevage (à partir de 89) et, depuis peu, les cultures pérennes et mécanisées (97 et 2002). Certaines de ces activités sont encore présentes aujourd'hui, d'autres sont en déclin.

Dans les années 70, toute la municipalité était intégralement recouverte de forêt primaire<sup>1</sup> et peuplée par certaines communautés amérindiennes. En 1973, avec la construction de la transamazonienne, des lots agricoles de 100 ha furent délimités et attribués aux immigrants le long

1 Théoriquement une forêt primaire est une forêt qui n'a jamais été rasée. En pratique, toute forêt qui a plus d'une centaine d'années.

de la piste et de ces vicinales<sup>2</sup>. Au bout des vicinales furent délimités des lots de 500 ha à 3000 ha destinés à l'élevage.

On se trouve réellement dans ce que l'on appelle un front pionnier où les nouveaux arrivant coupent et brûlent des hectares de forêt pour y implanter des cultures ou des pâturages. Les immigrants continuent d'arriver tous les jours.

### Positionnement du modèle

Le but du modèle TransAmazon est de formaliser les pratiques agricoles (des petits producteurs) responsables de l'avancée du front pionnier. Pour, à terme, trouver d'autres pratiques viables économiquement, écologiquement et socialement de l'utilisation des sols. Par pratiques, on entend actions des producteurs sur l'utilisation du sol. Ces pratiques sont influencées par des politiques publiques d'incitation ou de répression ou par l'apprentissage de nouvelles techniques culturales (nouveaux systèmes de culture).

TransAmazon est réalisé sous la plate-forme Cormas. Il s'agit d'un modèle type « expert » dans le sens où il n'a été construit qu'à partir de données secondaires. Il formalise et synthétise une dizaine de thèses et un grand nombre de données (Bonodo, 2005).

### Description

Un environnement riche a été défini de manière à prendre en compte toutes les caractéristiques de la problématique étudiée. Ainsi, une hiérarchisation d'agrégation spatiale caractérise les types de sols, le cadastre et les couverts végétaux. Ces derniers sont dynamiques, leur évolution dépendant notamment de l'entretien apporté par les agents.

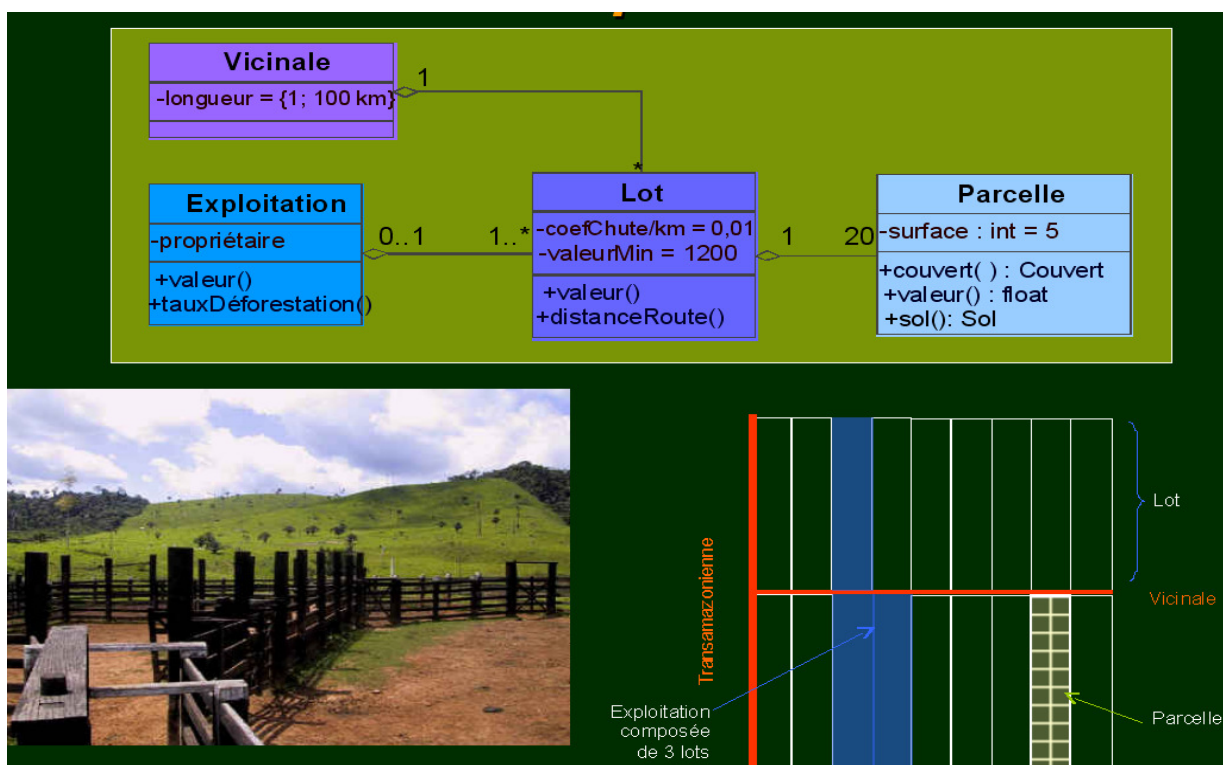


Figure 10: hiérarchie des entités spatiales du modèle TransAmazon

<sup>2</sup> Une vicinale est une voie secondaire.

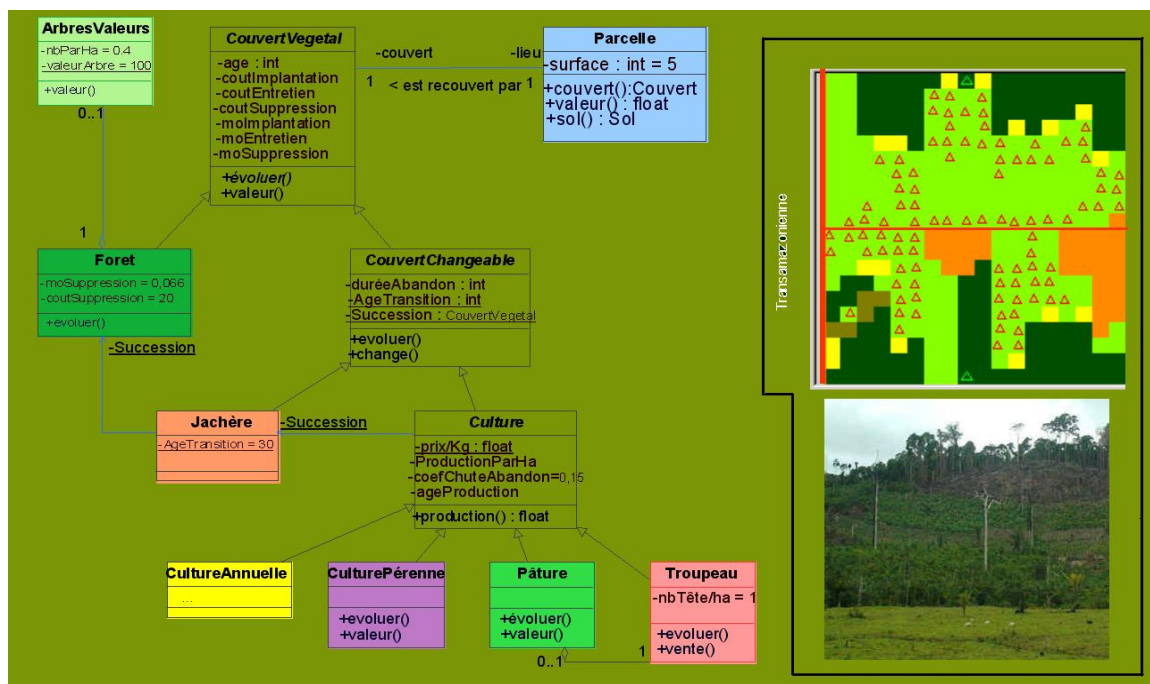


Figure 11: pattern d'occupation du sol de TransAmazonienne

On peut distinguer tout d'abord les entités spatiales qui constituent le support topologique au différentes échelles nécessaires (Figure 10). La figure 11 présente ensuite les différents types de couverts végétaux avec leur dynamique propre et les besoins d'entretien qu'ils demandent.

Les agents eux mêmes correspondent aux familles de pionniers. Ils ont trois caractéristiques principales. (i). Un certain nombre de membres de la famille qui constituent une *force de travail* qu'ils peuvent utiliser ou vendre et qu'il faut nourrir, (ii). Une *trésorerie* qui leur permet d'investir, de se nourrir et d'acheter davantage de force de travail, (iii). Et enfin, éventuellement, une *ferme* composée d'éléments de l'environnement.

Au niveau de la dynamique générale, on distingue *deux échelles de temps*. Un pas de temps annuel à l'issue duquel les agents décident l'orientation qu'il vont donner à leur exploitation et un pas de temps semestriel qui distingue chaque année la saison humide et la saison sèche pendant lesquelles, selon l'orientation choisie en début d'année, l'agent va effectuer différentes activités saisonnières.

Le comportement des agents est défini sous forme de « stratégies » qui sont composées d'un ensemble d'actions à effectuer à chaque pas de temps selon un ensemble de règles. Une stratégie est une orientation que l'agent donne à son exploitation. Trois stratégies différentes sont définies pour la gestion d'exploitation: la stratégie « conservationniste » qui dirige les exploitations vers une valorisation de la forêt, la stratégie « éleveur » qui la dirige vers une intensification de l'élevage et la stratégie « planteur » qui la dirige vers une implantation de cultures pérennes (ici le cacao). En plus de cela, une stratégie « sans-terre » dirige les agents qui ne possèdent pas ou plus d'exploitation (Figure 12).

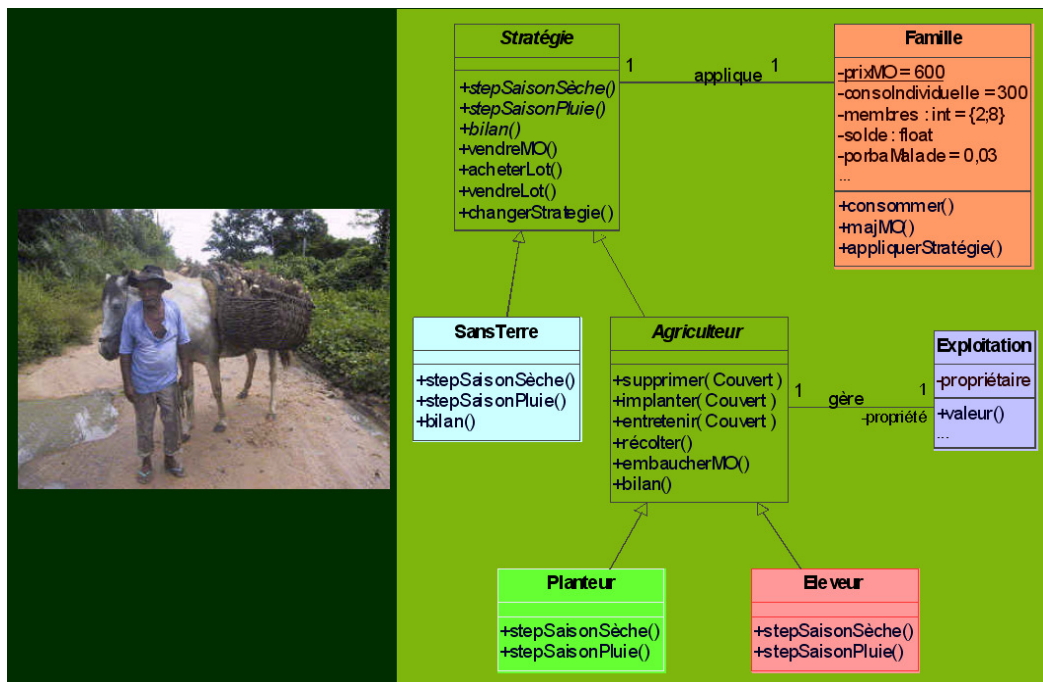


Figure 12: Un agent TransAmazon: Une famille et une stratégie

Les comportements décrits dans ces stratégies correspondent à des caricatures de comportements observés sur le terrain (pour les stratégies éleveur et planteur) ou en tout cas à des comportements plausibles chez des familles de colons (pour la stratégie conservacionniste). Leur définition résulte de la thèse de Thierry Bonodo (Bonodo, 2005) qui s'est assuré que ces comportements respectent les caractéristiques principales observées sur le terrain. Ainsi, toutes les stratégies vont imposer une activité de culture annuelle en saison sèche de manière à assurer la survie de la famille, les cultures demandant un investissement important ne vont pas être abandonnées après un changement de stratégie, ...

## Caractéristiques

### 1. Peu d'interactions entre les agents

En fait il y a deux niveaux de décision: une étape de décision pour l'achat de terrain et une étape de décision pour tout le reste. Nous parlerons parfois de décision d'assolement pour cette dernière mais elle est en fait plus large que la simple assignation d'une culture à un sol puisqu'elle concerne également la répartition des ressources parmi les différentes cultures.

Dans le modèle, seule la décision d'achat de terrain fait intervenir un processus de décision collective sous forme d'une vente aux enchères. C'est la seule situation d'interaction organisée du modèle. Les conséquences des autres décisions sont purement individuelles mais n'affectent tout de même, faiblement, les autres agents que de manière indirecte. Pour choisir la stratégie qu'il va adopter, un agent va observer les résultats qu'obtient chaque différent type de couvert chez les agents voisins.

### 4. Peu de sources d'incertitudes

Les conditions initiales des agents sont déterminantes. A l'initialisation, ils se voient attribuer des terrains vierges (appelés « lots » comme dans la réalité) de qualités de sols différentes. En fonction de cela, ainsi que de la composition des familles, les agents vont choisir différentes stratégies et le système global va évoluer en un ensemble hétérogène et d'apparence complexe. A

côté de cela, au cours de la simulation seuls deux « risques » peuvent prendre les agents au dépourvu. Le risque de maladie, qui va pouvoir immobiliser un membre de la famille et réduire ainsi ses ressources en force de travail pendant un semestre (un tirage aléatoire détermine à chaque semestre s'il y aura un malade ou non). Et le risque de changement de prix du cacao qui va changer la rentabilité du couvert « culture pérenne », en bien ou en mal. Le prix du cacao lui n'est pas aléatoire mais varie selon une sinusoïde de période relativement longue.

### **5. Des agents complexes, un grand nombre de paramètres**

Nous parlions plus haut de complexité apparente du modèle. En fait, le système dans son ensemble, par le peu d'interaction qu'il présente entre les agents, n'est pas très chaotique. Mise à part la première mise en place d'une nouvelle culture par un agent qui va être copiée par tous les autres lorsqu'elle est très rentable, on observe peu de comportements globaux. C'est plutôt le développement de chaque agent qui est très difficile à prévoir. Sa ferme est composée de nombreuses parcelles cultivables qui ont des caractéristiques différentes et même, si elles sont cultivées, des comportements différents selon la culture et la régularité avec laquelle elles sont entretenues. Or les comportements des agents vont dépendre de cet ensemble de parcelles à travers le choix d'une stratégie ou d'une autre.

## **L'implémentation de l'anticipation**

Le modèle TransAmazon est un modèle existant. Nous y avons rajouté une fonction de modélisation hiérarchique. C'est à dire qu'au cours de la simulation, les agents du modèle vont pouvoir eux-mêmes simuler leur futur et choisir l'action présente à effectuer en fonction du résultat de leur simulation. Nous considérons uniquement la décision d'assolement. La décision d'achat de nouveaux lots n'a pas été suffisamment traitée par les thématiciens. Elle existe dans le modèle initial pour que l'on puisse observer une rotation des terres à peu près probable. Cependant, la manière dont elle est représentée (protocole type vente aux enchères) n'a que peu de rapports avec la réalité qui est beaucoup plus complexe et semble faire intervenir un réseau de relations sociales complexe et obscur entre les familles de colons.

Dans notre cas, l'agent va construire un arbre décisionnel des futurs possibles qu'il a « simulé/imaginé » pour la surface de terres qu'il possède. Pour cela, il duplique son état autant de fois qu'il est nécessaire pour pouvoir prendre en compte toutes les éventualités qui peuvent arriver au pas de temps suivant. Ces éventualités sont le produit de l'ensemble des actions qu'il pourrait effectuer avec les différentes conséquences que peuvent entraîner chaque action.

Dans la suite du rapport, on parle de « clones » pour désigner ces états dupliqués. Chaque clone va lui même être capable de se dupliquer à son tour de la même manière et de faire évoluer ses propres clones pour explorer les possibilités du pas de temps suivant.

L'agent obtient au final un véritable arbre décisionnel qui se présente sous la forme de celui présenté sur la figure 13.

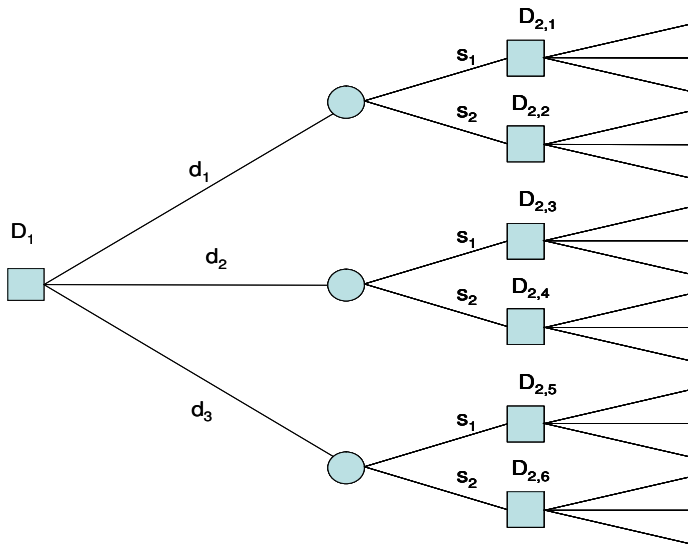


Figure 13: Arbre de décision dans TransAmazon

Ainsi la construction et l'utilisation d'arbres décisionnels requièrent la définition de trois choses différentes que nous présentons dans les paragraphes suivants. Tout d'abord l'ensemble des actions (décisions) que l'agent peut prendre à chaque pas de temps. Ensuite, les facteurs d'incertitudes qui peuvent entraîner qu'une action effectuée en un état peut engendrer différents états possibles. Enfin, il faut définir une relation de préférence sur les états, une évaluation numérique des incertitudes et finalement un critère de décision qui permette de prendre en compte les incertitudes et les préférences sur les états pour prendre la décision finale.

### Les actions

Nous avons pensé à différentes possibilités de définir les actions que l'agent pouvait effectuer à chaque pas de temps. Dans le modèle TransAmazon, l'agent a la possibilité chaque année d'appliquer une des trois stratégies d'exploitation possibles et peut se voir attribuer le statut de « sans-terre » s'il perd sa ferme. Dans un premier temps, nous avons préféré conserver les acquis du modèle TransAmazon et nous considérons que pour un agent, effectuer une action consiste à choisir une stratégie ou une autre. Ainsi, nous assurons un comportement à court terme le plus réaliste possible.

L'ensemble d'actions utilisé par l'agent pour sa simulation est donc le suivant:  $A = \{\text{conservationniste, éleveur, planteur}\}$ .

Comme nous l'expliquons dans les perspectives, il serait intéressant de se passer de ces stratégies « toutes faites » et d'envisager une action comme une combinaison d'activités réalisable dans l'année quelconque.

### Les incertitudes et les préférences

#### 1. Les préférences sur les états à atteindre

A présent que les agents ont une représentation du monde dont ils peuvent simuler l'évolution, il va être possible et nécessaire de leur permettre de préférer certains états à d'autres de manière à ce qu'ils puissent choisir les actions les menant vers l'état qu'ils préfèrent. Il va donc falloir définir une relation de préférence sur les états si on veut utiliser un processus de décision anticipatif. Dans le modèle initial, l'agent choisit la stratégie à suivre en fonction des résultats qu'il a observé chez lui et chez ses voisins pour les cultures principales de chaque stratégie (« forêt » pour la stratégie conservationniste, « pâturage » pour la stratégie éleveur et « culture de cacao » pour la stratégie planteur). Il choisit la stratégie correspondant au couvert ayant rapporté le plus grand profit. Pour rester fidèle aux préférences que suppose un tel comportement, nous avons considéré



dans un premier temps que la trésorerie des états imaginaires constituerait une fonction d'utilité définissant la relation de préférence entre ces états. {état 1} >= {état 2} équivaut à trésorerie(état 1) >= trésorerie(état 2).

Comme nous le disions plus haut il ne s'agit pas seulement de juger des états, mais de juger des ensembles d'états pouvant être la conséquence d'une action. C'est à dire des branches entières de l'arbre de décision. En effet, du point de vue du modélisateur informaticien, un agent qui anticipe sur un état futur dans un monde incertain (ici certaines variables de l'environnement sont tirées aléatoirement) se doit d'envisager différents futurs possibles. Ainsi, nous avons choisi d'implémenter deux types de modèles décisionnels:

- Un modèle déterministe

dans lequel l'agent imagine qu'il évolue dans un monde déterministe où tout se passe au mieux. L'arbre construit ne contient que des noeuds « décisions ». Il va alors choisir l'action le menant vers la branche se terminant par l'état le meilleur d'après le critère que nous venons d'expliquer. Pour ce premier modèle, nous n'avons pas besoin des paragraphes qui suivent sur les incertitudes et l'agrégation des préférences.

- Un modèle dans l'incertain

dans lequel l'agent prend en compte ces incertitudes, ce qui nous demande de les identifier et de les évaluer. De plus, la préférence des agents doit maintenant se mesurer sur un ensemble d'états « pouvant arriver », conséquents d'une décision et non plus uniquement sur un état donné.

## **6. Les incertitudes**

### *Les différentes situations prises en compte*

Tout d'abord notons que cette nouvelle forme de décision par anticipation supprime l'interaction qui consistait à observer ses voisins pour prendre sa décision puisque l'agent va désormais imaginer plutôt que copier. Il nous reste donc deux incertitudes à prendre en compte: le prix du cacao et les maladies des membres des familles. Nous décidâmes donc d'incorporer ces deux « risques » dans la décision des agents. Pour cela, il nous fallait connaître la manière avec laquelle les acteurs appréhendaient ces risques. Nous espérons obtenir ces données par l'envoi d'un questionnaire précis à un panel d'experts de la région.

### *L'obtention des données*

Ce questionnaire, première prise de contact concrète avec les experts, ne mena pas aux résultats escomptés. Il est présenté en annexe suivi naturellement de sa traduction en français [Annexe 4]. Les problèmes rencontrés sont discutés dans la partie suivante de ce rapport, portant sur les limites et les perspectives de ce travail.

Dans ces questionnaires, nous demandions des probabilités: Quel risque une famille considère-t-elle de voir un de ses membres immobilisé par une maladie le semestre prochain ? (1 chance sur 2? 10 chances sur 100?). Nous nous attendions cependant à des résultats très approximatifs et envisagions de ne considérer que les ordres de possibilités exhibés par les probabilités si par exemple les experts donnaient tous des probabilités différentes mais restaient cohérents entre eux. On aurait alors pu utiliser des résultats du type: « Il y a plus de chances qu'il n'y ait pas de malade plutôt qu'il y en ait un ».

### *Résultat final*

Ce qu'il est finalement ressorti de ces questionnaires a été que les acteurs imaginent un marché stable et une force de travaille maximale mais restent constamment sur leurs gardes.

## **7. Les préférences sur les choix à réaliser**

Prévoyant un autre dénouement à cette question, et pour rester général, nous avons envisagé

trois critères à utiliser pour discriminer les branches à choisir. Le critère d'utilité espérée (EU pour Expected Utility) et des critères qualitatifs, l'utilité qualitative optimiste et pessimiste (U+ et U-) (Dubois & Prades, 1995). Nous avons retenu le critère EU, le plus simple, pour notre implémentation.

Pour « résoudre » cet arbre on utilise un algorithme classique d'induction arrière. Ces critères sont aussi appelés agrégations de loteries et l'on va effectivement partir des feuilles de notre arbre de décision (*Figure 13*) et se servir de ces critères pour évaluer les loteries et les remplacer par une valeur numérique dans l'évaluation du noeud suivant et ainsi de suite. On agrège ainsi ces loteries uniquement pour les noeuds « loteries » (représentés par des ronds). Pour les noeuds « décisions » (représentés par des carrés) on remplace le noeuds par la meilleure valeur possible puisqu'on imagine que si l'on arrive à ce point de décision, on fera le choix le plus fructueux.

L'utilité d'une loterie P, menant à un ensemble de conditions  $C = \{c_1, .. c_n\}$  ayant chacune la probabilité  $P\{c_i\}$  et l'utilité  $u(c_i)$  est l'utilité  $U(P)$  calculée selon la formule suivante:

$$U(P) = \sum P\{c_i\}u\{c_i\}$$

Ainsi à la racine de l'arbre, les trois premières arêtes, correspondant à chacune des trois actions immédiates possibles, ne mènent plus à trois branches touffues mais à trois valeurs qui sont l'évaluation de chacune des branches. L'agent choisit alors l'action menant vers la meilleure valeur.

L'utilisation de critères qualitatifs nous vient du fait que l'on n'espérait pas obtenir une représentation de l'incertain sous forme de probabilité mais plutôt sous forme de possibilités. Le critère EU n'était donc plus utilisable. Cependant, l'utilisation de critères qualitatifs, s'il requiert une représentation de l'incertain sous forme de possibilités, demande également que l'on utilise des préférences qualitatives sur les états. Ainsi, notre questionnaire comprenait également une question sur ce sujet, qui fut par ailleurs bien mieux acceptée que les autres.

Pour les préférences, il paraît de premier abord plus judicieux d'utiliser une échelle cardinale dans la mesure où le seul critère considéré est le critère financier qui est une valeur cardinale. Néanmoins, nous avons pensé définir une échelle ordinale en fonction de la valeur de la trésorerie de la famille. On peut considérer que les décideurs n'ont pas une préférence continue et ne distinguent que certaines « strates » de trésorerie. Par exemple: une configuration pour laquelle la trésorerie est de 10 000 ne sera pas préférée à une configuration pour laquelle elle est de 10 100.

### **8. Note sur le codage « objet » de l'algorithme récursif qui permettra une généralisation du processus**

Plusieurs protocoles sont nécessaires pour permettre la construction de l'arbre de décision que l'agent va explorer « dans sa tête » pour prendre sa décision. Tout d'abord, l'agent doit pouvoir reproduire sa représentation du monde pour construire les différents états possibles futurs, les prédictions. Ensuite, il doit pouvoir faire évoluer ces représentations.

Pour cette raison, une méthode « clone » a été définie pour chaque classe, qui permet à une instance de se reproduire à l'identique. D'autre part, un attribut « imaginary » a été ajouté à chaque classe. Lorsque l'agent « simule » une l'évolution d'une représentation du monde, il fait office de simulateur et envoie un message « step = nouveau pas de temps » à cette représentation. De plus, le rôle d'un état imaginaire est d'évoluer *dans certaines conditions*. Ainsi, notre état imaginaire stocke également les conditions dans lesquelles il est destiné à évoluer (ici, le prix du cacao et le nombre de membres inactifs).

A la réception de ce message « step », tout objet vérifie s'il est imaginaire ou non pour déterminer son évolution. Un objet imaginaire va évoluer selon les croyances de l'agent et peut ainsi avoir un comportement différent qu'un objet réel de la même classe.



Naturellement, un « clone » est détaché du simulateur principal, et notamment ne lui envoie aucun message lié à sa vue ou à l'enregistrement des statistiques qui le concernent.

L'algorithme récursif permettant la construction de l'ensemble des états qui vont former l'arbre de décision est l'algorithme 1 présenté page suivante. Notre ensemble d'actions est composé des trois stratégies: Conservationniste, Eleveur et Planteur. Cet algorithme a été initialement réalisé pour le cas général d'une anticipation non-déterministe. L'ensemble des situations possibles que nous imaginions était le même pour chaque action. Il s'agissait d'un produit cartésien entre les différentes valeurs que pouvait prendre le prix du cacao et celles que pouvait prendre le nombre de malades dans la famille. Enfin, la fonction  $I(\text{état}, \text{action}, \text{situation})$  n'était prévue pour ne dépendre uniquement que de l'état d'origine et de la situation d'arrivée mais nous n'avons pas pu l'évaluer.

Dans le cas d'une anticipation déterministe, tous les ensembles  $S(a_i)$  sont limités à un singleton. Dans notre cas il s'agit toujours de la même situation correspondant à un prix égal au prix réel et une absence de malades. Quant à la fonction  $I$ , elle renvoie naturellement toujours la même valeur. Dans notre cas, la valeur 1.

## Algorithme 1

### Notations:

- $A = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_n\}$ : l'ensemble des actions possibles
- $S(a_i) = \{s_1, \dots, s_m\}$ : pour chaque action  $a_i$ , l'ensemble des situations possibles
- $l(\text{état}, a_i, s_j)$ : une fonction renvoyant pour chaque couple (action, situation), la mesure d'incertitude correspondante en fonction de l'état « état » d'origine.

### Algorithme:

#### Initialisation:

profondeur  $\leftarrow$  horizon

clone  $\leftarrow$  se-cloner()

liste  $\leftarrow$  nouvelle\_liste()

#### **Pour tout** $a_i \in A$ **faire:**

{dec  $\leftarrow$  créer\_décision(action= $a_i$ , origine=clone)

#### **Pour tout** $s_i \in S(a_i)$ **faire:**

{liste ajouter(clone *imagine*(dec,  $s_i$ , profondeur -1))}

}

#### Fonction de récurrence:

#### *imagine*(décision, situation, profondeur)

liste  $\leftarrow$  nouvelle\_liste()

clone  $\leftarrow$  se\_cloner()

clone réalise\_action\_sous\_condition(décision, condition)

créer\_arrête\_chance(

origine=décision, destination=clone, incertitude= $l(\text{origine\_de}(\text{décision}), \text{action}, \text{condition})$ )

#### **si** profondeur = 1 **alors:**

{liste ajouter(clone)}

#### **sinon**

**{Si clone non-viable alors: {renvoyer(liste)}**

#### **Pour tout** $a_i \in A$ **faire:**

{dec  $\leftarrow$  créer\_décision(action= $a_i$ , origine=clone)

#### **Pour tout** $s_i \in S(a_i)$ **faire:**

{liste ajouter(clone *imagine*(dec,  $s_i$ , profondeur -1))}

}

}

**renvoyer**(liste)

## Partie 4: Limites et perspectives

---

### Problèmes de calibration

Les données sur les connaissances que les agents avaient sur l'évolution des incertains n'existaient pas dans le codage des comportements initiaux. Les questionnaires ont révélés plusieurs choses. Tout d'abord, la majeure partie des acteurs sur le terrain n'anticipent pas à moyen ou long terme mais seulement au niveau de l'année. De plus, l'anticipation réelle se fait peut-être sur des points qui n'apparaissent pas dans le modèle. En suivant les règles définies dans les stratégies, les agents respectent un certain nombre de « principes » qui leur permettent de ne pas être pris au dépourvu par l'évolution du monde. Mais l'origine de ces principes se trouve peut-être autre part que dans une imagination de l'avenir.

D'autre part, les sous-modèles (i.e.: modèles que l'agent a du monde) que nous avons implicitement proposés dans nos questionnaires pour les évolutions des marchés et les maladies n'étaient pas réalistes. Certaines réponses reçues vont dans ce sens et expliquent par exemple que la prise en compte des maladies ne dépend pas seulement du semestre précédent (comme nous l'avions supposé) mais de l'histoire entière de la famille et de son entourage [Annexe 5]. Et l'on trouve ainsi des groupes de familles particulièrement prudents à ce sujet de part leur histoire. Les mêmes réflexions sont faites sur l'évolution du prix du cacao dont on nous répond que ce n'est pas le semestre qui est suivi mais l'évolution sur les années précédentes.

A côté de cela, et c'est pour cela que nous ne considérons qu'un modèle de marché simpliste, on trouve des réponses nous disant que les agents ne prévoient pas l'évolution des marchés ni les maladies mais qu'ils considèrent plutôt que ces deux sources de problème peuvent leur être néfaste et qu'ils prennent donc des mesures de précaution systématiques.

D'après nous, une nouvelle tentative avec des sous-modèles plus adaptés pourrait néanmoins être intéressante mais la discussion avec les experts étant difficile (ils sont répartis dans toute l'Amérique!), nous n'avons pas eu le temps de la faire.

### Une ouverture: la décomposition des « stratégies » des agents

Nous nous sommes dans ce stage concentré sur les changements de stratégies, que nous considérons comme des « orientations » que le colon donne à son exploitation agricole. Nous avons conservé ces stratégies car elles prennent en compte un nombre important de critères implicites et nous ne désirions pas entrer dans ces détails pour lesquels nous ne disposons pas de thématiciens avec qui discuter régulièrement. Cependant, nous nous sommes rendu compte au cours du stage qu'il pouvait être possible et intéressant de rentrer à un niveau plus fin dans la prise de décision.

D'ailleurs, les problèmes que nous avons rencontrés lors de nos contacts avec les thématiciens proviennent parfois du fait qu'ils veulent être assurés du respect de ces critères extrêmement importants. La réponse de Jean-François Tourrand, de formation vétérinaire mais travaillant depuis plus de dix ans sur l'occupation des sols sur les fronts pionniers amazoniens, illustre bien, et explique, le point de vue des thématiciens :

*« Je ne crois pas qu'un producteur de la Transamazonienne (et d'une manière générale un producteur du Sud ... et peut être du Nord) pense en termes de marché. Certes dans le cas de la Transamazonienne, le prix de vente du cacao est important, mais il sait qu'il varie, et parfois fortement. Il gère plus son exploitation en fonction de sa main-d'oeuvre, de ses besoins, de ses perspectives à court, moyen et long terme, des potentialités de ses terres, et surtout des risques. Voilà pourquoi la première activité est la culture annuelle de l'année car elle permet de survivre quoi qu'il arrive ... la famille aura à manger. Vient ensuite l'élevage qui est une épargne facilement mobilisable, ... surtout en cas de maladie, en vendant une vache ou un veau ou plus on peut se soigner. Vient ensuite les cultures pérennes, dont le cacao qui sont un investissement*

*avec un retour à moyen et long terme, mais peu flexible et sensible aux variations de prix ... »*

Ces comportements à propos des cultures annuelles et de l'élevage sont assurés par les stratégies mais le fait de ne pas les expliciter les masque et empêchent les modélisateurs et les utilisateurs du modèle de les prendre en compte. Or on remarque que ces façons de faire des producteurs ressemblent à des garde-fous contre différents risques, et nous pensons que cette façon de voir peut-être intéressante à développer.

Dans le modèle, les principaux risques introduits sont liés aux maladies principalement. Il y a aussi un scénario avec des fluctuations du marché du cacao, mais il paraît moins important dans un premier temps.

Donc, il me semblerait intéressant, suite au travail réalisé, de réfléchir à une manière de voir "émerger" ces comportements de "garde-fou" contre les risques. Lors de la construction du modèle Uruara, 7 types de producteurs ont été regroupés en 2 stratégies : planteur et éleveur. La possibilité de changer de stratégie au cours du temps permettait alors de retrouver l'ensemble de la typologie. C'était déjà un bon résultat. Mais ces 2 stratégies déroulent encore des comportements assez cablés : d'abord faire une culture annuelle puis s'occuper de sa culture de prédilection (élevage ou cacao), etc.

La dernière stratégie (le « conservationniste ») a été construite par la suite pour étudier les impacts possibles des interventions de l'état (subventions pour la protection de la forêt par ex.). L'agent ne fait qu'entretenir son lot sans défricher plus que pour sa culture annuelle. Mais cette stratégie n'existe pas sur le terrain et personne ne raisonne ainsi. C'est en fait un artifice pour pouvoir traiter des aides de l'état.

Le travail réalisé pendant ce stage a consisté à réfléchir sur les changements de stratégie : on est passé d'un agent qui fait un bilan de son année passée et qui regarde ses voisins pour décider de sa prochaine stratégie, à un agent anticipatif qui explore ses futures possibles en testant les 3 stratégies à sa disposition. Les changements de stratégie tels qu'ils étaient pensés initialement semblaient un peu bancals et surtout plutôt cablés.

L'idée serait ici de tester un agent anticipatif, non plus sur les stratégies mais plutôt sur un certains nombres d'activités qu'il sait exécuter : défricher, implanter et entretenir des cultures (culture annuelle, culture pérenne, élevage de bovins). Si avec ce procédé, on parvenait à retrouver les stratégies, mais aussi les itinéraires techniques des agents, on ferait encore un pas vers la généralité : en travaillant sur la notion de risque, on pourrait voir émerger des comportements dont parlent les thématiciens et les « expliquer » rationnellement. On n'aurait alors par exemple plus besoin d'une stratégie artificielle pour tester des interventions publiques.

Le mécanisme serait le même que celui que nous avons considéré sauf que l'ensemble des actions ne serait plus composé des 3 stratégies possibles mais de toute composition d'activité acceptable.

## **Construction et résolution de l'arbre de décisionnel**

### ***Explosion combinatoire***

La question de la construction de l'arbre de décision pose naturellement la question de l'explosion combinatoire engendrée. Pour remédier à cela, nous comptons sur l'utilisation d'heuristiques sabrant les branches passant par des états trop mauvais. Pour l'instant, le mécanisme consiste à supprimer les états (et les branches qui s'ensuivent) ne vérifiant pas une condition d'admissibilité définie ici comme une trésorerie minimale. Cependant, cette condition laisse encore un nombre important d'états et il serait peut-être nécessaire de considérer que l'on ne conserve à chaque embranchement qu'un certain nombre d'états optimaux dont il faut envisager les futurs, se limitant ainsi de manière certaine. Cela pourra s'avérer indispensable au cas où on utilise un ensemble d'actions beaucoup plus grand.

### ***Encapsulation des états imaginaires***

Enfin, pour avoir un travail plus générique, on pourrait définir une classe « état imaginaire » qui contienne l'état de l'agent et l'état du monde qui l'entoure ainsi que le scénario auquel il correspond. Dans notre cas par exemple, l'état de l'agent serait la famille et sa ferme, l'état du monde qui l'entoure n'est pas modélisé par l'agent et le scénario serait une valeur pour le prix du cacao et un nombre de personnes immobilisées par la maladie.

### **Utilisation d'autres méthodes d'anticipation que les arbres de décisions: les Processus Décisionnels Markoviens**

Enfin, nous pensons qu'il serait intéressant de développer d'autres méthodes d'anticipation notamment l'utilisation de réseaux de contraintes et les processus décisionnels markoviens.

Nous ne les avons pas utilisées parce qu'étant moins immédiats à appréhender pour les thématiciens, nous avons voulu commencer par les arbres décisionnels et nous n'avons pas eu le temps pour les étudier ensuite. Une utilisation des réseaux de contraintes pour l'anticipation, utilisant les travaux antérieurs réalisés sur la résolution de problèmes de satisfaction de contrainte est présenté dans (Dionec et al. 2006), Nous nous sommes plus particulièrement penchés sur les processus décisionnels markoviens et pouvons donner ici quels intérêts et inconvénients ils présentent.

### ***Un ensemble d'états considérés par l'agent***

Tout d'abord, d'un point de vue de la modélisation, la définition de l'ensemble d'états demande un travail important en collaboration avec les thématiciens et acteurs pour le cas ComMod. D'un autre côté, cela devrait assurer un comportement cohérent de l'agent en nous permettant de ne distinguer que les critères importants dans la prise de décision.

### ***L'apprentissage du modèle de transition***

De plus, une fois ce modèle construit, on devrait pouvoir se passer du modèle de transition que nous avons eu tant de mal à obtenir pour construire nos arbres de décisionnels. En effet, celui-ci peut être appris en utilisant un apprentissage par renforcement sur un grand nombre de simulations effectuées préalablement. Cependant, si il est possible d'apprendre notre fonction de transition, il faut garder à l'esprit que le MDP, comme son nom l'indique, respecte l'hypothèse de Markov. Ainsi, la définition de l'ensemble d'états dont on parle dans le paragraphe précédent doit prendre en compte le fait que toutes les informations nécessaires à l'évaluation de la fonction de transition doivent se trouver dans chaque état.

Pour donner un exemple, imaginons que l'on veut une anticipation cohérente de l'état du marché qui, on le rappelle, dépend de son évolution antérieure sur plusieurs années. Si on utilise un PDM de pas de temps « 1 an », il faut que chaque état contienne le prix actuel du cacao, mais également sa tendance sur les dernières années. Le PDM ne peut naturellement pas prendre en compte les états précédents du système. Ainsi, si la calibration du modèle de transition peut se faire « automatiquement », il doit néanmoins être suffisamment connu.

### ***Une anticipation multi-agents***

Le modèle TransAmazon, que nous avons utilisé pour notre test de méthodes d'anticipation, ne comporte pas réellement d'interactions entre ses agents. Du moins, nous ne les avons pas pris en compte dans l'anticipation que ceux-ci avaient du monde. Cependant, on pourra rencontrer des modèles multi-agents dans lesquels les situations d'interactions rendent toute anticipation individuelle caduque. Typiquement lorsqu'un agent particulier ne possède pas l'ensemble des ressources ou des compétences nécessaires pour parvenir seul à son but. Or nous n'avons rencontré nulle part dans la littérature de mentions d'arbres décisionnels multi-agents.

Par contre, comme nous l'expliquions dans notre présentation des PDM, de nombreux travaux existent sur les PDM décentralisés ou multi-agents. Cependant, ils fonctionnent sous la forme de partage des récompenses immédiates, ce qui n'est peut-être pas toujours très expressif (Chavès & Boutellier, 2005).

### ***Un module générique***

Enfin, d'un point de vue du modèle décisionnel, les récents travaux sur les PDMs algébriques (Weng 2006, Perny et al., 2005) devraient permettre d'installer un « module PDM » dans une plate-forme multi-agent, permettant le codage systématique de comportements anticipatifs utilisant des modèles décisionnels différents. A savoir, différents types de représentation de l'incertain et différents types de préférences (qualitatifs ou quantitatifs) et différents critères sur les chemins parcourus pour arriver au but (il faut évaluer un ensemble d'états). La question qui reste étant de permettre à un modélisateur lambda (souvent un thématicien du sujet étudié dans le cas de ComMod) d'utiliser ce module, et aux thématiciens et acteurs concernés de comprendre le processus.

## Conclusion

---

L'objectif de ce stage était de donner un comportement anticipatif aux agents des modèles ComMod, afin d'enrichir leurs comportements.

Après avoir expliqué les bases de l'approche ComMod, nous avons choisi une forme d'anticipation particulière, nous paraissant la plus adaptée à notre contexte: les arbres décisions.

Comme application, nous avons implémenté un algorithme d'anticipation dans un monde non-déterministe permettant aux agents du modèle *TransAmazon* de construire et d'exploiter des arbres de décisions. Cependant, la phase de recherche de données ayant soulevé une polémique chez les experts consultés, c'est une anticipation dans un cadre déterministe qui a pu être utilisée. Les agents du modèle *TransAmazon* peuvent à présent anticiper leur avenir lors des simulations. Il serait maintenant intéressant d'analyser ces simulations sous la tutelle d'experts agronomes.

Enfin, de cette expérience nous tirons un certain nombre de leçons et de propositions concrètes. Nous les exposons dans notre dernière partie. Il me semble que les plus intéressantes portent sur: (i) l'utilisation d'une description plus précise du comportement des agents sous la forme d'activités élémentaires, (ii) l'utilisation de processus décisionnels markoviens.

Au cours de ce stage, j'ai également eu l'occasion de vivre une expérience de modélisateur dans un projet de modélisation d'accompagnement en contruisant le modèle *Solimões*. Le travail réalisé, en plus d'être intéressant, m'a aidé a comprendre les contraintes de la modélisation d'accompagnement et de la plate-forme de modélisation *Cormas*. Ce travail a mené à la réalisation d'un modèle socio-économique et de réflexions dont la réunion sera la base d'une approche ComMod pour la suite des actions du projet PRODESAS dans la commune de Benjamin Constant (AM).





## Bibliographie

---

- Bonaudo T. (2005) *La gestion environnementale sur un front pionnier amazonien* thèse INPA-CDS-UnB.
- Bousquet F., Barreteau O., Le Page C., Mullon C. & Weber J. (1999), *An environmental modelling approach : the use of multi-agent simulations*. In: F. Blasco et A. Weill (Eds), *Advances in environmental modelling*. Elsevier. Pp: 113-122.
- Chadès I. & Bouteiller B. (2005) *Solving Multiagents MDPs: Forest Management example* - MODSIM-05
- Edmonds B. & Moss S. (2004), *From KISS to KIDS - an "antisimplistic" modelling approach*. In Joint Workshop on Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation, New York City, USA, 2004 - 292
- Etienne M., Le Page C. & Cohen M. (2003), *A Step-by-step approach to building land management scenarios based on multiple viewpoints on multi-agent system simulations*. Journal of Artificial Societies and Social Simulation 6(2).
- Doniec A., Mandiau, Piechowiak, Espié S. (2006), *L'anticipation comme modèle d'interaction : application à la coordination multi-agent en simulation*, RFIA 2006 15ème congrès francophone Reconnaissance des formes et Intelligence Artificielle, Presses Universitaires François-Rabelais, Tours, janvier, ISBN ISBN 2-86906-216-8.
- Dubois D. & Prade H. (1995), *Possibility Theory as a Basis for Qualitative Decision Theory*, Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence.
- Ferber J. (1995), *les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris
- Gomes, P.C., Brasil A.C.P. & Tourand J.F. (2006), *Natural resources management by Benjamin Constant traditional communities (Brasil)*, ICSMM 06
- Le Page C. & Bommel P. (2004), *A methodology for building agent-based simulations of common-pool resources management: From a conceptual model designed with UML to its implementation in CORMAS*
- Le Page C., Bousquet F., Bakam I., Bah A., & Baron C. (2000), *CORMAS : A multiagent simulation toolkit to model natural and social dynamics at multiple scales*. In: "The ecology of scales", Wageningen, Pays-Bas, 27-30 juin 2000
- Perny P., Spanjaard O., Weng P. (2005) *Algebraic Markov Decision Processes* - IJCAI- 05
- REJEB L. (2005), *Simulation SMA de modèles économiques: Vers des systèmes multi-agents adaptatifs*. Thèse de doctorat
- Rosen R. (1985), *Anticipatory Systems - Philosophical, Mathematical and Methodological Foundations*. Pergamon Press
- Simon C. (2006), *LITERATURE REVIEW OF SCENARIO METHODS*. sous la direction d'A. Gibon avec la participation de G. Bigot, P. Bommel, E. Josien et O. Thérond W.P. 5-W.P. 4 D.3 final (version 1) .
- Stinckwich S., (2003) *L'anticipation dans les systèmes complexes. Conséquences pour la simulation*. Proceedings de Roche Brune '03
- Thomas V., Bourjot C. & Vincent Chevrier (2006) *Heuristique pour l'apprentissage automatique décentralisé d'interactions dans des systèmes multi-agents réactifs*, in proc. RFIA 06, Tours.
- Weng P. A-L . (2006) *Modèles qualitatifs et approches algébriques pour la décision dans l'incertain : fondements axiomatiques et application à la décision séquentielle*. Thèse de doctorat. LIP6



## Annexes

---

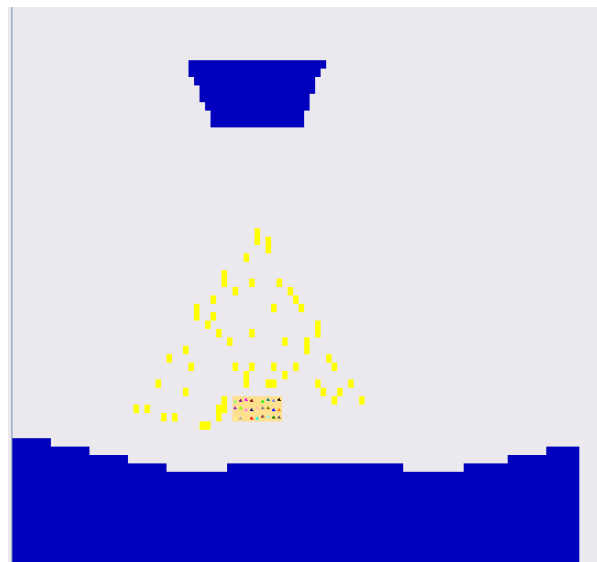
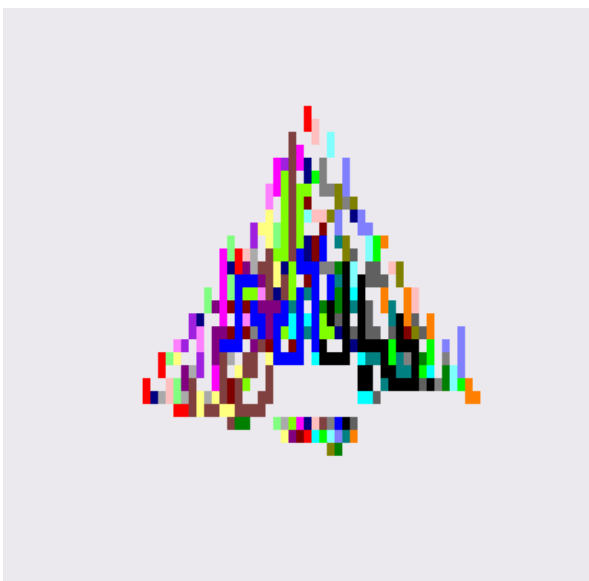
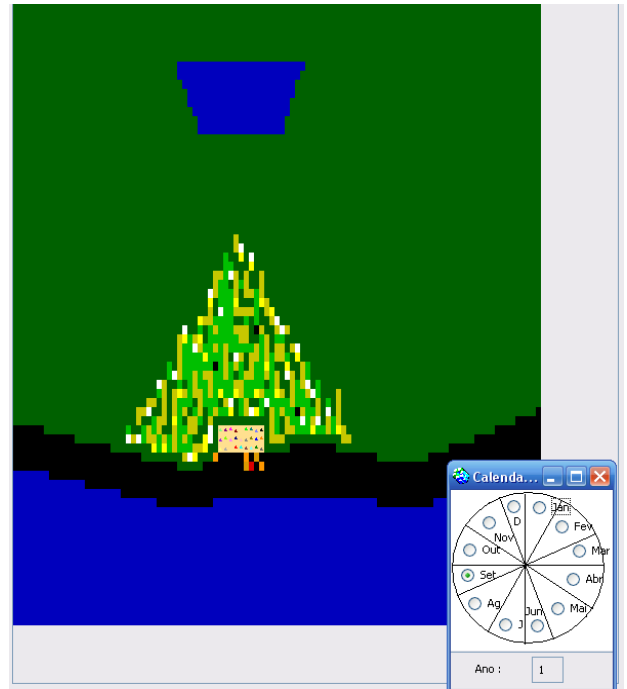
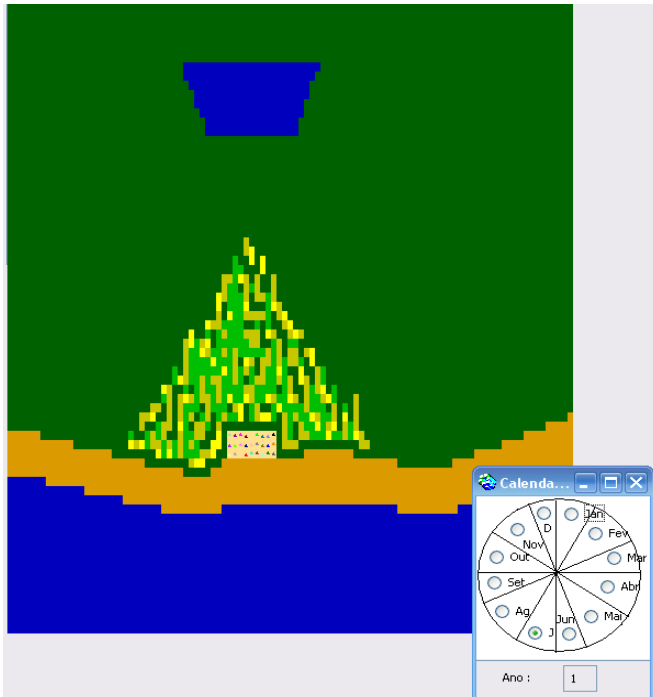


**Annexe 1: Diagramme de classes général du modèle Solimões**



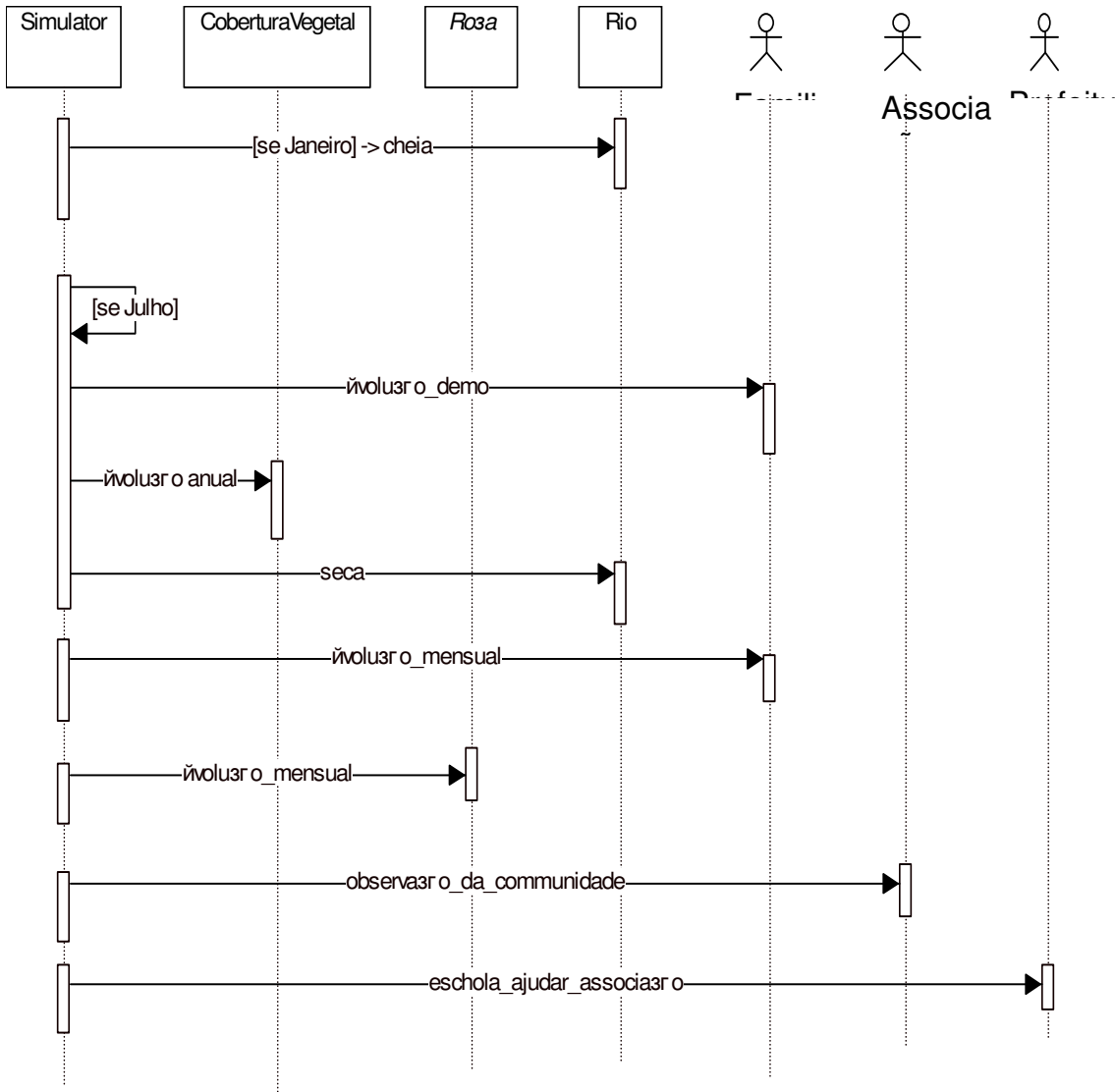
## Annexe 2: Visualisations des sorties du modèle Solimões

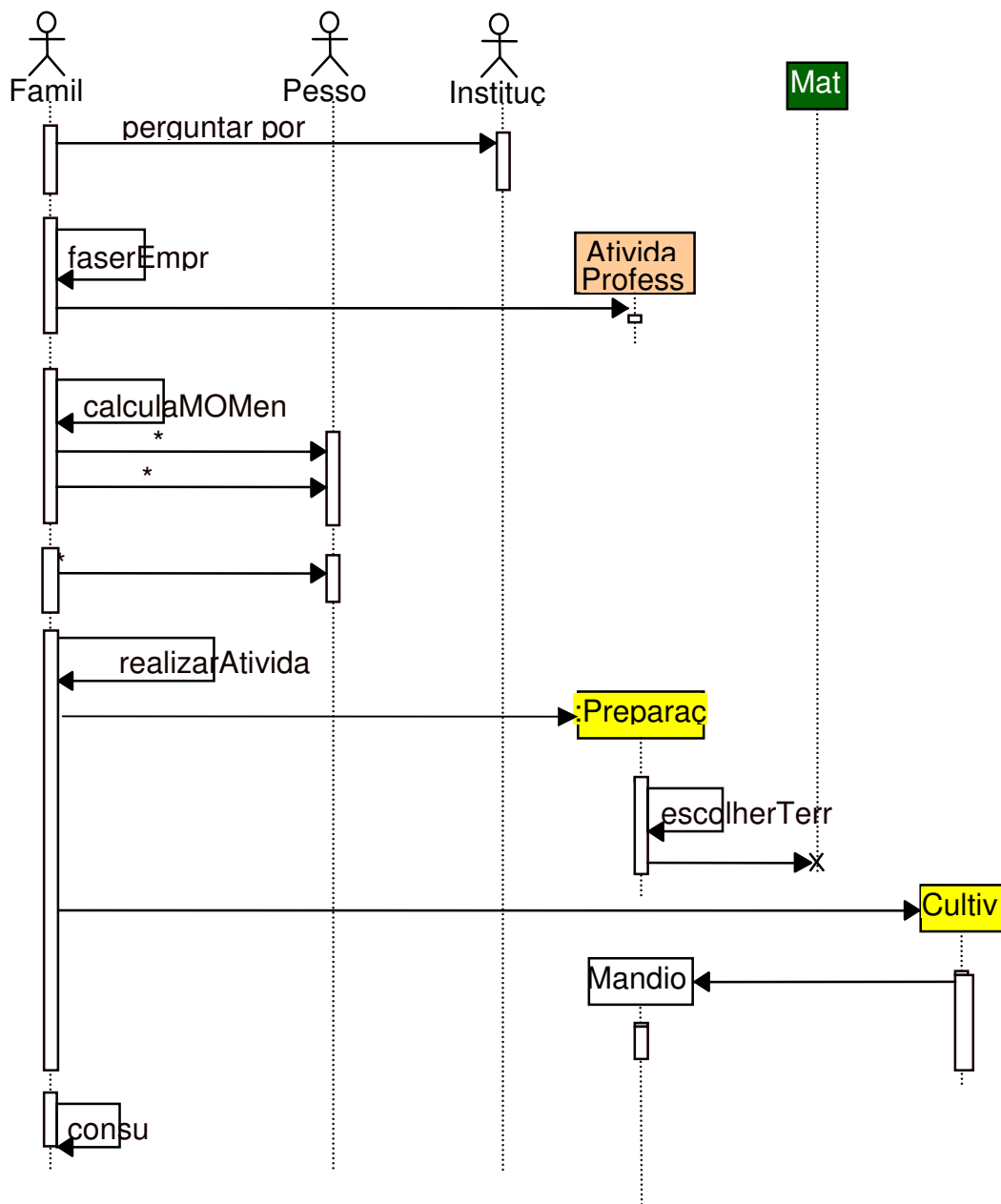
Les quatre figures ci-dessous présentent respectivement l'occupation du sol, les cultures, le « cadastre » et les aires totalement déforestées.

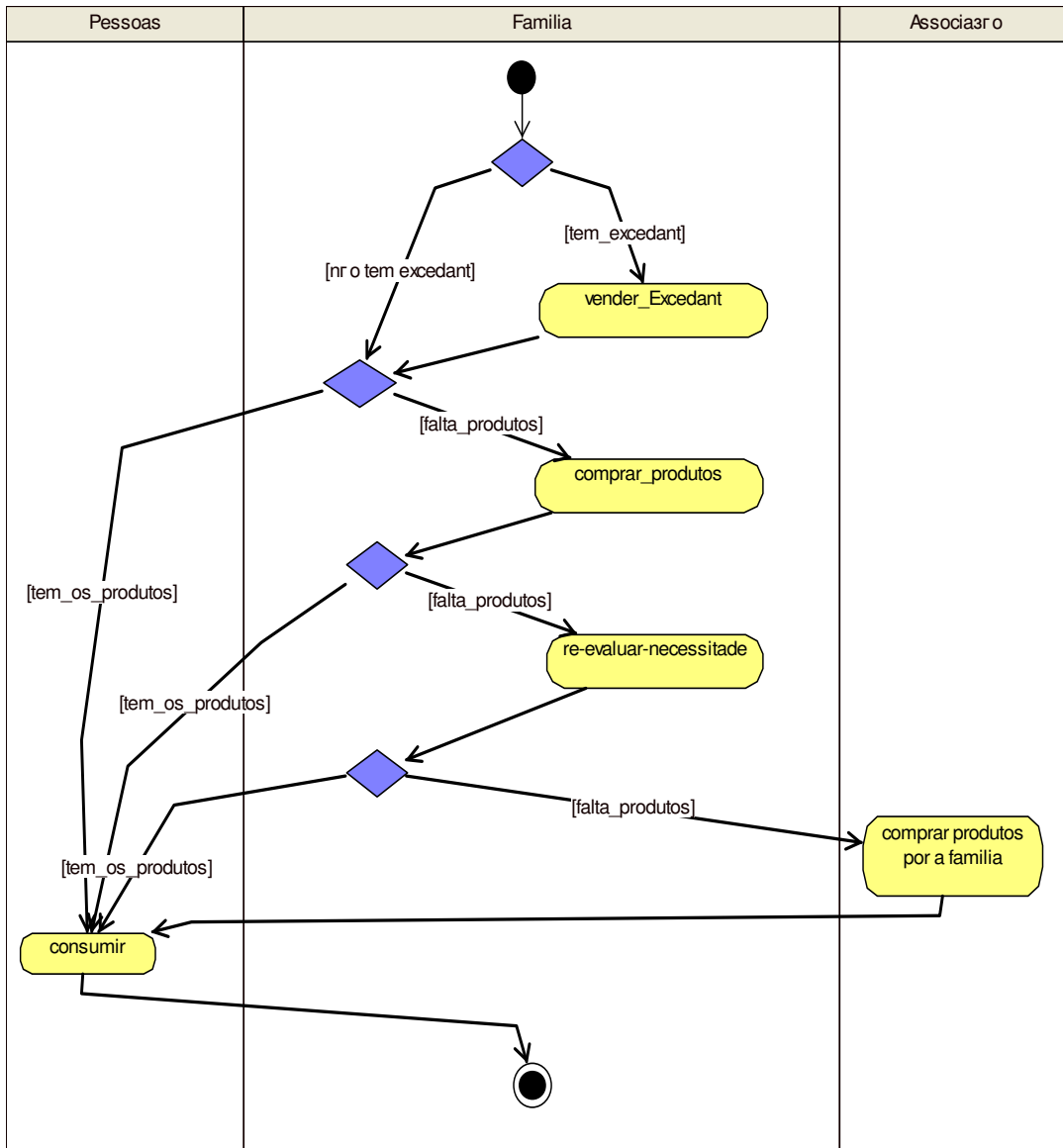












## Annexe 4: Questionnaire pour la collecte de données liées à l'anticipation

### 1. Version envoyée aux experts:

# Questionario: comportamento antecipativo dos agentes do modelo TransAmazon

## Introdução

A priori, a maioria de vocês já ouviu falar (e até participou da construção) do modelo «TransAmazon». Ele é um modelo de simulação multi-agentes (SMA) que representa a evolução de uma frente pioneira na Amazônia. De forma bem resumida, um modelo SMA representa uma situação dinâmica resultante das ações de um conjunto de agentes (neste caso, as famílias pioneiras) em um ambiente (neste caso, a floresta amazônica e os mercados).

O modelo TransAmazon já está operacional e calibrado. O trabalho pelo qual eu solicito a sua participação consiste em aprimorar a definição do comportamento dos agentes. Atualmente, os agentes utilizam regras de decisão para determinar as suas estratégias. Nós gostaríamos que os agentes tenham um comportamento «antecipativo», ou seja, que eles façam a tomada de decisão ponderando sobre as possíveis situações futuras.

### **Comportamento atual:**

Para cada decisão a tomar, o agente observa o comportamento ocorrido nos últimos anos. Depois ele calcula qual ação do passado foi a mais lucrativa. O agente, então, realiza esta mesma ação.

Exemplo: *Nos três últimos anos a cultura que trouxe o maior lucro no Travessão foi a cultura do cacau. Portanto, eu vou adotar uma estratégia de agricultor de culturas perenes (cacau).*

### **Novo comportamento:**

Para cada decisão a tomar, o agente imagina quais conseqüências poderiam ter cada uma de suas ações nos próximos anos. Ele avalia cada uma destas conseqüências e escolhe a ação que leva à melhor direção.

Exemplo: *Se eu planto cacau, há uma grande chance que o preço do cacau baixe e que eu ganhe pouco, mas há uma pequena chance que o preço estabilize e que eu ganhe muito. Por outro lado, se eu crio gado bovino, como o mercado é estável, eu tenho certeza de obter um lucro médio. Portanto, eu vou criar gado bovino porque há uma certeza maior de ganhar nesta direção (racionalmente).*

## Posicionamento deste questionário

Este questionário irá permitir a calibração dos dados necessários à estabelecer um comportamento antecipativo dos agentes. Ele está dividido em quatro grupos de questões.

Três grupos sobre as previsões que as famílias fazem (**as informações que queremos não são as**

**dinâmicas reais, mas as crenças que os colonos têm destas dinâmicas):**

- A previsão da evolução da saúde na família
- A previsão da evolução do mercado de cacau
- A previsão da evolução do mercado de terrenos (lotes)

Um último grupo é sobre diferentes formas dos colonos representarem seus objetivos e suas preferências.

**Questionário**

**Evolução da saúde na família:**

1. Questão fechada: Preencha a tabela

Esta atividade é para saber como os colonos consideram o fato que eles poderão estar doentes no semestre seguinte (futuro). Em função do estado de saúde de sua família no momento « t », os colonos irão imaginar qual será o estado de saúde de sua família no momento « t+1 ». Para cada estado de saúde da família atual (linhas) coloque-se no lugar de um colono e indique a probabilidade que a sua família não tenha nenhum membro doente no próximo semestre, que tenha um membro doente, que tenha dois membros doentes ou que tenha mais que dois membros doentes.

Exemplo: *Para a primeira linha (no caso de não ter tido nenhum doente no semestre atual), um colono muito otimista considerará 95% de chance que não tenha doentes no próximo semestre, 5% que tenha um doente, 0% que tenha 2 doentes e 0% que tenha mais que 2 doentes.*

**Atenção!** Procuramos a distribuição de probabilidades dos eventos futuros, portanto, a soma dos quatro valores de cada linha deve ser igual à 100%!

	0 doente no semestre seguinte	1 doente no semestre seguinte	2 doentes no semestre seguinte	mais que 2 doentes no semestre seguinte
0 doente neste semestre				
1 doente neste semestre				
2 doentes neste semestre				
Mais que 2 doentes neste semestre				

2. Questão aberta:

De acordo com o seu ponto de vista, os colonos levam em conta o fato que eles poderão estar doentes no próximo semestre para tomar suas decisões neste semestre?

**Evolução do preço do cacau:**

1. Questão fechada: Preencher a tabela

Esta atividade é para saber como os colonos percebem a evolução do preço do mercado de cacau,

que depende um pouco do mercado local mas, sobretudo, do mercado internacional.

Em função do preço do mercado de cacau no momento « t », os colonos irão imaginar o preço do mercado no momento « t+1 ». Para cada preço atual (linhas) coloque-se no lugar de um colono e indique a probabilidade que o preço do mercado no semestre seguinte seja baixo, normal ou alto (percepção dos colonos!).

Exemplo: *Para a primeira linha (i.e. se o preço atual do mercado está baixo), o colono pode pensar que tem 50% de chance que continue baixo, 35% que passe a um preço normal e 15% que chegue a um preço alto.*

**Atenção!** Novamente, procuramos a distribuição de probabilidades dos eventos futuros, portanto, a soma dos três de cada linha deve ser igual à 100%!

	Previsão semestre seguinte: preço baixo	Previsão semestre seguinte: preço normal 0,5 US \$ / kg	Previsão semestre seguinte: preço alto
Preço atual baixo			
Preço atual normal			
Preço atual alto			

## 2. Questão aberta:

1. Os colonos consideram realmente o preço atual para prever o preço futuro?
2. Você está de acordo com as classes de preço propostas: baixo, normal e alto?

## **Evolução do Mercado de terrenos (preço do lote):**

### 1. Questão fechada: Preencher a tabela

Da mesma forma que no item anterior (evolução do preço do cacau), esta atividade é para saber como os colonos percebem a evolução do preço do mercado de terrenos, que depende somente do mercado local.

Em função do preço do mercado de terrenos no momento « t », os colonos irão imaginar o preço do mercado no momento « t+1 ». Para cada preço atual (linhas) coloque-se no lugar de um colono e indique qual é a probabilidade que o preço do mercado no semestre seguinte seja: um preço sub-avaliado (com preço do mercado abaixo do valor real), o preço real ou um preço sobre-avaliado (com preço do mercado acima do valor real). Novamente, o importante é a percepção dos colonos!

Exemplo: *Para a primeira linha (i.e. se o preço atual do mercado está subestimado), o colono pode pensar que tem 50% de chance que continue sub-avaliado, 35% que passe ao valor real e 15% que chegue a um valor sobre-avaliado.*

**Atenção!** Novamente, procuramos a distribuição de probabilidades dos eventos futuros, portanto, a soma dos três de cada linha deve ser igual à 100%!

	Previsão semestre seguinte: preço sub-avaliado	Previsão semestre seguinte: preço real	Previsão semestre seguinte: preço sobre-avaliado

Preço sub-avaliado			
Preço real			
Preço sobre-avaliado			

2. Questão aberta:

3. Os colonos consideram somente o preço atual para prever o preço futuro ou se baseiam em outros critérios? Quais?

**Definição das preferências:**

1. Questão fechada: Preencher a tabela

Defina 4 estados de satisfação da família e as suas características em função das rendas anuais de cada família na tabela a seguir. Para cada faixa de renda, indique em qual estado de satisfação a família se encontra, dentre os 4 estados seguintes:

- péssimo
- mal
- bom
- ótimo

0 até 1000	1000 até 1500	1500 até 2000	2500 até 3000	3000 até 3500	3500 até 4000	4500 até 5000	5000 até 5500	5500 até 6000	>6000

2. Questão aberta:

Você pode dar um nome para cada um destes estados de satisfação?

De acordo com o seu ponto de vista, quais outros critérios podem ser considerados para definir o estado de satisfação de uma família?

## 2. Traduction en Français:

### Introduction

A priori la plus grande partie d'entre vous a entendu parlé (voire a participé à la construction) du modèle « TransAmazon ». Il s'agit d'un modèle multi-agents de l'évolution d'un front pionnier amazonien. Pour résumer, un modèle multi-agent représente une situation dynamique résultant des actions d'un ensemble d'agents (ici les familles pionnières) dans un environnement (ici la forêt amazonienne et les marchés).

Le modèle TransAmazon est déjà opérationnel et calibré. Le travail pour lequel je sollicite votre participation consiste à enrichir la définition du comportement des agents. A l'heure actuelle, les agents utilisent des règles de décisions pour déterminer leurs stratégies. Nous aimerions maintenant que les agents aient un comportement « anticipatif ».

#### **Ancien comportement:**

Pour chaque décision à prendre, l'agent observe le passé sur quelques années. Puis il calcule quelle action a été la plus lucrative et effectue cette action.

Exemple: *Sur les trois dernières années la culture qui a rapporté le plus grand profit dans le Traversao est la culture de Cacao => Je vais adopter une stratégie de cultivateur de plantes pérennes.*

#### **Nouveau comportement:**

Pour chaque décision à prendre, l'agent imagine quelles conséquences pourrait avoir chacune de ses actions dans quelques années. Il évalue chacune des conséquences et choisit l'action menant dans la meilleure direction.

Exemple: *Si je plante du cacao, il y a une forte chance que le prix du cacao baisse et que je gagne peu mais il y a une petite chance que le prix stagne et que je gagne beaucoup. Si j'éleve des bovins, comme le marché est stable, je suis sûr d'obtenir un profit moyen. => Je vais élever des bovins parce qu'il y a plus à espérer dans cette direction (rationnellement).*

### Positionnement de ce questionnaire

Ce questionnaire va nous permettre de calibrer les données propres à l'anticipation. Il est décomposé en quatre groupes de questions.

Trois groupes sur les prévisions que font les familles (**Les informations recherchées ne sont pas les dynamiques réelles mais les croyances que les colons ont de ces dynamiques**):

- La prévision de la santé de la famille
- La prévision de l'évolution du marché du cacao
- La prévision du marché de terrains

Et un dernier groupe sur la façon dont les collons se représentent leurs objectifs.



## Questionnaire

### **Évolution de la santé de la famille:**

#### 1. Question fermée: Remplir le tableau

Il s'agit ici de savoir comment les colons prennent en compte le fait qu'ils pourront être malade le semestre suivant en fonction de leur santé actuelle. Vous devez vous mettre à la place d'un colon et donner les probabilités qu'il n'y ait pas de malades le semestre suivant, qu'il y en ait un, qu'il y en ait 2 ou qu'il y en ait plus que 2.

Exemple: *Pour la première ligne (pas de malade ce semestre), Un colon très optimiste considérera 95% de chances qu'il n'y ait pas de malades, 5% qu'il y ait un malade, 0% qu'il y ait 2 malades et 0% qu'il y ait plus que 2 malades.*

Attention: On cherche ici des distributions de probabilités sur les événements futurs possibles. Pour chaque ligne la somme des quatre doit être égale à 100% !

	0 malade le semestre suivant	1 malade le semestre suivant	2 malades le semestre suivant	plus que 2 malades le semestre suivant
0 malade ce semestre				
1 malade ce semestre				
2 malades ce semestre				
plus que 2 malades ce semestre				

#### 2. Question ouverte:

Est-ce que selon vous les colons prennent en compte le fait qu'il peuvent être malades pour prendre leurs décisions?

### **Évolution du prix du cacao:**

#### 1. Question fermée: Remplir le tableau

Il s'agit ici de savoir comment les colons perçoivent l'évolution du prix du marché de cacao, qui dépend un peu du marché local mais surtout du marché international.

En fonction du prix du marché du cacao à l'instant « t », les colons vont imaginer le prix du marché à l'instant « t+1 ». Pour chaque prix actuel (lignes), mettez vous à la place d'un colon et indiquez la probabilité que le prix du marché le semestre suivant soit bas, normal ou élevé (colonnes).

Exemple: *Pour la première ligne (i.e. si le prix actuel du marché est bas), le colon peut penser qu'il y a 50% de chances qu'il reste bas, 35% qu'il passe à un prix normal et 15% qu'il arrive à un prix élevé.*

Attention: On cherche ici des distributions de probabilités sur les événements futurs possibles. Pour

chaque ligne la somme des quatre doit être égale à 100% !

	prévision semestre suivant: prix bas	prévision semestre suivant: prix normal = 0,4 à 0,6 US\$ / kg	prévision semestre suivant: prix élevé
prix actuel bas			
prix actuel normal			
prix actuel élevé			

2. Question ouverte:

- Est ce qu'on considère vraiment le prix actuel pour prévoir le prix futur?
- D'accord avec les classes: bas, normal et élevé?

**Prise en compte de l'évolution du Marché des lots:**

Comme dans la question précédente il s'agit de connaître l

	prévision semestre suivant: valeur sous-évaluée	prévision semestre suivant: valeur réelle	prévision semestre suivant: valeur surévaluée
valeur sous-évaluée			
valeur réelle			
valeur surévaluée			

**Définition des préférences:**

Définissez 4 états de la familles et les caractériser en fonction des rentes annuelles dans le tableau qui suit.

Pour chaque tranche de rentes, indiquer dans quel état de satisfaction se trouve la famille. Entre 4 états différents.

- I. :-( ( pessimo
- II. :-( mal
- III. :-) bom
- IV. :-)) otimo

0	1000	1500	2500	3000	3500	4500	5000	5500	>6000
até	até	até	até	até	até	até	até	até	
1000	1500	2000	3000	3500	4000	5000	5500	6000	

2. Question ouverte:

Pouvez vous donner un nom pour chacun des états?

Quels autres critères à prendre en compte? Trésorerie, configuration de la ferme, etc.

## **Annexe 5: Une réponse originale au questionnaire sur l'anticipation**

### **QUESTIONÁRIO I. Saúde na família**

No questionário Evolução da saúde na família não posso responder á tabela, mas sim o comportamento, ou seja, entre mais doentes mais probabilidade que outro semestre existam doentes e ao contrario. Igualmente ficar doente depende dos tipos de dolências presentes, ou seja, são dolências de quanto tempo? Que tipo de dolências? Para pensar na duração da dolência. Isto porque uma dolência é independente da racionalidade do produtor. Assim, se existe uma dolência é melhor ter estatísticas que nos falem que tipos de dolências existem na região e a porcentagem de pessoas que a possuem. Entender o tipo de dolência permite colocar um tempo de duração e assim a probabilidade que se mantenha por vários anos o somente um semestre. Assim que temos que definir tipo de dolência.

Assim que para responder a tua pergunta se os colonos levam em conta o fato que eles poderão estar doentes no próximo semestre, depende de uma história passada, se a família já teve dolências anteriormente. Não levariam em conta isto para suas decisões se não existe um caso de dolência na família ou possivelmente se os vizinhos também não.

### **QUESTIONÁRIO II. sobre o preço do cacau**

No preço do cacau igualmente fica difícil preencher a tabela, eu falaria de tendência mais que preço somente. Isto porque os produtores olham mais a tendência mesmo se o preço está baixo um semestre. Se a tendência é de aumento regular com preço alto, normal ou baixo, o produtor o próximo semestre continuaria com a cultura, se a tendência é de diminuição seria ao contrario.

Na pergunta aberta eu falaria melhor de igual, não normal.

### **QUESTIONÁRIO III. Sobre o mercado de terrenos**

Igual para o mercado de terrenos, se o terreno está sub-avaliado então continuaria assim a menos que outros fatores incidam no preço, como a utilização de solo (<floresta, >pastagens), distancia das estradas, aproximação do centro povoado entre outros. Igual com os outros valores.