

LE MODELE TRANSAMAZON

1) LE CONTEXTE AMAZONIEN

*"Donner à une terre sans homme, des hommes sans terre"
"coloniser pour ne pas abandonner"
" coloniser par la patte du bœuf"*

*Slogans gouvernementaux des années 60-70
pour la colonisation de l'Amazonie*

Le contexte amazonien n'est pas simple. Il est le fruit d'une histoire mouvementée, souvent douloureuse, sous l'emprise de politiques volontaristes de colonisation.

En 1988, suite à l'assassinat de Chico Mendes, leader seringueiro¹, l'Amazonie est devenue le symbole mondial de la lutte pour la préservation de l'environnement. Car, selon l'INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), l'Amazonie brésilienne (6,7 millions de kilomètres carrés, 7 fois la superficie de la France) perd pratiquement 24.000 km² de forêt tropicale chaque année et 15% du massif a été détruit ces dernières décennies. Parmi les raisons de cette déforestation, on pense souvent de l'autre côté de l'Atlantique qu'elle est liée aux "madereiros" qui en exploitent le bois de façon non certifiée. Certes, la production non gérée de bois est effectivement une cause de déforestation, mais elle n'en est pas la principale. L'élevage est un facteur bien plus important. Car avec l'augmentation des exportations de viande bovine vers les marchés européens notamment, le nombre de têtes de bétail en Amazonie brésilienne a doublé au cours des dix dernières années. Or ce bétail a besoin d'espace et la plus grande forêt tropicale du monde cède progressivement du terrain en faveur de nouveaux pâturages [Tourrand et al., 1999 et 2002], [Ferreira, 2001]. Aujourd'hui le Brésil possède le plus grand cheptel du monde et il est devenu en quelques années le leader des exportations mondiales de viande de bœuf. L'Amazonie y joue un rôle majeur², ce qui fait dire à [Kaimowitz et al., 2004] que cette région a rejoint la "Hamburger Connection"³.

A partir des années 50, une politique volontariste a été engagée pour occuper l'espace amazonien. Cette volonté était commandée par trois objectifs. Le premier consistait à sécuriser les frontières disputées par les pays voisins mais aussi à affirmer la souveraineté du Brésil sur ce massif forestier considéré par certains environnementalistes comme un bien mondial de l'humanité. La seconde motivation était de tirer profit de cette réserve en ressources minières et de développer l'extractivisme. Le troisième objectif était de profiter de cette espace pour éviter une réforme agraire au Nordeste et au Sud du pays. Ainsi, sous l'impulsion de décisions politiques diverses (de Kubitschek à Lula, en passant par la dictature militaire 1964-1985), cet espace a été volontairement colonisé grâce à la construction d'un réseau routier et de diverses incitations

¹ Les seringueiros sont les travailleurs qui extraient la sève des hévéas pour produire du caoutchouc. Lors de nombreux combats syndicaux pour la défense de la forêt amazonienne, Chico Mendes a préconisé que soient créées des réserves forestières, gérées par les communautés traditionnelles pour favoriser une production durable. Il est devenu le porte parole des défenseurs de la forêt, des seringueiros et des Amérindiens, face au lobby des propriétaires terriens et des grands fazendeiros. Il est mort assassiné par l'un d'eux le 22 décembre 1988 à Xapuri.

² Aujourd'hui, l'Amazonie compte plus de 57 millions de bovins (1/3 du cheptel brésilien). De plus, avec un taux de croissance annuelle de plus de 10,5%, depuis 1990, l'Amazonie est en passe de devenir le premier bassin d'élevage du monde [Tourrand et al., 1999].

³ Norman Myers a utilisé l'expression "Hamburger Connection" pour décrire un phénomène similaire en Amérique centrale dans les années 80. A cette époque, les exportations de viande de cette région alimentaient les chaînes de fast-food aux Etats-Unis et contribuaient au processus de déforestation.

foncières et financières pour y attirer des investisseurs et des milliers de colons⁴. L'installation de ces petits fermiers le long des axes de pénétration a entraîné l'avancée de la frontière agricole, appelée front pionnier. Considéré comme le principal facteur de déforestation, l'élevage extensif est responsable de plus de 50% de la déforestation et l'agriculture itinérante sur brûlis représente 30 à 35% des surfaces déforestées [Bonaudo, 2005].

Ces familles paysannes, issues des migrations en provenance du Sud, du Sud-est et du Nordeste du Brésil, ont eu accès à la terre soit en bénéficiant d'un lot attribué par l'état, soit en achetant un terrain. Auparavant ces familles étaient souvent employées dans des exploitations sans jamais avoir possédé de terre avant de migrer en Amazonie :

"J'ai aimé être ici car c'est ici qu'on a trouvé une petite terre. Là-bas on habitait sur la terre des autres, allant par ici en allant par-là". Dona Maria, citée par [Negreiros Alves, 2004]

Car les problèmes environnementaux ne doivent pas cacher les difficultés sociales et individuelles de ces petits paysans soumis à la dureté du climat, à l'isolation, aux aléas du marché et aux maladies, sans parler des relations avec les fazendeiros ou celles avec les scieries clandestines.

"L'émergence de nombreux conflits entre les grands exploitants agricoles et les sans-terres, les titulaires de titre de propriété et les indiens, les indiens et les chercheurs d'or ou les grandes entreprises qui se disputent un même espace ou une même richesse minière. L'Amazonie est devenue la scène d'une véritable foire d'empoigne où les conflits se règlent par des assassinats ou des exécutions sommaires." [Negreiros Alves, 2004]

De plus, les systèmes de production mis en place ne sont pas toujours compétitifs et font face à des contraintes écologiques de plus en plus fortes (érosion des sols, changement climatique⁵, perte de biodiversité, etc.). Enfin, sur de nombreux fronts pionniers, on assiste à une concentration foncière qui écarte une partie de la population des bénéfices liés à l'usage de la forêt. Malgré de nombreuses ressources, on constate une augmentation de la pauvreté, de la précarité de toute une frange de la population et des dégradations environnementales irréversibles [Nepstad et al., 2002].

Aujourd'hui, sous les pressions nationales et internationales, le développement de la région se voudrait durable, écologiquement, économiquement et socialement. Mais, avec une très faible valorisation de la forêt sur pied, l'agriculture extensive reste la principale source de revenue et le rythme de déforestation ne ralentit pas. D'ailleurs la forêt est toujours considérée comme une simple *réserve*⁶ d'espace à transformer pour favoriser le développement économique [Poccard-Chapuis, 2004].

Pourtant, les grandes directives politiques pour coloniser l'Amazonie se sont progressivement estompées au profit de réglementations pour la préservation de l'environnement. Mais ce changement de politique laisse les colons dans une position inconfortable :

⁴ L'INCRA (Institut National de Colonisation et de Réforme Agraire), créé en 1970, était en charge de la réforme agraire et de la promotion de la colonisation. L'INCRA avait pour mission de construire les routes, d'établir le cadastre, de distribuer les terres et d'assurer l'assistance technique aux producteurs.

⁵ L'Amazonie est une des régions la plus humide au monde. Or l'humidité des régions tropicales constitue la première source de redistribution de chaleur pour la Terre. En effet, lorsqu'il pleut, l'eau passe de l'état gazeux à l'état liquide pour s'évaporer de nouveau. Ces processus accumulent ou libèrent de la chaleur. Aussi, une grande partie de l'humidité de l'atmosphère de l'Amazonie provient de la vapeur d'eau recyclée par évapotranspiration par la forêt elle-même. Or, si le déboisement ne semble pas modifier le cumul moyen des pluies, il changerait significativement la distribution et le cycle des précipitations par son influence sur la quantité de chaleur dégagée. Par ailleurs, [Andreae et al., 2004] montrent que la pollution causée par les brûlis de bois diminuerait la quantité de pluie mais aussi la couverture nuageuse. Ces phénomènes pourraient également avoir une incidence sur le climat continental [Malhi et al., 2008].

⁶ La partie de forêt naturelle présente sur une exploitation est d'ailleurs appelée « *reserva* » par les producteurs. Ils considèrent par là que cette partie de forêt n'est qu'une réserve de fertilité sur pied dont la finalité est à terme d'être coupée et brûlée pour laisser place à une parcelle agricole fertile [Veiga et al., 2004].

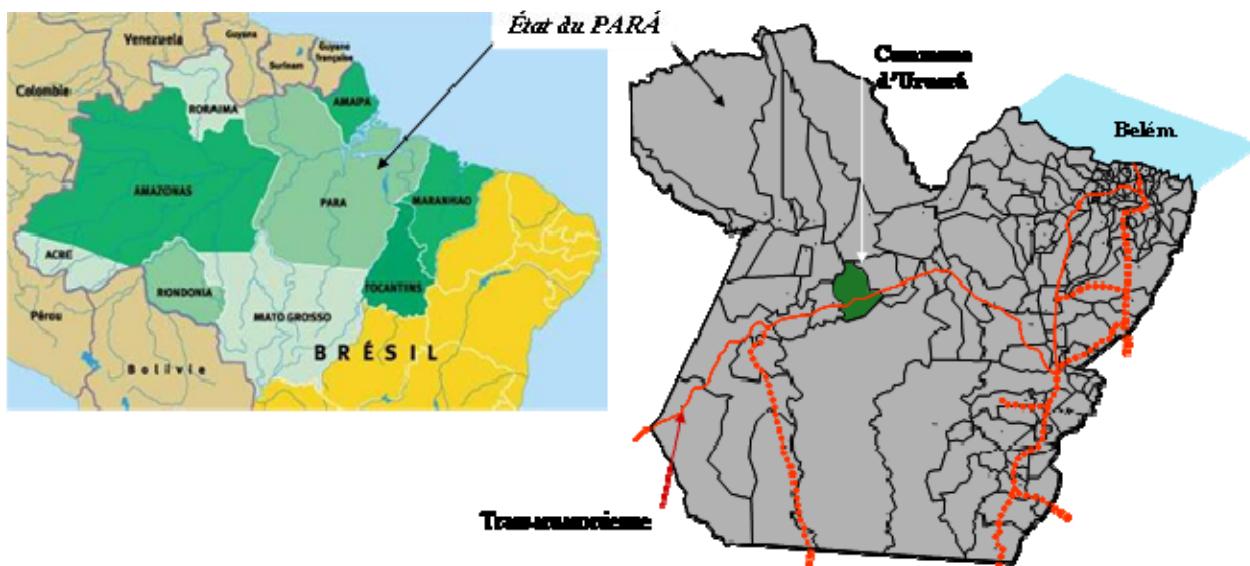
“Quando chegaram os cientistas disseram que devíamos desmatar perto do igarapé para eliminar a malaria e a febre amarela, mas não tinha nem malaria nem febre nessa regia. E agora nos chamam de bandidos da Amazônia”⁷. Senhor Cirilo, petit exploitant de cacao interviewé à Uruará.

Beaucoup de ces colons se sentent accusés par l'opinion internationale qui les considère comme les responsables des dommages écologiques. Ils sont souvent irrités par les critiques à leur égard et réagissent parfois violemment aux interventions de l'Ibama⁸. A tel point qu'il est mal vu voire dangereux de s'afficher comme environnementaliste en Amazonie, surtout si l'on est étranger !

Aujourd’hui, suite à la suspension des programmes de colonisation, des courants politiques s'affrontent au sein même du gouvernement fédéral. Les uns approuvent des actions incitatives pour continuer le développement économique (programme *Avança Brasil*) quand d'autres soutiennent des réglementations pour la protection de l'environnement. Mais proposer des lois exclusivement environnementales en ignorant les conditions de vie des petits producteurs entraînera certainement l'exclusion d'une partie de la population qui ira alimenter les favelas et conduira à un durcissement des conflits sociaux sans résoudre les problèmes de déforestation. Au contraire, réfléchir sur l'amélioration des conditions de vie, sur l'éducation, sur des technologies agricoles plus adaptées au milieu et sur la mise en place de marchés de produits forestiers non ligneux ou de bois certifiés, apparaît être une solution plus adaptée pour favoriser de nouveaux modes de gestion des ressources naturelles. Il est donc nécessaire et urgent de trouver des alternatives qui concilieraient la conservation et les besoins des populations locales.

2) LOCALISATION DU SITE D'ETUDE

Nous nous intéressons à la gestion environnementale d'un front pionnier situé dans la commune



d'Uruará (état du Pará) sur la Transamazonienne (BR 364). La superficie de la commune est de 10.796 km². Le climat y est équatorial avec une saison des pluies qui s'étend de décembre à mai.

Figure 1: Localisation de la commune d'Uruará. A gauche, les neuf états qui couvrent les 5,5 millions de km² de l'Amazonie brésilienne ; à droite, l'état du Para (capital Belém) et Uruará traversée par la Transamazonienne

Uruará est une commune récente (1972) qui n'était pas initialement prévue par le plan d'aménagement de l'INCRA, contrairement à Novo Brasil et Medicilândia. Or ces deux

⁷ "Quand ils sont arrivés, les scientifiques ont dit que nous devions déboiser près de la rivière pour éliminer la malaria et la fièvre jaune, mais il n'y avait ni la malaria ni la fièvre dans la région. Et maintenant ils nous appellent les hors-la-loi de l'Amazonie".

⁸ Ibama : Institut Brésilien de l'environnement et des ressources naturelles renouvelables (fondé en 1989)

communautés sont plus proches de la grande ville, Altamira et se sont moins bien développées. La situation d'Uruará à 200 km d'Altamira explique certainement les raisons de son émergence, car cette distance à la ville limite les échanges (en saison des pluies, il n'est pas rare de mettre 1 à 2 jours pour y arriver, ce qui est très pénible, même pour y mener des recherches !).



Figure 2: Etat de la Transamazonienne en saison des pluies.

Avant la colonisation, la commune était couverte de forêt occupée par les indiens *Araras*. Aujourd’hui, ils vivent dans deux réserves situées au sud de la commune.

3) OBJECTIFS DU MODELE

Ce rapide panorama de la situation ne sert qu'à introduire le contexte dans lequel ce travail de modélisation s'inscrit. Il est évidemment trop limité et la lecture des ouvrages cités ci-dessus permettra de mieux comprendre la situation générale de ces fronts pionniers.

➤ *La question de recherche, point d'entrée de la modélisation*

Le premier objectif du modèle est de formaliser et de synthétiser 15 ans de connaissances sur les dynamiques pionnières à Uruará. En effet, un matériel très conséquent est disponible sur ce municipio tel que des SIG, des cartes de télédétection, de nombreuses monographies, thèses, base de données, etc. Ce travail de modélisation vise donc à obtenir une vision plus synthétique des dynamiques rurales.

De plus, la modélisation a également pour objectif de mieux comprendre les activités humaines pour les intégrer dans les dynamiques conduisant à la déforestation. Grâce à la représentation des processus spatiaux et sociaux, le modèle cherche alors à retracer les dynamiques passées et à anticiper les évolutions possibles des fronts pionniers. Mais, contrairement à la plupart des modèles sur l'Amazonie qui abordent le problème de la déforestation au niveau du bassin amazonien, le modèle *TransAmazon* se focalise sur les petits exploitants, principaux acteurs de la déforestation, et les interactions entre les agriculteurs et l'environnement. Plus particulièrement, il s'agit de comprendre

- Comment les producteurs utilisent la terre ?
- Quelles sont les points clés qui influencent les dynamiques d'utilisation du sol ?

Il s'agit ici de se concentrer sur les petits colons, arrivés dans ce municipio au début des années 70, pour mieux comprendre leurs besoins (alimentaires, santé, argent, main d'œuvre, éducation, etc.), leurs stratégies de production et leurs interactions afin de retracer leurs itinéraires agricoles.

Ainsi, en prenant en compte les nécessités des acteurs, le modèle cherche à tester des scénarios prospectifs en produisant des informations originales pour l'élaboration de politiques publiques. Plus particulièrement, les questions portent sur les sujets de développement suivants :

- Comment contrôler l'avancée des fronts pionniers ?
- Comment concilier les aspirations des populations locales et la conservation d'espaces forestiers suffisamment grands pour maintenir la biodiversité naturelle ?

- Quelles gestions des ressources naturelles seraient en mesure de concurrencer le système coupe-brûlis-pâturage ?
- Quels systèmes pourraient rendre plus intéressante la poursuite de l'exploitation sur les aires déjà déforestées plutôt que de défricher de nouvelles parcelles forestières ?
- Comment intégrer des modes de gestion durable des ressources naturelles dans les paysages de front pionnier et dans la construction régionale ?
- Quelles sont les mesures et les politiques les plus appropriées pour parvenir à ces fins (mesures incitatives ou répressives, politiques d'accès au crédit, programmes de santé et d'éducation, ...) ?
- En quoi le savoir et le savoir-faire de l'agriculture traditionnelle peut-il servir l'agriculture pionnière ?

Si au départ, le projet cherchait à traiter l'ensemble de ces sujets, il est clair que dans un premier temps, il a fallu réduire l'éventail des objectifs. Or l'identification d'une question de recherche pour un modèle n'est pas triviale. A la lecture des divers objectifs énoncés ici, on comprend qu'il était nécessaire de passer par une première phase descriptive ("formaliser et de synthétiser 15 ans de connaissances") pour se concentrer ensuite sur les activités agricoles des producteurs. Nous verrons par la suite comment la question de recherche à évoluer, aboutissant à de nouvelles versions du modèle.

➤ *Autres modèles et avantages de la modélisation multi-agent*

On peut aussi se poser la question de l'intérêt de concevoir un nouveau modèle pour étudier un terrains si connu, objet d'attentions mondiales. Et d'ailleurs qu'est-ce que peut apporter un SMA pour aborder les problèmes amazoniens, sur un territoire plus grand que l'Europe ?

[Kaimowitz & Angelsen, 1998] présentent une revue des modèles (150) qui traitent de la déforestation des grandes forêts tropicales, dont nombreux se situent en Amazonie. Ainsi, il apparaît que la plupart des modèles sont statiques (modèles statistiques pour quantifier les relations entre variables) et opèrent à des niveaux macroscopiques, allant pour certains jusqu'à représenter tout le bassin amazonien. Habituellement conçus à partir d'analyses de télédétection des changements d'occupation des sols, ces modèles se basent sur l'observation des tendances passées de la déforestation qu'ils extrapolent sur le futur selon une perspective optimiste ou pessimiste. Ils projettent ainsi les dynamiques actuelles en estimant les probabilités de création de nouvelles routes ou l'asphaltage des voies principales, l'accessibilité aux marchés (frigorifiques, laiteries, etc.), la mise en place de réserves indiennes, ou l'application de nouvelles réglementations publiques.

Dans la continuité de l'étude de Kaimowitz et Angelsen, [Piketty, 2003] propose une typologie des modèles amazoniens selon leur mode opératoire. Parmi ces modèles prospectifs, l'auteur distingue les modèles uni-variés des modèles statistiques multi-variés. Pour les premiers, il s'agit d'identifier la principale cause de déforestation pour ébaucher des scénarios en extrapolant les tendances passées. Pour les seconds, la méthodologie est semblable mais repose sur l'identification de relations entre la variable à expliquer (surface déboisée) et un ensemble de variables indépendantes considérées comme exogènes (tel que les niveaux des prix des intrants et des productions, l'accessibilité des marchés, la densité de population, ...) et qui sont propres à influencer la variable dépendante.

Par exemple, en constatant que le taux de déboisement le long des grands axes routiers est compris entre 29 % et 58% de la couverture initiale de forêt, [Nepstad et al., 2001] attribuent la cause de la déforestation à la construction ou à l'asphaltage de routes. Les auteurs critiquent alors le programme Avança Brasil (plus de 6000 km de nouvelles routes) en estimant que pour les deux décennies suivantes, la déforestation atteindrait entre 120.000 km² et 270.000 km² selon les scénarios (optimiste ou pessimiste). Sans nier l'importance de la route comme facteur de déboisement, [Piketty, 2003] explique que les principales faiblesses de ces types de modèles uni-

variés sont que "(i) le déboisement est associé à une seule variable (présence de routes ou croissance agricole) (ii) que l'impact de la variable choisie sur le déboisement restera au même niveau que dans le passé (hypothèse de processus stationnaire)". Sur ce dernier point, [Poccard et al. 2005] expliquent que "cela peut conduire à des interprétations peu convaincantes comme celles supposant que les aménagements routiers continueront pendant les cinquante prochaines années à avoir le même effet qu'au cours des vingt dernières [Laurance et al., 2001], et donc des propositions inadaptées. Relayées par une diffusion efficace, celles-ci peuvent malgré tout avoir un impact fort dans le débat international sur les moyens de préserver la forêt amazonienne⁹".

Certains modélisateurs estiment qu'un meilleur accès aux routes et aux marchés ainsi qu'une bonne qualité des sols augmentent la probabilité d'une zone donnée à être déforestée. Pour d'autres, la pauvreté et la déforestation sont fortement corrélées et cette relation est renforcée dans les zones isolées, loin des routes. Outre ces contradictions, ces modèles proposent des explications peu convaincantes des causes de la déforestation. Ainsi, une simple corrélation entre la présence d'une route et une zone déboisée est interprétée comme un lien causal de la route sur la déforestation. Mais il arrive souvent que les routes soient endogènes, c'est à dire qu'elles peuvent avoir été construites suite à une déforestation [Kaimowitz & Angelsen, 1998].

Etant donné qu'ils s'attachent à décrire les grandes tendances au niveau macroscopique, la plupart des travaux éprouvent des difficultés à saisir l'essence des phénomènes étudiés. Comme le remarque [Lambin, 1994], "à de telles échelles, le haut niveau d'agrégation des variables obscurcit la variabilité des situations et des relations ; moyenner ces données entraîne un aplatissement de l'information sans portée explicative". Par ailleurs, à l'exception de [Deadman et al., 2001] et [Caldas et al., 2002], les acteurs ne sont pas représentés dans ces modèles, si ce n'est sous forme de densité et de flux de population dans le meilleur des cas. Ainsi, en dépit de l'attention toute particulière que l'Amazonie reçoit de la part de la communauté internationale, les connaissances sur les choix décisionnels des acteurs sont rudimentaires. Ces modèles de corrélation ne donnent qu'un éclairage partiel sur des processus qui restent mal compris :

Surprisingly little is known about how the characteristics of deforestation agents affect their behaviour. We know households that exhibit "full-belly" or subsistence type behaviour are less responsive to market signals, but existing models tell us little about how common such behaviour is. [...] Analytical models suggest both time preferences and risk aversion are important. But their practical effect depends on assumptions about the relevant investment decisions, and there is little empirical evidence on which to base such assumptions. [Kaimowitz & Angelsen, 1998]

Par conséquent, en se focalisant sur les acteurs, l'approche SMA paraît être un outil judicieux pour révéler certains éléments clés qui sont à l'origine de la déforestation. D'ailleurs, comparé aux autres modèles qui s'intéressent exclusivement à quantifier la déforestation, et en accord avec nos objectifs énoncés, nous nous sommes davantage intéressés à la vie des colons des fronts pionniers. Evidemment, ce travail est moins confortable. Il nécessite de se frotter davantage au terrain, qui peut être difficile parfois. Il faut aussi interviewer les acteurs, découvrir l'organisation de leur ferme, retracer leur histoire et identifier leurs réseaux sociaux, afin de mieux comprendre leurs difficultés et d'imaginer avec eux des évolutions alternatives.

4) DESCRIPTION DU MODELE

Il n'est pas simple de présenter un modèle compliqué comme *TransAmazon* malgré notre volonté de rester au plus simple. La description présente n'est donc pas exhaustive mais tente d'expliquer la structure et le fonctionnement global du système en mettant la lumière sur quelques points précis. D'autres descriptions du modèle sont disponibles dans [Bonaudo, 2005], [Bonaudo et al., 2005] et [Viera Pak, 2008].

⁹ Les parution dans Science de [Nepstad et al., 2001] et [Laurance et al., 2001] ont fait grand bruit.

La conception du modèle *TransAmazon* a commencé en 2004 et a été suivie de périodes de travail et d'arrêt. Aujourd'hui, plusieurs versions ont été réalisées. L'équipe de concepteurs est constituée de Jean-François Tourrand (Cirad), Thierry Bonaudo (AgroParisTech) et Pierre Bommel (Cirad). *TransAmazon* est donc un modèle d'experts dans le sens où il n'a pas été conçu selon une démarche de modélisation participative telle que présentée par certaines expériences ComMod. L'effort principal a consisté à délimiter le cadre du modèle et à concevoir de sa structure. Sans même écrire une seule ligne de code, il a fallu plusieurs mois à l'équipe pour réaliser les premiers diagrammes UML.

➤ Délimitations

Les nombreuses informations accumulées sur Uruará ainsi que les SIG et bases de données, auraient permis de construire une véritable usine à gaz. Mais, malgré la disponibilité des outils, notre souci a été de synthétiser et de condenser les connaissances pour garder le contrôle sur le modèle. La partie la plus longue du travail a consisté à trier, hiérarchiser et synthétiser l'information disponible. Il a fallu identifier les éléments qui semblaient les plus pertinents, les caricaturer parfois, pour obtenir la structure la plus simple possible sans pour autant dénaturer notre objet d'étude. Car notre objectif n'est pas de reproduire la réalité, mais d'identifier les éléments clés et de comprendre la façon dont ils influencent les dynamiques à l'œuvre. La deuxième préoccupation était de produire un outil qui puisse être partagé avec les acteurs : obtenir un ersatz de leur situation pour ne pas impressionner par l'étalage d'outils "high-tech", mais plutôt pour laisser la porte ouverte à la discussion et à la remise en cause de notre travail.

Uruará est déjà une petite ville au sein d'un espace deux fois plus grand que le Lot-et-Garonne. Le municipice compte aujourd'hui 35.000 habitants. La carte ci-dessous montre le découpage foncier de la commune. La route transamazonienne la traverse d'Est en Ouest et tous les 5 km partent perpendiculairement à cet axe deux vicinales, vers le Sud et vers le Nord. La carte laisse apparaître des zones de chevauchements, en particulier entre la réserve indienne et des lots de 100 ha occupés par les petits producteurs, mais aussi au niveau des projets d'*assentamentos* (lotissements destinés à accueillir des familles de sans-terres).

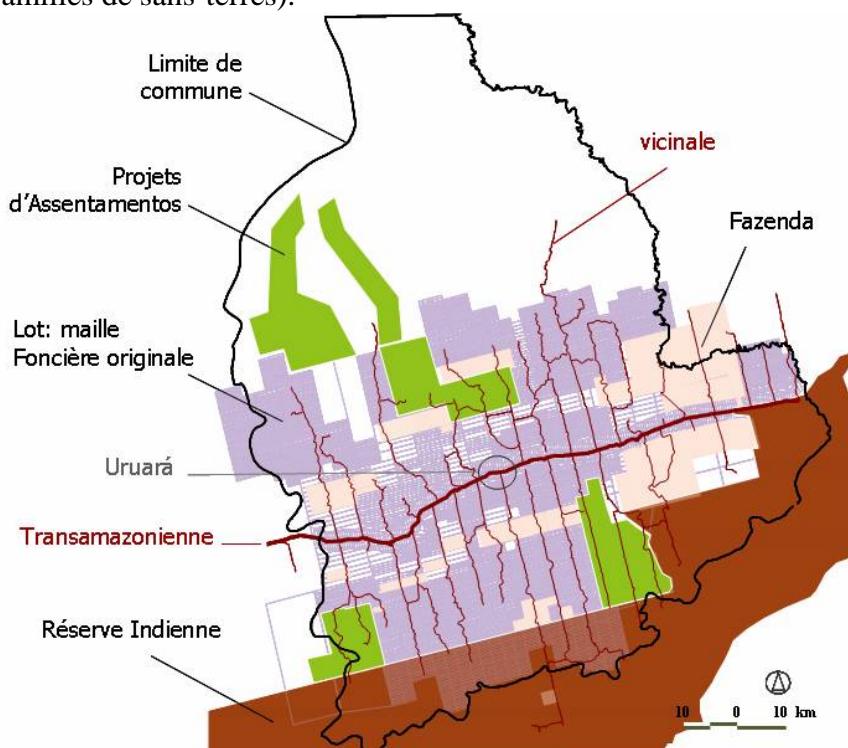


Figure 3: Carte foncière d'Uruará, d'après [Bonaudo, 2005].

Sur la base d'une structure initiale (lots de 100 ha), dessinée à l'origine par l'INCRA (cf. figure suivante), on constate donc des zones de chevauchements, sources de tensions. De plus, même si les grandes scieries ne figurent pas sur la carte, il est courant de voir apparaître des conflits avec les *madereiros* qui entrent parfois dans les propriétés et les réserves pour y extraire des arbres. Comme l'explique [Negreiros Alves, 2004], des tensions diverses pour l'accès à la terre et aux ressources surviennent régulièrement, sans parler des jeux de pouvoir et d'influences, ni du rôle des églises. Bref, comme pour la plupart des systèmes socio-environnementaux, il s'agit d'une zone sensible et complexe. On nous a parfois reproché de ne pas prendre en compte ces différents aspects dans le modèle et surtout de ne pas tenir compte des Indiens.

Les objectifs du modèle nous servent à mieux délimiter ses dimensions, tant spatiales que sociales. En se référant à ces objectifs initiaux, on comprend que la cause des Indiens n'est pas à prendre en compte ici, ni les jeux de pouvoir, ni le poids des églises, ni même les actions des *madereiros*. En effet, la première cause de déforestation en Amazonie est essentiellement liée à l'action de l'agriculture. A Urará, les fronts pionniers de déforestation progressent essentiellement sous l'action des petits producteurs. Le modèle doit donc s'attacher à décrire uniquement les activités de ces colons sur l'espace.

La figure suivante montre une photo satellite de la couverture végétale à Urará où la zone déforestée forme ce qu'on appelle une arête de poisson. Cette structure particulière est liée à la configuration du réseau routier : tous les 5 km ont été tracées des routes vicinales (*traversão* en portugais). Certaines peuvent atteindre quelques centaines de kilomètres. Le modèle se limite alors à décrire la structure et les dynamiques de ces vicinales, divisées en lots simples sur lesquelles habitent et évoluent les familles des petits producteurs.

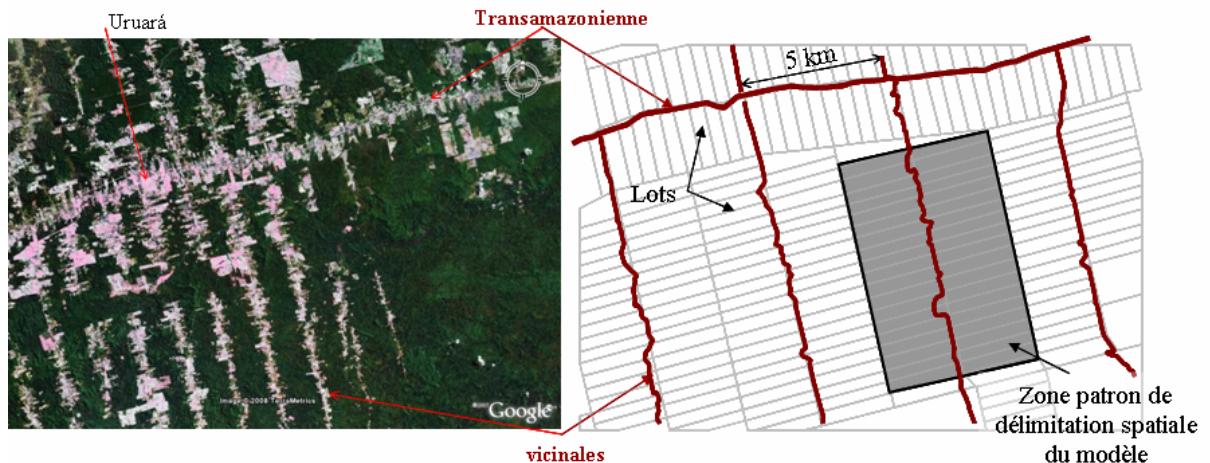


Figure 4: Urará vu d'en haut. A gauche, photo satellite (source Google Earth) montrant la structure particulière en arête de poisson. A droite, schéma de la zone présentant le réseau routier et la configuration des lots.

➤ Description de la structure

Les diagrammes issus des phases de conception ont été retravaillés en les épurant au maximum pour les présentés ici. Au final, le modèle présente une structure "relativement" simple, composée de trois parties : l'espace, le couvert végétal et les familles :

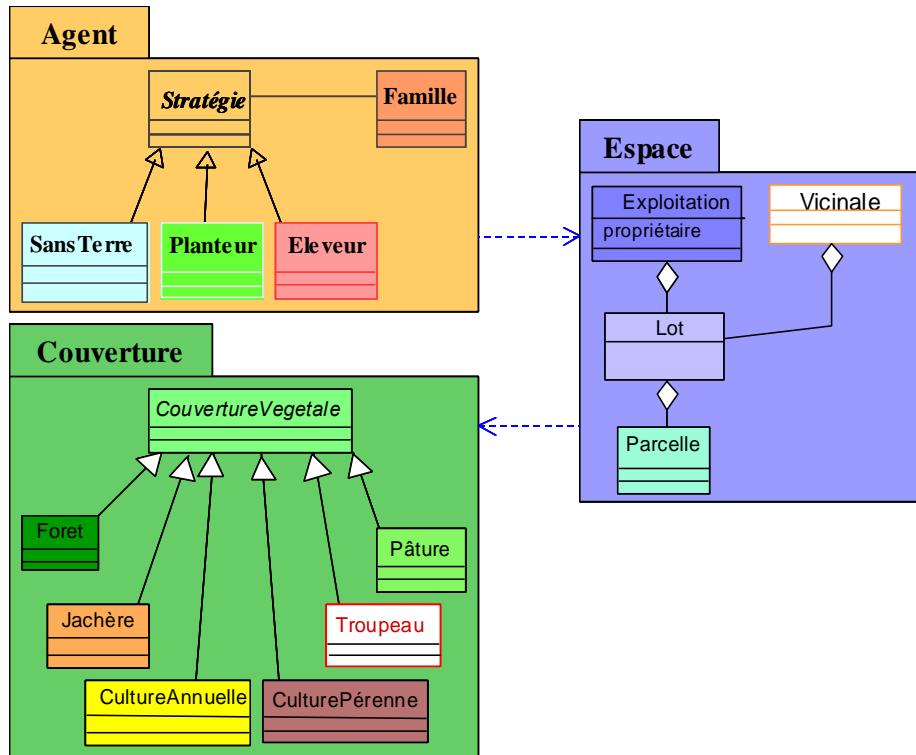


Figure 5 : Diagramme de package montrant la structure générale de TransAmazon.

○ L'espace

Des lots de 100 ha ont été cadastrés par l'INCRA le long des vicinales. Les lots de la "faixa" (bord de la Transamazonienne) sont considérés comme ayant une localisation privilégiée. "L'alqueire" est l'unité de mesure utilisée par les fermiers et vaut 5 ha. Elle a été choisie comme granularité spatiale minimale. Le diagramme de classes suivant montre la structure spatiale du modèle :

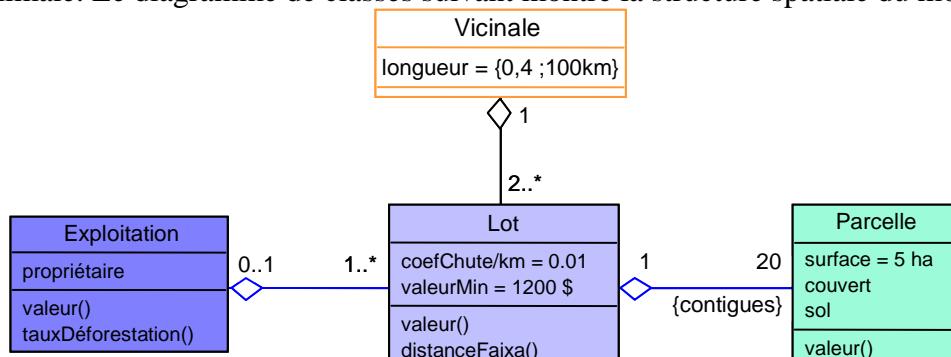


Figure 6: Une hiérarchie d'agrégation d'entités spatiales caractérise la structuration spatiale de TransAmazon.

Une exploitation, composée d'au moins un lot, est capable de calculer sa valeur monétaire (en cas de vente ou d'achat) ainsi que son taux de déforestation. Chaque lot est composé de 20 parcelles contigües. Sa valeur monétaire est la somme de la valeur de ses parcelles mais diminue avec la distance à la Transamazonienne sans pour autant descendre sous le seuil de 1200 \$. La parcelle est l'unité spatiale élémentaire. Certains l'appellent parfois le pixel et d'autres la cellule, mais en modélisation il est important de ne pas mélanger le vocabulaire technique avec celui du domaine ciblé par le modèle. La parcelle, donc, délimite une surface de 5ha sur laquelle on trouve un type de sol et un couvert végétal. L'exemple suivant montre une photo prise à l'entrée d'un lot entièrement recouvert de pâturage et un exemple de structure spatiale d'une vicinale.

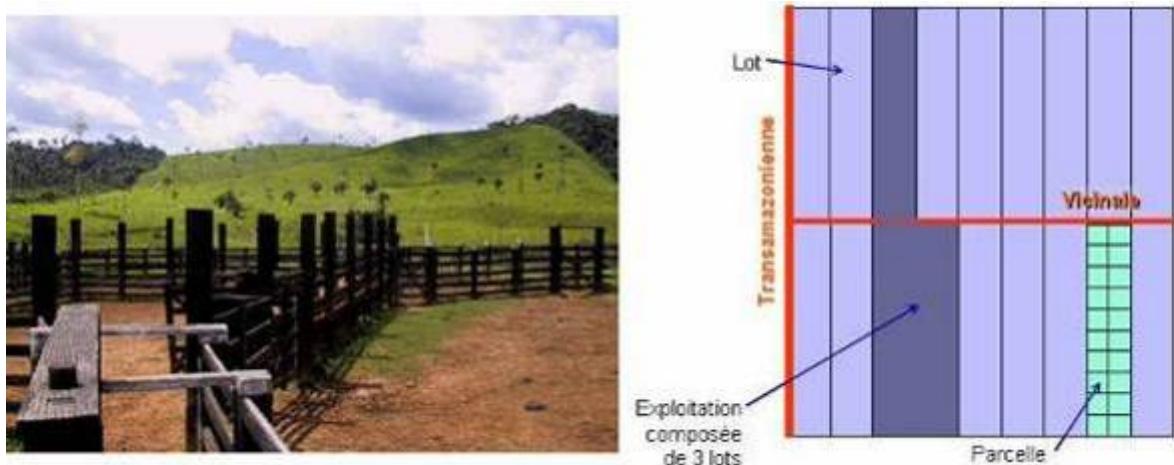


Figure 7: Photo d'un lot en pâturage entouré de forêts. Le schéma représente un exemple des éléments de la hiérarchie spatiale du modèle.

○ Les sols

Chaque couvert repose sur un sol dont l'indice de fertilité influence la production du couvert. Même si les pédologues estiment que cette classification est trop simpliste, nous avons suivi le vocabulaire des fermiers qui distinguent trois types de sol :

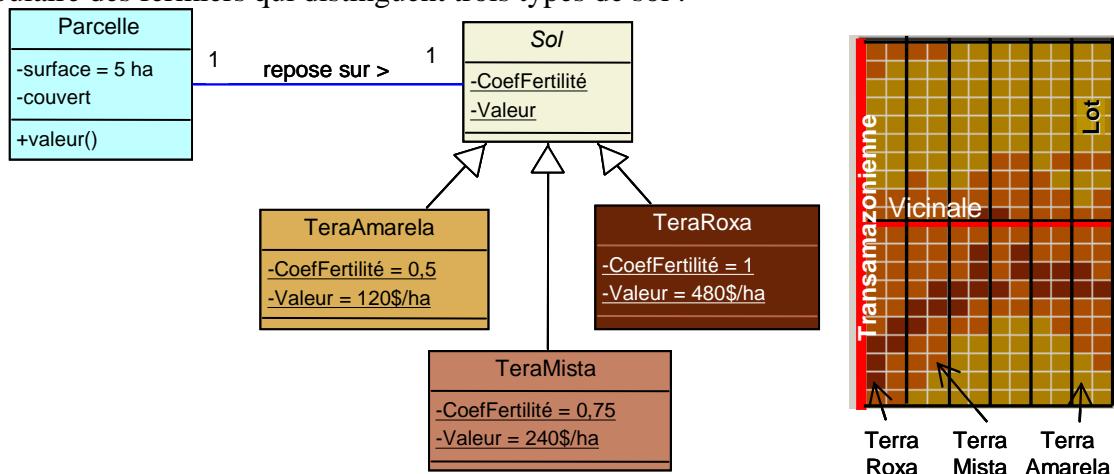


Figure 8: Les trois types de sols présents dans la région. Diagramme de classe et visualisation.

A chaque qualité de sol est associé un coefficient de fertilité qui influence la productivité de la végétation de la parcelle et par conséquent sa valeur monétaire. A Uruará, 10 % des terres sont de type *Roxa* (rouge, terre excellente), 50 % de type *Amarela* (jaune, terre assez pauvre) et 40 % de type *Mista* (mixte). Dans cette version du modèle, aucune dynamique n'est associée au sol : les cultures n'entraînent aucune dégradation de la fertilité. Etant donné l'importance de ce phénomène, il sera nécessaire d'introduire la dégradation et la récupération des sols dans les prochaines versions.

○ Le couvert végétal

A chaque parcelle est également associé un couvert végétal muni de sa propre dynamique. Sur une parcelle donnée, un couvert laissé à l'abandon changera naturellement de stade au cours du temps. Le diagramme de classes suivant utilise le "land-use pattern" [Le Page et Bommel, 2004] pour décrire cette structure.

Cette hiérarchie des couverts montre les différents types de végétation utilisés dans le modèle. Il s'agit à nouveau d'une simplification d'une réalité plus complexe. Chaque couvert possède un âge et une durée d'abandon et connaît son prochain stade évolutif (*Succession*). Ainsi, abandonné à lui-même, un paysage donné évoluera naturellement et progressivement vers la forêt (le climax des

écologues)¹⁰. Ce diagramme n'est pas suffisamment complet pour prétendre aider à la réPLICATION¹¹. Il n'est conçu que pour présenter une partie du modèle et le discuter. Il a été présenté plusieurs fois à des acteurs qui en ont parfaitement compris le sens. Certains ont d'ailleurs proposé d'autres valeurs des attributs.

Le troupeau n'est évidemment pas un couvert végétal, mais la façon dont nous avons représenté sa dynamique sans prendre en compte le cycle de vie des vaches, s'est révélé finalement très proche d'une culture : en fonction des entretiens qu'il reçoit, il génère tous les ans une production (de viande) comparable à une autre culture. S'il n'est pas entretenu, sa productivité est réduite progressivement à l'instar des autres cultures et il fini par disparaître.

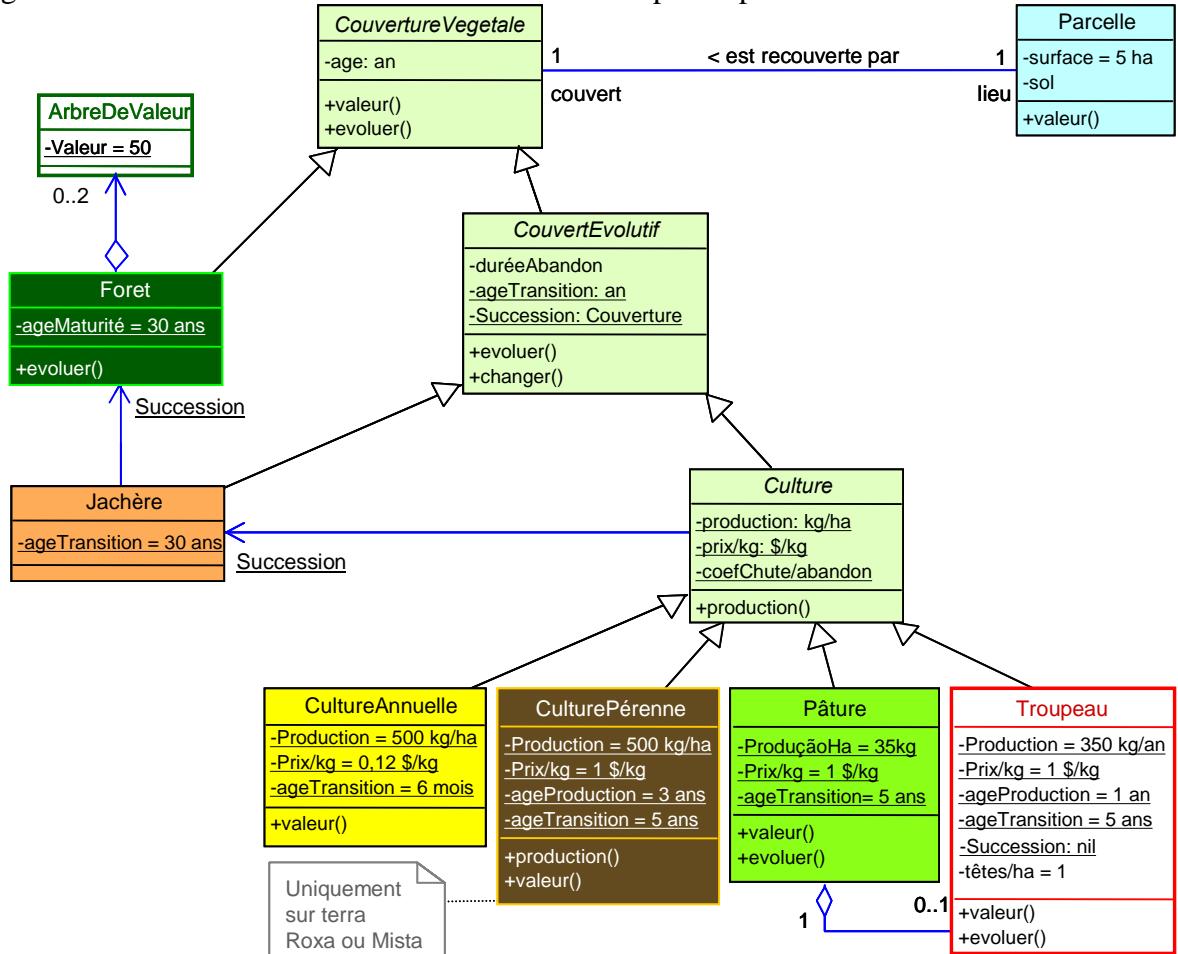


Figure 9: Utilisation du "Land Use Pattern" pour décrire la structure et les successions du couvert végétal (les attributs et les rôles soulignés correspondent à des variables de classe).

La culture pérenne dominante à Uruará est le cacao qui nécessite une bonne terre (*Roxa* ou *Mista*). Le cacao commence à produire au bout de 3 ans. La figure suivante montre un exemple de paysage végétal :

¹⁰ Le diagramme d'état-transition de la végétation est présenté (Figure 14, p. 16).

¹¹ Pour cette première description, nous avons retiré toutes les informations concernant les coûts en main d'œuvre et les coûts en argent qu'un agent producteur doit dépenser pour supprimer, planter et entretenir un couvert donné. Ces informations sont présentées plus loin.

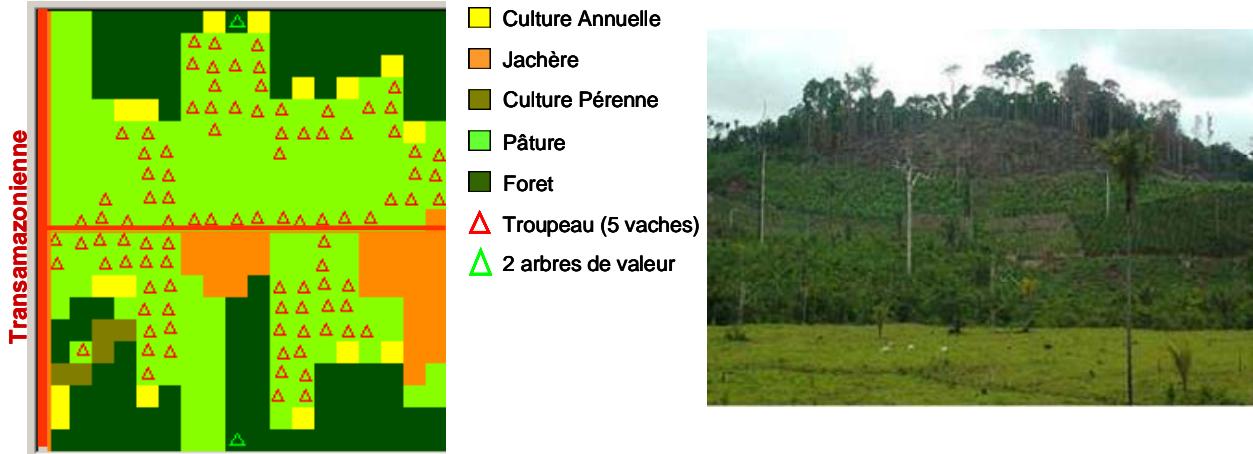


Figure 10: Vue du paysage végétal telle que représentée par le modèle (à gauche) ou sur une photo qui laisse apercevoir différents types de couvertures, du pâturage à la forêt primaire (à droite).

A partir de tous ces éléments, on est capable de faire évoluer naturellement les couverts végétaux, de calculer la production de chacun. On peut aussi calculer la valeur de chaque lot qui dépend des proportions de sols qu'il contient et de la valeur des couverts qu'il supporte. Cette valeur totale diminue en s'éloignant de la Transamazonienne :

$$V_{lot} = \text{Max} \left\{ 1200 ; \text{distance} \times \text{coefChute} \times \sum_{parc=1}^{20} V_{parc} \right\} \text{ avec } V_{parc} = V_{couverture} + V_{sol} \quad (11.1)$$

○ Les familles de colons

- Pas de dynamique démographique

Dans *TransAmazon*, un agent social personnifie une cellule familiale de colons. Ses membres, de 2 à 8, se partagent entre les actifs (main d'œuvre familiale) et les inactifs (enfants trop jeunes pour travailler). La répartition des membres par famille suit les données statistiques de l'IBGE sur Uruará.

Ne voulant pas entrer dans les sujets trop complexes de mariage, de filiation, de décès et d'héritage, la famille ne se développe pas ; ses membres ne vieillissent pas, ni se reproduisent. Evidemment, ce n'est pas la réalité et les problèmes de succession et de division des terres sont un sujet de préoccupation pour les fermiers. Cet état figé de la population pause un problème que nous devrons certainement régler à terme. Mais étant donné les objectifs du modèle, cette dimension, trop complexe à concevoir ne nous a pas paru indispensable dans un premier temps. Par contre, elle empêche de mener des simulations sur le long terme.

La seule évolution de la population a lieu lors de l'exclusion définitive d'une famille du système qui ne parvient pas à survivre. Aussi, à partir d'un pool initial de familles, les simulations ne montrent jamais un accroissement de la population mais plutôt une légère diminution au cours du temps.

- Force de travail de la famille et coûts d'intervention sur la propriété

Pour survivre et se développer, chaque famille dispose de deux ressources : (1) sa main d'œuvre active (*MOactive*) qu'elle utilise pour ses travaux des champs ou pour travailler à l'extérieur, et (2) son argent (*solde*) qu'elle récupère lors des récoltes ou de la vente de sa main d'œuvre. Elle dépense cet argent par la consommation du ménage, par les coûts attachés aux travaux, par l'embauche de main d'œuvre occasionnelle et par l'achat de nouveaux lots. Sa main d'œuvre active est représentée comme une quantité de journées de travail disponible qui diminue au fur et à mesure des travaux des champs. En début de saison, le nombre de jours disponibles est réactualisé.

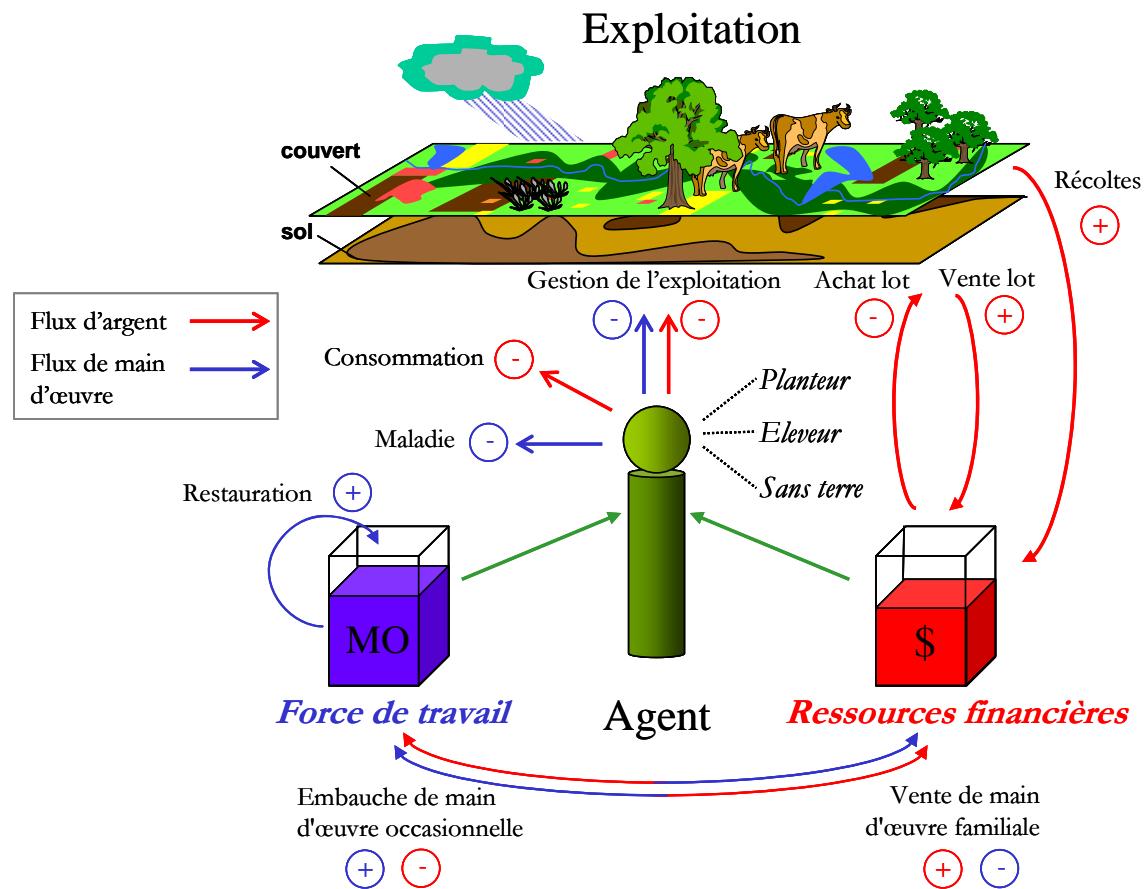


Figure 11: Diagramme systémique d'un agent. Pour se développer, l'agent dispose de deux ressources : sa main d'œuvre active et son argent. Il les utilise pour sa consommation et pour la gestion de son exploitation.

A chaque action d'un agent sur un couvert, un coût en main d'œuvre et un coût en argent sont respectivement retirés de sa force de travail et de son porte-monnaie. Ainsi, chaque type de couvert possède des informations sur les coûts à l'hectare en main d'œuvre et en argent pour supprimer, planter et entretenir ce couvert. Pour ne pas surcharger le diagramme de la figure 9, les informations sont réunies dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1: Coûts en main d'œuvre et en argent pour supprimer, planter et entretenir les différents couverts végétaux.

Couverture Vegetale	Foret	Jachère	Culture Annuelle	Culture Pérenne	Pâture	Troupeau
-age: an -CoutSuppression -CoutImplantation -CoutManutention -MOsuppression -MOimplantacao -MOmanutention	40	10	na	na	na	na
-CoutSuppression \$/ha -CoutImplantation \$/ha -CoutManutention \$/ha -MOsuppression jour/ha -MOimplantacao : jour/ha -MOmanutention: jour/ha	na	na	0	240	40	300
+valeur() +evoluer()	na	na	0	10	1	5
na: non attribué (0)	12	5	na	na	na	na
	MOimplantation jour/ha	na	na	4	55	11
	MOmanutention jour/ha semestre	na	na	0	24	1

Ces informations agrègent des données très variées. Le coût d'implantation d'un pâturage par exemple regroupe le coût des semences, des intrants et du matériel ainsi que le coût de la clôture. Le fruit des récoltes, effectuées en fin de saison, est directement transformé en argent selon la formule de la marge brute suivante :

$$marge\ brut\ e = \sum_{lot_i} \left(\sum_{parc_j}^{parc_{20}} prodEffective(couvert.parc_j) \times prix(couvert.parc_j) \right)$$

Pour un rendement optimum, les cultures doivent être entretenues. Ceci correspond, dans la réalité, au nettoyage du pâturage, à l'entretien des clôtures, à la taille de la cacaoyère, etc. Si l'entretien est négligé, une durée d'abandon est incrémentée. Au-delà d'un seuil (*ageTransition*, cf. diagramme 11-9), la culture disparaît laissant place à une jachère. Avant ce seuil, le manque d'entretien réduit la production effective d'une culture :

$$prodEffective(cult) = production(cult) \times coefFertilité(sol) \times tauxAbandon(cult)$$

avec $tauxAbandon(cult) = coefChuteParAbandon(cult) \times duréeAbandon(cult)$

La quantité de main d'œuvre disponible peut être vue comme un "stock" de journées de travail qui diminue avec les activités agricoles sur la propriété. En fin de saison, après la récolte, le surplus de main d'œuvre disponible est vendu à l'extérieur. Mais aucun agent du système n'achète effectivement ces journées de travail. Elles sont directement réinjectées dans les ressources financières familiales au tarif de 3,3 \$/jour (100 \$/mois).

En début de saison, le "stock" de main d'œuvre est réactualisé à son maximum. Cependant, étant donné que la santé constitue une réelle menace pour la survie des petits producteurs d'Uruará, ce facteur est pris en compte dans le modèle. En effet, les problèmes de santé pèsent lourdement sur les capacités de production des familles : les centres de santé sont chers et souvent très éloignés. De plus, pour y amener un malade, un adulte valide doit s'absenter, ce qui réduit fortement la main d'œuvre disponible pour effectuer les travaux des champs. Si le malade est lui-même un adulte, le coût pour la famille est rapidement catastrophique. A partir des données statistiques de l'IBGE, une probabilité de tomber malade a donc été calculée (*probaMalade* = 5%/semestre). A chaque début de saison, un tirage aléatoire est effectué pour chaque membre de la famille pour tester cette probabilité. Si un enfant tombe malade, la force de travail est réduite de 1. Si le malade est un adulte, 2 unités de main d'œuvre sont enlevées.

- Stratégies des agents

Pour la conception d'un modèle, un patron d'analyse (souvent appelé *design pattern*) permet de réutiliser des analyses robustes ayant déjà fait leurs preuves. Par exemple, le patron d'analyse "Acteur-Rôle", défini par [Coad, 1992], associe à chaque agent un rôle ou une stratégie. Il a été appliqué ici et offre un avantage indéniable au modèle. En effet, il permet de séparer l'agent en deux parties distinctes mais interconnectées : la famille et sa stratégie agricole. Cette séparation permet aux concepteurs de mieux se concentrer sur les activités agricoles des fermiers sans mélanger des notions rattachées strictement à la famille. De plus, la possibilité pour l'agent de choisir sa stratégie agricole et surtout de pouvoir en changer en cours de simulation constitue la véritable dynamique affectée aux agents. Ainsi l'alternance de stratégies au cours du temps engendre une diversité de parcours familiaux qui procure au modèle une richesse de comportements.

Dans *TransAmazon*, la stratégie se décline en trois spécialisations : "Sans-terre", "Eleveur" et "Planteur". S'il faut bien reconnaître que la première n'est pas vraiment le résultat d'un choix familial, les deux autres dépendent de décisions prises lors du bilan annuel de l'agent. Le diagramme suivant illustre la structure des agents :

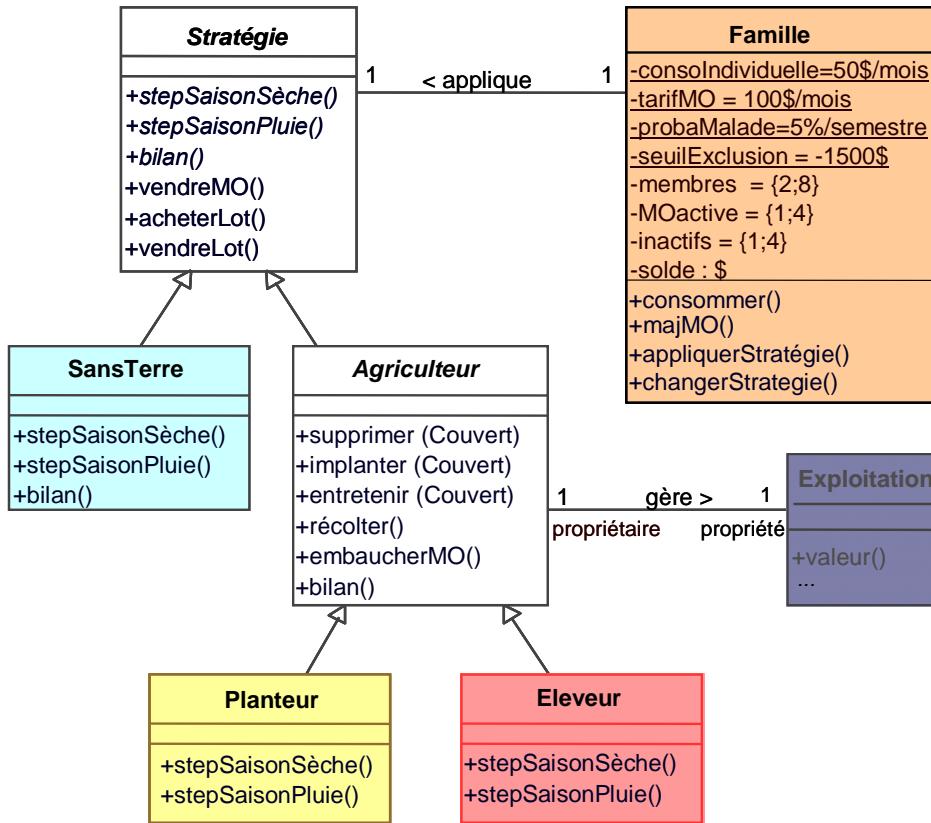


Figure 12: Diagramme de classe décrivant la structure d'un agent.

Les activités d'une famille sans-terre se limitent à la vente de sa main d'œuvre. En fin d'année, lors de son bilan, elle peut acheter un lot à vendre si elle possède suffisamment d'argent (le prix du lot + sa consommation annuelle). Dans ce cas, elle devient éleveur. Mais si son solde est inférieur à 1500\$ (seuil d'exclusion), la famille sort du système et l'agent est retiré de la simulation.

Une famille propriétaire d'au moins un lot peut choisir d'être planteur de cacao ou éleveur bovin. Elle cultive sa terre en privilégiant la spécialité qu'elle a choisie. Comme le montre les quelques diagrammes d'activité (en annexe), ce choix ne signifie pas nécessairement un abandon des autres cultures déjà en place sur le lot.

Ce fut évidemment l'élaboration de ce package "Agent" qui demanda le plus de temps et de discussions. Ainsi, Laura Ferreira propose dans sa thèse une classification des fermiers de la commune en six types : Sans-terre, Subsistance, Planteur, Eleveur, Diversifié et Accumulation [Ferreira, 2001]. Il aurait été simple d'intégrer cette classification dans le modèle comme l'aurait souhaité mes collègues. Mais l'étude détaillée des activités de chaque type à montrer des similitudes de comportements. Nous avons pris alors le risque de ne pas intégrer cette classification au profit de deux stratégies d'agriculteur plus caricaturales : Planteur et Eleveur. Or, grâce aux décisions des agents qui entraînent des changements de stratégies en cours de simulation, les sorties laissent apparaître les six typologies de fermiers identifiées à partir des seules 3 stratégies modélisées.

➤ *Description des dynamiques*

○ Choix du pas de temps

Ne souhaitant pas utiliser une gestion événementielle du temps par soucis de simplicité et par manque d'expérience, il a fallu définir la durée minimale du pas de temps. En Amazonie, la saison des pluies et la saison sèche sont les deux périodes principales, qui orientent les activités agricoles. Néanmoins le climat est tellement chaud et humide qu'il autorise deux récoltes annuelles. Les calendriers agricoles que nous avons élaborés avec les producteurs au cours d'ateliers collectifs, montrent un découpage des activités à l'échelle du mois, voire de la semaine [Vieira Pak, 2008].

Pour éviter de descendre à de tels niveaux de granularité, la saison (6 mois) a été choisie comme unité temporelle de base. Exprimé sous forme d'une quantité qui diminue au fur et à mesure des activités, le "stock" de journées de travail disponibles pour la famille apparaît être une astuce efficace pour rester à ce niveau de granularité. Le pas de temps finalement choisi est l'année, mais elle est subdivisée en 3 périodes : saison sèche, saison des pluies et bilan annuel.

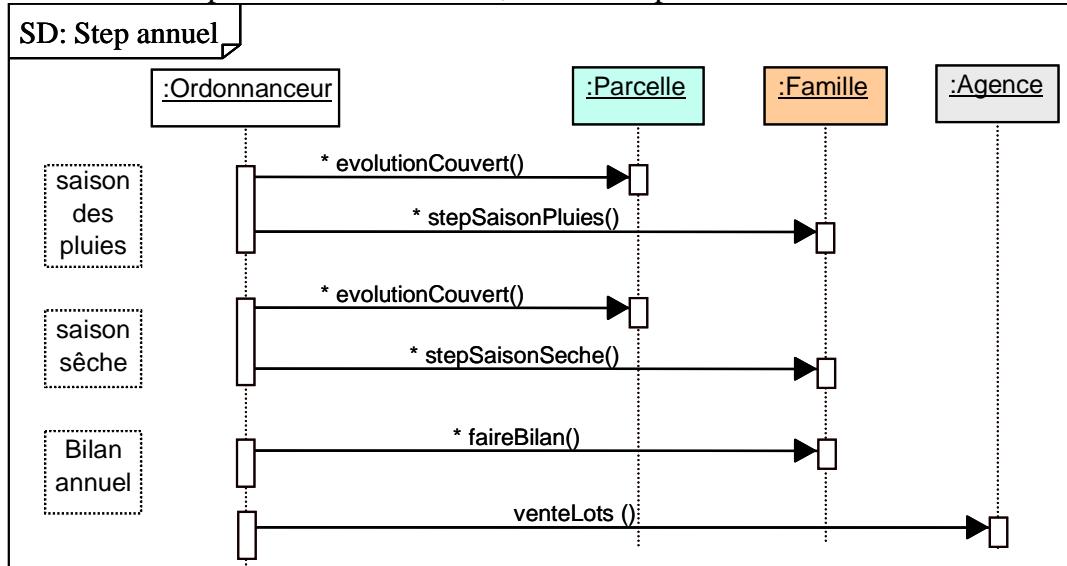


Figure 13: Diagramme de séquence d'un pas de temps annuel

○ Dynamique de la végétation

Sur la base du diagramme de classe 11-9, le diagramme d'état-transition suivant illustre la dynamique de changement d'état de la végétation. Deux catégories d'événements sont présentés : les événements naturels et ceux provenant d'activités agricoles.

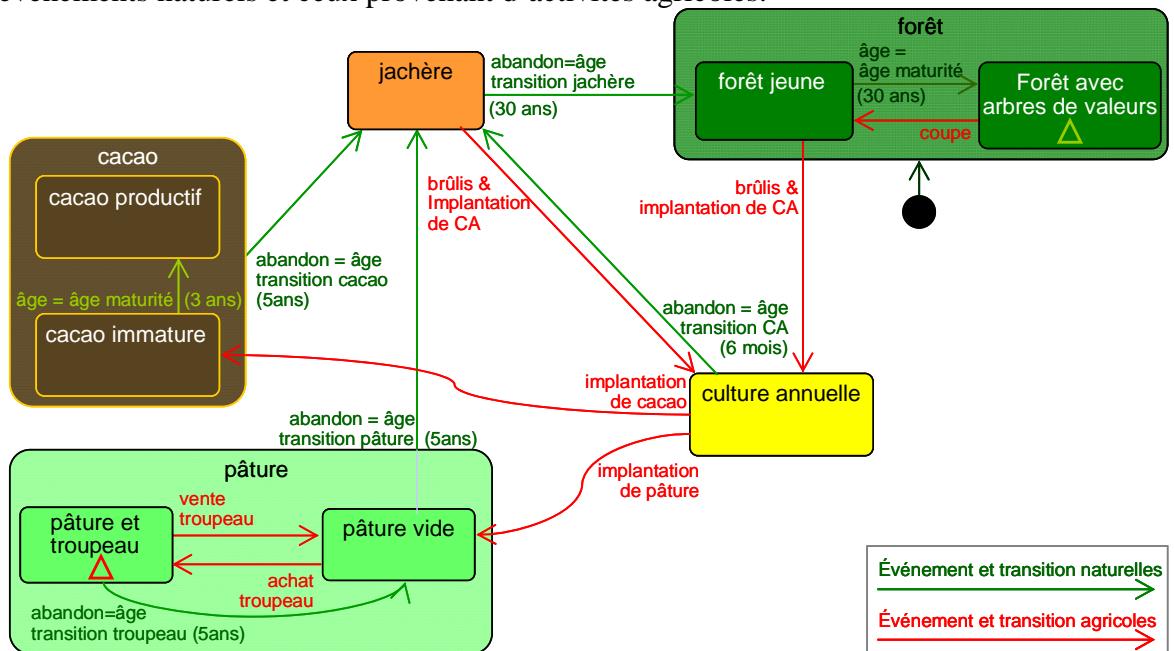


Figure 14 : Diagramme d'état-transition de la végétation.

Sur la base du diagramme de classe "Couverte" et des informations contenues dans le tableau 11-1, les agents peuvent calculer les profits issus de chaque culture qui correspondent à la moyenne des bénéfices des 3 dernières années.

○ Dynamiques des acteurs

A chaque saison (sèche ou pluvieuse), les agents actualisent leur main d'œuvre, consomment, cultivent (selon leur stratégie agricole) et vendent l'excédent de leurs journées de travail (cf. figure suivante, gauche). En fin d'année, en fonction de leur bilan financier, ils peuvent acheter ou vendre du bétail. Si la situation est catastrophique, ils doivent vendre un lot au risque de devenir sans-terre. Par contre, s'ils en ont les moyens et si leur exploitation est déforestée à plus de 50%, ils cherchent à acheter un autre lot. Sur la figure suivante, le diagramme de séquence de droite montre le déroulement d'un scénario de crise d'un planteur, obligé de vendre un lot. Etant encore propriétaire, il décide alors de changer de stratégie pour privilégier l'élevage.

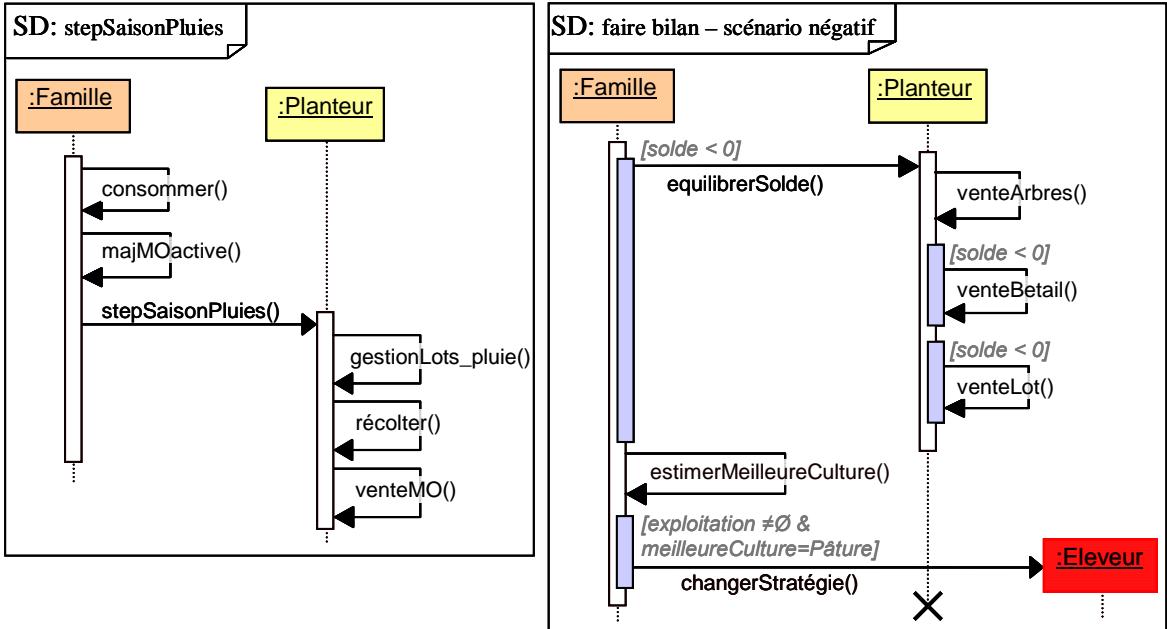


Figure 15: Diagrammes de séquence d'un agent planteur. A gauche, séquence d'activités de la famille pendant la saison des pluies ; à droite, exemple de bilan annuel pour un scénario négatif.

En saison sèche, la séquence des activités d'un agent est identique à celle décrite par le diagramme de gauche, à l'exception de l'activation de la stratégie (*stepSaisonSèche*). Les diagrammes d'activité des agents (en annexe) montrent que pour une stratégie donnée, la famille priviliege un type de culture sans pour autant délaisser complètement les autres. Dans le cas d'un éleveur par exemple, il implante des nouveaux pâturages et achète du bétail. Mais il continuera d'entretenir son cacao pour ne pas perdre tout l'investissement qu'il avait engagé auparavant.

5) GESTION DU TEMPS, DE L'AUTONOMIE ET DES INTERACTIONS

➤ *Un modèle sans difficultés pour l'activation des entités*

L'originalité du système étudié ainsi que les précautions prises, font de *TransAmazon*, un modèle sans grandes difficultés en ce qui concerne la gestion du temps et des interactions. En effet, comme le montre le diagramme de séquence général (figure 13), l'activation des entités ne nécessite aucun tri ou brassage aléatoire en préalable¹². Ceci est dû au fait que :

- Il n'y a pas de phénomène de diffusion (de semences par exemple) ni d'écoulement au niveau

¹² L'ordre d'activation des entités obéit à un découpage du pas de temps en 3 périodes. Pour chaque saison, toutes les parcelles et les familles sont activées (symbole * devant le message) selon l'ordonnancement préétabli, c'est à dire en suivant la liste des entités telles qu'elles ont été créées à l'initialisation (concrètement l'ordonnanceur les active en commençant en haut et à gauche, jusqu'en bas à droite). Mais cette ordre ou un autre n'influencent pas les résultats.

des dynamiques naturelles.

- Nous avons fait l'hypothèse que les agents sont individualistes : ils décident seuls de leurs activités agricoles sur leur propriété. Les actions des uns n'interfèrent pas sur celles des autres.
- Les seuls moments où le "multi" de SMA entre en jeu se situe en fin d'année, lorsqu'ils comparent les résultats de leurs voisins avec les leurs pour décider ou non d'un changement de stratégie. Mais ce bilan est effectué *après* que toutes les activités de culture aient été terminées (cf. diag. Séquence général, 13). A cet instant de la simulation, la comparaison s'établit sur la base d'un état du monde identique pour tous.
- Il n'y a pas un marché du travail pour la vente et l'achat de main d'œuvre. Celle-ci est juste une force de travail que l'on vend ou que l'on achète selon les besoins. Ainsi, en fin de saison, une famille vend son surplus de main d'œuvre, mais à personne en particulier. Elle reçoit juste une somme d'argent proportionnelle au "stock" de travail qui lui reste. De même, un propriétaire plus fortuné peut embaucher de la main d'œuvre à tout moment pour ses travaux des champs sans utiliser la force de travail des autres agents.
- Comme il est expliqué ci-dessous, les échanges de biens fonciers ne s'effectuent pas de gré à gré, mais obéissent à un procédé centralisé de type commissaire-priseur.

Ces précautions prises pour la gestion des interactions suppriment les effets sensibles liés à l'ordre d'activation des agents et qui peuvent générer de grandes incertitudes sur l'évolution d'un SMA. Les simulations n'en restent pas moins difficiles à analyser car le modèle n'est pas si simple, mais au moins, cette difficulté n'est pas affectée par la façon dont les interactions sont gérées.

➤ *Simplification des interactions : échanges de lots par la technique du commissaire-priseur*

Au cours du temps, les agents peuvent vendre leurs lots s'ils ne s'en sortent pas financièrement (cf. figure 11-15, droite). A terme, ils peuvent donc devenir sans-terre, voire être complètement exclus du système. Ils peuvent aussi acheter des lots qui les intéressent lorsqu'ils en ont les moyens. Ces échanges qui ont effectivement lieu à Uruará sont complexes et obscures. De plus, un travail d'investigation à ce sujet n'est pas sans risque. Cependant, ces questions ne sont pas au cœur des objectifs du modèle. Certes elles doivent influencer les dynamiques d'utilisation de la terre, mais la manière exacte dont ont lieu les transactions foncières n'est pas un facteur déterminant de l'évolution des couverts.

Nous avons donc pris le choix d'en faire un échange centralisé qui limite ainsi les artefacts liés à l'ordre d'activation des agents et d'autres ajouts de tirages aléatoires. Pour ce faire, nous avons rajouté dans le modèle une agence immobilière : une entité qui n'existe pas à Uruará. Cette agence achète sans discuter les lots vendus par les fermiers au prix de leur valeur (cf. équation 11.1). En fin d'année, elle propose à tous les agents d'acheter les lots à vendre selon une procédure de type vente aux enchères (deux diagrammes d'activité de ces deux procédures sont présentés en annexe). Tous les agents sont donc au courant des lots à vendre ; il n'y a pas d'asymétrie d'information. De plus le processus est centralisé et la vente n'est effective qu'à la fin d'une transaction complète. En d'autres termes, il n'y a pas de vente directe de gré à gré sur la base d'une relation de voisinage ou de réseau. Evidemment cet artifice ne reflète pas la situation réelle et privilégie les agents les plus fortunés (bien que les transactions réelles les privilégiennent aussi). Mais il simplifie la procédure et permet d'éviter des biais liés à l'ordre d'activation des agents¹³.

¹³ Ce procédé n'est pas sans rappeler un artifice plus ancien utilisé par Walras : "Pour fixer le prix d'équilibre entre une offre et une demande, Léon Walras avait perçu la difficulté de représenter les anticipations des agents dans les modèles. Il avait évacué le problème en imaginant l'intervention d'un commissaire-priseur qui aurait organisé à chaque période une vente aux enchères de tous les biens et de tous les facteurs de production, les transactions n'intervenant effectivement que lorsque l'équilibre aurait été trouvé " [Boussard et al., 2005]

➤ *Pas de protection particulière de l'autonomie*

Le fait que les agents soient individualistes et qu'ils décident seuls de leurs activités, peut être considéré comme une forme d'autonomie sociale. Etant donné que les cultures qu'ils implantent sur leur propriété n'interfèrent pas sur celles des autres, il n'y a pas d'interaction directe (interaction forte) ni indirecte (interaction faible) durant les deux saisons annuelles.

En fin d'année par contre, on constate des interactions entre agents lors des changements de stratégie ou lors des ventes de lots. Dans le premier cas, observer les rendements et les cultures de ses voisins peut influencer la décision de l'agent. Son autonomie vis-à-vis des autres est altérée, mais cette comparaison ne dénature pas son intégrité décisionnelle.

En ce qui concerne les ventes et achats de lots, il s'agit en réalité d'interactions directes entre colons. Comme pour tout échange marchand mettant en relation deux individus, une telle transaction aboutit à la modification de l'état de chacun : les quantités de marchandises et d'argent de chaque individu sont modifiées. Appliquée aux SMA, une interaction directe de ce type peut entraîner une perte de l'intégrité informatique de l'agent : ses variables d'état risquent d'être modifiées directement par l'autre entité¹⁴. Mais la technique du commissaire-priseur utilisée ici évite de mettre en place une protection de l'autonomie. Elle modifie la relation de vente entre les agents qui devient une interaction indirecte.

6) PREMIERS RESULTATS

➤ *Le simulateur*

Le modèle a été implémenté sur Cormas. A noter que cette phase a été relativement rapide (2 – 3 semaines) car la conception a été menée de façon approfondie. De plus, l'utilisation d'une plateforme de simulation permet d'éviter le développement d'interfaces de visualisation ou de sauvegarde de données. Il faut enfin préciser que l'utilisation de design patterns (hiérarchie d'agrégation, "land-use pattern" et acteur-rôle) facilite le codage. En particulier, le polymorphisme a été utilisé à fond ce qui évite de répéter du code et réduit la possibilité d'erreur.

➤ *Exemple d'une simulation*

L'exemple suivant illustre une simulation sur 25 ans. A partir d'un espace vierge sur lequel deux vicinales ont été percées sur 44 km (100 lots), 400 familles sont créées et 200 d'entre-elles ont reçu un lot. La stratégie pour chacune de ces familles propriétaires est tirée aléatoirement (50% de chance de commencer éleveur ou planteur).

○ L'évolution du paysage dépend des choix de cultures

Une simulation standard montre que l'évolution du paysage crée progressivement la forme d'arête de poisson typique (voir graphiques des successions paysagères en annexe). Outre une représentation spatiale dynamique, le simulateur permet de suivre l'évolution de nombreux indicateurs au niveau individuel : évolution de la couverture végétale d'une parcelle ou d'un lot, les bénéfices de chaque agent, son type, ses ventes et ses achats, la taille de son exploitation, etc. On peut également suivre des indicateurs globaux, tels que le nombre de familles, leur type, leur capital, leurs bénéfices, leurs stratégies, ou bien le nombre de ventes et d'achats ou encore la taille de chaque couvert.

¹⁴ Sous-estimer l'impact de cette perte d'autonomie peut conduire à des comportements aberrants tels que ceux observés lors de l'achat de poisson dans *Mopa* (page **Erreur ! Signet non défini.**). Sans nécessairement utiliser une architecture particulière pour protéger l'intégrité informatique de l'agent (autonomie forte), on peut éviter ces anomalies en prévenant l'agent qui a "subit" la transaction, de mettre à jour son état interne et de réviser ses décisions (page **Erreur ! Signet non défini.**).

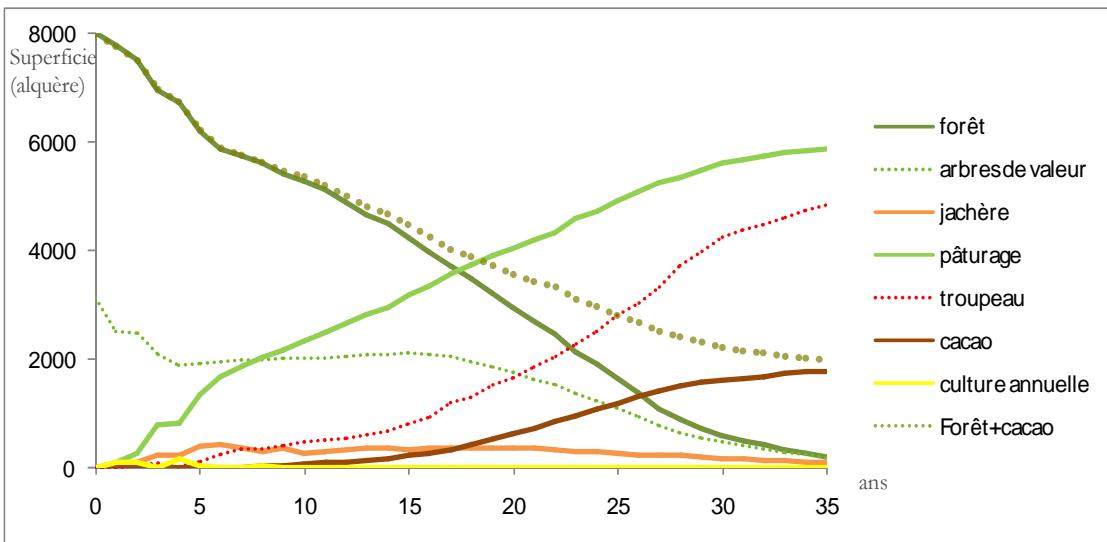


Figure 16: Evolution des couverts végétaux au fil des années.

Ce graphe montre que les 40.000 ha de forêt (8.000 parcelles de 5 ha) cèdent progressivement la place à une vaste prairie de pâturages. C'est en effet l'élevage qui prédomine sur les autres cultures même si sa rentabilité est réduite. Contrairement au cacao qui ne produit qu'à partir de la troisième année, l'élevage est rapidement rentable. Ses coûts d'implantations et d'entretiens sont faibles. De plus, si le bénéfice est limité, le troupeau constitue une garantie face aux risques : en cas de besoin, il est toujours possible de vendre quelques vaches. C'est une sécurité fondamentale pour ces familles soumises aux aléas du climat, de la santé et du marché. D'ailleurs, si le cours mondial de la viande reste bas, sa stabilité est un atout considérable pour les producteurs [J.F. Tourrand, comm. pers.]. Enfin, de nombreux colons sont originaires du sud du Brésil et ont gardé leur tradition *gaucha* basée sur l'élevage. Ces éléments (origine et gestion du risque) ne sont pas pris en compte dans le modèle si ce n'est par une certaine préférence pour la stratégie Eleveur. Mais au cours des simulations, on constate des ventes de bétail lors de crises familiales, ce qui permet de les surmonter temporairement.

Le cacao ne permet pas cette souplesse. A moins de vendre son lot en entier, il n'est pas possible de céder une parcelle de cacao en cas de besoin. De plus, l'investissement nécessaire pour planter et entretenir une cacaoyère, réclame un lourd effort financier et mobilise la majeure partie de la force de travail. En outre, cet engagement, tant en argent qu'en main d'œuvre, ne porte ses fruits que trois ans plus tard. Certes, la rentabilité est alors très profitable, mais la famille doit pouvoir surmonter ces années non productives qui nécessitent un entretien continu. Enfin, le plus grave danger vient des fluctuations des prix du cacao¹⁵. Cette simulation ne présente pas de variation des tarifs, mais une version du modèle possède une entité *Marché* qui fait osciller les cours du cacao. Dans ce cas, les conséquences pour les producteurs sont significatives et ils se

¹⁵ Les multinationales de l'alimentation s'appuient sur la compétition entre producteurs pour assurer leur main mise sur ce marché et jouer sur les cours du cacao. Dans un rapport de la délégation de l'Assemblée nationale pour l'Union Européenne, le député François Guillaume rapporte une analyse sur la sécurité alimentaire des pays du Sud, et son lien avec les règles de l'OMC. Il explique en particulier que "les filières de production agricole sont de plus en plus dominées par quelques multinationales et sociétés de distribution, un phénomène qui est à l'origine de l'écart croissant entre les prix à la production, les prix mondiaux et les prix à la consommation dans les pays développés" [Guillaume, 2004]. Soutenus par l'OMC, les marchés internationaux ont été progressivement libéralisés : fin des grands accords internationaux sur les produits agricoles (café, cacao) et réduction des protections douanières et tarifaires. Les paysans sont alors en prise directe avec le marché mondial caractérisé ces derniers temps par une forte instabilité des prix. Les cours du cacao se sont certes redressés progressivement ces deux dernières années car l'Amérique latine a réduit sa production. Mais le redressement enregistré à partir de 2000 a commencé à s'essouffler à la fin de 2003 car l'offre est redevenue surabondante. Le marché a été ensuite affaibli par la concurrence de l'"équivalent beurre de cacao", une directive de l'UE ayant autorisé l'ajout de matières grasses végétales non issues du cacao pour remplacer le beurre de cacao dans le chocolat.

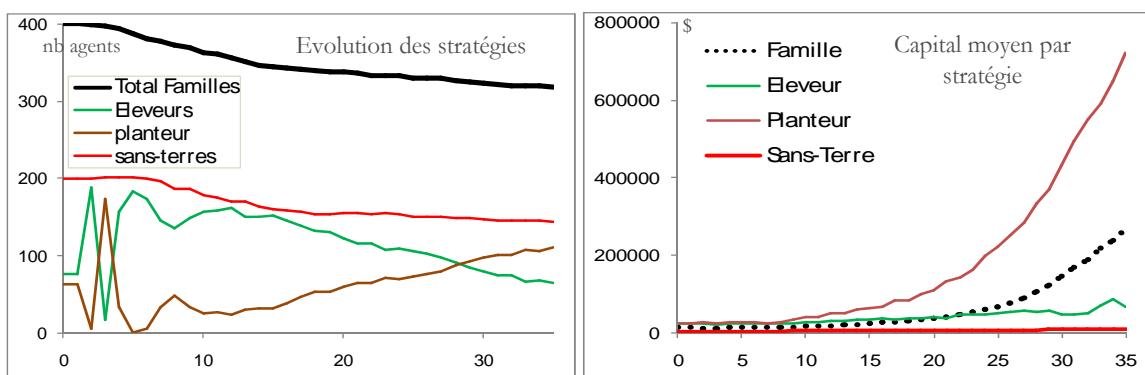
tournent encore davantage vers l'élevage avec les conséquences que cela entraîne sur l'environnement.

Car l'impact environnemental du cacao est bien moindre. Contrairement au pâturage qui met les sols à nu, la culture du cacao évite les phénomènes d'érosion ; la biomasse végétale reste importante (puits de carbone) ; l'évapotranspiration continue à alimenter le cycle de l'eau dont le rôle est primordial pour le climat de l'Amazonie. Certes, en coupant une partie de la forêt, le cacao contribue à éroder la biodiversité, mais la présence d'arbres pour protéger les pieds de cacao du rayonnement solaire permet d'abriter une faune végétale et animale¹⁶. C'est pour toutes ces raisons que les superficies de forêt et de cacao sont réunies en une courbe sur le graphe précédent.

Les résultats comparatifs sur les prix du cacao montrent donc qu'une stabilisation des prix, incite les producteurs à s'orienter vers la stratégie planteur, ce qui résulte en de meilleurs gains pour la famille et dans le même temps à une réduction de la déforestation. C'est en quelque sorte une situation gagnant-gagnant.

○ Une typologie retrouvée

Comme expliquer dans la description du modèle, les agents sont uniquement créés en début de simulation. Il n'y a ni reproduction ni arrivée de nouveaux colons. La seule dynamique démographique est liée à l'exclusion des agents trop endettés. Les graphes suivants montrent l'évolution de la population et des différentes stratégies. Pour chacune, le capital moyen est présenté.



Durant les 25 premières années de la simulation, la stratégie éleveur est préférée par rapport aux planteurs, le temps de "bien nettoyer" la forêt. Pourtant le revenu du cacao est supérieur à celui de l'élevage. Les agents ayant essayé le cacao les 2 premières années, se ravisent rapidement par manque de moyen et surtout de productivité. Au bout de quelques années, certains producteurs reviennent progressivement à cette activité. Le capital de ces familles augmente alors très rapidement et dépasse de beaucoup celui des éleveurs. A tel point qu'il tire vers le haut le capital global de l'ensemble des familles.

Mais cette progression économique ne doit pas cacher des disparités entre agents. Comme le montrent les graphes suivants, certains s'en sortent très bien, mais pour d'autres, la vie n'est pas un long fleuve tranquille ; sans parler des exclus...

¹⁶ Le cacao est un petit arbre de 5m de haut qui craint les rayons directs du soleil. Pour le protéger, les producteurs ont commencé à planter des arbres de valeur (Acajou, Ipê, Jatobá, Teck, ...) dans leur cacaoyer en espérant en tirer un bénéfice à l'avenir. Ainsi, lors de la visite de son exploitation, M. Cirilo, un petit planteur, m'a demandé si je n'avais pas l'impression d'être en pleine forêt. Ce qui était exact.

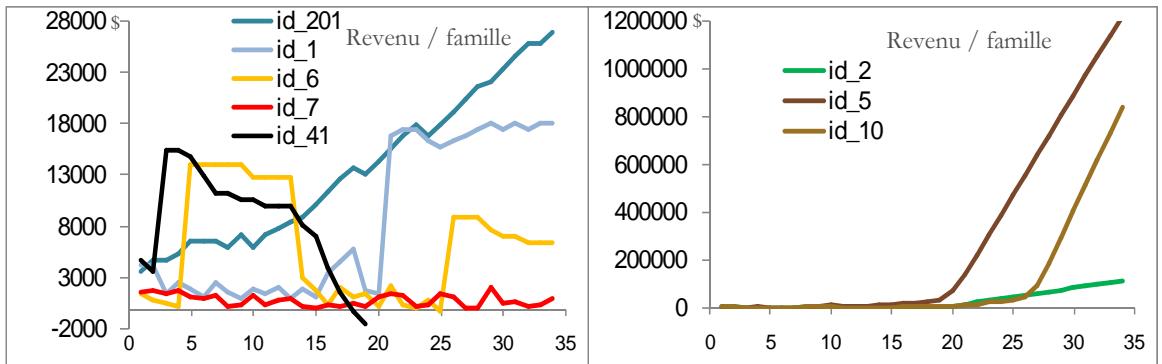


Figure 18 : Quelques exemples de trajectoires individuelles. A gauche, plutôt difficiles alors qu'à droite, les familles s'en sortent d'une façon incommensurablement mieux.

[Ferreira, 2001] propose de répartir les acteurs en 6 types : Sans-terre, Subsistance, Accumulation, Planteur, Eleveur et Diversifié. Cette typologie se base sur les structures productives des exploitations mais intègre aussi le niveau économique des colons. [Bonaudo, 2005] note que ces caractéristiques ressortent aussi avec une ACP. L'axe 1 du graphe de l'ACP correspond aux conditions socio-économiques et à la stabilité du système alors que l'axe 2 correspond à la spécialisation élevage ou cultures pérennes (cf. figure suivante).

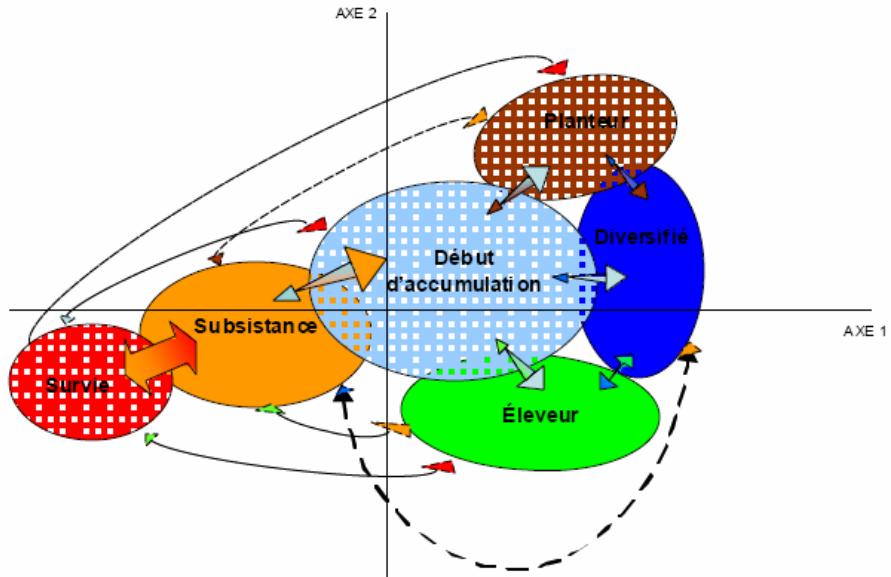


Figure 19 : Trajectoires d'évolution des exploitations agricoles en trente ans de colonisation, d'après [Ferreira, 2001] et [Bonaudo, 2005].

Au cours des trente dernières années, la répartition des acteurs par type a changé. "Il y a eu un glissement du barycentre de chaque groupe reflétant une certaine amélioration des conditions économiques à l'intérieur de chaque type" [ibid.].

En transférant le calcul de cette typologie dans le simulateur, on retrouve une relative similarité de la répartition de l'évolution des types d'acteurs avec celles des agents :

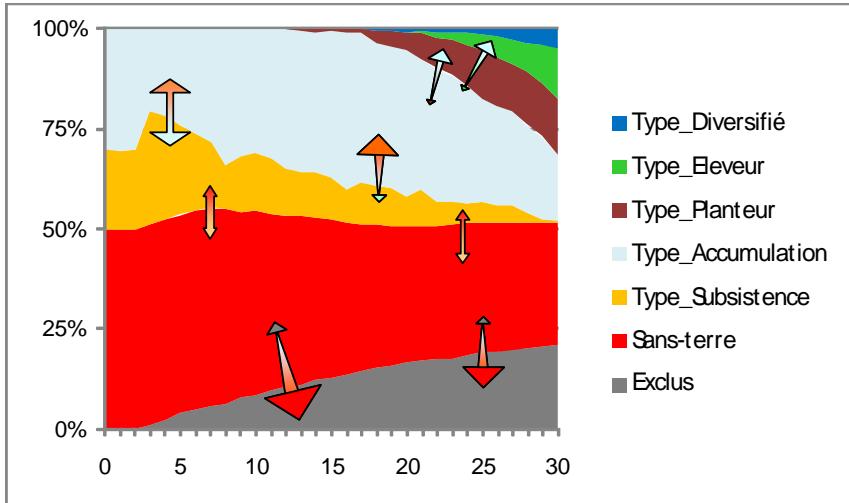


Figure 20: Evolution des typologies d'agents et passages des unes aux autres.

Ainsi, la simulation, en déroulant le temps du modèle, montre une diversité de trajectoires. A partir de seulement deux stratégies caricaturales de production, on retrouve alors les sept types de colons ainsi que leurs passages successifs à travers ces catégories.

➤ Analyse de sensibilité

Une exploration détaillée a permis de vérifier la bonne marche du simulateur en suivant pas à pas les décisions et les activités des agents. L'utilisation d'un langage interprétré comme *Smalltalk* facilite grandement cette tâche car il permet d'examiner en détail l'évolution des agents. Sans avoir à stopper la simulation, on peut aussi relancer des opérations qui semblent étranges. En modifiant à la volée la valeur d'un paramètre ou en plaçant volontairement un agent dans une situation extrême, on vérifie ainsi la cohérence de ses comportements. De plus, en dégradant volontairement des parties du modèle, certains modules ont été isolés afin de tester leur fonctionnement dans des situations diverses : évolution naturelle de la couverture végétale, ventes et achats de lots, changement de stratégie, invasions, etc.

A ce jour, seules des études de sensibilité locale ont été menées sérieusement. Ce travail a permis d'identifier les paramètres les plus sensibles du modèle et les hiérarchiser. Une étude a été menée pour analyser les réponses du modèle sur trois indicateurs qui reprennent les trois piliers du développement durable : le taux de déforestation (préservation de l'environnement)¹⁷, le capital de la communauté (viabilité économique) et le taux d'exclusion des sans-terres (équité sociale). Concrètement, les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus en initialisant chaque simulation toujours sur un même état : même carte des sols, espace de 2 fois 20 lots entièrement en forêt, 50% des lots initiaux attribués à des fermiers dont la composition familiale reste identique et dont les stratégies sont préétablies (10 éleveurs et 10 planteurs). Les 10 autres lots initialement non-affectés sont susceptibles d'être achetés au cours de la simulation par les 20 fermiers ou par les 20 familles de sans-terres. A partir de cet état prédéfini, 100 simulations de 30 ans sont répétées pour chacun des 31 principaux paramètres du modèle dont les valeurs sont réduites de 15% à tour de rôle. Pour chaque simulation, les 3 indicateurs sont enregistrés : la taille de la forêt à 30 ans, le capital foncier et financier de l'ensemble des agents et le nombre d'agents sans-terres et exclus. La sensibilité de chaque indicateur est calculée selon l'équation suivante :

¹⁷ Contrairement à ce qui a été dit précédemment, cet indicateur n'agrège pas la taille de la forêt et du cacao, car dans ce cas, cet indicateur forêt-cacao est très corrélé à l'indicateur Capital. En effet, comme on l'a vu précédemment (fig. 11.18 droite), après des débuts difficiles, les producteurs de cacao tire le capital de la communauté vers le haut.

$$S_{i,j} = \frac{\ln \overline{M_j} - \ln \overline{M_{j,b}}}{\ln p_i - \ln p_{i,b}}$$

où M_j et $M_{j,b}$ sont respectivement les réponses du modèle selon l'indicateur j

aux paramètres p_i et $p_{i,b}$: p_i est le paramètre que l'on a fait varier d'un petit pourcentage autour de sa valeur de base $p_{i,b}$, les autres paramètres restant fixés. Ces calculs se font numériquement en faisant varier les entrées du modèle dans un intervalle très restreint autour d'une valeur nominale. Pour un modèle stochastique, M_j représente une espérance qui doit être estimée en répétant les simulations. Le graphique suivant présente la sensibilité agrégée de ces trois indicateurs

$$(S_{i,tot} = \sqrt{\sum_j S_{i,j}^2})$$

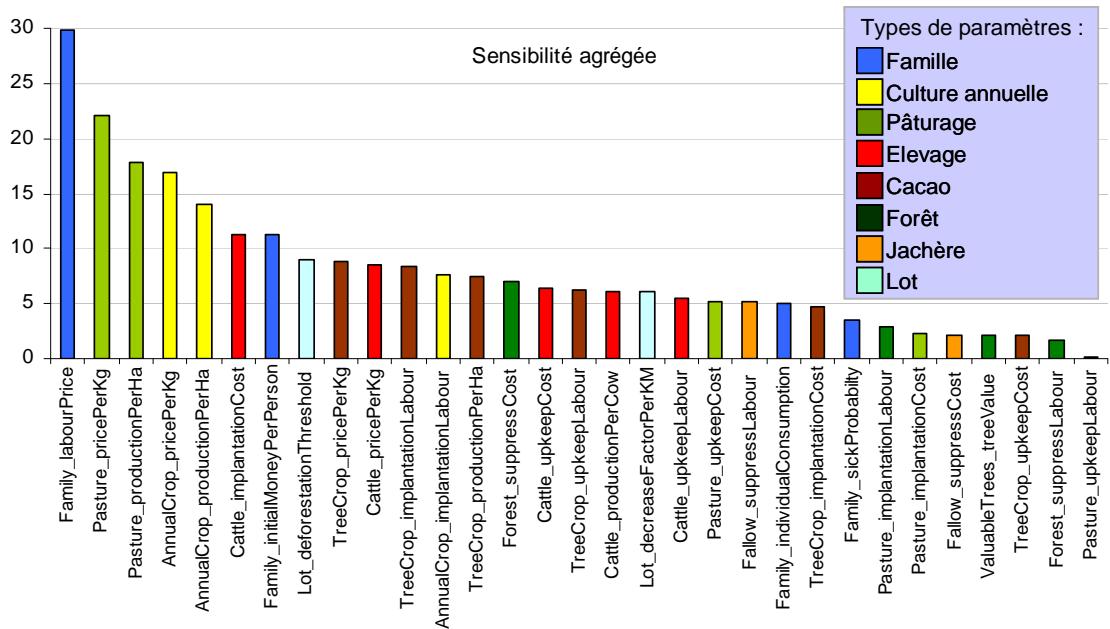


Figure 21 : Sensibilité générale agrégeant trois indicateurs du développement durable.

Le tarif de la main d'œuvre ainsi que le prix et la productivité des pâturages sont les paramètres dominants au niveau général. Mais les indicateurs pris indépendamment montrent des sensibilités différentes (les sensibilités de chaque indicateur sont présentées en annexe, fig. 26). Ainsi, le capital de la communauté des agents est sensible au prix de la main d'œuvre et au coût d'implantation du cacao.

Mais cette étude a montré surtout l'influence considérable des conditions initiales. Une première analyse de sensibilité avait été menée sur un état initial prédéterminé spatialement (sols, végétation, lots sont identiques) mais en initialisant les agents aléatoirement (membres et nombre d'inactifs par famille, localisation et stratégie initiale ne sont pas identiques à chaque simulation). Même en répétant 500 fois les simulations par paramètres, les réponses de certains indicateurs (tels que forêt et cacao) étaient trop hétérogènes. A tel point qu'il devenait difficile de discriminer la sensibilité des paramètres. Ainsi, même si les simulations montrent une certaine robustesse du modèle qui laisse apparaître des schémas généraux d'évolution (paysage en arrête de poisson, domination de l'élevage), on constate une sensibilité marquée aux configurations initiales. En effet, pour aider à choisir sa prochaine stratégie, un agent regarde ce qu'ont fait les autres. Or comme il est difficile et long de tirer profit du cacao, les planteurs se font rares en début de simulation. Ceci ne favorise pas une diffusion de ce type de culture. Seules quelques configurations initiales permettent à certains agents de se trouver dans une situation favorable pour devenir planteur. Alors dans ces cas, on constate une meilleure diffusion de cette pratique qui influence fortement le capital et l'environnement.

Si les conditions initiales influencent les résultats, le paramètre *SickProbability* (Probabilité d'être malade pour chaque membre) est aussi la cause d'une grande dispersion des résultats, même si sa

sensibilité paraît limitée. Au cours d'une simulation, le seul moment où apparaît de l'aléatoire à lieu pour déterminer le nombre de malades dans les familles (sans ce phénomène, le modèle serait déterministe). La figure suivante montre la signature de ce paramètre :

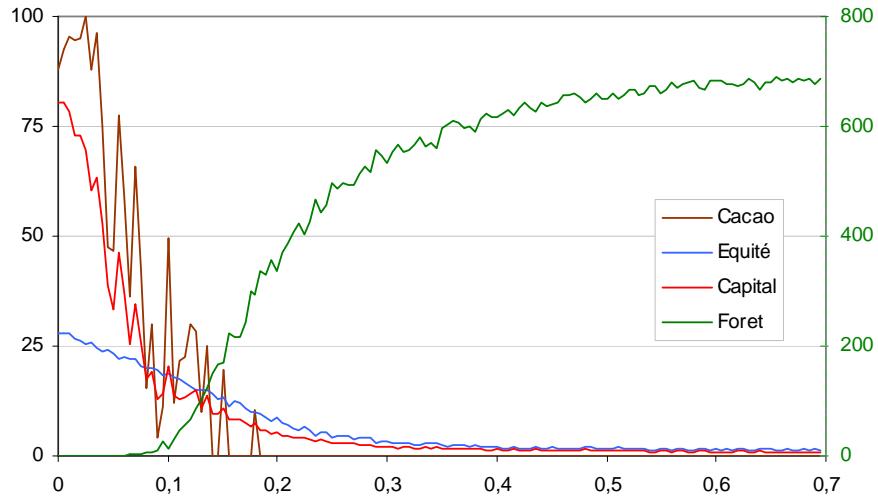


Figure 22 : Signatures (moyennées) du paramètre SickProbability pour 4 indicateurs : Equité, Forêt, Capital et Cacao (à noter la forte corrélation entre ces deux derniers). Chaque point représente la valeur moyenne de 10 simulations. Pas d'incrémentation du paramètre : 0,005.

Cette signature montre que plus la probabilité d'être malade est faible, plus le capital global, les surfaces en cacao et l'équité augmentent. A l'opposée, plus la maladie augmente et plus la forêt est préservée, car les producteurs ne travaillent plus. Or cette signature moyennée ne rend pas bien compte de la dispersion des résultats.

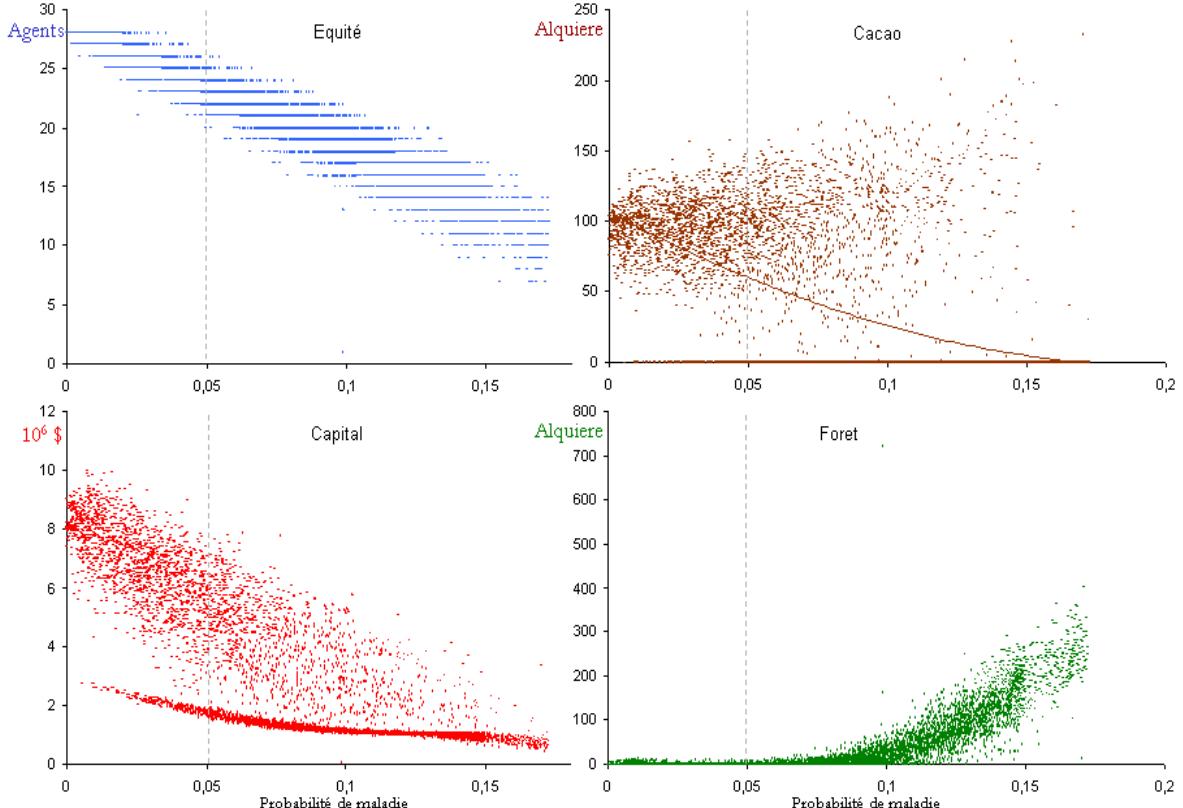


Figure 23 : Signatures (brutes) du paramètre SickProbability pour 4 indicateurs. 7000 simulations pour une valeur du paramètre pris aléatoirement entre 0 et 0,17. Une courbe de tendance a été rajoutée pour l'indicateur surface de Cacao.

Autour de la valeur de base (0,05 %) du paramètre, on constate donc une grande dispersion des sorties. Ainsi, même en partant toujours d'un même état initial, le modèle nécessite un grand nombre de répétitions pour pouvoir évaluer la sensibilité de ses paramètres et les hiérarchiser.

➤ *RéPLICATION*

Personne n'a encore répliqué ce modèle et ce n'est pas aux concepteurs de le faire. Il faut tout de même admettre que ce travail paraît difficile de prime abord car, même si nous avons essayé de rester au plus simple, *TransAmazon* est déjà un modèle compliqué. Sa description complète exige plus de temps et de pages de présentation. Celle qui est fournie ici sert à en comprendre la philosophie générale sans prétendre à la réPLICATION. Pour cela, il faudra plus d'un article. Une présentation détaillée par des pages web semble être une solution acceptable.

7) DISCUSSION

En prenant le partie de se concentrer sur les acteurs, nous cherchons à comprendre les principes de base qui sont à l'origine de la déforestation. Comparer à d'autres approches de type télédétection ou modèles macroscopiques, la modélisation SMA oblige à un contact plus étroit avec le terrain. Cela conduit à prendre en considération les difficultés des acteurs et ainsi à mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre.

Mais le risque de cette approche réside dans la possibilité de se perdre dans la complexité des relations humaines. En travaillant avec deux spécialistes du domaine, la phase de conception a duré un trimestre. On peut penser que ce prologue était excessif, mais sur un sujet si complexe, cette phase était indispensable pour bien définir les objectifs, cerner les limites du modèle et s'accorder sur son contenu. Pour éviter la réalisation d'une usine à gaz et pour toujours garder un contrôle sur l'interprétation des résultats, il a fallu s'accorder sur les éléments à enlever parmi la quantité d'information accumulée sur ce terrain. Le résultat n'est pas un modèle simple, mais sur un tel sujet il était facile de faire bien plus compliqué !

Dans un tel contexte, une démarche *KIDS* aurait utilisé toutes ces informations. Elle aurait par exemple intégré dans son modèle la typologie de L. Ferreira [2001] sans se poser plus de question. A l'opposé, une approche *KISS* condense les informations en recherchant les mécanismes de base. La force de la simulation multi-agent est alors de retrouver une forme de complexité par le déroulement du temps.

Néanmoins, ce modèle reste encore un peu descriptif. Non pas que le comportement des agents soit "câblé" (complètement prédéterminé). Mais ils manquent de plus de souplesse, d'une certaine forme d'*autonomie* pour s'adapter à des modifications de leur système. Par exemple, afin de tester les effets d'une politique d'indemnisation à la préservation de la forêt, le modèle, tel que présenté ici, ne permet pas de voir apparaître des modifications de comportements quelle que soit la hauteur de l'indemnisation. Il est pourtant facile d'augmenter le revenu lié à la forêt. Mais les agents n'ont pas d'autres alternatives que de continuer à planter ou élever. Il a donc fallu rajouter artificiellement une nouvelle stratégie : *Conversationniste*. Les activités saisonnières de celle-ci se limitent à planter une culture annuelle sur une jachère pour l'alimentation de la famille, et à entretenir les cultures déjà en place. On peut alors tester ce type de politique publique en augmentant le revenu issu de la forêt¹⁸. Ainsi, l'ajout de la stratégie *Conversationniste* entraîne une nouvelle version du modèle, mais aussi un glissement de ses objectifs : à partir de la question initiale de comprendre "*Comment les producteurs utilisent la terre ?*", nous sommes passés à "*Quelles sont les mesures et les politiques les plus appropriées pour parvenir à des modes de*

¹⁸ Le polymorphisme facilite ces modifications : il s'agit juste de rajouter une nouvelle sous-classe à *Agriculteur*, de spécifier la manière de choisir cette nouvelle stratégie, et de redéfinir la méthode qui donne le revenu de la *Forêt*.

gestion durable ?". Ce déplacement du modèle et de la question de recherche illustre le processus de modélisation présenté sur la figure 6.

Les changements de stratégie tels qu'ils sont conçus jusqu'à présent, me semblent encore fragiles : les agents prennent leur décision sur la base d'un calcul hasardeux qui intègre les résultats de leurs stratégies antérieures et sur la meilleure stratégie parmi leurs voisins (cf. Figure 15). C'est une solution intéressante mais qui ne laisse pas la place à des innovations même si elles sont bien plus avantageuses. Les agents ne possèdent pas la capacité d'anticiper. Par ailleurs, nous avons cherché à mieux prendre en compte les productions futures. En effet, les agents "découvrent" que le cacao produit au bout de 3 ans alors que c'est une évidence pour tous les producteurs. En semant aujourd'hui, on espère en récolter les fruits dans le futur. Cette faculté d'anticipation qui nous est si familière, est difficile à retranscrire chez les agents.

Une autre version a donc été développée qui modifie fortement la manière de changer de stratégie [Bonté, 2007]. L'agent est devenu "anticipatif" : il ne prend plus sa décision sur son bilan passé, mais il explore ses futurs possibles en testant les stratégies à sa disposition. En d'autres termes, il explore un arbre de décisions dont chaque feuille est le résultat d'une succession imaginaire de stratégies. Il choisit alors l'itinéraire qui lui paraît le plus rentable (cf. "simulation dans la simulation" en annexe).

Sur cette base, une nouvelle version est en cours de développement qui cherche à donner plus de souplesse encore dans les possibilités d'adaptation des agents et éviter ainsi des ajouts ad-hoc à chaque nouvelle mesure incitative que l'on voudrait tester. En effet, les stratégies actuelles apparaissent comme des déroulements un peu mécaniques des activités des agents. Elles ne proposent que 2 ou 3 alternatives d'utilisation de la terre. Issues de nombreux entretiens et enquêtes, elles sont cohérentes avec nos observations (voir calendrier des activités en annexe). Néanmoins, elles sont trop rigides pour tester des alternatives d'assoulement.

Dans cette nouvelle version, les stratégies préétablies ont donc été supprimées. L'agent connaît maintenant un certain nombre d'activités élémentaires qu'il peut effectuer sur sa terre (défricher, planter et entretenir des cultures, etc.). Il anticipe ses futurs en imaginant diverses combinaisons d'activités. L'arbre de décisions qu'il explore correspondant ainsi à un ensemble d'itinéraires d'assoulement¹⁹. Il choisit alors celui qui lui paraît le plus rentable ou le moins risqué. De cette manière, il construit *dynamiquement* sa stratégie. En basant les choix décisionnels sur la gestion du risque, on espère retrouver les stratégies prédefinies, mais aussi de nouveaux itinéraires plus efficaces. Avec ce procédé, on aura encore fait un pas vers la générativité.

Dans le même temps, la question de recherche a évolué : le focus se situe désormais sur les difficultés des producteurs. Car il s'avère que les questions du risque et de la sécurité alimentaire sont des problèmes fondamentaux pour les colons²⁰.

En conséquence, *TransAmazon* a changé progressivement d'état : de modèle descriptif présentant des comportements stéréotypés pour montrer des scénarios prédefinis, il devient un modèle plus explicatif pour lequel la gestion du risque prend une dimension jusqu'à lors sous-estimée. A présent, il devient un modèle adaptatif susceptible de tester des scénarios. En quelques sortes, il a

¹⁹ Cette version de parcours exploratoires d'arbres de décisions s'apparente davantage à de la recherche opérationnelle. Dans ce cas, il peut s'agir d'aider à trouver des stratégies optimales pour diminuer les risques ou maximiser les profits. Mais ce procédé sera rapidement limité par l'explosion combinatoire. Une solution alternative est décrite dans le paragraphe suivant (Perspectives).

²⁰ Un producteur de la Transamazonienne ne pense pas forcément en termes économiques. Certes, il appréhende les variations du cours du cacao. Mais il gère plus son exploitation en fonction de sa main-d'œuvre, de ses besoins, de ses perspectives à court et long termes, des potentialités de ses terres, et surtout des risques. Voilà pourquoi la première activité de l'année est la mise en place de la culture annuelle 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. Viennent enfin les cultures pérennes qui constituent un investissement avec un retour à moyen et long termes, mais peu flexibles et sensibles aux variations de prix.

amélioré sa valeur informative. Simultanément, la question de recherche s'est déplacée pour mieux cibler les difficultés des producteurs. Or les façons dont ils y répondent, affectent l'environnement.

8) PERSPECTIVES

Outre les évolutions en cours précédemment décrites, nous étudions une autre utilisation de *TransAmazon*. Dans ce cas, l'objectif n'est plus d'étudier un modèle SMA en analysant uniquement ses résultats, mais de participer activement au déroulement de la simulation. Il s'agit donc de concevoir un nouvel outil de simulation participative de type jeu-vidéo avec lequel l'utilisateur joue en agissant directement sur l'évolution de la simulation [Guyot, 2006].

L'objectif de *VisãoFamiliar (TransAmazon-Interactif)*, est de disposer d'un outil de dialogue permettant de tester, avec les producteurs, des alternatives possibles pour la gestion de leur exploitation. Sur la base de la structure du modèle *TransAmazon*, il s'agit de remplacer les agents et leurs stratégies par des avatars (agents contrôlés par des humains qui les représentent dans le système virtuel). Dans une simulation hybride de ce type, les dynamiques naturelles de croissance végétale, d'appauvrissement des sols ou les précipitations sont prises en charge par le simulateur qui calcule également les conséquences des actions du joueur. Celui-ci dispose d'un ensemble d'activités qu'il peut mobiliser à tout moment pour générer son itinéraire d'assoulement mais aussi pour construire d'autres trajectoires familiales. Il peut aussi choisir parmi les indicateurs à disposition, ceux qu'il souhaite suivre au cours du temps. Grâce à la possibilité de "remonter le temps", il peut revenir sur certaines décisions pour tester d'autres alternatives. Car toutes les actions sont enregistrées. On peut donc retourner à n'importe quel moment de la simulation pour expérimenter de nouvelles pistes. Les sauvegardes permettent aussi de comparer des trajectoires et de faire expliciter les raisons des choix décisionnels des participants pour les discuter.

Cette démarche s'inscrit dans le cadre de projets de développement qui visent la mise en place de systèmes de production et de gestion durable des ressources naturelles et agricoles. En particulier, nous avons testé en grandeur réelle des possibilités de récupération des aires agricoles dégradées. Les résultats sont très enthousiasmants : les fermiers qui se sont prêtés à ces expérimentations, ont vu leur production augmenter alors que dans le même temps, ils n'ont pas déforesté. De plus, ces nouvelles techniques (le semis direct) sont peu coûteuses et offrent un confort de travail très apprécié. Avec *VisãoFamiliar*, nous espérons ainsi contribuer à une diffusion de ces pratiques agricoles. Enfin, une version multi-joueur permettra de faire participer un groupe de producteurs cherchant à s'organiser pour gérer collectivement des aires forestières pour la production durable de bois.

9) CONCLUSION

Les différentes versions de *TransAmazon* s'inscrivent donc dans le cadre plus général de projets de développement. Elles ont pour objectif de mieux comprendre les motivations des producteurs sur la manière "traditionnelle" de cultiver leurs terres. Plutôt que de proposer une représentation macroscopique des grandes tendances en cours, il nous a semblé plus important de comprendre ce qui pousse les petits colons des fronts pionniers à produire d'une manière non-durable. Car les mécanismes actuels de production conduisent finalement à la déforestation.

TransAmazon permet donc de décrire ces dynamiques en cours. Il permet aussi d'élaborer des scénarios prospectifs sur les évolutions possibles des fronts pionniers en fonction des nécessités des acteurs. En modifiant légèrement sa structure, on peut alors tester quelques politiques publiques.

Par ailleurs, les différentes versions montrent une évolution des questions de recherche qui ciblent davantage les motivations des producteurs. En partant de raisonnements exclusivement économiques, la question de la gestion du risque s'est progressivement imposée comme un

élément essentiel qui motive les activités de production. On a montré en particulier que les risques liés à la production de cacao, pourtant nettement moins nuisible à l'environnement, empêchent les petits colons à s'investir dans cette voie.

En partant d'une représentation plutôt descriptive, le processus de modélisation a conduit à une succession de versions du modèle, qui devient plus explicatif, jusqu'à devenir un modèle adaptatif. Dans le même temps, ce cheminement a permis d'en améliorer la valeur informative.

La prise en considération des difficultés des colons nous amène également à développer un outil original d'accompagnement pour imaginer avec eux des alternatives de production. En testant en parallèle des expérimentations sur le terrain, nous espérons ainsi mettre en place d'autres manières de gérer les lots. Ces alternatives seront, espérons-le, plus durables pour l'environnement mais aussi plus économiquement viables et socialement plus équitables. Déjà les premières solutions envisagées ont montré des résultats enthousiasmants. A tel point que les enfants des producteurs pensent maintenant à rester sur la terre de leurs parents.