



ELSEVIER



www.elsevier.com/locate/natsci

ARTICLE

Introduction de la modélisation dans une recherche interdisciplinaire : état et gestion des jachères dans les Andes [☆]

The introduction of models in an interdisciplinary research on fallow state and management in the Andes

Dominique Hervé ^{a,*}, Bernardo Paz Betancourt ^b, Jorge Migueis ^c, Jean-Pierre Treuil ^d

^a Agronome, IRD, UR Trade, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France

^b Agronome-informaticien, Negowat Project Coordination, Centro Agua, UMSS, Casilla 4926, Cochabamba, Bolivie

^c Informaticien, 12 rue Montera, 75012 Paris, France

^d Mathématicien-informaticien, IRD, UR Géode, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

Reçu le 8 juin 2000 ; accepté le 5 juin 2003

MOTS CLÉS

Modélisation ;
Interdisciplinarité ;
Agronomie ;
Jachère ;
Andes

Résumé L'état et la gestion des jachères ont été étudiés dans une communauté de l'altiplano bolivien, par une équipe pluridisciplinaire sciences agronomiques et sociales. La généralisation de ces résultats à la dynamique des jachères dans les Andes passait par une démarche de modélisation. Les objets de recherche initiaux ont été reformulés avant cette étape de modélisation. Plusieurs types de modèles ont été introduits, couvrant chacun un aspect spécifique du système étudié : la dynamique de la matière organique, le fonctionnement annuel des activités d'une exploitation et les interactions entre exploitations. Nous expliquons comment la modélisation a contribué, par sa fonction maïeutique, à organiser un dialogue interdisciplinaire sur l'état et la gestion des jachères, et finalement ouvert des possibilités d'exploration du système complexe étudié. Cependant, des difficultés demeurent pour le couplage entre des modèles biophysiques représentant sous une forme mathématique le fonctionnement de l'agro-écosystème et des modèles informatiques de gestion des terres par les exploitations agricoles, qui tiennent à l'objectif même de l'interdisciplinarité.

© 2003 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

[☆] Cette réflexion concerne deux programmes de recherche : Environnement, Vie et Sociétés du CNRS (1992-1997), Comité « Systèmes écologiques et actions de l'homme », puis le programme européen Tropandes (Fertility management in the tropical andean mountains: agroecological bases for a sustainable fallow agriculture, INCO-DC DGXII, ERBIC18CT98-0263, 1998-2002), en cours de valorisation, qui réunissait sur deux sites, l'*altiplano* central bolivien et le *paramo* vénézuélien, des pédologues, écologues et agronomes boliviens, vénézuéliens et européens (Espagne, Pays-Bas, France).

* Auteur correspondant. Tél. : 04.67.63.69.81 ; Fax : 04.67.63.87.78.

Adresses e-mail : herve@mpl.ird.fr (D. Hervé), bpazbe@ceibo.entelnet.bo (B. Paz Betancourt), jmigueis@mac.com (J. Migueis), treuil@bondy.ird.fr (J.-P. Treuil).

KEYWORDS

Modelling;
Interdisciplinarity;
Agronomy;
Fallow;
Andes

Abstract Fallow land state and management were studied in a community of the Bolivian altiplano, by a multidisciplinary team including agronomists and social scientists. The generalization of these results to the fallow dynamics in the Andes implied a modelisation approach. The initial research topics were re-defined before modelling. Different types of models were built to address each component of the system: soil organic matter dynamics, yearly farm operating and interactions between farms. We explain how modelling allowed to organize an interdisciplinary dialog about fallow state and management and, finally, to better explore the complex studied system. Anyway, the link is still difficult between biophysical models, which represent how the agro-ecosystem is operating in a mathematical form, and computation models of land management by farms, due to the interdisciplinarity objective.

© 2003 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Co-signé par un agronome et trois modélisateurs, ce texte tente un retour critique sur une expérience interdisciplinaire particulièrement éclairante parce qu'elle révèle deux niveaux d'interdisciplinarité. Le premier établi entre pédologues, écologues et agronomes, met en interaction sciences du vivant et sciences de la terre. Il s'avère efficace pour saisir le fonctionnement des agro-systèmes, notamment le rôle joué par les jachères. La discipline agronomique y remplit une fonction charnière dans l'articulation des modèles proposés. Le second niveau d'interdisciplinarité, plus problématique, introduit les sciences sociales pour rendre compte des modes de gestion individuelle et collective des jachères. Les modèles d'aide à la décision sont certes utilisables, mais les difficultés rencontrées pour les associer avec les modèles bio-physiques ne tiennent-elles pas à la conception même de la modélisation et à ce qu'en attendent les uns et les autres ? *La Rédaction*

Cet article présente les résultats de recherches interdisciplinaires menées dans le cadre du comité SEAH (Systèmes Ecologiques et Action de l'Homme) du Programme Environnement, Vie et Société du CNRS, tout comme les quatre autres articles précédemment publiés dans *NSS* (cf. « Eaux, poissons et pouvoirs. Un siècle de gestion des échanges mer-lagune en Camargue » de P. Allard et al. (*NSS* (9)1) ; « *Gestion de l'eau et interactions société-nature. Le cas du delta du Sénégal en rive mauritanienne* » de S. Duval et al. ; « *À la recherche d'une agriculture « durable » sur les fronts pionniers : les processus de sédentarisation d'une agriculture familiale en Amazonie et en Argentine* » de C. Albaladejo (*NSS* (9)2) ; « *Bilan scientifique d'une recherche interdisciplinaire entre agronomes, hydrologues et économistes : le point de vue des économistes* » de A. Lacroix et A. Mollard (*NSS* (10)1) ; ainsi que le texte de G. Fontenelle « *Le programme Urbamont* » (*usages et ressources en baie du Mont-Saint-Michel* » publié en *Vie Scientifique* (*NSS* (9)3)).

La gestion durable des ressources renouvelables concerne toute une gamme d'écosystèmes influencés par des interventions humaines, de la cueillette à une artificialisation poussée du milieu. Dans ce gradient, l'agriculture consiste à gérer des ressources renouvelables : le sol dont l'épaisseur et l'aptitude à produire doivent être maintenues, les espèces végétales dont le sol est le support, cultivées ou spontanées et dans ce cas prélevées par les troupeaux ou extraites pour un usage domestique. Le caractère renouvelable des ressources (sol, plante) et la gestion des terres, qui implique plusieurs exploitations familiales, ne peuvent être évalués que dans la durée et selon des dynamiques conjointes. Comment modéliser la dynamique des ressour-

ces d'une part, la gestion de ces ressources d'autre part, et finalement comment coupler ces deux types de modèles ?

Dans les Andes centrales, les voies d'évolution de la jachère dépendent des modalités de gestion communale des terres (Hervé et al., 1994). Des équipes pluridisciplinaires (sciences agronomiques et sociales) ont étudié la gestion des jachères dans une communauté originaire de l'*altiplano* central bolivien qui a toujours maintenu, sur une partie de son territoire, un système de culture à jachère longue collective (10 ans) et qui représente, à ce titre, un archétype des communautés andines. Ce dispositif social de jachère collective permettait d'installer un dispositif expérimental *in situ* puis-

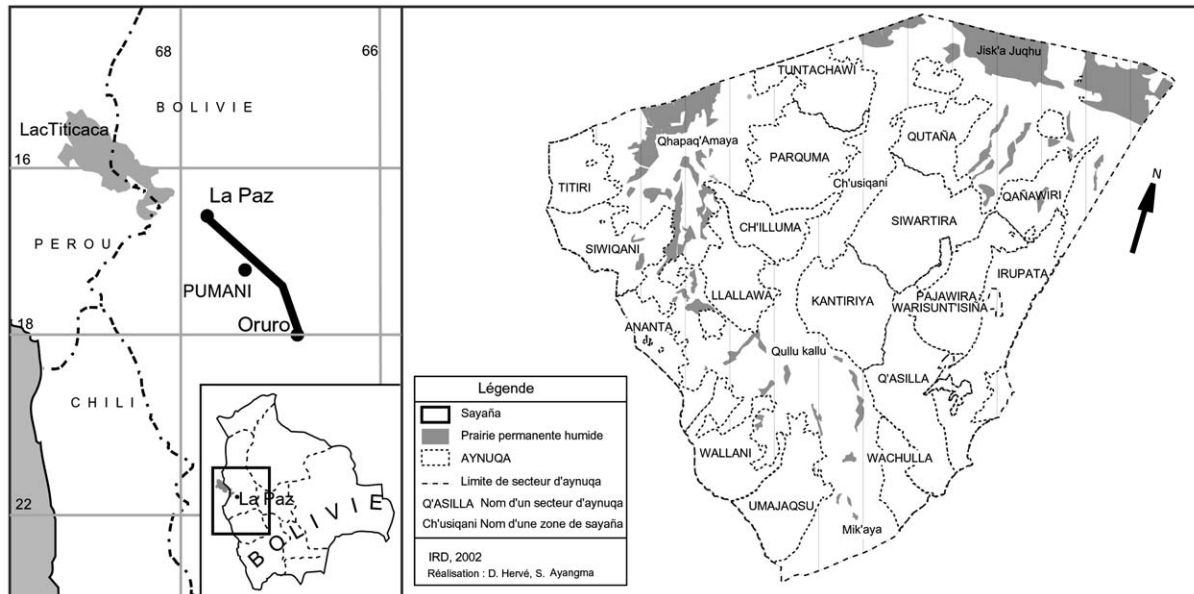


Figure 1 Localisation et occupation des terres en 1994, communauté de Pumani (d'après Hervé et Ayangma, 2000).

que la durée de la jachère de chaque parcelle pouvait se déduire de la localisation des parcelles sur le territoire villageois¹. Cet effort de compréhension d'une situation locale devant déboucher sur une généralisation, nous avons choisi de formaliser les règles de gestion des jachères de manière à explorer des scénarios d'évolution en analysant leurs conséquences sur le milieu. Ce choix a conduit à la modélisation.

Nous partons des acquis des programmes qui se sont succédés dans cette communauté et à proximité (programme européen Tropandes)[☆] afin de comprendre comment la modélisation a été introduite dans une recherche interdisciplinaire. Nous examinons la contribution de la modélisation à la construction d'un dialogue interdisciplinaire. Nous analysons les attendus et les difficultés de l'articulation entre plusieurs types de modèles, chacun correspondant à un aspect spécifique du système étudié. Nous tentons finalement de tirer un bilan de ces expériences en termes d'interdisciplinarité.

Les acquis

État de la ressource sol

L'évolution de la fertilité du sol est étudiée sur l'*altiplano* central bolivien dans la communauté de

Pumani, située à 80 km au sud de La Paz, entre 3800 et 4100 m d'altitude, centrée sur les coordonnées 17° 08' de latitude sud et 68° 04' de longitude ouest (Fig. 1). Les conditions climatiques à Ayo Ayo (station la plus proche de Pumani) sont caractéristiques d'un milieu semi-aride d'altitude : précipitation moyenne annuelle de 480 mm, température moyenne de 7°C avec une amplitude thermique journalière pouvant atteindre 30°C, gel durant la période de culture (la pomme de terre a une chance sur neuf d'avoir un cycle normal).

Les analyses agronomiques ont permis de vérifier certaines des fonctions de la jachère dans les conditions de l'*altiplano* central bolivien, mais pour une durée qui ne correspond pas toujours aux dix ans du cycle de rotation actuellement pratiqué. En effet, les différentes composantes de la fertilité n'évoluent pas toutes dans le même sens (Hervé et al., 1994 ; Hervé et Rivière, 1998). Ainsi, la pratique de la jachère ne contribue pas à augmenter le stockage de l'eau dans le sol, ni à contrôler les adventices. Le suivi *in situ* d'éléments chimiques stockés dans le sol, d'indicateurs de son état physique et de populations de microorganismes, met en évidence des améliorations beaucoup plus nettes d'état physique (stabilité structurale), d'activité microbologique du sol (mycorrhizes arbusculaires), que d'état chimique. Le contrôle du nématode kyste de la pomme de terre (*Globodera pallida*) demande au minimum cinq ans de jachère, durée au-delà de laquelle la production fourragère n'augmente pas. Une réduction de la jachère à cinq ans compromettrait l'approvisionnement en combustible ligneux (*Baccharis incarum* essentiellement), nécessaire à la cuisson des aliments, ce

¹ Il y a autant de soles que d'années de rotation. La durée de jachère d'une parcelle se déduit donc de sa localisation dans une sole. Une enquête auprès du propriétaire permet de repérer des cas particuliers de parcelles échappant à la norme. Des espèces végétales sont également indicatrices de l'âge de la jachère.

combustible ne pouvant être substitué que par des déjections bovines, au détriment de leur utilisation comme fertilisant. L'emploi de bouteilles de gaz reste en effet une alternative trop onéreuse pour la majorité des agriculteurs.

La comparaison des stocks d'éléments dans le sol, à différentes dates, paraît insuffisante pour évaluer la fonction de restauration de la fertilité. Il faut également repérer les flux de carbone et d'azote et préciser le rôle du compartiment micro-biologique. L'importance de la biomasse micro-bienne a également été soulignée pour la jachère longue du paramo vénézuélien (Llambi et Sarmiento, 1998). Dans ces deux situations, en Bolivie et au Vénézuéla, l'objet des recherches s'est donc déplacé des états aux flux et de la composante chimique à la composante microbiologique de la fertilité du sol. Cette convergence a conduit les équipes concernées à s'associer dans un programme européen.

Gestion des terres

Deux types de gestion des terres coexistent dans la communauté de Pumani : l'*aynuqa* et la *sayaña* (Fig. 1). Ces terres, qui restent en usufruit, sont privatives. Cependant les intercultures² sont totalement privées dans le cas de la *sayaña*, tandis que dans le cas de l'*aynuqa*, elles sont communales et ouvertes après récolte à la vaine pâture de l'ensemble des animaux de la communauté pendant la durée de la jachère fixée collectivement. Les *sayaña* sont les terrains à proximité des maisons, soit en prairie permanente humide, soit en orge cultivé tous les ans pour l'affouragement des bovins. Il y a autant de soles d'*aynuqa* que d'années de rotation communale, ce qui explique que ces terrains soient plus éloignés des habitations : ils sont cultivés en pomme de terre après jachère suivie d'au plus deux années de culture de quinoa (*Chenopodium quinoa*) ou d'orge.

Entre 1955 et 1994, la surface des *aynuqa* est passée de 70 à 52 % de la surface totale de la communauté, au profit des *sayaña*, et 44 % des prairies permanentes humides ont été retournées à la charrue pour des semis d'orge (Hervé et Ayangma, 2000). La figure 1 représente l'usage des terres à Pumani en 1994. La construction de maisonnettes sur les terres d'*aynuqa* durant la période de jachère³ est un des moyens de contourner l'accès libre dans les jachères communales puisqu'elle

conduit à une privatisation des intercultures. La dispersion des parcelles dans les *aynuqa* et les distances les séparant du lieu de résidence sont devenues un handicap pour la production d'orge destinée à l'élevage bovin laitier. À l'échelle d'une génération, des échanges de parcelles entre familles ont abouti à une concentration spatiale à proximité des *sayaña* et du secteur d'*aynuqa* le plus proche (Rivière et al., 1996). De nouveaux dispositifs de gestion des ressources sont ainsi en gestation. Ils feront moins appel aux normes collectives, mais de plus en plus à des accords concertés entre individus disposant d'une plus grande autonomie dans la gestion de leur exploitation et, en même temps, d'une moindre protection collective contre les risques. L'objet de la recherche s'est ici déplacé de la communauté et du système d'*aynuqa* vers des stratégies individuelles et familiales, spatiales et foncières, qui tendent à s'imposer aux règles communautaires (Hervé et Rivière, 1998).

La gestion des jachères passe par le choix d'une combinaison localisée de *sayaña* et d'*aynuqa*, choix modifiable chaque année mais qui oriente durablement l'exploitation (Encadré 1). Le fait de connaître la durée de la jachère et l'ordre stable de succession des secteurs d'*aynuqa* dans l'espace autorise des anticipations et des reports interannuels, nécessaires dans un contexte de risques climatiques très élevés. Chaque année, le chef de famille doit adapter à nouveau sa main-d'œuvre et sa disponibilité d'animaux de trait à la quantité de terres disponibles dans le ou les secteurs d'*aynuqa* désignés par la communauté pour être mis en culture ; il a souvent recours à des accords de réciprocité⁴ (Fig. 3). Le résultat de tous ces processus individuels d'adaptation est visible dans le paysage par le pourcentage de parcelles non labourées dans le secteur d'*aynuqa* ouvert cette année-là.

L'analyse de l'occupation de l'espace suscite d'autres questions concernant l'émigration. Une partie de la population émigre en ville, pas toujours de manière définitive, une fois assurés les labours, semis et récoltes. D'autres partent plusieurs années, comme en témoigne la quantité de maisons habitées temporairement, puis reviennent, parfois de l'étranger, pour reprendre la conduite de leur exploitation. Les migrants ont des compromis sociaux à assurer à la fois en ville et dans la communauté, en particulier pour l'éducation des enfants.

² État du sol entre la récolte et la première opération culturale suivante, labour ou semis.

³ Sur l'emplacement d'abris temporaires pour le gardiennage des animaux.

⁴ Ces accords sont un type « instable », car variable d'une année sur l'autre, de contrats de métayage. La récolte est partagée à moitié mais le propriétaire ne reste pas tous les ans offreur de terre, il peut devenir une autre année demandeur d'accès à la terre, c'est-à-dire offreur de travail.

Encadré 1. Stratégies des unités de production familiales

Les exploitations comprennent de deux actifs (un jeune couple qui vient de s'installer) à quatre actifs (une famille nombreuse ayant gardé des membres dans la communauté) et de 10 à 30 ha dont 0,5 à 3 ha annuellement cultivés et le reste en jachère. La variabilité des stratégies adoptées s'explique par des raisons multiples liées à l'histoire de la famille et de l'exploitation, la scolarisation des enfants localement, en ville ou à la Paz, les priorités concernant l'élevage (Tableau 1). Si l'on compare la localisation des parcelles des unités C et D, qui priorisent la *sayaña* (plus de 70 % de la surface), C illustre une stratégie de dispersion et D une stratégie de concentration à proximité des habitations (Fig. 2) mais ces deux stratégies peuvent se combiner.

Tableau 1
Importance de la *sayaña* dans quelques unités de production familiales (UPF)

Unité Production Familiale	Sup. Totale St (ha)	Sayaña/St (%)	Sup. cultivée Sc (ha)	Sc/actif	Nombre bovins	Nombre ovins	Nombre d'enfants scolarisés
A	15,49	28	1,7	0,43	8	68	3 Co
B	25,0	60	3,24	1,09*	6	92	3 Co
C	13,44	76	2,66	1,32*	5	100	1 Co 1 Vi
D	28,02	74	2,75	0,89	9	76	1 Co

* Cultivent des terres en partageant les facteurs de production et la récolte à moitié. St : superficie totale, Sc : superficie cultivée, Co : dans la communauté, Vi : en ville. Source : d'après Bennehard (1998).

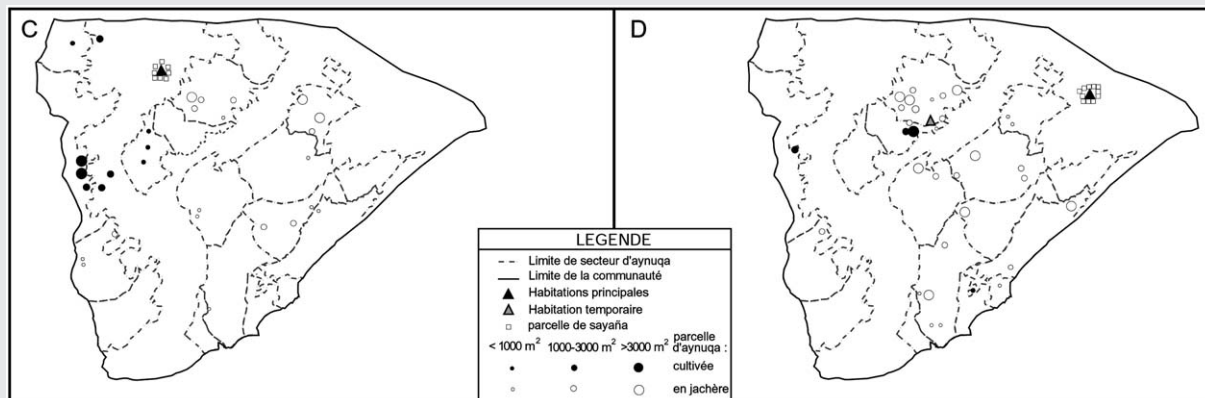


Figure 2 Stratégies de dispersion (C) et de concentration (D) des parcelles d'*aynuqa* (1998-1999) (d'après Bennehard, 1998)

- L'UPF C dispose de 9 parcelles de *sayaña* à Qhapaqamaya, de l'ordre d'un hectare à Ananta et Qotaña et d'un demi-hectare à Parqoma, Kantiriya et Warisuntisina. Elle conserve des parcelles dans la plupart des *aynuqa*, sauf les plus éloignés (Umajaqsu, Irupata). En 1998-1999, une surface significative est cultivée dans les trois *aynuqa* mis en culture, qui se trouvent relativement proches des habitations.
- L'UPF D a concentré ses parcelles dans la *sayaña* de Jiskaoqho, dans le secteur d'*aynuqa* de Parqoma, à proximité d'un abri temporaire, et secondairement dans les secteurs de Qasilla, Irupata et Siwartira. Par contre D n'a pratiquement aucune parcelle sur le versant de la cordillère au sud-ouest de la communauté, ni dans les *aynuqa* les plus éloignés des habitations.

Des accords de partage à moitié sont passés entre ceux qui ont quitté la communauté et ceux qui, étant restés, mettent en culture leurs parcelles. On peut donc se demander dans quelles limites les accords de réciprocité permettent de résoudre les déséquilibres identifiés, accentués par l'émigration.

En conclusion, la gestion des jachères résulte bien de décisions d'assolement individuelles, prises par des exploitations interdépendantes car reliées par des réseaux de réciprocité, dans un cadre de normes collectives.

L'introduction de différents types de modélisation

Nouveaux objets, nouvelles équipes

La recherche interdisciplinaire menée sur la jachère a évolué vers de nouveaux objets de recherche⁵ : dynamique de la matière organique du sol,

⁵ Chassany et Jollivet (1997) parlent de « problématique progressive ».

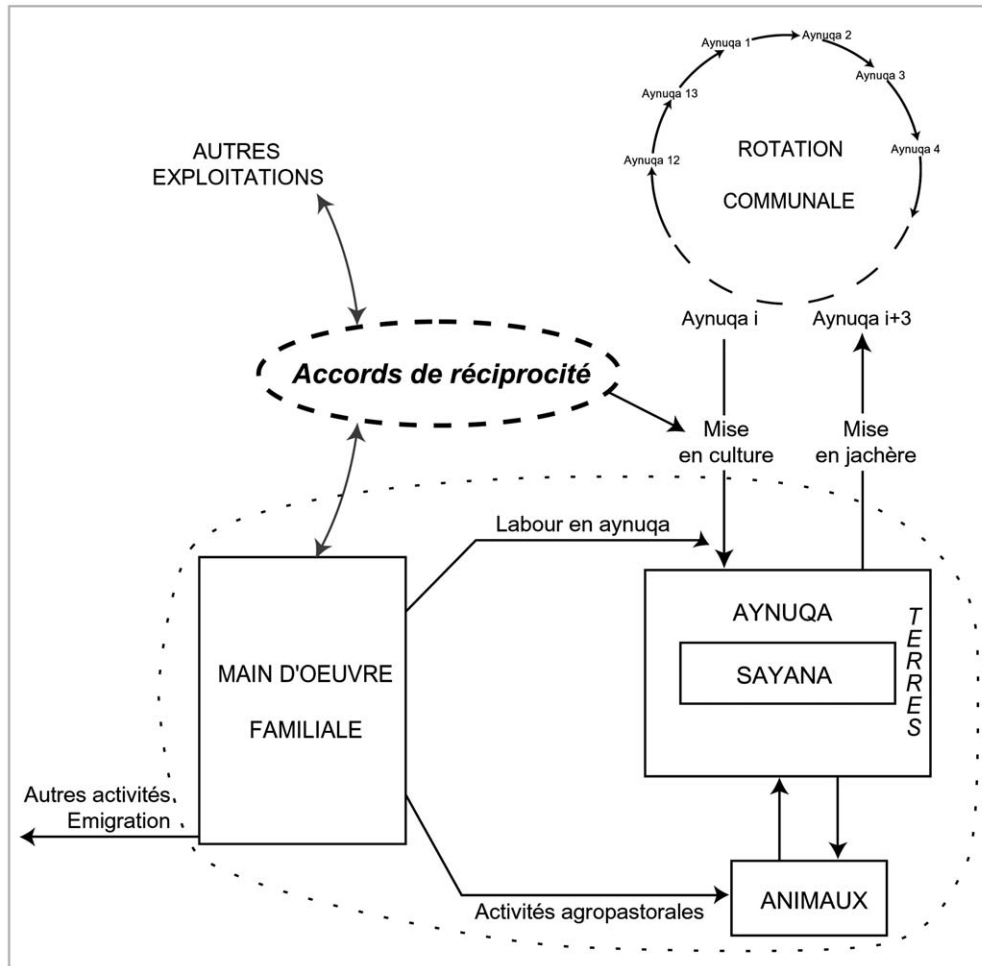


Figure 3 Rôle des accords de réciprocité pour réduire le déséquilibre dynamique entre terre et main-d'œuvre pour une exploitation dans une communauté (d'après Paz, 1997).

gestion des activités au sein d'une exploitation, interactions entre exploitations. Comment cette évolution s'est-elle accompagnée d'une approche de modélisation et en quoi celle-ci a-t-elle finalement éloigné ou rapproché les deux communautés scientifiques concernées, l'une par l'état d'une ressource et l'autre par sa gestion ?

L'équipe pluridisciplinaire initiale, sciences agronomiques-sciences sociales, a défini des thématiques de recherche communes aux systèmes de culture à jachères, s'éloignant ainsi du contexte de la communauté de Pumani. Cet éloignement et le renouvellement partiel des partenaires ont conduit à la formation de deux groupes de disciplines rapprochées, plus aptes à traiter des nouveaux objets identifiés, entre lesquels l'agronomie, présente dans les deux groupes, a joué un rôle charnière.

À propos des états du sol, des écologues, des spécialistes du sol (pédologues, microbiologistes) et des agronomes, avec une compétence en modélisation chacun dans son domaine, ont tenté de

modéliser la dynamique de la matière organique dans le système jachère-pomme de terre.

À propos de la gestion des terres, des modélisateurs en systèmes multi-agents ont été associés à l'équipe initiale (agronome, zootechnicien-pastoraliste et anthropologue) pour représenter la gestion annuelle des activités au sein d'une exploitation puis les interactions entre gestion individuelle des terres cultivées et gestion collective des jachères. Les sciences sociales étaient, au moins au début, partie prenante de cette modélisation qui intégrait explicitement les interactions de l'homme et de la nature (Weisbusch et Duchateau-Nguyen, 1996).

Ces travaux ont été poursuivis dans le programme européen Tropandes par un modélisateur et un agronome pour aboutir à un modèle pluriannuel de gestion d'exploitation (un modèle informatique, essentiellement qualitatif, basé sur un système multi-agents), qu'il s'agissait ensuite de coupler aux modèles de fonctionnement de l'agro-

écosystème (des modèles quantitatifs, construits sur des bases mathématiques).

Modèles biophysiques appliqués à la dynamique de la matière organique

L'hypothèse générale est que le stock de matière organique d'un écosystème baisse rapidement après sa mise en culture, et que la jachère permet de récupérer une fraction du carbone perdu et la population des microorganismes qui intervient dans le recyclage des éléments minéraux. Pour vérifier cette hypothèse, les processus de production et de minéralisation de l'azote, au cours de la jachère et sous la culture de pomme de terre, ont été décomposés en plusieurs modules.

- Une donnée que tous les autres modules utilisent, le bilan hydrique du sol, est modélisé selon le modèle SAHEL (Penning de Vries et al., 1989), qui fonctionne sur le principe des vases communicants entre couches de sol.
- La production de biomasse au cours de la jachère est modélisée en fonction de l'efficacité de l'interception du rayonnement par le couvert végétal et l'alimentation hydrique. FAPROM (Saugier, 2000) fournit un flux de nécromasses (aériennes et souterraines) de qualités connues.
- La décomposition de ces nécromasses dans le sol est simulée par un modèle à compartiments de minéralisation de la matière organique (C et N), adapté de MOMOS (Pansu et al., 1996 ; Pansu et al., 1998). Ce modèle prend en compte la composition des matériaux incorporés au sol, sa biomasse microbienne, ainsi que les facteurs température et humidité pour fournir une quantité d'azote minéral par couche de sol.
- Un modèle de production de pomme de terre PAPANDES, inspiré de LINTUL (Kooman et Haverkort, 1995 ; van Haren et Haverkort, 1998), prédit l'élaboration du rendement en fonction de l'eau et l'azote du sol, qui sont des sorties respectivement du modèle SAHEL et du couplage des modèles FAPROM et MOMOS.

En connectant ces quatre modèles par l'intermédiaire de fichiers standardisés, et sur un pas de temps journalier, on cherche à comprendre ce qui contribue au flux d'azote minéral dans le sol et comment ce flux évolue en fonction de la durée de la jachère pour supporter une ou plusieurs années de culture de pomme de terre. La variabilité saisonnière et inter-annuelle du climat est prise en compte dans l'humidité du sol. SAHEL est pour cette raison connecté avec les trois autres modèles. La connexion de MOMOS se fait avec FAPROM pour représenter le flux d'azote au cours de la

jachère puis, lorsque la jachère est cultivée, avec PAPANDES pour le flux sous culture de pomme de terre. Le déroulement d'un cycle livre à la fois une production de pomme de terre et un stock résiduel d'azote dans le sol disponible pour les cultures suivantes. Le couplage de ces modèles devrait permettre à terme de simuler le cycle de l'azote dans l'ensemble de l'agrosystème et d'anticiper les effets d'une réduction de la durée de la jachère, d'apports de fertilisants ou de manipulations des espèces végétales au cours de la jachère.

Chaque équipe, représentant l'une des disciplines associées, travaille sur l'un de ces modules⁶, en calibrant des modèles quantitatifs adaptés de modèles existants ou élaborés pour la circonstance, sur les études de cas dans le *paramo* vénézuélien et la *puna* bolivienne. Écrits au départ dans des langages de programmation (Fortran) et des plateformes de simulation différents (Vensim), ces modèles de la famille des systèmes dynamiques ont été progressivement convertis à la plateforme Vensim qui s'est révélée particulièrement adaptée à la représentation des flux⁷. Le dialogue entre les disciplines voisines, écologie, agronomie, biologie des sols, s'organise alors pour établir une communication entre les modèles, au gré des ajustements de versions successives.

Modèles de décision adaptés à la gestion individuelle et collective

Quatre modèles ont été construits : 1) le fonctionnement agro-pastoral annuel d'une exploitation familiale (PUMANI) ; 2) les relations entre plusieurs exploitations sur un pas de temps pluri-annuel (SIMANDES) ; 3) les modalités de négociation entre familles pour parvenir à des décisions collectives (NEGO) ; 4) le fonctionnement d'une exploitation en interaction avec l'agroécosystème sur la durée de la rotation (FINPUPA).

Modélisation d'une exploitation

L'approche a combiné un Système-expert et un Système Multi-Agents (SMA) (Encadré 2). Deux principes ont été mis en œuvre : des connaissances d'experts, d'origine diverse, exprimées en termes de règles qualitatives d'une part, des règles réparties entre des objets et des agents informatiques

⁶ *Plant International Research* (Wageningen) pour les modèles SAHEL et PAPANDES, IRD et CEFE-CNRS (Montpellier) sur le modèle MOMOS, Lab. Ecol. Veget. (Paris Sud) pour le modèle FAPROM.

⁷ Guerrin et Paillat (2002), en modélisant les effluents d'élevage dans l'île de La Réunion, arrivent à la même conclusion.

Encadré 2. Démarche de modélisation multi-agents

Les disciplines réunies (agronome, zootechnicien - pastoraliste, anthropologue) sont intervenues dès le début de la construction du modèle, pour se mettre d'accord avec le modélisateur sur sa structure⁸. Le modélisateur a formalisé les connaissances de chaque expert, qualitatives et quantitatives, sous la forme de règles de type « Si, Alors », puis dans un système multi-agents, à partir des métaphores : agriculteur - agent informatique et ressource - objet informatique (Treuil et Mullon, 1997). Chaque agriculteur est représenté par un agent, c'est-à-dire une entité informatique dotée d'autonomie, capable d'agir localement en réponse à des stimulations ou à des communications avec d'autres agents et de se représenter son environnement ; les agents, qui sont des objets particuliers, peuvent agir sur des objets situés dans l'environnement (Ferber, 1999 ; Treuil et al., 2001). Des cartes évolutives, créées grâce à l'incorporation dans le modèle d'interfaces graphiques, ont permis de restituer aux thématiciens des ébauches successives, au fur et à mesure de l'élaboration du modèle (Laloë, 1999). Ce type de modélisation a une fonction maïeutique en agencant des connaissances disciplinaires différentes, échangées à cette occasion, dans une représentation logique, rigoureuse et nécessairement simplifiée de la réalité⁹.

qui communiquent entre eux d'autre part (Migueis et al., 1996). Le choix d'un modèle individus-centrés se prêtait à la représentation du fonctionnement d'une exploitation, fondée sur la métaphore : un agriculteur (dans la vie réelle) = un agent (informatique).

À partir de la connaissance, dans cinq exploitations, de la gestion des terres d'*aynuqa* et de *sayaña* et de l'ensemble des activités journalières des membres de la famille pendant deux ans, ces principes ont été appliqués au fonctionnement annuel d'une exploitation agropastorale dans une communauté paysanne (Hervé et al., 2002). Dans un contexte où les familles paysannes combinent agriculture, élevage et activités extérieures, nous avons représenté l'ensemble des activités agropastorales de l'exploitation.

Les principes développés par des chercheurs du département Économie et Sociologie Rurales de l'Inra (Attonaty et al., 1990 ; Papy et al., 1988), sur l'organisation des chantiers de travaux agricoles dans le modèle OTELO, ont été appliqués pour résoudre les aspects synchroniques et diachroniques de l'organisation du travail¹⁰. Il est apparu qu'en déroulant le temps, les différentes activités

des membres de la famille (domestiques, sociales, agro-pastorales, rituelles, etc.) s'enchaînaient en suivant des règles de priorité et sous la dépendance étroite des conditions climatiques. Le déroulement du temps constitue l'élément fédérateur de ce modèle, ce qui n'est pas toujours le cas dans les modèles multi-agents.

Le modélisateur a représenté l'exploitation par un agent informatique unique *Exploitation* qui manipulait divers objets : Pomme de terre, Orge, Quinoa, Luzerne, Bovins, Ovins, en les faisant fonctionner dans un univers virtuel (Migueis et al., 1998). L'agent *Exploitation* possède les informations concernant la structure et les règles de décision de l'exploitation. Le modèle Pumani fournit les surfaces cultivées et les rendements obtenus, l'état des stocks (déjections ovines utilisées en engrais, foin d'orge pour l'alimentation des bovins), le déroulement journalier des chantiers et l'emploi de la main-d'œuvre familiale dans chacune des activités agro-pastorales, selon la composition initiale de la famille, la disponibilité de ses membres, la taille du troupeau, les surfaces disponibles et les données climatiques journalières consultables sur fichier (Fig. 4). Les risques climatiques (gel selon la topographie) et les contraintes de distance (temps de marche des habitations jusqu'aux zones cultivées) sont également intégrés dans le modèle.

Ce modèle « exploitation » permet d'envisager les conséquences d'une réduction de la jachère sur l'augmentation des surfaces cultivées, notamment en fourrage, et donc de la taille du troupeau, et sur l'adaptation nécessaire de l'organisation du tra-

⁸ Le formalisme UML (Lopez et al., 1998) oblige à définir les agents, leur regroupement en classes, leurs attributs et méthodes et les interactions entre agents, en séparant un modèle statique (« instances ») et un modèle dynamique (« actions »).

⁹ Les connaissances des experts, traduites dans un même langage informatique, acquièrent un nouveau statut au sein du modèle et, de ce fait, changent en quelque sorte de propriétaire, ce qui à la fois permet des rencontres interdisciplinaires et donne aux auteurs de ces connaissances l'impression qu'ils en perdent le contrôle.

¹⁰ Chaque travail agricole est considéré comme un chantier (main-d'œuvre, outils et conditions climatiques de sa réalisation). Au cours de l'année, certains chantiers sont en compéti-

tion. Afin de résoudre ces conflits d'affectation, l'année est découpée en périodes et, dans chaque période, les chantiers actifs sont classés par ordre de priorité.

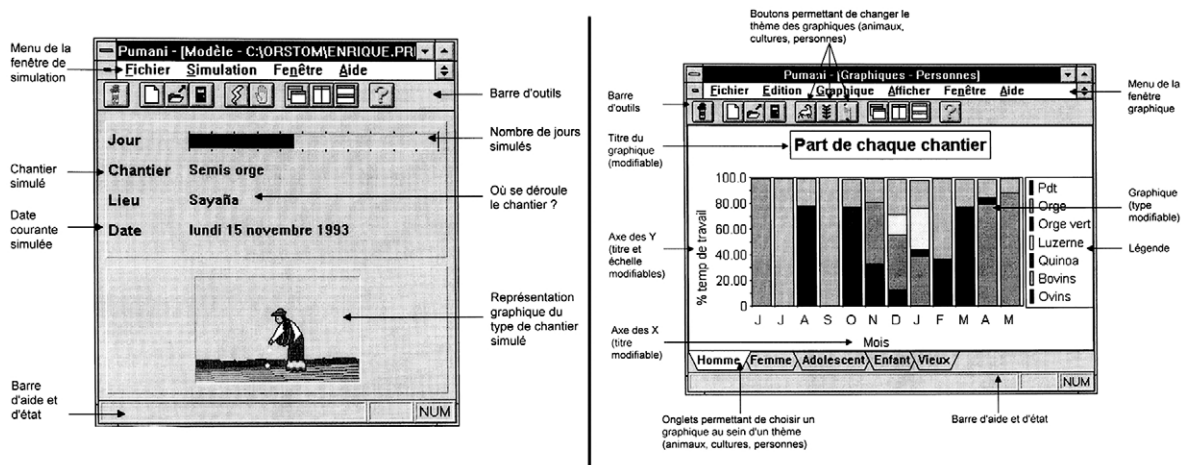


Figure 4 Simulation de chantier et résultats graphiques dans le modèle PUMANI (Migueis et al., 1998)

vail. Avec des conditions climatiques contraignantes, on comprend qu'une telle adaptation doit être prévue longtemps à l'avance et ne soit applicable que par une catégorie d'agriculteurs.

Modélisation des interactions entre exploitations dans une communauté

La formalisation SMA a été appliquée à la passation d'accords de réciprocité entre les familles paysannes, dans la même communauté (Fig. 3). Le modèle SIMANDES représente les échanges d'accès à la terre contre travail entre les 200 familles de la communauté pendant les 13 ans du cycle de rotation (Paz, 1997). Ces accords d'échange de prestations de services entre familles apparaissent indispensables pour la remise en culture des jachères communales, dans un contexte de risques climatiques élevés, de ressources rares et réparties inégalement, de migrations en ville. Cette interdépendance entre familles s'exprime au sein de réseaux de proximité ou de connaissance ; elle intervient aussi dans les négociations collectives lors de l'assemblée communale (Paz et al., 1996).

Dans le modèle SIMANDES, la structure démographique et foncière de la communauté est déduite des connaissances existantes. Un protocole d'interaction définit avec qui, et sur quelles bases, un agent va engager un accord de réciprocité concernant un échange d'accès à la terre contre du travail. Un protocole de communication définit les règles de conversation entre les offreurs de terre et les offreurs de main-d'œuvre qui s'engagent dans des accords. Le modélisateur définit pour cela un processus de mémorisation des contrats passés, un degré de qualification des partenaires qui se traduit par un classement des candidats à l'accord, et finalement un niveau d'exigence pour les quantités échangées, qui peut être élevé au début, mais qui tend à baisser au cours de la conversation.

Les conditions initiales sont d'abord définies conformes à la réalité : taux de migration masculine, déséquilibre terre/main-d'œuvre, surface des secteurs d'*aynuqa*, structure et étendue des réseaux de connaissance et niveau d'exigence des partenaires pour la passation des accords. Puis on fait tourner le modèle et, chaque année, la surface laissée sans labour en *aynuqa* mesure l'efficacité des accords passés¹¹. En modifiant les conditions initiales, on vérifie par simulation dans quelles limites ces accords de réciprocité peuvent résoudre ou amortir les déséquilibres observés, ou accentués par les dynamiques en cours (migrations, développement de l'élevage bovin, utilisation du tracteur). On peut aussi chercher à augmenter l'efficacité des accords en simulant différents types de réseau de connaissances (proximité, famille élargie, réseau restreint ou étendu) ou différents niveaux d'exigence du propriétaire des terres lorsqu'il ne trouve pas de travailleurs. Plus globalement, en repérant les situations limites, on se rend compte que les accords de réciprocité permettent de garantir, jusqu'à un certain point, la viabilité des communautés qui conservent ce système d'*aynuqa*.

Le troisième modèle (NEGO) se réfère aux négociations préliminaires aux décisions collectives, par des interactions finalisées entre deux ou plusieurs acteurs interdépendants, de manière à converger, à partir de positions initiales divergentes, vers une solution acceptable, voire satisfaisante pour ces acteurs (Franchesquin, 1995). La gestion collective d'une partie du territoire de la communauté implique en effet de choisir les dates des premiers labours et des dernières récoltes et les soles à labourer, ce qui revient à un problème de classe-

¹¹ On distingue les surfaces labourées avant la passation des accords, grâce aux accords et, par différence, les surfaces restées non labourées après accords.

ment des lieux-dits, chaque famille pouvant exprimer une préférence différente (Paz et al., 1996). Franchesquin (1995) a retenu, parmi les protocoles de communication¹², le *Speech Act Based Negotiation Protocol* (SANP) (Chang et Woo, 1992) qui organise la discussion un à un à partir de connaissances partagées au départ entre tous, mais qui ne sont ensuite accessibles qu'à un nombre plus restreint d'interlocuteurs.

Le quatrième modèle, FINPUPA, résulte de la synthèse des expériences antérieures (Pumani, Simandes, Nego). Il représente le fonctionnement d'une exploitation pendant les treize ans de rotation en incluant, par rapport aux constructions précédentes, des agents « Animaux » (Bovin, ovin) et un agent « Économique » qui calcule en fonction des prix définis par les marchés les seuils de viabilité de l'exploitation.

Discussion et conclusion

Bilan interdisciplinaire

Dans notre approche interdisciplinaire, l'objet commun, la jachère, a été certainement redéfini en partie du fait de son caractère composite (Laloë, 1999). La phase de modélisation n'a pu être introduite qu'après la séparation d'objets plus stables, concernant l'état de la fertilité du sol et la gestion des jachères, et pouvant être traités par des groupes de disciplines rapprochées. Le dialogue interdisciplinaire change alors de nature ; il est orienté avant tout par les couplages entre modèles.

La pratique de la modélisation dans chaque groupe de disciplines voisines a eu trois conséquences.

- Elle a accentué les différences d'outils et de démarches et, en contribuant au dialogue au sein de chaque groupe, elle a en quelque sorte éloigné une possibilité de rapprochement ou, en tous les cas, a reporté cette possibilité à une étape ultérieure.
- Elle a contribué à un ciblage de la recherche sur des questions plus théoriques, en s'éloignant par là-même d'une préoccupation d'aide à la décision.
- Elle a posé aux disciplines d'intelligence artificielle et de mathématiques de nouvelles questions, nées du couplage entre des modèles de

nature différente. Ces disciplines se sont retrouvées alors au centre du dispositif, dans un rôle de médiation entre les différents thématiques, et d'intégration (Laloë, 1999).

Couplage entre modèles biophysiques et modèles de décision

La connexion de modules décentralisés et relativement indépendants nous a permis de modéliser le fonctionnement du système jachère-cultures. Le problème non encore résolu nous paraît être le couplage entre des modèles biophysiques et des modèles de décision.

Une solution envisagée consiste à coupler aux modèles biophysiques, connectés sous Vensim à l'aide de fichiers standardisés d'entrées et de sorties, au modèle de gestion de l'exploitation agricole, instancié au niveau d'une parcelle (avec ses caractéristiques initiales d'azote et d'eau dans le sol), par l'intermédiaire d'une base de données. Pour chaque parcelle, les résultats de la simulation (définie pour une durée de jachère donnée) sont recueillis dans cette base de données qui contient également les données climatiques et de prix que le modèle de décision FINPUPA peut venir récupérer. Ce choix d'un type de couplage entre les modèles a des répercussions sur la manière d'envisager les scénarios, dans notre cas en incluant une entité de gestion. C'est peut être la principale source de divergence, l'objectif étant soit une meilleure compréhension du cycle de l'azote, soit une meilleure gestion de la fertilité des jachères. Or pour chaque objectif : scientifique (meilleure compréhension), pédagogique (meilleur transfert), opérationnel (meilleure gestion), les formes de couplage ne sont pas nécessairement les mêmes. Ce qui est donc en jeu, au delà des problèmes techniques, est bien la difficulté de s'accorder sur l'objectif de la modélisation lorsque sont mises en commun des connaissances de disciplines différentes et, par là même, une différence de conception de l'interdisciplinarité.

Généralisation

Les modèles de fonctionnement quantitatifs sont spécifiques à chaque ressource : modèles de flux dans un système hydraulique, de population dans le cas de la pêche, de croissance et de reproduction dans le cas de végétaux. On peut ainsi décrire les états de la ressource et les mécanismes de changement d'état. Il est cependant difficile d'isoler une ressource particulière, chacune faisant partie d'un ensemble de ressources localisé dans un espace. On parlera plus volontiers d'espace-ressource, de mi-

¹² Dans les références sur les SMA, divers protocoles simulent une discussion collective suivant les règles de déroulement des conversations : qui débute, degré de synchronisme des conversations, informations publiques ou non, nombre d'interlocuteurs, qui termine la conversation à deux ?

lieu ou d'écosystème. Le modèle de fonctionnement de l'écosystème devra alors combiner plusieurs modèles-flux ou plusieurs modèles-ressources. C'est le cas des flux de carbone et d'azote dans un système jachère-cultures, ou encore des processus de pollution ou d'érosion qui peuvent être mesurés ou appréhendés à l'échelle de la parcelle agricole, au sein d'un bassin versant.

Les pratiques d'exploitation relèvent de modèles de décision et de modèles de gestion. Dans la majorité des cas, la gestion est à la fois individuelle et collective : elle implique des communications entre familles et une phase de négociation afin d'aboutir à des règles qui s'imposent à tous. La gestion de ressources renouvelables, localisées dans un espace donné, fait donc appel à une concertation entre des acteurs qui communiquent entre eux. Dans ces mécanismes de gestion et, quelle que soit la nature des ressources en jeu, n'observe-t-on pas certains invariants ? Ne pourrait-on pas parvenir à des modèles de gestion génériques, compatibles avec les modèles utilisés pour représenter la dynamique des ressources ?

La mise en relation entre, d'une part, des acteurs-décideurs et, d'autre part, des processus biophysiques est envisageable autour d'un objet spatial, la parcelle agricole, objet tout à la fois de ces processus et de la gestion par agriculteur. La représentation des interactions entre agriculteurs (contrats, conversations, etc.) permet de prendre en compte, dans la typologie des acteurs ou dans leurs règles de décision, non seulement leurs plans d'action mais également leurs accointances et leurs réseaux de connaissance. La gestion à plusieurs peut être mise en scène soit dans un système multi-agents, soit dans un jeu de rôle, afin d'aborder l'usage et le devenir de plusieurs parcelles. Le dialogue entre agronomes et modélisateurs doit se poursuivre sur ce sujet de portée beaucoup plus générale.

Les SMA constituent des façons d'envisager les problèmes de gestion concertée de ressources renouvelables multiples. D'une part, des formalisations mathématiques peuvent leur être incorporées, d'autre part, des mathématiciens pourraient travailler sur la validation de ces modèles. En contre partie, les modélisateurs de processus biophysiques doivent prendre conscience que, pour représenter les activités humaines, il existe d'autres formes de représentation que des équations mathématiques. Divers outils existent, mathématiques, statistiques ou informatiques, pour le couplage entre un modèle biophysique et un modèle de gestion, mais l'objectif de leur utilisation dans une recherche interdisciplinaire doit être éclairci. À cette condition, des approches de modé-

lisation pourront susciter des rencontres fécondes entre les spécialistes des ressources, les spécialistes de la gestion et de l'aide à la décision, — l'agronomie comme l'halieutique sont des disciplines d'interfaces qui se situent entre les deux —, et les spécialistes de l'intelligence artificielle et des mathématiques.

Remerciements

Que l'ensemble des relecteurs et du comité éditorial de *NSS* soit sincèrement remercié pour les corrections apportées aux versions successives de ce texte.

Références

- Attonaty, J.M., Chatelin, M.H., Poussin, J.C., Soler, L.G., 1990. Un simulateur à base de connaissance pour raisonner équipement et organisation du travail en agriculture. In: Bourgien, P., Walliser, B. (Eds.), *Economics and artificial intelligence*. Paris, pp. 291-297.
- Bennehard, I., 1998. Parcelles et assolements dans un système de production andin. Le cas de la communauté de Pumani (Bolivie). DEA Gestion des espaces montagnards, Institut de Géographie Alpine, Grenoble 102 p + annexes.
- Chang, M.K., Woo, C.C., 1992. Sanp: a communication level protocol for negotiations. In: Werner, E., Demazeau, Y. (Eds.), *Decentralized A.I.*, 3, pp. 139-198.
- Chassany, J.-P., Jollivet, M., 1997. Questions à la modélisation à partir d'une expérience d'observation continue : le cas du Causse Méjan. In: Blasco, F. (Ed.), *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*. CNRS, Elsevier, pp. 345-350.
- Ferber, J., 1999. *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Franchesquin, N., 1995. Modélisation des négociations aboutissant à une prise de décision collective au sein d'une assemblée communautaire. Mémoire de DEA, Paris IX, Dauphine.
- Guerrin, F., Paillat, J.-M., 2002. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Restitution des travaux de l'ATP 60/99. Actes du séminaire 19-20 juin 2002, Montpellier, France, Cirad.
- Hervé, D., Rivière, G., 1998. Les jachères longues pâturées dans les Andes. *Acquis interdisciplinaires. Natures Sciences Sociétés* 6 (4), 5-19.
- Hervé, D., Ayangma, S., 2000. Dynamique de l'occupation du sol dans une communauté agro-pastorale de l'*altiplano* bolivien. Les montagnes d'Amérique Latine : Environnement et aménagement, 2, 88. *Revue de Géographie Alpine*, Grenoble, France, pp. 69-84.
- Hervé, D., Genin, D., Rivière, G., 1994. Dinámicas del descanso de la tierra en los Andes. ORSTOM - IBTA, La Paz, Bolivia.
- Hervé, D., Genin, D., Migueis, J., 2002. A modelling approach for analysis of agropastoral activity at the on-farm level. *Agricultural systems* 71, 187-206.

- Kooman, P.L., Haverkort, A.J., 1995. Modelling development and growth of the potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. In: Haverkort, A.J., Mac Keron, D.K.L. (Eds.), *Potato Ecology and Modelling of Crops under Conditions Limiting Growth*. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, pp. 41-59.
- Laloë, F., 1999. Le statut de la modélisation dans une démarche interdisciplinaire. *Natures Sciences Sociétés* 7 (4), 5-13.
- Llambí, L. D., Sarmiento, L., 1998. Biomasa microbiana y otros parámetros edáficos en una sucesión secundaria de los páramos venezolanos. *Ecotropicos* 11, 1-14.
- Lopez, N., Migueis, J., Pichon, E., 1998. Intégrer UML dans vos projets. Eyrolles Informatiques, Paris.
- Migueis, J., Hervé, D., Genin, D., Rivière, G., 1996. Usage des ressources, fonctionnement d'exploitations agropastorales ; des modèles pluridisciplinaires renouvelables ? Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, Journées du programme PIREVS-CNRS, Paris, 15-17/01/96, thème 2. 126-132.
- Migueis, J., Hervé, D., Genin, D., Rivière, G., 1998. « Pumani » : un modèle de représentation de l'activité agropastorale dans les Andes. *Laboratoire d'Études Rurales (LER), Document ORSTOM Montpellier*, 9, 69 p. + annexes.
- Pansu, M., Sallih, Z., Bottner, P., 1996. Modélisation des formes du carbone organique dans les sols. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 322, série II a, 401-406.
- Pansu, M., Sallih, Z., Bottner, P., 1998. Modelling of soil nitrogen forms after organic amendments under controlled conditions. *Soil Biol. Biochem.* 30 (1), 19-29.
- Papy, F., Attonaty, J.M., Laporte, C., Soler, L.G., 1988. Work organization simulation as a basis for farm management advice. *Agricultural systems* 27, 295-314.
- Paz, B., 1997. Un modèle multi-agents pour simuler les accords de réciprocité dans les Andes boliviennes. Thèse doctorale, Université Lyon I, France.
- Paz, B., Franchesquin, N., Hervé, D., Rivière, G., Treuil, J.P., 1996. Décisions collectives, contrats et négociations : une expérience de modélisation multi-agents d'un contexte agropastoral dans les Andes boliviennes. *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, Journées du Programme Environnement, Vie et Sociétés, PIREVS-CNRS, Paris*, 15-17/01/96, session A, 61-66.
- Penning de Vries, F.W.T., Jansen, D.M., Berge, H.F.M.ten, 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. *PUDOC, Wageningen Simulation monographs* 29.
- Rivière, G., Pacheco, L., Hervé, D., 1996. Espaces, droits et jachères dans une communauté *aymara* des hauts-plateaux boliviens. *Journ. d'Agric. et de Bota. Appl.* 37 (1), 83-104.
- Saugier, B., 2000. The fallow production model. Second individual annual report 01/10/99 - 30/09/00 INCO-DC UE project (ERBIC18-CT98-0263).
- Treuil, J.-P., Mullon, Ch., 1997. Expérimentation sur mondes artificiels : pour une réflexion méthodologique. In: Blasco, F. (Ed.), *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement. Journées du Programme Environnement, Vie et Société, CNRS, Elsevier*, 425-431.
- Treuil, J.-P., Mullon, Ch., Perrier, E., Piron, 2001. Simulation multi-agents et dynamiques spatialisées. In: Lena Sanders (Ed.), *Modèles en analyse spatiale. Hermès Science Publications*, 219-252.
- van Haren, R., Haverkort, A.J., 1998. Description and application of the LINTUL-POTATO crop growth model. In: Stoorvogel, J.J., Bouma, J., Bowen, W.T. (Eds.), *Information Technology as a Tool to Assess land Use Options in Space and Time, Proceedings of an international workshop, Lima*, 28/09 - 4/10/97, 41-61.
- Weisbusch, G., Duchateau-Nguyen, G., 1996. Une modélisation intégrant les composantes culturelles de l'interaction nature-société. *Natures Sciences Sociétés* 4 (1), 52-57.

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®