

Modélisation d'accompagnement

Simulations multi-agents et gestion des ressources naturelles et renouvelables

Mémoire pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger les Recherches de
l'Université de Lyon 1

Soutenue le 22 mars 2001



Rapporteurs

Jean-Marie Attonaty (INRA)

Christian Gautier (Université Lyon 1)

Jacques Weber (Cirad)

Examineurs

Jim Doran (Université Essex)

Jacques Ferber (Université Montpellier 1)

Alain Pavé (Université Lyon 1)

Nils Rohling (Université Wageningen)

Lena Sanders (CNRS)

PARTIE 1 : ACTIVITES DE RECHERCHE 5

1.1 CV RESUME 5
1.1.1 DIPLOMES. 5
1.1.2 POSITIONS. 5
1.2 PROJETS CONTRACTUELS 5
1.3 RESPONSABILITES SCIENTIFIQUES 6
1.3.1 CO-ENCADREMENT DE THESE : 6
1.3.2 PARTICIPATION A L'ENCADREMENT DE THESE 7
1.3.3 ENCADREMENT DE DEA : 7
1.3.4 JURYS DE THESE 7
1.3.5 AUTRES ACTIVITES LIEES A LA RECHERCHE 7
1.4 DIFFUSION 7
1.4.1 FORMATIONS 7
1.4.2 SEMINAIRES, CONFERENCES INVITEES 8
1.4.4 LOGICIEL 8
1.5 PUBLICATIONS 9

PARTIE 2 : 13

1. INTRODUCTION GENERALE 13

2 RECHERCHES MENEES AVANT 1994 14

**2.1 COMMENT REPRESENTER LA COMPLEXITE DU MONDE OBSERVE ET COMMENT REPRESENTER
LES DIFFERENTS POINTS DE VUE SUR LE MONDE OBSERVE ? 14**
**2.2 QUELS PEUVENT ETRE LES APPORTS METHODOLOGIQUES DES MODELISATIONS
INFORMATIQUES PROPOSEES PAR LE DOMAINE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ? 14**
2.2.1 ECHELLES ET NIVEAUX D'ORGANISATION 16
2.2.2 MODELISATION DES REPRESENTATIONS 16
2.2.3 L'ESPACE COMME ENTITE DE CONTROLE DE L'INTERACTION HOMMES-RESSOURCES. 16
**2.3 COMMENT UTILISER LES SIMULATIONS DANS LE DOMAINE DES INTERACTIONS HOMMES-
RESSOURCES? 16**

**3. MODELISATION DE LA GESTION DES RESSOURCES RENOUVELABLES :
PARCOURS ET APPROCHES 17**

**3.1 LES COMMUNAUTES DE RECHERCHE SUR LA GESTION DES RESSOURCES RENOUVELABLES ET
LES MODELISATIONS PROPOSEES 18**
3.1.1 ECOLOGIE 18
3.1.2 SCIENCES ECONOMIQUES ET SOCIALES 19
3.1.3 SCIENCES AGRONOMIQUES 21
3.1.4 SCIENCES COGNITIVES 22
3.2 SYSTEMES MULTI AGENTS 23
3.2.1 EVOLUTION DE LA RECHERCHE SUR LES SMA 23
3.2.2 SMA ET SIMULATION DE SOCIETE 24

3.2.3 SMA ET SIMULATION DE LA GESTION DES RESSOURCES	25
3.3 LA PRISE EN COMPTE DU LONG TERME : MODELISATION D'ACCOMPAGNEMENT ET APPROCHE PATRIMONIALE.....	26
<u>4. LES OUTILS ET MODELES DEVELOPPES</u>	<u>29</u>
4.1 CORMAS.....	31
4.1.1 MODELISATION AVEC CORMAS	32
4.1.2 VISUALISATION DE L'ESPACE	33
4.1.2 VISUALISATION DES ECHANGES.	34
4.1.3 EXEMPLE D'UN MODELE ET METHODE: TRAGEDIE DES COMMUNS	35
4.2 DE L'ECHANGE	36
4.2.1 REPRESENTATIONS, ECHANGES ET STRUCTURATION DE LA SOCIETE.....	36
4.2.2 DYNAMIQUE DES RESSOURCES ET RESEAUX D'ECHANGE	37
4.3 DE L'ESPACE.....	39
4.3.1 LE MODELE SAVANEAGENT.	39
4.3.2 LE MODELE FORPAST.....	41
4.3.3 LE MODELE BROUTE LA FORET	42
4.3.4 LE RETOUR A L'IMPLEMENTATION	43
4.4 LES APPLICATIONS.....	44
4.5 MODELISATION D'ACCOMPAGNEMENT : USAGE DES MODELES ET AIDE A LA DECISION.....	46
4.5.1. DU MODELE AU JEU DE ROLE	47
4.5.2 DU JEU DE ROLE AU MODELE.....	48
4.6 VALIDATION, VERIFICATION DES SMA, APPROCHES FORMELLES	50
<u>5 PROJET DE RECHERCHE.....</u>	<u>52</u>
5.1 RATIONALITE ET ADAPTATION	54
5.1.1 UTILITE, STRATEGIE ET SIMULATIONS MULTI-AGENTS.	54
5.1.2 SYSTEMES MULTI-AGENTS ET ALGORITHMES EVOLUTIONNAIRES.	56
5.2 SIMULER DES INTERACTIONS ECONOMIQUES ET SOCIALES.....	57
5.2.1 INTERACTIONS ECONOMIQUES : ECHANGES MARCHANDS DECENTRALISES.....	58
5.2.2 INTERACTIONS SOCIALES : RECIPROCITE.....	59
5.3 CONCLUSION DU PROJET DE RECHERCHE	60
6 CONCLUSION GENERALE	62

Figure 1 L'organisation d'un système modélisée pour un SMA.....	26
Figure 2 Interface principale de Cormas	32
Figure 3 Copie de la grille Cormas	34
Figure 4 Interface de Cormas avec la carte de Djemiong en mode vecteur.	34
Figure 5 Observateur des liens.	35
Figure 6 Coordination par communications de type gré à gré (gauche) ou de type centralisée avec un commissaire priseur (droite)	35
Figure 7 Les réseaux d'échange.	38
Figure 8 Un modèle de filière spatialisée	38
Figure 9 La représentation générale d'un SMA et position des outils de gestion économique.....	39
Figure 10 Simulation de la version « acteur ».....	40
Figure 11 Simulation de la version spatiale	41
Figure 12 Représentation des objets de niveau 1, 2 et 3	42
Figure 13 Représentation schématique des relations entre une société d'agents et son espace.	43
Figure 14 Schéma d'héritage des entités spatiales de Cormas	44
Figure 15 Séance de jeu dans le village de Podor	47
Figure 16 La carte initiale de la zone du village de NGnith.....	49
Figure 17 Fin de simulation.	49

PARTIE 1 : ACTIVITES DE RECHERCHE

1.1 CV Résumé

Né le 2 Octobre 1963 à N'Djamena (Tchad)

Marié, 2 enfants

Adresse : 4 rue des Liserons 34070, Montpellier

Tel : 04 67 75 42 13

1.1.1 Diplômes.

- **1986** : Ingéniorat en Sciences de l'Eau (ISIM, Montpellier)
- **1987** : DEA Hydrologie, Montpellier
- **1988** : DEA de biomathématiques, Paris 7
- **1994** : Thèse de l'Université de Lyon1 (Directeur de thèse : A. Pavé) Sujet : *Des milieux, des poissons, des hommes - étude par simulation multi-agents, le cas de la pêche dans le delta central du Niger*, soutenue le 11 Mars 1994 , mention très honorable avec les félicitations du jury.

1.1.2 Positions.

Novembre 1993 - Présent : Cirad, Montpellier.

Chercheur de l'Unité de Recherche Green puis du programme Espaces et ressources, Responsable de l'équipe de Simulations Multi-Agents.

Décembre 1989 -Novembre 1993 : Laboratoire d'Informatique Appliquée, Orstom Bondy.

Allocataire de Recherche sur la modélisation de la pêche dans le Delta Central du Niger, utilisation et développement de la méthodologie des systèmes multi-agents pour la simulation de la gestion de ressources renouvelables.

Juin 1988- Août 1989 : Programme Delta Central du Niger, Orstom Bamako.

Biométricien dans une équipe pluridisciplinaire, chargé de la gestion des bases de données, de la formation et du suivi des techniciens informatiques, de la mise en place et du suivi des réseaux d'enquêtes sur le terrain.

Avril 1987 - Décembre 1987 : Laboratoire de Biomathématiques de l'Inserm, URA 243, Jussieu.

Analyse et modélisation de la pression artérielle en ambulatoire.

Mars 1986 - Juin 1986 : IFREMER, Palavas.

Essai d'élevage de Pénéides en Réacteur Multiphasique à Haut Compactage.

Novembre 1984 - Mai 1985 : Service Régional d'Aménagement des Eaux, Rennes.

Analyse des bilans de flux de pollution de la retenue d'Arzal.

1.2 Projets contractuels

- Responsable du projet *La coordination des usages des ressources renouvelables dans un écosystème forestier tropical : le rôle des simulations et des systèmes d'information*. En collaboration avec M. Tchuenté (Université de Yaoundé). Dates : 1996-2000. Financement : Comité SEAH (Systèmes Ecologiques et Action de l'Homme) du programme Environnement, Vie et Sociétés du CNRS.
- Responsable du projet *Modélisation et simulation des interactions spatialisées entre sociétés et ressources : couplage des Systèmes d'Information Géographique et des Systèmes Multi-Agents*. Action thématique programmée du Cirad en collaboration avec l'Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar, l'Ecole d'Agronomie de Antananarivo, l'Ecole Supérieure Polytechnique de

Antananarivo, l'Université de Harare, Dates : 1998-2000, Financement : Direction scientifique du Cirad .

- Participant au projet *Validité des systèmes multi-agents*, dirigé par C. Le Page (Cirad). Dates : 1999-2000, Financement : Direction scientifique du Cirad,
- Participant au projet *MOBYDIC : simulation multi-agent des peuplements en poisson des grands lacs alpins*, dirigé par V. Ginot (INRA- Thonon les Bains) Dates : 1996-1998. Financement : Ministère de la recherche.
- Participant au projet *Politiques publiques et dynamiques du paysage au Sud du massif Central*, dirigé par R. Lifran (INRA –ESR, Montpellier) en relation avec le Cemagref Dates : 1999-2002, Financement : Ministère de l'Aménagement du Territoire et Environnement.
- Participant au projet *gestion intégrée des ressources naturelles, des territoires et des politiques publiques : approches par la modélisation multi-agents et la théorie des jeux*. dirigé par R. Lifran (INRA –ESR, Montpellier) en relation avec le Cemagref, le Lirimm. Financement : région Languedoc-Roussillon.
- Participant au projet *Modèles et jeux de rôles pour l'aide à la négociation dans les processus de gestion de ressources renouvelables*, dirigé par O. Barreteau (Cemagref, Montpellier). Financement : Ministère de l'Aménagement du Territoire et Environnement.
- Participant au projet *Modélisation de l'agencement et de l'intérêt des droits de propriété intellectuelle liés à la gestion des ressources génétiques dans le cadre du terroir*, dirigé par E. Le Roy, Laboratoire d'anthropologie juridique de Paris 1, Financement : Bureau des ressources génétiques du Ministère de la Recherche.
- Participant au projet *Modélisation de la dynamique d'entités géographiques transformables, dans un environnement multi-agents*, dirigé par S. Lardon (INRA-SAD, Montpellier) Dates : 1998-2000 ; Financement : Programme Systèmes d'informations géographiques (PSIG- Cassini), CNRS.
- Participant au projet *Analyse et modélisation des impacts et des pratiques coutumières sur divers milieux naturels sahéliens et sahélo-soudaniens au Niger et au Mali*, dirigé par A. Bertrand (Cirad-Forêt), Dates : 2000-2003. Financement : Comité Scientifique Français de la Désertification.
- Participant au projet *FLORES, Forest Land Oriented Resource Envisioning System*, dirigé par J. Vanclay Dates 1999. Financement Dfid, Icrاف, Cifor, Cirad

1.3 Responsabilités scientifiques

1.3.1 Co-encadrement de thèse :

- O. Barreteau (Engref, Prof : C. Millier), «Un système multi-agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et modes d'organisation », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et de Forêts, 1998», Soutenance effectuée Sept 98, Félicitations du Jury
- J.Rouchier (Univ. Orléans, Prof . A.Pavé) « La confiance à travers l'échange. Accès aux pâturages au Nord-Cameroun et échanges non-marchands : des simulations dans des systèmes multi-agents», soutenance effectuée Mai 2000, félicitations du Jury
- I. Bakam (Univ. Yaoundé, Prof. M.Tchuenté) «Simulation de la gestion de la faune sauvage », soutenance prévue fin 2000.

1.3.2 Participation à l'encadrement de thèse

- Raphael Mathevet « Usages des zones humides camarguaises : enjeux et dynamique des interactions Environnement/Usagers/Territoire » thèse de géographie de l'Université de Lyon (soutenance le 6 Septembre 2000)
- Sarah Feuillet thèse en hydrologie à l'Université de Montpellier (soutenance prévue fin 2000)
- Jarek Kozlack, (prof. Y. Demazeau) thèse en informatique de l'université de Cracovie (Pologne)

1.3.3 Encadrement de Dea :

- Rouchier J. : Le potlatch : une modélisation par les systèmes multi-agents, rapport de stage de DEA ETES, 42P. (en thèse)
- Duthoit Y. : stage de DEA Informatique de l'université Montpellier 2, 31p.
- Proton H.: stage de DEA Informatique de l'université Montpellier 2,42p. (en thèse)
- Lieurain M. : stage de DEA Informatique de l'université Montpellier 2, thèse proposée
- Dzeakou P. stage de DEA Informatique de l'université Montpellier 2 (en thèse)
- A. Bah, stage d'ingénieur de l'Ecole Polytechnique de Dakar puis DEA d'Informatique
- J.P Hillaire, stage d'ingénieur de l'ISIMA.

1.3.4 Jurys de thèse

- Bernardo Paz 1998 (Prof. A Pavé, Univ. Lyon 1). Simulations multi-agents de la communauté de Pumani (Bolivie)
- O. Barreteau 1998 (Prof C. Millier, Engref) voir ci –dessus.
- G. Hutzler 2000 (Prof J.P. Briot, Univ Paris 6) Du jardin des hasards au jardin des données : une approche artistique et multi-agent des interfaces homme / systèmes complexes.
- J. Rouchier 2000 (prof A. Pavé) voir ci dessus
- R. Mathevet 2000 (Prof M. Mériaudeau, Lyon 3)
- Y.-J. Shin 2000 (Prof M. Chau, Paris 7) Interactions trophiques et dynamique des populations dans les écosystèmes marins exploités. Approche modélisatrice individus-centrée.
- M.Martin Décembre 2000 , Université de Rennes , prévu comme rapporteur avec dispense d'HDR

1.3.5 Autres activités liées à la recherche.

- Membre du réseau AgentLink, réseau d'excellence européen sur les systèmes multi-agents,
- Membre du comité de rédaction de la revue de Géomatique (Hermès)
- Membre du Conseil Scientifique de la Mission Economie et Sociologie (Cirad)
- Membre de la commission CGRA1 (Commission chargée des Unités de Service) de l'Ird
- Participation au groupe Marcia du PRC-Intelligence Artificielle sur les systèmes multi-agents.
- Responsable par intérim pendant six mois du programme Ere du département Tera du Cirad.

1.4 Diffusion

1.4.1 Formations

- au DEA d'informatique de l'Université de Yaoundé (30h) (Université des Nations Unies)
- Organisation de la formation « Simulation des systèmes complexes » en français et en anglais (60h). Cette formation a eu lieu 6 fois en France, une fois en Thaïlande (Université de Chiang-Mai), une fois

en Afrique du Sud (Université de Prétoria). Elle est prévue pour la fin de l'année 2000 aux Philippines.

- Formations auprès du Ministère de la Coopération ou formations internes au Cirad Montpellier (1 semaine en co-organisation, 2 journées personnelles sur la modélisation)
- ICRA
- Ensam, au sein de l'option modélisation (12h)
- Master IAMM (18h par an)
- DEA ETES au sein de l'option modélisation (6h)
- DEA d'informatique de l'Université Montpellier 2 (2h)
- Engref Montpellier (1 semaine en co-organisation)
- Cours occasionnels à l'InaPG, à l'IAM, à l'EHESS, à l'ISIM

1.4.2 Séminaires, conférences invitées

- Depuis 1998 je co-anime avec S. Lardon du CNRS un séminaire sur le thème SMA spatialisés qui se tient 4-5 fois par an à Montpellier.
- J'ai co-organisé avec R. Lifran (Inra) un atelier de travail international sur le thème SMA et théorie des jeux, qui a duré 3 jours en Mars 2000 et qui comprenait une cinquantaine de chercheurs Européens. Les meilleurs articles de cette rencontre paraîtront en 2001 dans la revue JASSS dans un numéro spécial dont je serai le coéditeur.
- Séminaires invités sur le thème modélisation multi-agents de la gestion des ressources renouvelables.
 - Laboratoire d'Ingénierie des systèmes complexes, Cemagref
 - Université de Technologie de Compiègne
 - ENSA Rennes
 - Université de Florianopolis (Brésil)
 - Thailand Environmental Institute
 - CIFOR (centre international pour la foresterie, Indonésie)
 - Ecole des Hautes Etudes en Sciences sociales
 - Greqam (Groupe de recherche en économie quantitative d'Aix-Marseille)
- Présentations invitées en sessions plénières dans des conférences.
 - International Rangeland Congress, Australia 1999
 - IUFRO Malaysia 2000
 - International Society for Ecological Economics, Australia 2000

1.4.4 Logiciel

Depuis deux ans Cormas est distribué sur le site web du Cirad. Un manuel est fourni et des versions sont régulièrement mises à jour. Je co-anime avec C. Le Page un forum électronique.

1.5 Publications

Articles dans revues avec comités de lecture

Bousquet F., 1994: Distributed artificial intelligence and object-oriented modelling of a fishery, *Mathematical Computer Modelling*, vol 2018 : 97-107

Bousquet F., Morand P., Quensière J., Mullon C., Pavé A. 1993 : Simulating the interaction between a society and a renewable resource, *Journal of Biological Systems*, n°1 (1) : 199-214

Barreteau, O., Bousquet, F. 2000. SHADOC: a Multi-Agent Model to tackle viability of irrigated systems, *Annals of Operations Research* 94, pp 139-162

Bousquet F., Le Page C., Bakam I., Takforyan A. (2000, sous presse) A spatially explicit individual-based model of blue duikers population dynamics : multi-agent simulation of bushmeat hunting in an eastern cameroonian village, *Ecological Modelling*.

Rouchier J., Bousquet F., Requier-Desjardins M., Antona M. (2001) A multi-agent model for transhumance in North Cameroon, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol 25, pp ; 527-559.

Bonnefoy J.-L., Rouchier J., Bousquet F. (2000, sous presse) Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi-agents : patûre en forêt virtuelle, *L'espace Géographique*.

Bousquet F., Gautier D., 1998« Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches *spatiales* et *acteurs* », *CyberGéo*, <http://www.cybergeopresse.fr/modelis/bousquet/bousquet.htm>

Barreteau, O., Bousquet, F., 2000. Systèmes multi-agents et viabilité des systèmes irrigués, *Techniques et Sciences Informatiques*. 19 (7) 943-962

Soumis :

Conservation Ecology : Kam, S.P, Castella J.C., Hoan , Trebuil G., Bousquet Methodological Integration: Lessons from the Ecoregional Initiative for the Humid and Sub-Humid Tropics of Asia

Conservation Ecology : Lynam, Bousquet, le page, Barreteau, Chinembiri, Mombeshora Adapting science to adapting managers – spidergrams, belief models and multi-agent systems modelling

Ecological modelling : Le Page, Bousquet A Multi-agent simulation toolkit to model natural resources management based on dynamics at multiple scales

Agriculture, Ecosystem, Environment : Bousquet, Guizol, Antona, Ndikumandenge Ecological scales and use rights : the use of multi-agent systems

Chapitres de livres avec comité de lecture

Lardon, Bommel, Bousquet, Le page, Libourel, Lifran, Osty De la simulation de l'embroussaillage à un outil d'aide à la gestion de l'espace. JFIADSMA 2000 , Hermès

Barreteau, Bousquet 2000 Des systèmes irrigués virtuels aux systèmes irrigués réels : retour par les jeux de rôle. Lardon (ed) Hermes, à paraître fin 2000

Bousquet F. et Le Page C., Systèmes multi-agents et écosystèmes, Briot (ed), Hermès, à paraître fin 2000.

Rouchier J., Bousquet F., Barreteau O., Le Page C., Bonnefoy J.-L. 2000. Multi-agent modelling and renewable resources issues : the relevance of shared representations for interacting agents. MABS 2000, *Lecture Notes in Artificial Intelligence* 1979 : 181-198

Bonnefoy J.L., Le Page C., Rouchier J., Bousquet F. 2000 Modelling spatial practices and social representations of space using multi-agent systems, Application of simulation to social Science, Ballot et Weisbuch eds, Hermes.

- Bakam I., Kordon F., Le Page C., Bousquet F. 2000 Formalization of a spatialized multi-agent system using coloured Petri nets for the study of a hunting management system. *Lecture Notes in Computer systems* (sous presse).
- Bousquet F., Barreteau O., Le Page C., Mullon C., Weber J., 1999. An environmental modelling approach : the use of multi-agent simulations, *Advances in environmental modelling*, Blasco and Weill editors, Elsevier, p. 113-122.
- O. Barreteau et F. Bousquet, 1999. Jeux de rôles et validation de systèmes multi-agents. JFIADSMA'99. Editions Hermès.
- Rouchier, J., Bousquet F. 1998. Potlach and multi-agents systems, an analysis of structuring exchanges, Sichman, Conte and Gilbert (eds) *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation Lecture Notes in Artificial Intelligence*, volume 1534, pp. 61-79 December 1998 Berlin, Springer-Verlag.
- Antona, M., Bousquet, F., Le Page, C., Weber, J., Karsenty, A., Guizol, P., 1998. Economic theory and renewable resource management, Sichman, Conte and Gilbert (eds) *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pp. 111-124 volume 1534 December 1998 Berlin, Springer-Verlag.
- Bousquet F., Bakam I., Proton H., Le Page C., 1998« Cormas : common-pool resources and multi-agent systems », *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, vol. 1416, p. 826-838, Springer.
- Rouchier, J., Barreteau, O., Bousquet, F., Proton, H., 1997. Evolution and co-evolution of individuals and groups in environment. In: *Proceedings of the Third International Conference on Multi-Agent Systems*, éd. Y. Demazeau, pp. 254-260, IEEE Press.
- Bah Alassane, Canal Richard, d'Aquino Patrick, Bousquet François Les SMA génétiques pour l'étude de la mobilité pastorale en zone intertropicale sèche, *Systèmes multi-agents et gestion du territoire*, Ferrand (ed), Cemagref Editions.
- Lifran R., Le Page C., Bakam I., Bousquet F. Externalités de voisinage, communication entre agents et pareto optimalités - Etude théorique et par un SMA *Systèmes multi-agents et gestion du territoire*, Ferrand (ed), Cemagref Editions..
- Bakam Innocent, Bousquet F. Modèles multi-agents pour la gestion de ressources renouvelables : vers un couplage simulations et approches formelles de modélisation *Systèmes multi-agents et gestion du territoire*, Ferrand (ed), Cemagref Editions..
- Zunga Q., Vagnini Antoine, Le Page Christophe, Toure Ibra, Lieurain E., Bousquet François Coupler systèmes d'information géographique et systèmes multi-agents pour modéliser les dynamiques de transformation des paysages. Le cas des dynamiques foncières de la moyenne vallée du Zambèze (Zimbabwe) *Systèmes multi-agents et gestion du territoire*, Ferrand (ed), Cemagref Editions..
- Herimandimby V., Randriajona E., Barreteau Olivier, Bousquet François, Weber Jacques *Systèmes multi-agents et démarche patrimoniale : utilisation de jeux de rôle Systèmes multi-agents et gestion du territoire*, Ferrand (ed), Cemagref Editions..
- Lardon S., Baron C., Bommel P., Bousquet F., Le Page C., Lifran R., Monestiez P., Reitz P. Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires *Systèmes multi-agents et gestion du territoire*, Ferrand (ed), Cemagref Editions..
- Barreteau O., F. Bousquet et J. Weber (1997). Modes de gestion et viabilité de périmètres irrigués : questions de représentation. In: *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, coord. F. Blasco, pp. 153-159.Elsevier.
- Bousquet F., (1997) Usage des ressources renouvelables et modélisation des représentations. Une approche par les SMA. In: *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, coord. F. Blasco, pp.187-196.Elsevier.

Proton H., Bousquet F., Reitz P, 1997. Un outil pour observer l'organisation s'une société d'agents. Le cas d'une société d'agents chasseurs-agriculteurs. Actes du colloque JFIADSMA'97, *Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, Hermès.

Morand P., Bousquet F., Cambier C. 1995. Un modèle d'écologie des pêches. *Les recherches Françaises en évaluation quantitative et modélisation des ressources et des systèmes halieutiques*. Gascuel, Durand et Fonteneau eds, Orstom Editions.

Bousquet F., 1995: Les systèmes multi-agents et la modélisation de la pêche dans le delta central du Niger, remarques sur une expérimentation, *Table-ronde Questions sur la dynamique de l'exploitation halieutique*, ORSTOM/IFREMER, 6-8 septembre 1993, 21p.

Bousquet F., Morand P., Quensière J., Mullon C., 1994 Simulating fishermen society. *Simulating Societies*, Gilbert et Doran (eds), UCL press.

Morand P. et Bousquet F., 1994 Modélisation de la ressource. *La pêche dans le Delta Central du Niger*, J.Quensière ed. Karthala, pp. 267-283.

Bousquet F., Cambier C., 1990. Transfert d'échelle et univers multi-agents. *Seminfor 4*, Mullon (ed) Orstom Editions.

Colloques avec comité de lecture.

Bousquet F., D'Aquino P., Rouchier J., Requier-Desjardins M., Bah A., Canal R., e Page C. "Rangeland herd and herder mobility in dry intertropical zones: multi-agent systems and adaptation". Invited paper, VI International Rangeland Congress, Townsville, Australie, Juillet 1999

Kozlack J., Demazeau Y., Bousquet F. 1999 Multi-agent system to model the Fishbank play process, Proceedings of CEEMAS, Varsovie.

Bousquet F., Gautier D., Le Page C. "Resource management and scale transfer: the contribution of multi-agent systems". In: *Scaling methodologies in eco-regional approaches for natural resource management*", Colloque organisé à Ho Chi Minh ville, Viet Nam, du 22 au 24 juin 1998

Olivier Barreteau, François Bousquet : un système multi-agents représentant les modes d'organisation dans un système irrigué. Actes du colloque SFER : Irrigation et gestion collective de l'eau en France et dans le monde, Montpellier, 19-20 Novembre 1998.

Bousquet F., 1995: Resource-space, individuals and ecosystems : Emergences and représentations, *European Conference of Cognitive Science*, Saint-Malo, 4-7 avril 1995, 20 p

Bousquet F., 1996 : Usage des ressources renouvelables et modélisation des représentations : une approche par les systèmes multi-agents. *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement* Journées du Programme Environnement, Vie et Sociétés du CNRS- *session B*, Cité des Sciences et de l'Industrie Paris, janv. 96, pp 123-128.

Barreteau O., Bousquet F., Weber J., 1996 : Modes de gestion et viabilité de périmètres irrigués: questions de représentation, *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement* . Journées du Programme Environnement, Vie et Sociétés du CNRS- *session A*, Cité des Sciences et de l'Industrie Paris, janv. 96, pp 43-48.

Actes de colloques

Le Page C., Bousquet F., Takforyan A., Bakam I. "Simulations on virtual worlds: understanding the interactions between ecological and social dynamics". p. 286-290 in Actes du Colloque "Jardin Planétaire" organisé à Chambéry du 14 au 18 mars 1999

H. Proton, C.Ndikumagenge, F. Bousquet, Ph.Guizol, La modélisation multi-agent : un outil pour analyser les dynamiques de passage entre formations forestières et agroforestières à l'échelle d'une région. Actes du *colloque L'agroforesterie pour un développement Rural Durable*, Montpellier, 23-28 Juin 1997.

F. Bousquet, O. Barreteau, C. Mullon, J. Weber Modélisation d'Accompagnement : Systèmes Multi-Agents et Gestion des Ressources Renouvelables. Colloque International « *Quel environnement au*

XXI^{ème} siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie » Abbaye de Fontevraud 8-11 Septembre 1996

Bousquet F., Duthoit Y., Proton H., Lepage C., Weber J., 1996: Tragedy of the commons, game theory and spatial simulation of complex systems, *Colloque Ecological Economics*, Saint-Quentin en Yvelines, 23-25 mai 1996, vo, 8p.

F.Bousquet, O.Barreteau, J.Weber. Systèmes multi-agents et couplage des modèles biophysiques et socio-économiques, in: *Couplages des modèles biophysiques et des modèles économiques*, PP 91- 98, Cirad Editions, 1996.

Bousquet F., 1995 : Simulating the management of renewable resources with multi-agents systems, Fifth Annual Common Property Conference « Reinventing the commons », IASCP, Bodod, 24-28 Mai, 12 P.g

Bousquet F., Cambier C., 1994 : Simulating the interaction between ecological dynamics and the decision-making process, *Congrès Mondial de Sociologie*, Bielefeld, avril 1994, 23 p.

Bousquet F., Antona M., Weber J., 1994 : Simulation et gestion des ressources renouvelables, *Colloque Recherche-Système en Agriculture et Développement Durable*, CIRAD/INRA Montpellier Novembre 1994, 19 p.

Bousquet F., Weber J., Antona M. , 1994 : Control nature or play with it ? Multi-agent modelling and renewable resources management, *IIIème Conférence de l'ISE, International Society for Ecological Economics "Down to earth"*, San-José Costa Rica, octobre 1994, 17 p.

Bousquet F., Morand P., Cambier C.. Apport des simulations à la compréhension du fonctionnement du Delta central du Niger *Communication aux journées du programme Environnement du CNRS*, janvier 1993.

Cambier C., Bousquet F., Dansoko D., Un univers multi-agents pour la modélisation de la pêche dans le Delta Central du Niger » *CARI Premier colloque Africain sur la recherche en Informatique*, Yaoundé, 1992.

Bousquet F., Cambier C., IAD et perspectives d'un modèle pluridisciplinaire, Actes de l'atelier IER-Orstom, Bamako, Mali, 1990.

Vulgarisation

Bousquet F., 1994: Simulation multi-agents d'un écosystème anthropisé, *Annales des Ponts & Chaussées*, 33 p.

Bousquet F., 1993: L'intelligence artificielle au service des pêches artisanales, *ORSTOM Actualités* 40 : 8-12.

PARTIE 2 :

1. INTRODUCTION GENERALE

L'exercice de l'habilitation demande de présenter l'évolution des recherches entreprises depuis le doctorat. Je reviendrai cependant brièvement sur la période passée entre 1988-1993 à l'Orstom (aujourd'hui IRD) car c'est au cours de cette phase, achevée par la soutenance de ma thèse, que la majorité des questions abordées aujourd'hui a été posée. Par la suite, au sein de l'équipe Green du Cirad, j'ai eu la chance de pouvoir élargir mon domaine de compréhension dans différentes disciplines telles que les sciences sociales ou les sciences agronomiques et de pouvoir approfondir mes connaissances dans le domaine de la simulation informatique. Cet élargissement résulte d'un processus d'adaptation à un environnement de recherche ; il s'est réalisé et matérialisé par l'élaboration de plusieurs modèles et par l'encadrement de différents doctorants ou DEA.

L'appartenance à une équipe pluridisciplinaire majoritairement constituée de chercheurs en sciences sociales m'a donné l'occasion d'acquérir quelques références pour comprendre différents points de vue en économie, voire en anthropologie ; la quête d'un lien avec les recherches développées en informatique m'a entraîné vers des lisières inter-disciplinaires telles que les sciences cognitives. L'appartenance au Cirad, majoritairement constitué de chercheurs ou d'ingénieurs agronomes, m'a donné l'occasion d'approcher quelques modèles qui supportent la pensée agronomique et l'intervention dans un processus de développement. Pendant ces quelques années, j'ai conçu et réalisé des modèles et j'ai assuré des formations. Cela m'a permis de mieux maîtriser le domaine de la modélisation et celui de la simulation informatique, dans ses concepts, dans son instrumentation et dans son usage. A travers le filtre très particulier des SMA (Systèmes Multi-Agents) j'ai parfois pu rentrer dans les bases des raisonnements de quelques disciplines comme l'économie ou la géographie.

Après avoir restitué les origines (chapitre 1), je présenterai tout d'abord mon environnement de recherche et ce que j'en ai retiré pour me construire un point de vue (chapitre 2) avant de décrire mes réalisations (chapitre 3). Je terminerai par le projet de recherche que je compte poursuivre dans le futur (chapitre 4).

2 RECHERCHES MENEES AVANT 1994

Au mois de Juin 1988 je commençais un séjour à Bamako au sein de l'équipe Delta Central du Niger de l'Orstom et de l'IER qui allait durer environ deux ans. La création de cette équipe fut motivée par la situation de crise alors invoquée par les pêcheurs et les responsables politiques Maliens. La démarche scientifique, résolument pluridisciplinaire, reflétait l'évolution de la pensée sur la gestion des ressources renouvelables qui prenait progressivement en compte son objet d'étude dans sa complexité. Les chercheurs délaissaient l'hégémonique concept d'équilibre pour s'intéresser à la dynamique des interactions sociétés-ressources. Après six ans de recherches, l'équipe composée de biologistes, écologistes, halieutes, démographes, anthropologues, économistes a produit un livre de restitution des connaissances acquises [Quensière, 1994]. Le chapitre de conclusion du livre qui vise à donner un point de vue totalisant procède par les deux méthodes que Godard [Godard, 1992] tient pour concurrentes dans l'exercice de la synthèse : la systémique et l'histoire. La recherche que j'ai débutée en 1989 intervenait au moment où l'équipe s'interrogeait sur les articulations entre connaissances. L'objectif général était d'apporter des éléments de réponse à la question suivante : la simulation permet-elle de tisser des liens entre différents points de vue ? Cette question générale se déclinait alors en trois parties.

2.1 Comment représenter la complexité du monde observé et comment représenter les différents points de vue sur le monde observé ?

Le choix de base était de s'orienter vers une recherche sur la modélisation des comportements et des représentations afin de pouvoir simuler des interactions. Comportements et interactions : ce choix, au sein de cette équipe, me faisait donc entrer à l'époque dans la sphère des sciences de la complexité. Représentations¹ et points de vue : mon rôle était de modéliser différentes représentations des acteurs du monde étudié (un pêcheur bozo ou somono²) et différents points de vue disciplinaires (de l'halieute et de l'anthropologue). Cette prise en compte des représentations fut pour moi la condition d'une réussite dans la relation interdisciplinaire. Le postulat de la multiplicité des représentations entrouvrit alors la porte des recherches en sciences sociales et en sciences cognitives.

2.2 Quels peuvent être les apports méthodologiques des modélisations informatiques proposées par le domaine de l'intelligence Artificielle ?

Le choix de l'Intelligence Artificielle, dont je n'avais alors qu'une vue partielle sur les systèmes à base de connaissances fut tout d'abord motivé par la possibilité de représenter des connaissances qualitatives sur le fonctionnement du système. La découverte des recherches sur les systèmes multi-agents à travers les travaux de J.Ferber et différentes lectures [Gasser and Bond, 1988] prirent alors

¹ La polysémie du mot représentation [Ladrière, 1990] rend son utilisation difficile dans le cadre de mes activités. J'utiliserai le mot, au sens des anthropologues [Friedberg, 1992], pour désigner les représentations du monde (individuelles, collectives, sociales) que se font les acteurs, les chercheurs ; je le substituerai alors parfois par le « point de vue », bien que la vue, les sens, ne soient pas plus impliqués que l'imaginaire ou l'intellect. Je l'utiliserai aussi au sens des modélisateurs, des informaticiens [Minsky, 1975; Zeigler, 1987] qui cherchent à représenter les connaissances ; je le substituerai alors parfois par modélisation, formalisation. Enfin, l'objet modèle étant réalisé, je chercherai à l'utiliser à des fins de représentations (re-présentation) de situations. Un résumé de mon travail : je représente (formalise) des représentations (points de vue) à des fins de représentation (médiation).

² Les bozos et somonos sont des groupes sociaux qui se différencient par leur origine ethnique et leurs activités.

la forme d'une révélation, tant cette modélisation offrait un cadre novateur et adéquat. Les agents et les systèmes multi-agents étaient alors ainsi présentés [Ferber, 1988]

1. On appelle agent une entité physique ou virtuelle,
2. qui est capable d'agir dans un environnement,
3. qui peut communiquer directement avec d'autres agents,
4. qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
5. qui possède des ressources propres,
6. qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,
7. qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),
8. qui possède des compétences et offre des services,
9. qui peut éventuellement se reproduire,
10. dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

Un système multi agent est composé de :

1. Un ensemble d'agents agissant et communiquant
2. Un mode d'organisation et de coordination
3. Un point de vue de l'observateur
4. Un environnement
5. Des objets passifs
6. Des agents
7. Un ensemble d'interactions
8. Des opérateurs pour la perception, la communication, la production, la consommation et la transformation de ces objets
9. Des opérateurs pour la mise à jour de l'environnement

C'est vers cette méthode que je me suis tourné. En compagnie de C.Cambier qui effectuait alors sa thèse en informatique au sein du Laboratoire d'Informatique Appliqué de l'Orstom dirigé par C. Mullon, nous avons donc développé des outils. On peut diviser les programmes que nous avons écrits en deux parties : une architecture générale de type blackboard, inspirée des travaux du CRIN [Laasri, 1989], et une implémentation d'un modèle de simulation sur cette architecture que nous appelâmes SimDelta. La connaissance était divisée en deux parties ; les spécialistes représentaient différents points de vue disciplinaires tandis que la base partagée représentait le monde artificiel observé par les spécialistes. Ce monde artificiel était représenté par différents agents qui avaient une certaine autonomie. Activés par divers événements de la base partagée, les spécialistes transformaient le monde. En ce qui concerne l'implémentation des agents de la base partagée, nous avons représenté la dynamique à l'aide de trois types d'agents : les poissons ou plus exactement les groupes³ de poissons, les pêcheurs et l'espace.

³ Le groupe de poisson est une partie de cohorte localisée. Au cours de leur histoire, les membres d'une cohorte peuvent être amenés à se séparer.

2.2.1 Echelles et niveaux d'organisation

Nous avons choisi de représenter les poissons à l'échelle du groupe de poissons qui se divisaient puis se rassemblaient dans les différents milieux. Cela permettait de mettre la dynamique de la ressource en concordance avec la représentation spatiale et temporelle des autres composantes du modèle. Ayant choisi de représenter des pêcheurs, des milieux à l'échelle de la mare, de la portion de fleuve ou de la plaine inondable il nous fallait simuler des millions de poissons.

2.2.2 Modélisation des représentations.

En ce qui concerne les pêcheurs nous avons choisi de les doter d'une représentation de leur milieu, en créant des objets mentaux appelés technotopes, ce qui était une réification d'un concept introduit par un anthropologue C. Fay [Fay, 1989] pour conceptualiser la représentation à la fois écologique, technique et temporelle que le pêcheur se fait de son activité.

2.2.3 L'espace comme entité de contrôle de l'interaction hommes-ressources.

En ce qui concerne l'espace, nous avons créé des entités biotopes qui constituaient des supports pour les différents agents et qui peu à peu sont devenus des éléments de contrôle de l'interaction hommes-ressources. Ainsi un poisson prédateur adressait une requête au biotope pour connaître le nombre de proies, l'agent pêcheur adressait une requête au biotope sous forme de l'utilisation d'un engin et le biotope collectait la ressource et la redistribuait aux agents pêcheurs.

2.3 Comment utiliser les simulations dans le domaine des interactions hommes-ressources?

La modélisation telle que je la perçois est un processus que je qualifierai plus tard de processus d'accompagnement. Les avancées conceptuelles, les résultats des simulations ont accompagné un processus collectif. Dans ce cadre de catalyse interdisciplinaire il est difficile *a posteriori* de quantifier l'apport de la seule modélisation. Qui entraîne qui dans un processus d'accompagnement ? Le travail de réflexion sur l'usage du modèle SimDelta a continué après ma thèse grâce aux actions de P. Morand. Dans un récent article à paraître dans l'ouvrage de l'action Orstom DURR (Dynamique et Usage des Ressources Renouvelables) les apports sont considérés à trois niveaux :

1. une nouvelle déclinaison de la problématique de gestion « *en permettant de faire apparaître deux niveaux de gestion bien différents: le premier concerne les interactions sociales qui régissent et affectent le déroulement de la campagne annuel de pêche, tandis que le second renvoie à l'aménagement ou à la conservation physique de l'écosystème Delta dans le long terme* »,
2. un outil de communication “pour amener certains gestionnaires à s'interroger sur la validité des métaphores moralisatrices dont ils aiment souvent se servir pour justifier leurs inclinations coercitives - inclinations qui ont tendance, heureusement, à reculer depuis quelques années”,
3. une aide pour concevoir un outil d'aide à la gestion d'un observatoire en aidant à identifier les niveaux critiques de gestion sur lesquels faire porter l'observation.

3. MODELISATION DE LA GESTION DES RESSOURCES RENEUVELABLES : PARCOURS ET APPROCHES

Cette période passée à l'Orstom s'achevait donc avec un certain nombre de questionnements sur les méthodes et les usages de la modélisation dans les sciences de l'environnement. J'eus alors la grande chance d'intégrer l'équipe Green (Gestion des ressources renouvelables, environnement) du Cirad nouvellement créée par J.Weber. S'ouvraient de nouveaux champs pour préciser les interrogations générées au cours de ma thèse et pour solidifier les fondements scientifiques de ma recherche. Faire partie de cette équipe m'a permis à la fois de participer à la matérialisation d'une démarche à partir des principes proposés par J.Weber, mais aussi d'enraciner cette construction sur différents corpus théoriques qui développaient chacun leurs méthodes de modélisation.

Le choix de l'équipe était de travailler sur les ressources naturelles renouvelables plutôt que les ressources naturelles pour lesquelles l'homme contrôle en général le renouvellement. L'écologie est donc importante pour comprendre la dynamique de la ressource mais elle n'est pas suffisante. Pas de dynamique des ressources soumises à une perturbation anthropique, ni de dynamique économique soumise à une variabilité naturelle : il s'agit d'un problème d'interactions entre dynamiques naturelles et dynamiques sociales. Le postulat de l'équipe était que les problèmes de gestion des ressources renouvelables peuvent être étudiés dans un cadre général, quelles que soient les ressources prises en compte, forêt, parcours, gibier, eau... S'éloignant du concept, certes caricatural mais néanmoins prégnant, d'équilibre entre une offre de ressource et une demande anthropique, nous nous sommes orientés vers l'étude d'une co-viabilité [Aubin, 1993] à long terme des écosystèmes et des modes de vie qu'ils supportent [Weber, 1995], adoptant en cela la posture de la connivence plutôt que celle de l'affrontement [Henry, 1990]. En conséquence l'équipe abordait :

- La ressource à travers une écologie des ressources qui cherche à comprendre les écosystèmes dans leur complexité. Les ressources renouvelables montrent souvent une grande variabilité que ce soit dans leur abondance et dans leur diversité. Les processus d'interactions entre individus, populations et en relation avec le milieu dans lequel elles se trouvent, expliquent souvent la répartition dans l'espace des ressources. La question est de définir une échelle d'appréhension et d'identifier les processus d'interactions qui permettent de comprendre la dynamique.
- Les interactions société-ressources à travers le concept d'appropriation c'est à dire d'accès et de partage de la ou des ressources. Les modes d'appropriation comportent cinq niveaux [Weber and Bailly, 1993] : (i) les représentations ou perceptions, (ii) les usages alternatifs des ressources, (iii) les modalités d'accès ou de contrôle de l'accès aux ressources, (iv) les modalités de transfert des ressources, ou des fruits tirés de ces ressources, (v) les modalités de répartition ou de partage des ressources et des fruits tirés de ces ressources. L'analyse des modes d'appropriation débouche sur la question des institutions et des modes de gestion. Il existe une très grande variété de modes d'appropriation qui caractérisent autant de formes de relations société-nature.
- Les dynamiques sociales à travers le concept de processus de décision. Défini comme un processus d'interactions entre des acteurs individuels et/ou collectifs ayant des représentations et des poids différents, ce concept donne à la fois les éléments pour comprendre la dynamique du système étudié et pose les préceptes d'une relation entre la recherche et les processus sociaux dans lesquels elle s'insère. La décision est posée comme un processus d'interaction qui peut se cristalliser par un choix collectif sur l'accès aux ressources ou sur leurs usages. En considérant le long terme, les adaptations environnementales aux actions sociales conduiront les sociétés à s'adapter, elles aussi. La participation de la recherche s'insère dans ce processus d'interaction : les acteurs définissent des choix sur le patrimoine, puis la recherche amène les éléments de la faisabilité des divers scénarios [Mermet, 1993] [Ollagnon, 1989].

Interdisciplinaire, cette équipe comprenait des chercheurs en géographie, agronomie, modélisation, économie et anthropologie. Les thèmes de recherche présentés ci-dessus m'ont conduit à approfondir

quelques questions par des lectures et des participations à des rencontres scientifiques dans le domaine des sciences sociales et de la gestion des ressources.

La participation à ces recherches passait, pour moi, par des opérations de modélisation. Il existe plusieurs démarches de modélisation correspondant à différentes approches. Dans le domaine de la gestion des ressources on voit ainsi les chercheurs utiliser des formalismes qui correspondent à différents points de vue. Dans les chapitres suivants je passe en revue rapidement ces quelques points de vue et les outils qu'ils utilisent. La recherche que j'ai menée se place dans ce contexte général qu'il me paraît important de présenter, car j'ai eu à m'inspirer de ces travaux ou au contraire à poser mes travaux comme une alternative. Il ne s'agit pas seulement d'une revue bibliographique. Dans tous les domaines présentés, j'ai eu l'occasion de discuter avec des chercheurs, de participer à des congrès ou de publier dans des ouvrages communs.

3.1 Les communautés de recherche sur la gestion des ressources renouvelables et les modélisations proposées

Dans le cadre des recherches environnementales plusieurs disciplines portent des points de vue différents sur la gestion des ressources renouvelables. Le premier point de vue est celui de l'écologie, le second appartient aux sciences sociales. Par ailleurs les recherches en agronomie sont aussi porteuses de représentations. Je tenais enfin à tirer quelques enseignements des rencontres et lectures que j'ai pu effectuer dans le domaine des sciences cognitives.

3.1.1 Ecologie

Le domaine de l'écologie a vécu ces dernières années quelques évolutions. Frontier [Frontier and Pichod-Viale, 1993] rappelle que le terme écologie a été créé par Hackel en 1866 pour désigner la science de l'habitat (du grec oikos = maison). Contrairement à l'éthologie qui ne s'intéresse qu'au comportement, l'écologie pose donc la relation au milieu comme constitutive de la discipline. Comme les organismes, populations et peuplements modifient le milieu, on parlera de l'écosystème, système d'interactions entre l'ensemble des populations et de celles-ci avec leur milieu. Se définissant ainsi, l'écologie se place dans le cadre de la théorie générale des systèmes que ses chantres [Von Bertalanffy, 1968; Morin, 1977; Le Moigne, 1989] présentent comme une théorie de l'interaction entre des parties d'où émergent des propriétés : le tout est plus que la somme des parties.

Dans un essai sur la complexité des écosystèmes, Holling [Holling, 1973; Holling, 1987] qui est un des écologues les plus cités dans le domaine de la gestion des ressources, définit trois concepts qui ont dominé la perception de la causalité dans les systèmes écologiques, avec pour conséquence de définir les éléments d'une gestion des écosystèmes. Le premier est centré sur la notion d'équilibre (la nature est constante), la deuxième considère plusieurs états de stabilité (*nature engineered* ou *nature resilient*). Cette deuxième perception donne de l'importance aux dynamiques causées par la variabilité, par des événements qui apparaissent à l'échelle dite micro. Plutôt qu'un seul équilibre, le système est caractérisé par un ensemble d'attracteurs. Le problème de gestion est de comprendre comment la variabilité endogène au système peut être contrôlée pour amener le système vers les attracteurs désirés. Le troisième point de vue est celui du changement organisationnel (*nature evolving*). Ce point de vue s'intéresse à la connectivité des éléments du système, à leur organisation sur plusieurs échelles. Une référence théorique des écologues sur ce dernier point de vue est la théorie de la hiérarchie, introduite par Allen et Starr [Allen and Starr, 1982] comme une théorie de l'observation de systèmes complexes. Ces systèmes complexes sont présentés comme les intermédiaires entre les systèmes à grands nombres pour lesquels une approche statistique est adaptée et les systèmes à petits nombres pour lesquels les approches mathématiques de type équations différentielles qui manipulent la dynamique de quelques populations sont pertinentes. Pour les auteurs les systèmes intermédiaires restent opaques à moins qu'on les modélise (observe) en tant qu'organisations hiérarchiques [Auger, 1993], [Allen and Starr, 1982]. Une organisation hiérarchique ne doit pas être vue comme un système de poupées gigognes mais plutôt comme des hiérarchies dynamiques enchevêtrées. Dans un récent ouvrage, Allen et Hoekstra [Allen and Hokstra, 1992] expliquent que la compréhension d'un

phénomène complexe en écologie implique de comprendre des interactions entre les différents niveaux : les organismes, les populations, les communautés, les écosystèmes, les paysages et les biomes. « *A part from organism and biosphere levels, there is plenty of room for entities from almost any type of ecological system to be contained within an entity belonging to any other class of the system.* » Les auteurs donnent l'exemple du phénomène de la rumination qui fait intervenir un écosystème sous le contrôle d'un organisme (le ruminant).

Pour les formalismes de modélisation, l'écologie, en s'interfécondant avec la systémique a adopté les outils des mathématiciens qui avaient fondé cette théorie : la dynamique des systèmes. Celle-ci décrit un système composé de compartiments ou modules reliés entre eux par des flux et des contrôles. Des logiciels très conviviaux tels Stella, Vensim, Simulink ou d'autres sont aujourd'hui utilisés pour cela. Pratiquement, dans la modélisation systémique, les compartiments sont utilisés pour représenter des stocks, des agrégats et l'on représente entre eux des flux de matière, d'énergie ou d'information. Le corpus théorique et les outils utilisés par cette démarche amènent à considérer les propriétés d'équilibre d'un système. Pour Uchmanski [Uchmanski and Grimm, 1996] cette perception (*balance of nature*) représente les systèmes écologiques par des états stables définis comme des attracteurs que l'on cherchera à identifier par la dynamique des systèmes. On retrouve ici les principes de base de la modélisation de la gestion des ressources avec un point de vue écologique. Le principe est d'étudier la production d'un système écologique pour ainsi définir les prélèvements acceptables, c'est-à-dire que le compartiment écologique peut soutenir, provenant de la sphère économique et sociale. De cette modélisation naît le concept de soutenabilité.

La vision systémique qui s'était en partie construite contre une approche réductionniste est aujourd'hui débattue par une écologie qui pose l'individu comme élément central et qui s'intéresse aux comportements et aux interactions entre ces individus. Cette nouvelle approche va développer son propre corps d'outils et de méthodes : les modèles basés sur l'individu (MBI) plus connus sous le terme anglo-saxon (IBM). Suivant les chercheurs et les applications ces modèles seront utilisés dans le cadre de la deuxième ou de la troisième perception présentée par Holling. Dans un premier temps et pour nombre de chercheurs, l'introduction des niveaux individuels dans les modèles va répondre à une demande de prise en compte de la variabilité entre les individus. L'agrégation de tous les individus sous forme de population ou de cohorte était considérée comme trop réductrice. La représentation des individus, plus exactement de la variabilité entre individus, fut introduite afin de préserver une hétérogénéité considérée comme primordiale pour l'étude du système. Ceci ne remettait pas en cause les principes d'une approche cybernétique de la réalité dont les thèmes majeurs sont l'équilibre ou les dynamiques de rétablissement d'équilibre (résilience). Dans un second temps et pour d'autres auteurs, l'entrée de l'individu dans l'organisation entraîne une démarcation fondamentale par rapport au point de vue cybernétique. Car l'individu est doté de caractéristiques uniques (référence à la génétique) [Judson, 1994] et il est porteur d'une histoire singulière. Ces individus interagissent et forment des organisations complexes qui évoluent. En conséquence, les états du système ne sont pas définissables *a priori*. Le chercheur s'intéresse alors aux changements organisationnels.

Au long de ce texte, adoptant cette dernière posture, je tente d'argumenter que ce type de modélisation basée sur les comportements et les interactions, pour peu qu'elle s'ouvre à d'autres niveaux d'organisation que les individus, constitue la méthode la plus appropriée pour aborder les problèmes de gestion des ressources suivant le troisième point de vue de Holling (*nature evolving*).

3.1.2 Sciences économiques et sociales

Plusieurs axes de recherche s'intéressent à la gestion des ressources naturelles et renouvelables. On en cite ici deux qui se sont structurés autour de deux associations de recherches, l'International Society of Ecological Economics (ISEE) et l'International Association for the Study of Common Property (IASCP) et se sont orientées, pour la première sur la recherche d'une formalisation intégratrice du système écologique dans la pensée économique, et pour la seconde vers la recherche sur la gestion des biens communs et plus particulièrement les ressources naturelles .

Ecological economics La première communauté structurante est celle de l'économie des ressources naturelles et de l'environnement. Celle-ci propose un ensemble de théories et de concepts qui

s'instrumentalise à travers des outils. En particulier, l'économie va fournir une modélisation de l'exploitation des ressources renouvelables destinée à en contrôler la soutenabilité grâce à l'emploi d'outils économiques de gestion comme les taxes, les quotas, les licences, etc. Cette modélisation, dite bio-économique, s'appuie sur des formalismes mathématiques qu'on trouve présentés de façon complète dans le livre de Colin Clark [Clark, 1976].

Par ailleurs le domaine de l'économie de l'environnement s'appuie sur une représentation circulaire de l'interaction hommes-nature. L'environnement offre des services à la société, en retour les hommes transforment l'environnement, ce qui constitue une externalité⁴. Tant pour les services que pour les externalités, l'économie propose des méthodes pour une évaluation monétaire et donne ainsi les éléments pour un arbitrage entre différents usages possibles d'un écosystème, voire d'un paysage. Les modélisations systémiques qui représentent la dynamique à travers des relations stocks-flux ont été très utilisées car elles permettent de standardiser les valeurs écologiques et économiques et ainsi les intégrer dans un système de flux. Ces modélisations vont d'ailleurs être initiées et vont diffuser à partir de chercheurs qui proviennent de la communauté écologique. C'est ainsi que Costanza [Costanza, Wainger et al., 1993], s'inspirant profondément des travaux de l'écologiste Odum est actuellement le principal représentant de la modélisation dans ce courant de recherche [Odum, 1957]. Ces méthodes proposent un cadre intégrateur d'où n'est pas absente la question de la valorisation. La recherche d'une unité commune aux sous-systèmes écologiques et sociaux est effectuée par le truchement d'une transformité énergétique et/ou monétaire. Comme aboutissement de cette pensée intégrative, on peut citer l'article de Costanza dans Nature [Costanza, Arge et al., 1997] qui propose une valeur à la biosphère. Au-delà du débat fondamental sur la pertinence des méthodes employées pour transformer tout type de composant en énergie (Joules), se pose la question des processus de décision auxquels cette modélisation participe. En effet, il n'est qu'un pas pour passer de l'énergie à la valeur monétaire, et la modélisation devient alors un outil très efficace pour donner des valeurs aux différentes possibilités envisagées par un décideur.

De nombreuses critiques ayant été formulées en raison de l'emploi normatif de ces méthodes, celles-ci sont aujourd'hui plutôt présentées dans une logique de négociation entre les acteurs par leur pouvoir d'explicitation des représentations. Pour cela je pense néanmoins que les outils utilisés souffrent de lacunes. La modélisation proposée cherche à représenter un lien entre la sphère naturelle et la sphère sociale. La sphère sociale est bien lisse : peu d'hétérogénéité, pas de prise en compte des représentations ni des réseaux dans lesquels s'insèrent les échanges. "*Dans la mesure où le système est conçu comme un ordre cybernétique, comme cela est fréquent dans les études écologiques, inclure la culture dans une science unifiée entraînerait également le déplacement de la propriété de l'esprit de l'humanité à l'écosystème*" [Sahlins, 1980].

Les biens communs. L'organisation d'une communauté sur la gestion des biens communs a eu lieu dans la deuxième moitié des années 80. Il faut cependant en trouver les origines bien plus loin dans le temps. Sans mobiliser l'histoire de la pensée économique qui est pourtant sous-jacente au débat, la publication en 1968 de la tragédie des communs par G. Hardin [Hardin, 1968] est considérée comme un acte fondateur. En effet, l'auteur exprime alors une pensée selon laquelle une ressource commune soumise à des agents économiques rationnels est condamnée à la disparition par surexploitation. Il est supposé que lorsque les ressources sont en accès libre, c'est à dire en l'absence de limitation et de contrôle de l'accès et qu'il s'agit de ressources ayant un marché, se met en place une dynamique de dilapidation des ressources, de surexploitation et de surinvestissement. Le problème étant ainsi posé, les solutions qui en résultent sont la privatisation ou la mise en place d'une autorité centrale chargée de gérer l'accès aux ressources, c'est à dire de le contrôler en utilisant à cet effet des outils de gestion économique. S'opposant à ce courant de pensée sur la gestion privative des auteurs tels Ostrom [Ostrom, 1990], Berkes [Berkes, Feeny et al., 1989], Stevenson [Stevenson, 1991] et bien

⁴ Même si plusieurs auteurs comme Arrow disent qu'il n'existe pas de définition claire du concept d'externalité, après consultation de mes collègues économistes voici la proposition de Pigou [Pigou, 1920] « Action d'un agent économique procurant des avantages, ou des inconvénients, à d'autres agents économiques ne l'ayant pas choisi, sans que ceux-ci ne reçoivent ni ne payent de compensation à l'agent qui est à l'origine de l'action »

d'autres ont présenté les fondements institutionnaliste (cf §5.2) qui met l'accent sur les mécanismes de régulation, officiels ou non, qui gouvernent la viabilité des écosystèmes⁵. Gouverner fait référence aux représentations des acteurs et se fonde sur un principe de négociation locale. Constatant le manque d'opérationnalité d'une approche locale en raison de l'interférence avec des acteurs extérieurs ou de contraintes provenant d'échelles différentes, l'évolution actuelle de la recherche tend vers le concept de co-management. Il s'agit d'articuler les processus locaux et globaux de gestion des ressources.

Différentes formes de modélisation sont utilisées dans ce champ de recherche. Les travaux qui font autorité sur le thème se réfèrent à la méthode de la théorie des jeux. En effet, dans le cadre dressé par Hardin ci-dessus, les modélisateurs vont s'intéresser à l'interaction entre des stratégies d'acteurs. Etant donnée une ressource ou un bien commun qu'une collectivité de joueurs va utiliser quelles vont être les stratégies optimales pour chaque joueur, dans un contexte de coopération ou de non coopération ? C'est ainsi que beaucoup de travaux ont été effectués sur le jeu du dilemme du prisonnier censé représenter le problème de gestion d'un bien commun. La rationalité individuelle conduit les joueurs à adopter des stratégies de destruction de la ressource alors que la stratégie de coopération serait collectivement meilleure et préserverait la ressource. On trouvera dans la thèse de Romagny [Romagny, 1996], toute l'histoire de la pensée sur les biens communs et les formalisations par la théorie des jeux.

Citons simplement ici les travaux de Ostrom, guide de cette communauté. Quatre ans après son fameux livre « *Governing the commons* » E. Ostrom et ses co-auteurs publient un livre intitulé « *Rules, Games and Common-Pool Resources* » [Ostrom, Gardner et al., 1994]. Dans une large partie de ce livre la théorie des jeux est utilisée pour analyser des situations de gestion de CPR (Common-Pool Resources). Les conclusions tirées de cette analyse sont comparées avec des résultats expérimentaux. En se référant à la théorie des jeux non coopérative, le but est d'exprimer le comportement maximisateur à l'équilibre de Nash. Différents types de jeux sont analysés pour prendre en compte entre autres les externalités, le contrôle social, l'appropriation. Dans chaque cas un changement dans la structure du jeu donne des équilibres différents de ceux prévus par un pur raisonnement stratégique. Pour les auteurs la structure des jeux sert comme un premier pas dans l'organisation des données sur les comportements de gestion des ressources. Ces classifications servent de référence pour des analyses sur les stratégies et organisations observées dans des cas de gestion de pêcheries, bassins versants, forêts. L'approche méthodologique est de lier la théorie des jeux, l'analyse institutionnelle et les expériences en laboratoire.

Outre la modélisation par la théorie des jeux, on introduit ici des travaux qui font appel à des expériences en laboratoire sur des comportements. Ce type de travaux rejoint des recherches menées en économie expérimentale. Plus particulièrement, dans le domaine de l'environnement, des recherches sont menées sous l'égide de Mermet [Mermet, 1993] sur les simulations de politiques à partir de jeux de rôles. La démarche est de mettre des joueurs en position de gestion de ressources soit pour examiner leur comportement pour voir s'il correspond à la théorie économique (c'est alors le même principe que l'économie expérimentale) soit pour placer des acteurs en situation de négociation sur une ressource afin de favoriser une prise de décision qui prenne en compte les diverses représentations.

3.1.3 Sciences agronomiques

Bien qu'étant recruté dans un institut de recherche agronomique, je n'ai que très peu approfondi les méthodes de modélisation classiquement utilisées dans cette discipline. Les quelques remarques ci-dessus sont donc superficielles, mais elles reflètent l'état de ma connaissance et ma perception. Il semble que l'approche reste assez dichotomique. Il y a d'une part les modèles dits bio-physiques qui formalisent la dynamique de la ressource. Généralement, le produit attendu de cette modélisation est une évaluation de la production. Il y a d'autre part une modélisation de la décision de l'exploitant agricole. Cette décision, qui concerne l'assolement, le travail ou d'autres facteurs économiques est

⁵ C'est dans ce cadre que l'équipe Green proposait le thème original de mode d'appropriation explicité au dessus

modélisé sous la forme d'un problème de recherche de solutions sous contraintes. Le formalisme le plus souvent utilisé est la programmation linéaire.

Les évolutions des paradigmes au cours des années quatre-vingts qui poussaient les chercheurs à aborder un problème de gestion de ressources à la fois dans ses dimensions économiques et biophysiques ont conduit les chercheurs à proposer des formes de couplage de modèles. Les modèles biophysiques et économiques échangent les données dont ils ont besoin. Notre recherche aborde cette confrontation de processus d'une autre façon : pour une question donnée il s'agit de construire le modèle pertinent. Ce modèle formalise les dynamiques à différentes échelles spatiales, à différents niveaux d'organisation, sur plusieurs pas de temps. Ces dimensions sont définies en construisant conjointement le modèle de ressource et de société. La démarche que nous proposons est donc résolument constructiviste.

Il est un autre type de modèle important dans le domaine agronomique: il s'agit des modèles de décision basés sur l'Intelligence Artificielle construits par l'Inra Grignon et plus précisément par [Attonaty, Chatelin et al., 1990]. Leur recherche est basée sur le concept du modèle d'action, des décisions stratégiques et des ajustements tactiques. Le modèle d'action est une proposition de [Sébillotte and Soler, 1990] qui a donc été instrumentalisé par les chercheurs ci-dessus cités. Ces chercheurs que j'ai rencontrés à la fin de ma thèse ont développé des outils basés sur des principes de l'Intelligence Artificielle pour la gestion d'une exploitation et de ses chantiers en fonction des aléas climatiques. Surtout, ces chercheurs, en compagnie de P.Y. le Gal sur des problèmes tropicaux, ont développé une méthodologie et une compétence sur le transfert des modèles vers le conseil de gestion. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que J.M. Attonaty s'est depuis intéressé à la méthode des SMA pour passer de l'individuel au collectif et, avec P. Le Grusse a développé quelques modèles appliqués à des problèmes agronomiques.

3.1.4 Sciences cognitives

Au début des années quatre-vingt-dix je me suis intéressé aux recherches en sciences cognitives. J'ai participé à quelques rencontres interdisciplinaires comme le premier congrès européen en sciences cognitives mais aussi et surtout au séminaire interdisciplinaire animé chaque année par C. Lenay [Lenay, 1994] à l'Université Technologique de Compiègne. Cette communauté rassemblait des philosophes, biologistes, éthologues, économistes, linguistes et informaticiens. La question essentielle qui m'intéressait concernait les représentations, sujet que nous nous étions donné au sein de Green ; le débat portait sur la confrontation entre une hypothèse cognitiviste que certains chercheurs sur les multi-agents ont adopté en mettant l'accent sur une rationalité basée sur les capacités calculatoires [Andler, 1992] d'un agent et une hypothèse plus réactive, portée à l'origine par des chercheurs comme Ferber et Drogoul [Drogoul, 1993] ou par certains pionniers de la Vie Artificielle. Si les premiers argumentaient en faveur d'un processus de décision organisé séquentiellement en objectifs, intention et action, cette dernière mouvance qui s'appuyait entre autres sur les travaux de Maturana et Varela [Varela, Thompson et al., 1993] en neuro-biologie ou de Denett en philosophie proposait une modélisation faisant beaucoup plus place aux interactions entre les agents et leur environnement, qu'il s'agisse d'un environnement physique ou biologique ou encore social. C'est dans ce cadre que mon travail de modélisation des interactions entre des agents simples mais qui se coordonnent pour l'usage de ressources intéressait le groupe de chercheurs [Bousquet, 1995]. On retrouvait là un débat sur les modèles mentaux qui opposait ceux qui s'appuient sur des concepts issus de la psychologie cognitive [Johnson-Laird, 1993] à ceux qui s'intéressent plutôt aux représentations sociales [Jodelet, 1989; Dumouchel, 1992]. La matérialisation de ces représentations comme objet propre rejoint aussi les interrogations de recherche en anthropologie. C'est ainsi que D. Sperber [Sperber, 1996] propose, dans cette communauté des sciences cognitives, une réflexion sur l'épidémiologie des représentations. Pour résumer la question que je me pose sur les représentations et que je retrouve lorsque concrètement j'élabore un modèle, je reprends Bimby : « *Les représentations sont-elles dans le cerveau, dans le monde ou dans les interactions ?* ». Cette recherche prend d'autant plus d'importance que les recherches environnementales de l'équipe soulignaient l'importance de la multiplicité des représentations.

Ces quelques relations avec le domaine des sciences cognitives, à travers des rencontres et des lectures, ont orienté mes recherches ultérieures. Je n'ai cependant pas eu l'occasion de suffisamment approfondir mes connaissances. Je tenterai de revenir à ce domaine dans les prochaines par des chemins qui sont explicités au chapitre 5.

3.2 Systèmes multi agents

Les systèmes multi-agents visent à appréhender la coordination de processus autonomes. Pour Weiss [Weiss, 1999], un agent est ainsi une entité computationnelle, comme un programme informatique ou un robot, qui peut être vue comme percevant et agissant sur son environnement au sujet duquel on peut parler d'autonomie parce que son comportement dépend au moins partiellement de son expérience. Un système multi-agents est constitué d'un ensemble de processus informatiques se déroulant en même temps, donc de plusieurs agents vivant un même moment, partageant des ressources communes et communiquant entre eux. Le point clé des systèmes multi-agents réside dans la formalisation de la nécessaire coordination entre agents. La recherche sur les agents est ainsi une recherche sur :

1. la décision –quels sont les mécanismes de la décision de l'agent? Quelle est la relation entre leurs perceptions, leurs représentations et leurs actions ? Comment les agents décomposent-ils leurs buts et tâches ? Comment les agents construisent-ils des représentations ?
2. le contrôle - quels sont les relations entre agents?, Comment sont-ils coordonnés ? Cette coordination peut être décrite comme une coopération pour accomplir une tâche commune ou comme une négociation entre des agents ayant des intérêts différents.
3. la communication - quels types de message s'envoient-ils? à quelle syntaxe obéissent ces messages? Différents protocoles sont proposés en fonction du type de coordination entre les agents.

Les systèmes multi-agents ont des applications dans le domaine de l'intelligence artificielle où ils permettent de réduire la complexité de la résolution d'un problème en divisant le savoir nécessaire en sous-ensembles, en associant un agent intelligent indépendant à chacun de ces sous-ensembles, en coordonnant l'activité de ces agents. On parle ainsi d'intelligence artificielle distribuée. Cette méthode s'applique, par exemple, pour la surveillance d'un processus industriel où elle met en œuvre la solution de bon sens qui consiste à coordonner plusieurs surveillants spécialisés, plutôt qu'à envisager un seul surveillant omniscient. Les recherches dans le domaine fondamental concernent des problèmes de représentation de la décision des agents, de protocoles de communication. Les applications principales sont celles de télécommunications, d'Internet avec le commerce électronique, d'agents physiques tels les robots, l'optimisation des systèmes de transports, la gestion de filières [Weiss, 1999]. Il existe une communauté de chercheurs qui s'intéressent aux simulations de sociétés d'agents, en écologie ou en sciences sociales.

3.2.1 Evolution de la recherche sur les SMA

Si, dans les prochaines années, une histoire des SMA en France est écrite, l'auteur situera certainement la naissance de cette approche et sa prime jeunesse dans le contexte d'une riche interaction multidisciplinaire. En effet contrairement aux Etats-Unis où l'Intelligence Artificielle Distribuée s'est développée sous l'égide des informaticiens séparément du domaine de la Vie Artificielle initié par les physiciens, en Europe et en France en particulier l'émergence de la communauté SMA est issue de la rencontre de chercheurs de plusieurs disciplines. Dans le cadre général des sciences de la complexité, qui propose de reposer les questions scientifiques par l'étude des interactions entre entités élémentaires et de leurs organisations dans une démarche ascendante, les SMA vont participer à cette dynamique dans un double mouvement. D'une part les SMA vont constituer une méthode pour catalyser la reformulation de certaines questions en sciences sociales ou en sciences de la nature, d'autre part les chercheurs informaticiens vont puiser dans cette interaction les éléments pour mieux préciser les questions et proposer de nouveaux concepts dans leur discipline. C'est ainsi, par exemple, que les SMA se posèrent dans un premier temps la question de la décision chez les agents, s'en allant interroger la psychologie cognitive et la théorie des jeux - pour rationaliser les stratégies qui anticipent

la relation aux autres agents - avant d'aborder, dans un second temps, la question de l'interaction entre les agents pour construire des sociétés artificielles, convoquant alors les sociologues - afin de construire les démarches d'interaction entre les individus et la société - ou bien les linguistes - afin de doter les agents de langages et d'organiser des protocoles. Une des questions actuelles est celle de l'environnement des agents.

Canalisée par les applications, la recherche tous azimuts des débuts a fait aujourd'hui place à des travaux sur la standardisation des systèmes. Les enjeux industriels qui existent aujourd'hui représentés au sein de fédérations industrielles comme la FIPA (Fédération Internationale pour les Agents Physiques) ont fait basculer une part de la recherche vers d'autres démarches que l'exploration, visant par exemple à définir des protocoles de communication standards. La simulation de sociétés reste cependant très empreinte d'un esprit recherche fondamentale sur les processus.

3.2.2 SMA et simulation de société

Généralement l'application des systèmes multi-agents à la simulation de phénomènes sociaux est associée au courant sociologique dit de l'individualisme [Havelange, 1994; Lenay, 1996] qui considère l'individu singulier comme l'unité élémentaire, comme l'atome de la société . [Weber, 1971]. Le point commun réside en effet dans la démarche ascendante qui caractérise les systèmes multi-agents. Cependant, l'assimilation entre individus d'une société et agents d'un univers multi-agents peut être trompeuse : il est tout à fait possible de considérer comme agents des groupes sociaux, des institutions données, avec leurs règles de fonctionnement, leurs normes [Livet, 1987]. C'est ainsi qu'un groupe de recherche sur la simulation de sociétés s'intéresse à la représentation de normes dans les SMA [Conte and Castelfranchi, 1995]. Les agents sont conduits par des contraintes, des règles exprimées au niveau du groupe : ils ne sont plus que des entités agissantes, que l'on place dans un environnement dynamique.

Cette simple remarque, naturelle dès que l'on envisage une modélisation par un système multi-agent indique comment la dualité simple entre l'individualisme et le holisme peut être remise en cause, ce qui est une préoccupation majeure tout à la fois des chercheurs qui étudient la gestion des ressources renouvelables et des chercheurs sur les systèmes multi-agents :

- (i) les individus, produits d'une histoire sont mus par des valeurs et des règles collectives,
- (ii) les valeurs et règles collectives évoluent par l'interaction entre les individus comme entre les groupes,
- (iii) les individus ne sont ni semblables ni égaux mais porteurs de rôles et statuts sociaux.

Comment les individus construisent-ils ce collectif ? Comment se crée une institution ? En retour l'individu ne peut être considéré comme une entité autonome indépendante de son environnement social. Comment les individus sont-ils contraints par les structures collectives qu'ils se sont données et comment les font-ils évoluer ? Quels sont les degrés de liberté à l'intérieur desquels se meuvent les pratiques individuelles ? Voici, entre autres, des questions que les SMA permettent d'explorer, dans les termes suivants : « Comment se créent et fonctionnent des structures collectives à partir d'agents qui ont de plus ou moins grandes capacités de représentations, qui échangent entre autres des informations, des services ou des biens, qui élaborent des contrats et qui sont plongés dans un environnement dynamique qui réagit à leurs actions ? ».

Cette représentation d'un bouclage entre un niveau inférieur où des agents hétérogènes interagissent entre eux et avec un environnement dynamique, créent, maintiennent et transforment un niveau collectif qui en retour les contraint fut pour moi le cadre conceptuel de ma recherche. Ce fut aussi le cadre que j'ai proposé aux étudiants que j'ai encadrés ou aux chercheurs que j'ai eu en formation. Ce cadre est décrit par N. Gilbert sous le terme d'émergence de second-ordre [Gilbert, 1995].

3.2.3 SMA et simulation de la gestion des ressources

Quelques travaux ont eu lieu dans le domaine. Le problème de la gestion de ressources par des groupes d'agents a rapidement constitué un cas d'école pour les informaticiens. Le nombre d'articles très théoriques concernant des agents qui doivent utiliser des ressources sur une grille spatiale est pléthorique. L'ouvrage le plus connu dans ce cadre est celui d'Epstein et d'Axtell qui publiaient en 1996 [Epstein and Axtell, 1996] un livre sur le thème d'agents qui doivent exploiter du sucre et des épices. Il est aussi des applications, plus reliées à une réalité. Ainsi une des premières applications proposées est celle de J. Doran [Doran and Palmer, 1993] qui testait l'hypothèse d'archéologues sur l'émergence de hiérarchies à partir d'agents qui devaient se regrouper pour capturer des animaux. Ainsi, également des travaux américains qui vérifient des hypothèses sur la disparition de populations d'indiens Anasazi, à partir de leurs comportements de déplacements [Kohler and Carr, 1996; Kohler, Kresl et al., 2000].

La simulation de la gestion de ressources communes pose le problème de l'interaction entre des ensembles d'agents et des ressources dynamiques. Dans la suite de classifications sur les modes de communication telles que les proposaient par exemple Ferber et des diverses applications que j'ai lues ou réalisées, je distingue plusieurs modes de modélisation de ces interactions. Dans la suite de ce mémoire je m'appuie sur des exemples issus de simulations de la gestion de l'eau dans des périmètres irrigués pour les illustrer.

Dans le premier mode il s'agit de mettre l'accent sur les processus cognitifs qui déterminent l'interaction entre agents et ressources. Ces processus peuvent être cognitifs (chacun des agents se fait une représentation de la ressource) ou réactifs. L'important est que chaque agent agit sur la ressource en conséquence de ses règles ou décisions. Ce faisant, il transforme cette ressource pour les autres. Il s'agit d'une modélisation des interactions qui se rapproche de ce que les économistes appellent externalités. Cette modélisation de sociétés d'agents est aussi celle des travaux d'éthologues (associés à des modélisateurs) comme Théraulaz [Théraulaz, 1994], Bonabeau [Bonabeau, Dorigo et al., 1999] qui parlent de stygmergie. Pour les questions de gestion des ressources, et en prenant l'exemple des périmètres irrigués, chacun des agents paysans peut avoir une représentation spécifique de sa parcelle et des besoins en eau. Les uns, qui voient dans leur parcelle un simple accès au foncier peuvent être assez flexibles sur le respect d'un calendrier d'irrigation tandis que les autres, qui voient dans leur parcelle un moyen de production économique, seront rigoureux sur ce point. Chacun agit sur la ressource commune en fonction de cette représentation et modifie l'environnement pour les autres ; ainsi, certains pourront provoquer des retards dans le démarrage de la campagne d'irrigation car leurs parcelles ne sont pas prêtes ou encore pour un pompage collectif de l'eau dans le fleuve les consommations d'eau des uns et des autres ne seront pas les mêmes. On étudie un problème de gestion des ressources renouvelables communes par la confrontation de représentations donc d'actions différentes sur celles-ci, qui peuvent donner lieu à un usage satisfaisant ou non pour l'ensemble des agents. On peut parler de coordination par l'environnement.

Le deuxième mode consiste à s'intéresser à la simulation de la gestion dans des réseaux sociaux. On considérera ici que les relations entre les hommes et les ressources doivent plutôt être formulées comme les relations entre les hommes à propos des ressources. Les univers multi-agents permettent de simuler des agents qui s'échangent des messages au sein de réseaux, dits réseaux d'acointances. Il est ainsi possible de simuler des échanges d'informations, des échanges de services, des contrats, des agréments entre les agents. Par exemple, dans le cas des périmètres irrigués, les agents paysans peuvent s'envoyer des messages pour se tenir informés des niveaux d'eau dans les parcelles ou bien se demander et se rendre des services ou encore s'échanger des adresses d'agents. Ainsi on simule des conversations entre des agents qui, lorsqu'ils considèrent que leur parcelle ne peut attendre leur tour d'eau, peuvent demander des autorisations et qui, lorsqu'ils ont le tour d'eau, peuvent accepter ou refuser ces autorisations. On montre ainsi [Barreteau, Bousquet et al., 1997] que l'évolution du nombre de parcelles à sec dans un périmètre peut être très sensible à la structuration des réseaux sociaux.

Enfin, nous proposons d'envisager un troisième mode de modélisation des interactions entre les groupes d'agents et les ressources communes. Nous proposons, pour aller plus loin dans la

caractérisation de la boucle individu-société, de passer par la représentation d'objets « médiateurs » ou de « référents communs ». Il s'agit des objets qui sont une représentation à la fois individuelle et partagée qui tendent à la fois à créer le groupe social et à être l'expression de son existence. Mémoire collective, mythes, marchés, divinités, lieux ou biens symboliques : autant d'objets que les hommes construisent en permanence, autant de perceptions qui orientent ou contraignent les pratiques des hommes. A travers la perception de ces objets chaque agent se perçoit comme membre du tout et ainsi contribue à la création ou au maintien de ce tout. Il y a réification, non pas du collectif, comme le voudrait un point de vue holiste, mais des objets qui sont le signe du collectif. Plus précisément on pourra ici limiter, dans un premier temps, le concept d'objet médiateur à la représentation d'institutions. L'exemple que l'on peut prendre à ce sujet est tiré du travail d'un anthropologue et d'un modélisateur, Lansing et Kremer [Lansing, 1994] qui ont étudié des problèmes de gestion de l'eau à Java. Le bassin versant étudié est divisé en plusieurs portions appelées subaks. Le partage de l'eau entre les subaks est soumis à un calendrier religieux qui organise les rituels autour de plusieurs temples de l'eau. C'est à l'occasion de ces rituels que se transmettent les droits d'usage de l'eau. En simulant cette organisation (les agents utilisent l'eau en fonction de ces calendriers religieux) et en la comparant à d'autres modes de gestion de l'eau (par exemple tous les agents utilisent l'eau en même temps ou de façon anarchique), les auteurs montrent que cette forme de coordination correspond à un optimum agronomique d'utilisation de l'eau.

En résumé, il nous semble que les systèmes multi-agents proposent des formalisations qui peuvent prendre en compte plusieurs modèles de pensées sur la gestion collective de ressources renouvelables communes. Offrant la possibilité de modéliser des représentations, des modes de communication au sein de réseaux, des contrôles individuels ou sociaux, donnés ou construits, des interactions, les systèmes multi-agents sont adéquats à la simulation de formes de coordination observables sur le terrain.

La figure 1 représente une synthèse graphique de l'approche générale que nous adoptons pour étudier un problème de gestion des ressources avec des SMA.

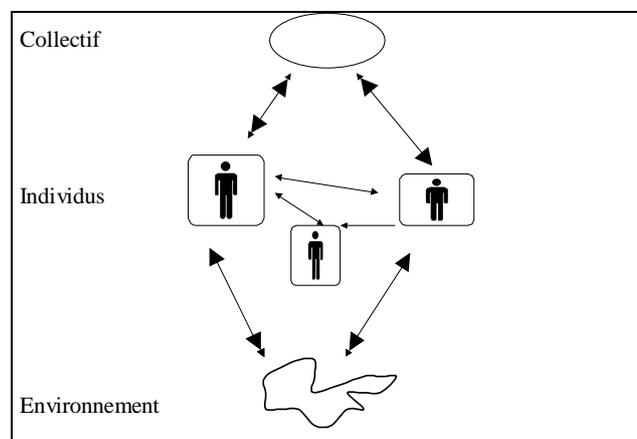


Figure 1 : L'organisation d'un système modélisée pour un SMA

3.3 La prise en compte du long terme : modélisation d'accompagnement et approche patrimoniale

L'un des usages classiques de la simulation réside dans la prédiction : telle n'est pas l'option que nous avons choisie. Le texte ci-dessous présente la méthode que nous proposons d'adopter.

Le très long terme n'est pas prévisible dans le champ économique et social ; il est par contre partiellement décidable. C'est l'hypothèse sur laquelle repose la « démarche patrimoniale » [Montgolfier and Natali, 1987; Ollagnon, 1989; Weber, 2000] « Parce qu'il se situe hors de portée de toute prévision, prendre en compte le très long terme dans l'analyse des problèmes

d'environnement implique de se donner des repères ou des objectifs de très long terme par rapport auxquels les chemins d'évolution, possibles ou impossibles seraient envisagés. L'approche du long terme ne peut guère relever que du scénario. » [Weber and Bailly, 1993]. Parce que les règles résultent de l'interaction entre acteurs, elles se trouvent légitimées aux yeux de l'ensemble des acteurs et elles intègrent les perceptions particulières. C'est à partir d'une conception partagée sur l'évolution de la situation présente que les acteurs peuvent « décider » des objectifs de très long terme, sur la base desquels les scénarios qui permettraient de les atteindre pourront être discutés. L'ensemble de la démarche de médiation suppose l'établissement d'une situation initiale dans laquelle les acteurs sont clairement informés de ce qui les oppose aux autres et de leur commune dépendance d'une solution au problème qui se trouve à l'origine de leur médiation. L'enjeu de la phase d'initialisation est de permettre aux acteurs d'exprimer leurs perceptions de la situation présente et de son évolution. Lorsqu'« une carte des perceptions », également légitimes et également subjectives, a pu être établie et discutée, il est demandé aux acteurs de débattre de l'acceptabilité d'une prolongation des tendances actuelles.

Comment les simulations peuvent-elles prendre part à ce processus, c'est à dire aider les acteurs à gouverner? Nous tentons de développer l'idée de modélisation d'accompagnement à l'aide des systèmes multi-agents. La réflexion qui suit constitue une démarche qui est en cours de mise en œuvre mais que nous n'avons pour l'instant que partiellement testée (cf § 4.5). Si elle est sans doute originale dans le domaine de l'utilisation de modèles multi-agents, c'est une démarche qui a déjà été utilisée par plusieurs chercheurs sur les travaux desquels nous nous appuyons. Il s'agit des travaux d'Ostrom [Ostrom, 1990; Ostrom, Gardner et al., 1994]. Pour la relation entre approche patrimoniale et la mise en situation expérimentale par jeu de rôle beaucoup a été fait par Mermet [Mermet, 1993] et Piveteau [Piveteau, 1994]. Nous nous plaçons dans un cadre de pensée proche de ces auteurs et proposons d'y inclure la démarche de modélisation avec des univers multi-agents. On distinguera plusieurs moments :

- Construire un monde artificiel. La première étape, classique pour les chercheurs, est celle de l'acquisition de connaissances sur le domaine d'étude. Nous proposons que les travaux de terrain et de modélisation soient menés de concert. Il s'agit d'identifier les différents acteurs, les différentes perceptions et d'utiliser les systèmes multi-agents pour une modélisation. Face à un monde très complexe, les systèmes multi-agents permettent de rechercher la simplification la plus acceptable en plaçant les questions sur les problèmes de représentations, interactions et contrôles. La simulation pose des questions au terrain qui apporte de nouveaux éléments à la modélisation.
- La deuxième étape est une étape de restitution que l'on pourrait aussi appeler validation du modèle cognitif. Il s'agit de tester le modèle proposé pour le processus de prise de décision. C'est la mise à plat des représentations et des processus d'interactions entre les agents. En effet il est difficile de faire comprendre ce qui « a été mis dans la machine ». Par contre il est possible de mettre l'acteur en situation de l'agent qui est dans la machine, avec les hypothèses de représentation, ses communications et les contrôles constitutifs du modèle. Pour mener cette opération à bien nous proposons de nous tourner vers la méthodologie du jeu de rôle expérimentée par les auteurs cités ci-dessus. On fait évaluer le monde artificiel en y plongeant les acteurs c'est à dire en créant un monde semblable au modèle. Ces acteurs peuvent être parties prenantes du système de gestion en tant qu'utilisateurs de la ressource (des paysans), régulateurs de cette gestion (gestionnaires ou administrateurs) ou observateurs du système (chercheurs). Le monde artificiel dans lequel sont plongés les acteurs ressemble-t-il au monde réel? Il s'agit d'une validation d'un simulateur comme par exemple pour un simulateur de vol. Un simulateur de vol est de qualité s'il intègre les mêmes éléments du processus de décision que dans la réalité, et non pas s'il reproduit exactement un vol. Cette étape peut participer à la phase d'initialisation de la démarche patrimoniale car elle permet de dresser une carte des différents types d'acteurs, des différentes perceptions et des interactions, et d'en faire un savoir partagé.
- Une troisième phase est celle de la simulation. La simulation montre comment la dynamique du système est issue des interactions entre des acteurs qui ont des poids et des représentations différents. On peut ici distinguer deux sous-phases. Dans un premier temps la simulation peut être

effectuée sous forme de jeu de rôle, ce qui permet aux acteurs de valider le fait que c'est bien dans les interactions entre représentations différentes que se trouve le moteur de la dynamique du système. Cette première sous-phase permet aussi de faire émerger les différents scénarios intéressants à tester. Puis, cette phase étant acquise, on peut utiliser le modèle multi-agent pour faire des simulations sous différents scénarios. Les simulations, tant « in ludo » que « in silico », participent ainsi à une autre phase de la démarche patrimoniale qui consiste, après avoir défini des objectifs de long terme, à envisager les différents scénarios qui pourraient y mener, à les tester et à en discuter les résultats.

4. LES OUTILS ET MODELES DEVELOPPES

Au cours de ces années de recherche j'ai eu l'occasion de travailler avec différentes personnes et de développer différents modèles. Ces modèles sont listés dans le tableau suivant.

Nom du modèle	Thématique	Problématique	Auteur, co-auteur	Contexte
Tragédie des Communs	Théorie de la gestion des ressources	Coordination par l'environnement	Duthoit, Le Page [Bousquet, Duthoit et al., 1996]	Dea info. Montpellier, 1996
Chasse-agri	Spécialisation	Coordination par l'échange	Proton [Proton, Bousquet et al., 1997]	Dea info. Montpellier, 1996
Balle	Physique	Modes de coordination	Dzeakou	Dea info. Montpellier, 1997
Pasteur	Transhumance au Sahel	Rationalité individuelle et ressources spatialisées	D'Aquino, Bah [Bah, 1997]	Dea info Dakar, 1997
Pasteur Génétique	Transhumance au Sahel	Hétérogénéité de stratégies spatiales	Bah [Bah, 1998]	Dea info Dakar, 1997
Filière	Filière théorique	Coordination par l'échange	Antona [Antona, Bousquet et al., 1998]	Projets filières, 1998
FilièreBois	Filière bois de feu au Niger	Coordination par l'échange, effet des interventions	Antona [Antona, 2000]	DEA 2000
Raphia	Filière Raphia à Madagascar	Coordination par l'échange	Antona, Randriajaona, Herimandimby [Herimandimby, 1998]	ATP SIG-SMA, 1998
Jumel	Transhumance	Représentations et l'échange	Rouchier, Requier-Desjardins [Rouchier, Bousquet et al., 2001], [Rouchier, 2000]	Thèse Orléans, Saint-Quentin, 2000
Confiance	Structuration hiérarchie sociale	Représentations et échange	Rouchier, O'Connor [Rouchier, 2000]	Thèse, 2000
Potlatch	Structuration hiérarchie sociale	Représentations et échange	Rouchier [Rouchier, 1998]	Dea Etes, Orléans, 1996
Samba	Dynamiques agraires	Usages de l'espace	Boissau, Castella	Projet SAM, Nord Vietnam

	Croissance démographique et environnement	Espace, individus et villages	Boissau [Boissau, Locatelli et al., 1999]	Dea EHESS, 1998
Kayanza	Bois de feu au Burundi	Accès à l'espace et échange,	Guizol, Ndikumadengue [Bousquet, Le Page et al., 2000]	ATP Dynamiques forestières, 1997
Djemiong	Chasse au Cameroun	Dynamique des populations, coordination pour l'accès à l'espace	Takforyan, Bakam, Le Page, Proton [Le Page, Bousquet et al., 1999; Bousquet, LePage et al., 2000]	Projet Cnrs Seah, 1999
Shadoc et Njoobari	Périmètres irrigués au Sénégal	Coordination, usage du modèle	Barreteau [Barreteau, 1998; Barreteau and Bousquet, 2000; Barreteau and Bousquet, 2000]	Thèse Engref, 1998
SelfCormas	Plans d'occupation et d'affectation des sols	Coordination, usage du modèle	D'Aquino, Bah, Le Page [Lynam, Bousquet et al., submitted]	ATP, 2000
SINUSE	Interactions et usage d'une nappe phréatique,	Coordination	Feuillette [Feuillette, Bousquet et al., 2000; Feuillette, Garin et al., 2000]	Thèse Hydrologie, 2000
WS Erosion	Erosion Nord Thaïlande	Stratégies individuelles	Trebuil, Baron, Le Page [Kam, Castella et al., submitted]	Projet IRRI, 1999
Didy	Aménagement forestier Madagascar	Coordination des usages	Le Page, Abrami, Babin	Dea Strasbourg, 1999
Camargue	Chasse en Camargue	Stratégies, contrats et espace	Mathevet [Mathevet, 1998; Mathevet, 2000]	Thèse Lyon, Tour du Valat, 2000
Orizi	Gestion de l'eau en Indonésie	Coordination pour l'usage de l'eau	Becu, Perez [Becu, 1999]	Projet Cirad
SavaneAgent	Représentation dynamique spatiale	Echelles	Gautier [Bousquet, 1999]	Groupe Smas, 1997
ForPast	Embroussaillement	Représentations spatiales et espace	Lardon, Bommel, Le Page [Lardon, Baron et al., 1998; Lardon, Bommel et al., 2000]	Projet Cassini 1998

BrouteLaForet	Société et dynamiques spatiales	Echelles spatiales et décision	Bonnefoy [Bonnefoy, Le Page et al., 2000]	Groupe Smas1999
	Dynamiques du paysage	Entités spatiales	Bonin, Le Page[Bonin and Le Page, 2000]	Thèse géographie
Sylvopast	Aménagement forestier Méditerranéen	Représentation spatiale, usage du modèle	Etienne, Le Page	Groupe Smas 2000
Faucon-Colombe	Théorique	Vérification de SMA	M. Valeix [Valeix, 2000]	Stage Ina-PG, 2000
RdP	Chasse au Cameroun	Vérification de SMA	Bakam, Kordon [Bakam, 2000]	Thèse, Univ Yaoundé, 2000

On peut regrouper ces travaux en quatre thèmes principaux :

- Des expériences sur la représentation de l'espace.
- Des expériences sur les représentations et les échanges.
- Des expériences et une réflexion sur l'usage de ces modèles en aide à la décision.
- Un travail sur la vérification et la validation des SMA.

Avant de revenir sur ces différentes avancées au cours de ces dernières années je décrirai tout d'abord l'outil qui a été mis au point pour créer l'ensemble de ces modèles. Très tôt après mon entrée au Cirad le besoin d'un outil pour créer des modèles multi-agents s'est fait sentir. Tout d'abord, d'un point de vue purement pratique, les différents modèles multi-agents réutilisent régulièrement des modules, des composantes et des interfaces. Ensuite, dans un processus de coopération avec différents partenaires, en particulier avec des laboratoires africains, il était intéressant de partager un outil commun qui soit donc aussi un outil de capitalisation. Enfin, à partir de 1996 je me suis engagé dans un processus de formation, en France et à l'étranger. Un outil était devenu nécessaire pour effectuer des travaux pratiques et expliquer aux stagiaires la méthode pour créer un système de simulation multi-agents. Cet outil a été baptisé Cormas [Bousquet, Bakam et al., 1998] pour Common-pool resources and multi-agent systems.

4.1 Cormas

Depuis quelques années, la mise à disposition de plates-formes de simulation multi-agents s'est organisée. Des communautés d'utilisateurs (parmi lesquelles en bonne place les écologues et les sociologues) se structurent autour d'outils génériques qui facilitent la construction des modèles et offrent des fonctionnalités de suivi et d'analyse des expériences de simulation menées dans ces «laboratoires virtuels». On citera par exemple les plates-formes MadKit, StarLogo, Desire, Sdml. On pourra se référer au recensement des plate-formes françaises effectué par Z. Guessoum [Guessoum, 2000, sous presse]. Chacune de ces plateformes a été conçue dans un but bien particulier. Au cours des années passées, deux Dea d'informatique de Montpellier ont été encadrés au Cirad, et leur travail a consisté à tester différentes plate-formes. Ainsi P. Dzeakou a testé la plate-forme Lalo, qui modélise essentiellement les communications entre agents et Manu Lieurain s'est penché sur la plate-forme MadKit, très efficace pour implémenter des systèmes distribués. Au cours de son Dea d'informatique de Montpellier, F. Amblard encadré par Nils Ferrand du Lisc au Cemagref a aussi comparé différentes plateformes dont Cormas.

Le cas de *Swarm*⁶, basée sur le langage orienté-objet Objective-C pour écrire du code et Tcl/Tk pour développer des interfaces, reflète bien cette tendance actuelle. Depuis le lancement du projet au Santa Fe Institute en 1994 [Minar, Burkhart et al., 1996], des groupes d'utilisateurs de *Swarm* se fédèrent autour de leur problématique commune. De ce regroupement naissent de nouvelles plate-formes, spécifiques à leur champ disciplinaire tout en restant basées sur *Swarm* (cf. par exemple, dans le domaine de l'écologie). Nous avons régulièrement envisagé de nous tourner vers l'utilisation de plateformes autres que *Cormas*, et *Swarm* est sans doute la plateforme qui serait la plus propice. La participation de C. Le Page au congrès 2000 des utilisateurs de *Swarm* nous a cependant confirmé dans l'idée de continuer à développer *Cormas*. Très générique *Swarm* permet à l'utilisateur féru d'informatique de préparer son simulateur. *Cormas* est la cristallisation d'une longue réflexion et représente un point de vue, sinon une méthode, sur la modélisation de la dynamique et l'usage de ressources par des agents artificiels.

Au sein de notre équipe, l'accent est mis sur les modèles de gestion des ressources. De ce fait, la notion d'espace porteur de ressources est au cœur de la plate-forme de simulation multi-agents que nous avons développée. Cette plate-forme, *Cormas*, est un environnement de construction de modèles multi-agents basé sur le logiciel *VisualWorks*, qui est lui-même un environnement de programmation en Smalltalk. *CinCom*, la compagnie américaine qui commercialise *VisualWorks*, diffuse une version non commerciale (à des fins d'éducation et de recherche)⁷. *Cormas* est également mis à la disposition de la communauté scientifique⁸ sous la forme d'un ensemble de programmes à charger dans *VisualWorks*.

4.1.1 Modélisation avec *Cormas*

Programmée en langage orientée-objet, *Cormas* propose un certain nombre d'entités génériques pré-définies desquelles héritent les agents spécifiques à chaque modèle.

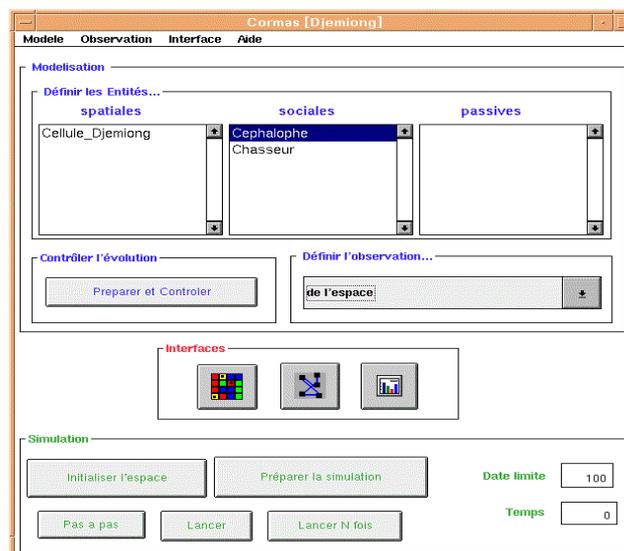


Figure 2 Interface principale de *Cormas*

La partie supérieure de l'interface principale (représentée à la figure 2) concerne le processus de modélisation que l'on décompose en trois étapes.

⁶ <http://www.swarm.org>

⁷ <http://www.objectshare.com/VWNC/default.htm>

⁸ <http://www.cirad.fr/programmes/espace/cormas/>

La première étape de ce processus est la spécification des entités⁹ qui composeront le modèle et les modes d'interactions. Tout d'abord on considérera les entités spatiales. Toutes les modélisations ne nécessitent pas forcément un support spatialisé, cependant cette dimension est souvent requise pour modéliser un problème de dynamique et d'usage de ressources.

L'entité spatiale de base est la cellule. A la manière d'un automate cellulaire, chaque portion d'espace peut ainsi avoir des comportements. On pourra utiliser l'automate cellulaire pour des processus de diffusion. La cellule comprend un ensemble de programmes pour calculer différents voisinages géographiques. L'espace peut être considéré à différentes échelles et d'autres entités ont été créées. Il s'agit d'un résultat important de nos recherches relaté en § 4.3.4.

Deux grands types d'agents ont été prévus dont l'utilisateur se sert pour définir ses entités par héritage.

1. Le premier type est l'agent situé. Une entité située possède une référence spatiale (des coordonnées) et un champ de perception. La cellule joue le rôle d'intermédiaire entre agents. Des méthodes sont pré-programmées pour les mouvements de l'agent (départ d'une cellule, arrivée sur une autre cellule).
2. Le second type d'agent est l'agent communicant. Une entité communicante peut envoyer des messages aux autres entités communicantes. La communication n'est pas un simple échange d'information ; il peut s'agir de dons, de contrats qui correspondent à toutes les situations qui impliquent une communication. Une entité communicante se voit automatiquement dotée d'une boîte aux lettres. Une classe Message est pré-programmée qui permet à l'utilisateur de décrire les messages que les agents s'envoient. Un canal de communication sert pour gérer la transmission des messages.

Une fois spécifiés les caractéristiques (attributs) et le comportement (méthodes) de chacune des entités de base, la seconde étape du processus de modélisation consiste à définir la dynamique des interactions entre entités. Ceci réfère à des problèmes de séquençage (ordonnancement) qui spécifient l'ordre dans lequel les différents agents, entités spatiales et sociales, vont interagir.

La troisième étape du processus de modélisation proposée dans *Cormas* concerne la définition de points de vue d'observation. Trois types d'observation sont proposés :

1. Des graphes scientifiques classiques qui permettent à l'utilisateur de suivre les indicateurs qu'il a définis.
2. Un point de vue sur une entité est une méthode qui associe à telle condition sur les valeurs des attributs de cette entité une image (forme et couleur). Lors d'une simulation, l'utilisateur sélectionne pour chaque entité un point de vue particulier.
3. Un point de vue sur les communications qui filtre les messages que l'utilisateur désire observer (voir § 3.2.3)

Cette dernière proposition sur la notion de point de vue provient de la réflexion qui s'est menée dans la communauté des chercheurs en SMA sur la position et le rôle de l'observateur dans la définition de propriétés émergentes (voir § 3.2.2)

4.1.2 Visualisation de l'espace

D'un point de vue technique tout d'abord, l'environnement de tous les modèles multi-agents développés avec *Cormas* est spécifié à partir d'une interface permettant de préciser la structure d'une grille spatiale composée d'un ensemble de cellules (voir figure 3). L'utilisateur choisit la forme et le cas échéant la connexité des cellules (carrée 4 ou 8 voisins, ou hexagonale), la dimension de la grille, ainsi que le type de frontières (toroïdales ou fermées).

⁹ Toutes les entités de *Cormas* sont dotées de méthodes pré-programmées pour gérer le partage des ressources. Ainsi une entité est capable de stocker toutes les demandes qui lui sont faites, puis, lorsqu'on l'active, d'offrir ces ressources suivant différentes règles (au prorata, premier arrivé-premier servi, etc...)



Figure 3 Copie de la grille Cormas

La visualisation de l'espace au travers d'une grille de cellules individuelles n'étant pas complètement satisfaisante pour la représentation d'un espace géographique, nous avons développé des réflexions dans deux directions :

- Le développement d'un support représentant l'espace en mode vectoriel (figure 4)
- La construction d'entités spatiales à partir de cellules. Cette modélisation permet d'envisager d'introduire des représentations des agents des agents sur l'espace et de modéliser des dynamiques spatiales.

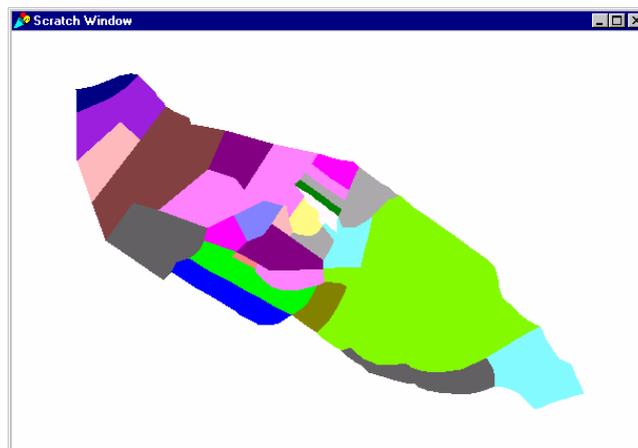


Figure 4 Interface de Cormas avec la carte de Djemiong en mode vecteur.

4.1.2 Visualisation des échanges.

Pour étudier une organisation d'agents, il est nécessaire de décrire les interrelations entre les agents. Les interfaces présentées ci-dessus permettent de visualiser les actions des agents que nous avons appelés situés mais il est aussi nécessaire de visualiser les communications entre les agents appelés communicants.

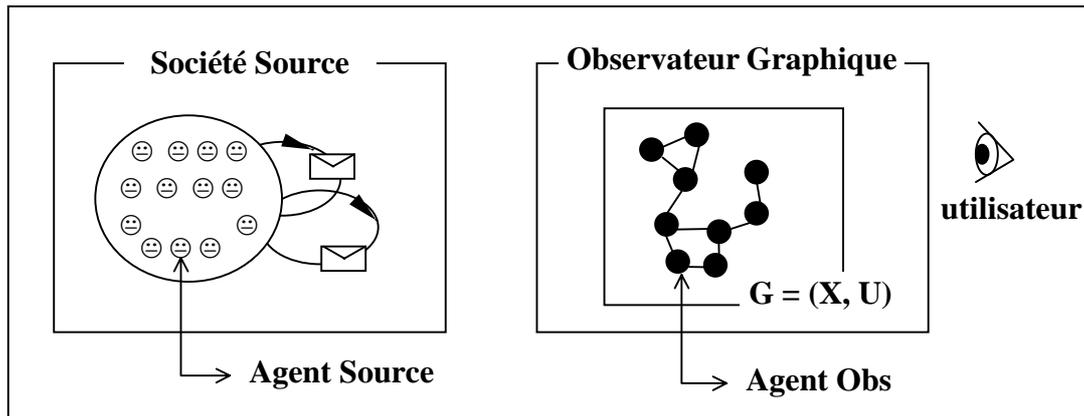


Figure 5 Observateur des liens. A partir des communications entre agents de la société source, l'observateur graphique affiche à l'écran une structure $G = (X, U)$ qui représente un *point de vue* sur l'organisation de la société source. Une structure sera assimilée à un graphe orienté $G = (X, U)$ tel que X est l'ensemble des sommets et U l'ensemble des arcs.

Nous avons cherché à élaborer un outil pour visualiser la dynamique des réseaux sociaux. Pour cela, nous avons rajouté une nouvelle interface à *Cormas*. Cette interface est un système multi-agents en elle-même : à chaque agent du modèle (les agents du domaine) on associe un agent graphique sur une fenêtre d'interface (figure 5). En fonction des communications des agents du domaine, il y aura des interactions entre les agents de l'interface. Ces interactions correspondent à des calculs de forces : chaque agent est attiré par les autres agents avec qui il communique tandis qu'il est repoussé par ceux avec qui il ne communique pas. Cet algorithme permet de séparer sur l'interface différents sous-graphes.

Cet outil est destiné à visualiser la coordination entre différents agents par l'échange de messages. La figure 6 présente deux exemples de coordination dans des cas de marché de la terre (gré à gré ou commissaire-priseur).

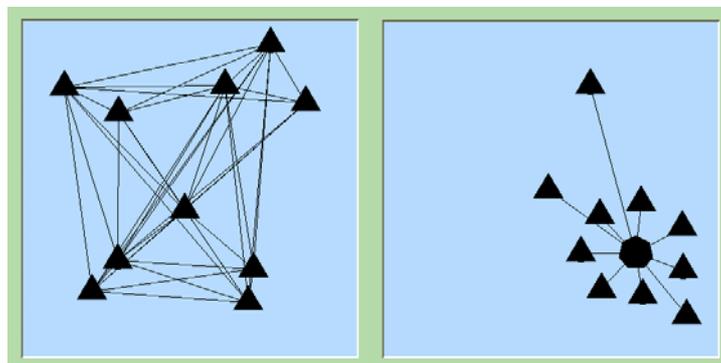


Figure 6 Coordination par communications de type gré à gré (gauche) ou de type centralisé avec un commissaire-priseur (droite)

Ce travail a fait l'objet du Dea d'informatique de Hubert Proton [Proton, Bousquet et al., 1997] et rejoint en cela les recherches sur les questions d'observation et de visualisation (voir par exemple Hutzler [Hutzler, 2000]).

4.1.3 Exemple d'un modèle et méthode: Tragédie des communs

Dés 1995 nous avons construit un modèle qui illustre les différents concepts multi-agents et présente une utilisation de *Cormas*. Ce modèle est une formalisation de la tragédie des communs présentée par Hardin [Hardin, 1968]. Comme nous l'avons décrit, le modèle de Hardin a été formalisé par la

théorie des jeux en utilisant le jeu particulier du dilemme du prisonnier¹⁰. Dans le domaine des sciences de la complexité, Nowak et May [Nowak and May, 1993] ont proposé un modèle de type automate cellulaire pour traiter cette question. Chaque cellule de la grille représente un joueur qui joue contre ses voisins. Les gains associés sont ceux de la matrice du dilemme du prisonnier. L'algorithme prévoit qu'après chaque tour de jeu, chaque joueur imite celui de ses voisins qui a obtenu les meilleurs gains globaux. Les auteurs montrent que ce jeu, en raison des interactions locales, ne conduit pas inéluctablement à une diffusion de la trahison au sein d'un monde initialement composé de coopérateurs.

Pour passer à une formalisation de type agent, Ito [Ito and Yano, 1995], dans le premier congrès sur les SMA va proposer un modèle d'agents (correspondants aux agents situés de Corman) qui peuvent se déplacer sur la grille, disparaissent s'ils perdent leurs avoirs et se reproduisent à l'identique s'ils doublent ceux-ci. La dynamique de ce modèle est celle d'un modèle prédateur proie. Les coopérateurs disparaissent puis les traîtres disparaissent. Ito propose des modélisations d'agents plus cognitifs. Chaque agent est capable de se faire une représentation des autres, en fonction de l'histoire des rencontres de l'autre, et d'agir en fonction de cette représentation. La cognition, la représentation individuelle et sociale sont engagées dans ce modèle. On pourrait imaginer aussi que les agents se communiquent des informations. En résultat on voit coexister des communautés d'agents aux stratégies différentes.

Le travail que nous avons effectué, dans la tradition de l'école réactive, a consisté à reprendre des agents non cognitifs, mais de considérer un environnement sensible. Chaque fois qu'un agent trahit, la cellule sur laquelle il se trouve se dégrade. La matrice des gains est locale et fonction de la matrice de jeu. Sur une cellule en bon état, les joueurs gagnent beaucoup. Au contraire sur une cellule dégradée les joueurs gagnent peu. A nouveau, on voit les populations d'agents de stratégies différentes coexister.

Cet exemple illustre la méthodologie sur une formalisation standard d'un paradigme dominant sur la gestion des ressources, qui se trouve dans les deux cas invalidé. L'une des voies consiste à augmenter la rationalité des agents, voire à considérer des institutions capables de réguler. L'autre, que nous avons choisie, consiste à étudier les boucles de rétroaction entre un environnement dynamique et des agents qui évoluent. Bien sur, il s'agit de deux extrêmes d'un continuum et on pourrait imaginer des modèles qui comportent à la fois un environnement dynamique, des agents qui ont des représentations et qui échangent.

4.2 De l'échange

Comme nous l'avons décrit plus haut un des principaux intérêts des systèmes multi-agents est de modéliser des agents qui ont des représentations et qui échangent. Cet échange peut concerner des biens, des informations, de l'argent, des services. La métaphore la plus couramment utilisée est celle de l'envoi de messages. Nous avons mené plusieurs expériences de modélisation sur ce thème au cours de ces années. On peut classer ces expériences en deux groupes : (i) des modèles où l'on étudie le lien entre des représentations individuelles et une structuration sociale ou économique émergente, (ii) des modèles où une ressource dynamique est exploitée par un ensemble d'agents qui échangent dans une structure sociale donnée.

4.2.1 Représentations, échanges et structuration de la société

Le travail sur les représentations et l'échange a plusieurs origines. Dans le cadre de l'équipe Green nous étions intéressés par la réflexion sur des modélisations de sociétés que les économistes qualifieraient d'hétérodoxes : échanges autres que l'échange marchand et représentations individuelles autres que la maximisation d'un gain économique. Le Dea de Juliette Rouchier nous a donné une

¹⁰ Le dilemme du prisonnier est le nom donné à une formalisation en théorie des jeux. Deux joueurs doivent adopter une stratégie de coopération ou de trahison. Le dilemme réside dans le fait suivant : si l'on considère le problème au niveau de chaque individu, il est préférable de trahir. Si l'on considère le problème pour la collectivité des deux agents il est préférable de coopérer.

première occasion de travailler ces modèles. Lors de son stage du Dea Etes J. Rouchier a travaillé sur le modèle du potlatch décrit par Franz Boas [Rouchier, 1996; Rouchier, 1998]. Ce modèle anthropologique décrit un système de dons contre-dons. Le modèle informatique est composé d'agents qui accumulent des richesses puis élaborent un plan pour donner ces ressources aux autres agents. La réflexion stratégique des agents réside dans la répartition de leurs biens dans différents dons. Dans cette société tout don effectué appelle un contre-don de valeur double. De ce système d'échange résulte une hiérarchie. Se pose alors le problème de l'observateur : l'observateur extérieur peut être le modélisateur qui observe des indicateurs comme le nombre de rencontres (intégration sociale), les dettes, les richesses accumulées. Mais l'observateur peut aussi être l'agent lui-même : chaque agent va se faire une idée de sa position par rapport aux autres en mesurant par exemple le temps que met un autre agent à répondre à un don. Les résultats des simulations montrent des divergences entre les points de vue de ces deux observateurs. Ce premier travail, bien que très riche pour un Dea, s'avérait pour moi inachevé dans ce sens que s'il y avait bien construction d'une hiérarchie sociale celle-ci ne rétroagissait pas sur les individus. Dans le cadre de l'émergence de second ordre de N. Gilbert [Gilbert, 1995], le bouclage entre le microscopique et le macroscopique n'était pas réalisé. Dans la communauté des simulations de société, les remarques portèrent d'ailleurs sur la question du jugement collectif de la place d'un agent, c'est à dire de sa réputation.

Lors de sa thèse Juliette Rouchier [Rouchier, 2000] revint sur cette problématique en élaborant un modèle sur le thème de la réputation. Cette fois dans un cadre totalement théorique, la structure sociale créée allait rétroagir sur les agents. Dans ce modèle, les agents ont une motivation pour le prestige et une motivation pour l'intégration et vont faire des dons. Ils ont une capacité à effectuer l'un ou l'autre de ces dons qui est fonction de leur position sociale qui est elle-même construite par le système de dons. De cette dynamique circulaire résulte différentes formes de hiérarchies sociales.

Le troisième modèle sur ce sujet vient aussi de Juliette Rouchier, en collaboration avec Mélanie Requier-Desjardins, économiste. Dans un modèle plus appliqué il s'agissait cette fois de comprendre les relations entre transhumants et sédentaires pour l'accès à l'eau et aux pâturages. Le transhumant doit faire sa demande auprès de différents sédentaires qui peuvent accepter ou refuser. Le principe du modèle est de tester deux représentations différentes pour les agents : une représentation purement en terme de coûts d'accès, et une représentation où les agents mémorisent l'histoire de leurs liens en se rappelant le nombre de succès et d'échecs dans les rencontres. Ces deux modèles donnent pour résultats des structures d'échanges très différentes, des réseaux plus ou moins stables, et des quantités de ressources différentes aussi [Rouchier, 2000].

4.2.2 Dynamique des ressources et réseaux d'échanges

Dans ce deuxième type de modèle, la structuration sociale est déjà donnée et l'on teste les interactions entre cette structure sociale et une ressource dynamique. Dans ce cadre, deux modèles ont été élaborés.

Le premier modèle a été élaboré pour étudier les systèmes d'échanges entre produits de la chasse et de l'agriculture [Proton, Bousquet et al., 1997]. Pour cela le modèle représente des agents qui ont deux activités complémentaires possibles, la chasse et l'agriculture. Ils allouent une proportion de leur temps et de leur travail à chacune des activités. Les résultats de leurs activités agricoles sont une fonction linéaire de cette proportion. Pour leur activité cynégétique elle est fonction de leur activité mais aussi de l'activité des autres puisque les résultats s'exercent sur une ressource commune qui de plus est dynamique. Après avoir obtenu des résultats pour les deux activités, les agents consomment et peuvent éventuellement échanger. Enfin, ils révisent leurs activités : ils changent la proportion relative de temps allouée à chacune des activités. Le modèle que nous avons élaboré est très simple. Il est un modèle d'arbitrage entre deux activités dont l'une est renouvelable et permet de tester soit la stratégie individuelle des agents, soit leurs modes de coordination, en relation avec un environnement dynamique dont les réponses peuvent être bruitées. En référence au classique modèle bio-économique on peut présenter ce modèle comme un modèle bio-sociologique. Nous avons testé différentes hypothèses qui portent d'une part sur la décision de l'agent (augmenter ou diminuer son taux d'activité dans la chasse ou l'agriculture) et d'autre part sur les systèmes d'échange (échanges directs ou

échanges en groupes organisés). Les quelques résultats obtenus permettent de discuter l'influence relative de ces décisions individuelles et de cette organisation de l'échange.

Figure 7 Les réseaux d'échanges. A gauche le réseau de lien entre agents qui échangent directement, à droite l'échange à travers les groupes. Les couleurs permettent de visualiser la spécialisation des agents : rouge clair pour $x = 1$ (totalement chasseur), vert clair pour $x = 0$ (totalement agriculteur)

Le deuxième modèle élaboré a été conçu avec Martine Antona, économiste. En s'inspirant d'une part des travaux d'Epstein et d'Axtell [Epstein and Axtell, 1996] sur l'échange marchand localisé et d'autre part des nombreux cas présentés par les agro-économistes au Cirad, nous avons décidé de modéliser une filière théorique des produits de l'exploitation d'une ressource renouvelable [Antona, Bousquet et al., 1998]. Un automate cellulaire représente cette ressource. Une première série d'agents (niveau 1) vont collecter la ressource, tenter de trouver un acheteur de niveau 2 en négociant un prix fonction de l'offre et de la demande des deux agents et de la distance entre eux. Une fois l'achat effectué, l'agent de niveau 2 transformera la ressource puis tentera à son tour de la vendre à un agent de niveau 3 et ainsi de suite. La filière que nous avons testée est conduite par l'aval, c'est-à-dire par une demande exogène exprimée au niveau 4. Ce modèle donne donc lieu à la création de filières spatialisées avec des prix variables.

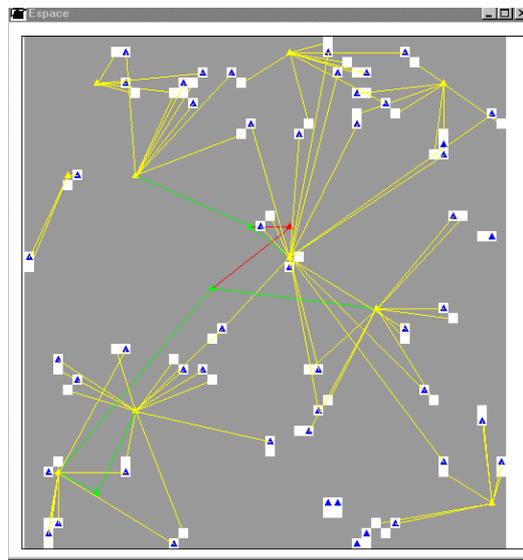


Figure 8 Un modèle de filière spatialisée

Une fois cette filière élaborée, le principe était de tester des outils économiques de gestion tels des taxes, d'étudier différentes formes de redistribution de la taxe. Dans le cadre d'un prix d'équilibre entre une offre et une demande on connaît les effets de tels outils. L'expérience a montré que les modèles d'application de ces outils sur des échanges localisés ne donnent pas les mêmes résultats. Si l'on reprend les principes de modélisation multi-agents tels que décrits plus haut avec un environnement, des agents, des groupes, on peut positionner les relations sur lesquelles sont censés jouer les outils de gestion.

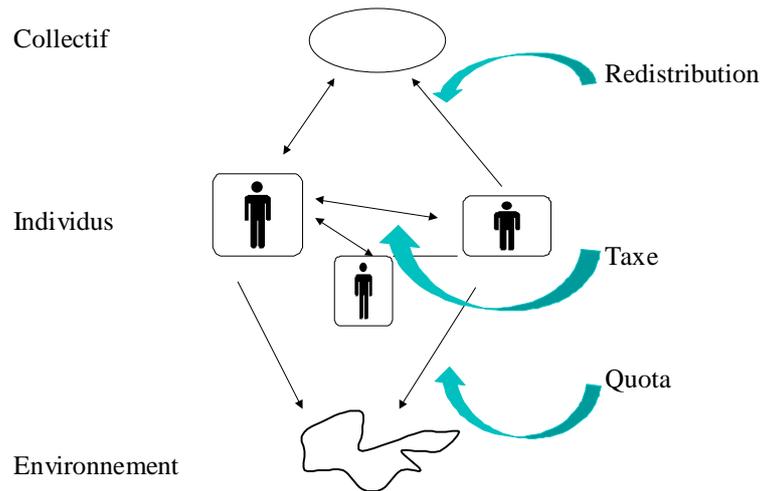


Figure 9 La représentation générale d'un SMA et position des outils de gestion économique

Dans le prolongement de ce graphe et pour synthétiser ce paragraphe sur les échanges, les modélisations s'intéressent aux relations entre des individus et des structures sociales, le tout plongé dans un environnement dynamique en général composé d'une ou de plusieurs ressources. Deux types de travaux ont été menés de façon disjointe. Les recherches de Juliette Rouchier se sont posé la question de la structuration des réseaux, de structures sociales à partir des modèles de représentations et des mécanismes d'échange. Les autres modèles se sont donné une structure d'échange, puis l'ont plongée dans un environnement dynamique. Nous n'avons donc pas développé de modèle théorique d'échange qui prenne en compte toutes ces dimensions. C'est dans les modèles appliqués à des questions de terrain qu'on verra se mobiliser l'ensemble de ces dimensions.

4.3 De l'espace

Une des principales recherches menées au cours de ces années a consisté à travailler sur la représentation de dynamiques spatiales. J'ai dirigé de 1998 à 2000 une ATP, action thématique programmée sur ce thème. Ce projet comportait trois volets.

1. Un premier volet technique consistait à réfléchir aux méthodes informatiques pour relier Cormas à des Sig (MapInfo, ArcView, Idrisi). Différents couplages ont été testés sous la direction de C. Le Page.
2. Un volet plus conceptuel sur la représentation de l'espace dans des systèmes multi-agents est développé ici. Ces avancées conceptuelles se prolongeront par la proposition de nouvelles entités génériques ajoutées dans Cormas.
3. Un troisième volet portait sur l'usage des simulations dans le processus d'aide à la décision.

La recherche sur la représentation de l'espace naît de la rencontre avec des géographes qui s'intéressent aux problèmes de gestion des ressources ou de relations entre espaces et société. Certains travaux dans le domaine de la géographie avaient déjà été effectués par le laboratoire PARIS par exemple [Bura, 1993]. Je présente ici la séquence des rencontres avec trois chercheurs qui a conduit à l'élaboration de trois modèles.

4.3.1 Le modèle SavaneAgent.

A l'origine une rencontre avec D. Gautier chercheur à la Maison de la Géographie, dans un groupe de discussion composé de différents chercheurs géographes ou spécialistes de statistique spatiale (S. Lardon, P. Monestiez). Les discussions communes montrent que nous abordons les mêmes sujets mais rapidement l'enrichissement mutuel plafonne car nous n'appréhendons pas les dynamiques spatiales à partir des mêmes objets et des mêmes règles (agents pour moi-même, entités spatiales pour D.

Gautier). Il faut rentrer plus dans le détail et D. Gautier et moi prenons l'initiative de discuter de ces concepts à partir d'un monde artificiel que nous aurons créé. C'est en fait deux mondes artificiels qui vont être créés correspondant à deux approches d'un même système spatial en évolution.

1. On peut s'intéresser aux groupes sociaux ou «acteurs» du territoire (éléments) et aux relations qu'entretiennent ces acteurs avec l'espace et les ressources qui s'y localisent (interactions). Dans cette approche, l'espace est perçu comme le support des interactions entre les sous-systèmes naturels et sociaux qui produisent de la différenciation spatiale. L'organisation spatiale résulte de l'impact des interactions entre acteurs sur l'espace, agissant elle-même comme une contrainte dans les comportements.
2. On peut également s'intéresser aux entités spatiales (éléments) et aux relations qu'elles entretiennent avec les autres entités spatiales du système (interactions). Dans cette deuxième approche, l'organisation spatiale est perçue comme le produit des interactions entre les entités spatiales.

Deux modèles vont être créés, en prenant pour base un même scénario : à partir d'un site d'implantation original d'un village situé sur une zone fertile, un petit groupe d'agriculteurs cultive les terres arables à proximité immédiate des maisons, selon ses besoins, et utilise les pâturages aux alentours (principe de mise en valeur auréolaire). La population augmente et la demande en champs et en parcours augmente en conséquence. Les nouvelles familles d'exploitants qui se forment construisent des maisons au voisinage immédiat des autres maisons et défrichent de nouveaux champs au détriment des parcours au voisinage du village (principe de compacité de l'exploitation). Dans le même temps, les troupeaux et la pression de pâturage sur les parcours augmentent.

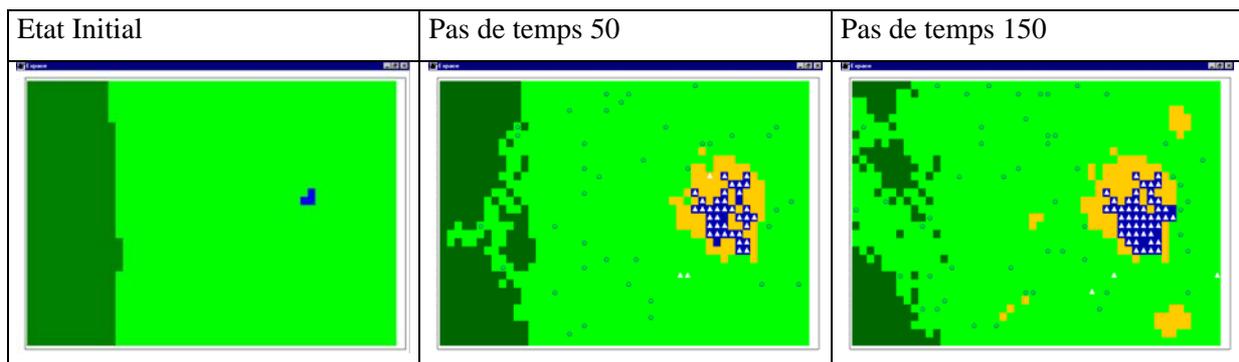


Figure 10 : Simulation de la version «acteur». La forêt est en vert foncé, la savane en vert clair, les champs en jaune et les habitations en bleu. Les agents paysans sont des triangles blancs et les agents troupeaux des ronds noirs

Lorsque la population s'accroît au point qu'il ne reste plus de terres arables disponibles à proximité des habitations, les nouvelles familles d'exploitants doivent aller rechercher de nouvelles terres et s'y installer, selon les mêmes principes (principe orbital). Suivant cet accroissement de la population, la pression pastorale augmente et atteint un seuil où son effet se combine à la demande en bois de chauffe pour provoquer la régression de la forêt.

Dans la version «acteur» de ce scénario, les agents sont les agriculteurs et leurs troupeaux qui se déplacent dans l'espace pour utiliser et gérer les ressources renouvelables dont il est le support. Dans la version «spatiale» de ce scénario, les entités agents sont les entités spatiales : villages, champs, parcours, forêt, dont la dynamique est liée au comportement des acteurs qui gèrent les ressources qu'elles contiennent.

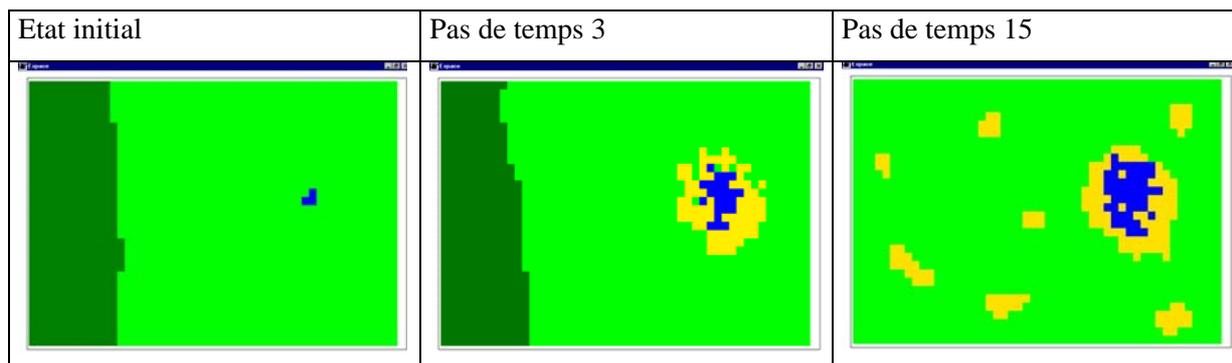


Figure 11 Simulation de la version spatiale

D'un point de vue multi-agents la version acteur du scénario est facile à modéliser avec les classes prévues dans Cormas, cellules et agents situés. Par contre pour la version spatiale du scénario on introduira pour la première fois dans Cormas une entité dite alors agrégat, composé de cellules, qui peut modéliser les entités forêt, savane, champs et village. C'est alors un véritable système d'échange entre ces quatre entités qui va être simulé. A nouveau ces deux modèles étaient présentés comme les deux extrêmes d'un continuum, avec la possibilité de représenter des cellules, des agents acteurs et des entités spatiales à des échelles différentes.

En conclusion d'un article [Bousquet, 1999] nous estimions que les perspectives thématiques qu'offre cette combinaison sont importantes. Tout d'abord, pour l'analyse de la gestion des ressources naturelles renouvelables, le lien entre des individus et des entités spatiales va permettre de préciser le rapport entre l'espace et la gestion de ces ressources, grâce à l'explicitation de règles associant des comportements d'acteurs à des comportements d'entités spatiales. Cela va autoriser en particulier une meilleure articulation entre les processus biophysiques sur différentes échelles et sociaux d'une part et spatiaux d'autre part. Ensuite, pour l'analyse des dynamiques spatiales, le lien entre une entité spatiale et ses composantes permet d'envisager de modéliser les interactions spatiales entre les entités et en particulier leurs déformations et déplacements [Cheylan, Lardon et al., 1994; Claramunt, Thériault et al., 1997], ce qui est très complémentaire des potentialités actuelles des SIG.

4.3.2 le modèle ForPast

L'étape suivante de cette réflexion fut un travail mené par Sylvie Lardon sur des dynamiques d'embroussaillage [Lardon, Baron et al., 1998; Lardon, Bommel et al., 2000] [Bommel, 1999; Bommel and Lardon, 2000; Bommel, Libourel et al., 2000]. Sa démarche peut être décrite en plusieurs étapes. Tout d'abord il y a plusieurs niveaux d'agrégats.

- Les objets pelouse, lande, sous-bois et bois sont des agrégats de niveau 1 (N1). Ils se reconstituent à partir de cellules connexes partageant le même aspect. Chaque objet connaît son «milieu intérieur» (ses cellules qui le composent, sa taille, son état moyen et sa forme), ainsi que son voisinage proche : c'est l'ensemble des cellules de sa bordure qui constitue en quelque sorte sa surface sensorielle.
- Les entités spatiales (dites composées non jointives en figure 14) sont les ensembles de niveau 2 (N2), constitués de l'union des objets de niveau 1. Chaque partition connaît ses constituants, objets N1, son état moyen et sa bordure.
- Le paysage végétal forme un objet de niveau 3 (N3), constitué de l'ensemble des entités spatiales de niveau 2.

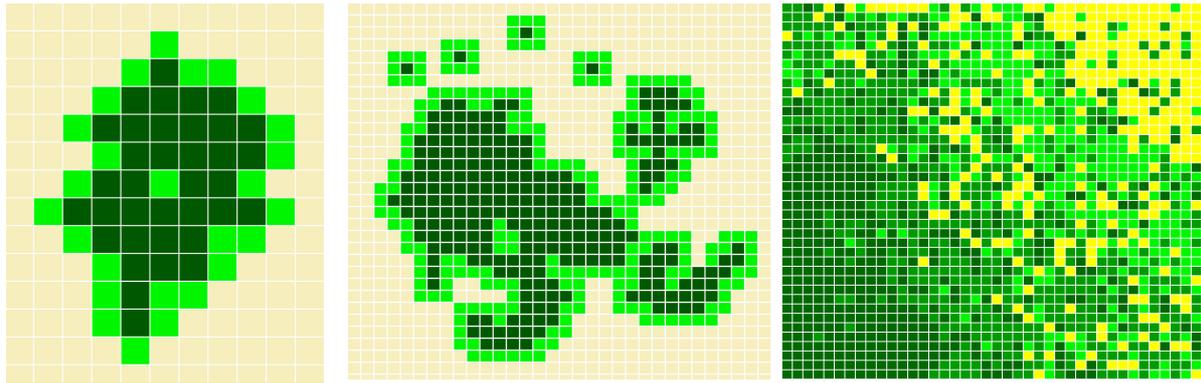


Figure 12 Représentation des objets de niveau 1, 2 et 3

Ensuite, l'apport est de considérer que chaque agent peut avoir sa propre représentation. On peut ainsi créer plusieurs objets paysage à partir d'une même grille de cellules, constituant autant de représentations différentes d'un même espace. En effet, les agents acteurs du système n'ont pas forcément la même image de l'espace dans lequel ils évoluent. En fonction de son rôle économique, de sa situation géographique ou de son expérience passée, chaque acteur possède un point de vue de l'espace qui lui est propre, il construit sa représentation du monde. L'idée est que les agents vont exprimer des stratégies en fonctions d'indicateurs spatiaux calculés sur ces différentes échelles. Pour exprimer les stratégies humaines et les processus naturels, nous avons donné aux objets spatiaux la propriété de connaître leurs propres caractéristiques : taille, âge, embroussaillement moyen, compacité, distance à la forêt. En fonction de différentes stratégies (faire des coupe-feu, préserver la pelouse) l'agent va construire ces représentations spatiales et observer ces indicateurs.

Le travail ici présenté développe donc l'idée des représentations spatiales des agents qu'ils se construisent à différentes échelles pour exprimer leurs stratégies. L'utilisation du concept d'entité spatiale est reliée à une modélisation cognitiviste des représentations des agents. Dans le cas de ces simulations il n'y a qu'un agent en relation avec son espace.

4.3.3 Le modèle BrouteLaForêt

Un troisième chercheur géographe, J.L. Bonnefoy, va ensuite s'intéresser à cette notion d'entité spatiale et proposer un modèle où intervient la dimension collective [Bonnefoy, Le Page et al., 2000; Bonnefoy, Bousquet et al., à paraître].

Si l'on reprend l'argumentation de Bonnefoy : Nous envisageons une modélisation qui associerait des pratiques spatiales individuelles et des appréciations de l'espace par le groupe. Ici le territoire n'est plus un sous-ensemble spatialisé du SMA, au contraire le SMA devient le territoire modélisé. Cette méthode est plus qu'une intégration de l'espace dans les systèmes multi-agents, c'est la mise en scène de conceptions théoriques de l'espace géographique. Il s'agit de construire une dialectique entre un espace produit par la société et un espace contraignant les individus, notamment par le biais des représentations individuelles et collectives. Pour cela, il est nécessaire de faire appel à ce que les spécialistes de l'Intelligence Artificielle Distribuée mettent sous le terme plus général d'apprentissage. De plus, il faut intégrer l'interaction existante entre espace et société, c'est-à-dire la contrainte dynamique que l'espace produit par la société exerce à son tour sur la société. Notre exemple s'attache à modéliser des interactions entre le parcours de troupeaux conduits par des bergers dans des sous-bois et une ressource forestière par le truchement des représentations spatiales. La pâture sera plus ou moins réglementée de manière dynamique par les représentations individuelles ou collectives qui se construisent au cours de la simulation, intégrant les états successifs de la ressource forestière entre altération en savane et repousse. Les représentations agissent comme médiateur dans la modélisation des interactions entre les agents et la ressource commune. Ici cependant, les représentations sont des constructions individuelles ou collectives issues de pratiques de l'espace au cours de la simulation au lieu d'être des référents communs établis a priori comme, par exemple, des pratiques [Lansing, 1994].

Ainsi, dans le modèle, nous considérons trois éléments en interaction dynamique : des pratiques spatiales d'individus, des représentations de l'espace individuelles ainsi qu'une représentation spatiale collective. Ces trois éléments interagissent au cours du temps qui s'écoule, les pratiques et les représentations individuelles à la fois découlant de la représentation collective et l'influencent.

En référence aux deux modèles précédemment exposés le travail de Bonnefoy va reposer plus sur une appréhension sociale de l'espace. Chaque agent se fait une représentation individuelle de l'espace, mais il existe aussi une représentation collective décidée qui va influencer leurs actions et donc modifier la ressource. En retour, les agents pourront modifier la représentation collective. « *Acteurs individuels, groupes et institutions créent l'espace par leur travail, par leurs actes quotidiens, même ceux qui ne portent pas directement sur l'espace. Ils le font sur un terrain déjà défini, muni de « mémoires », qu'ils utilisent ou qu'ils transforment selon leurs moyens et leurs stratégies, lesquelles sont guidées en particulier par leurs représentations de l'espace lui-même. Par ses propres structures, l'espace qu'ils produisent les amène à infléchir leurs actions ultérieures, selon ces représentations, également modifiées par les nouvelles pratiques de l'espace transformé* » [Brunet, 1992].

On retrouve ici le schéma du bouclage dynamique entre le niveau individuel et le niveau collectif qui a déjà été exposé sur les principes de modélisation multi-agents et qui s'est aussi révélé dans le chapitre sur les échanges. La figure 13 reprend ce schéma.

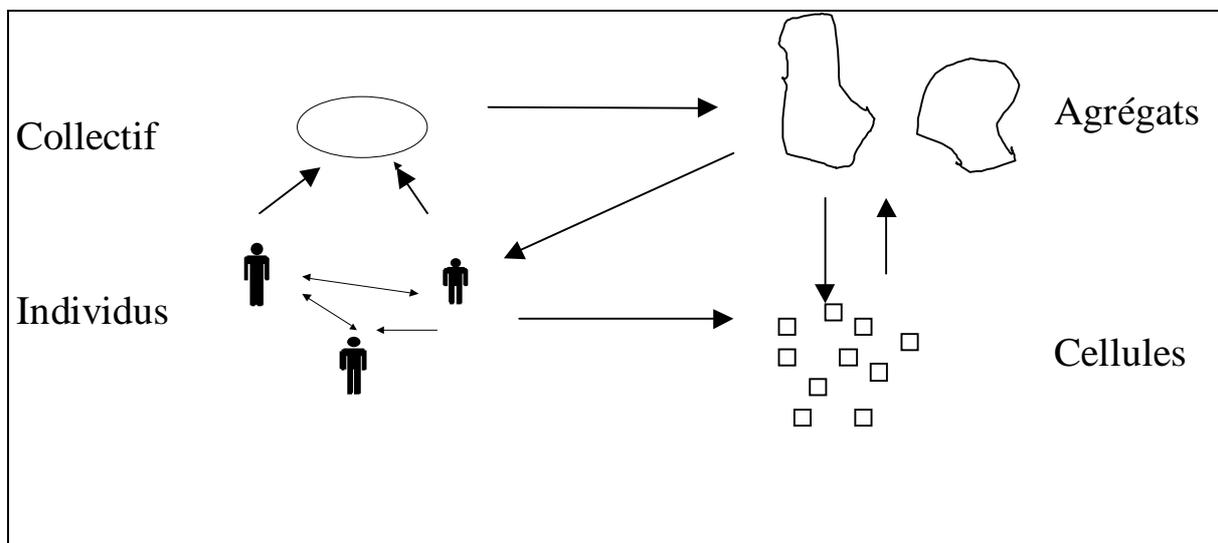


Figure 13 Représentation schématique des relations entre une société d'agents et son espace. Les individus se déplacent, transforment les cellules, perçoivent les agrégats forêts, décident collectivement des agrégats qui seront protégés.

Avec le modèle SavaneEspace nous avons introduit la notion d'agrégats ou d'entité spatiale qui nous fait considérer la dynamique de l'espace sur plusieurs niveaux. Avec le modèle ForPast nous avons prolongé cette réflexion en introduisant l'idée des représentations spatiales chez un agent qui peut en conséquence décider de son action sur cet espace, à différents niveaux. Enfin avec le dernier modèle ces représentations sont mobilisées pour une décision collective qui transforme l'espace sur plusieurs niveaux. D'autres chercheurs se sont lancés dans une réflexion sur ces représentations spatiales et leurs dynamiques [Bonin and Le Page, 2000], qui rejoignent des recherches menées dans le domaine de la physique par D. Servat [Servat, E.Perrier et al., 1998] et J.-P. Treuil [Treuil, Perrier et al., 1997] au Lia de l'Ird.

4.3.4 Le retour à l'implémentation

Devant le succès de cette recherche et l'engouement suscité auprès d'au moins cinq chercheurs, nous avons décidé de doter Cormas des modules nécessaires pour proposer aux utilisateurs de modéliser leur monde artificiel en utilisant des agrégats. C. le Page a proposé une architecture.

La construction d'un environnement avec *Cormas*, présentée au paragraphe précédent, passe obligatoirement par la définition d'une entité spatiale élémentaire qui hérite de l'entité générique (« Cellule »). Ce préalable accompli, différentes relations de composition sont possibles. Ces opérations dépendent de la nature des composants spatiaux. *Cormas* se base sur le schéma d'héritage entre entités spatiales présenté à la figure 14.

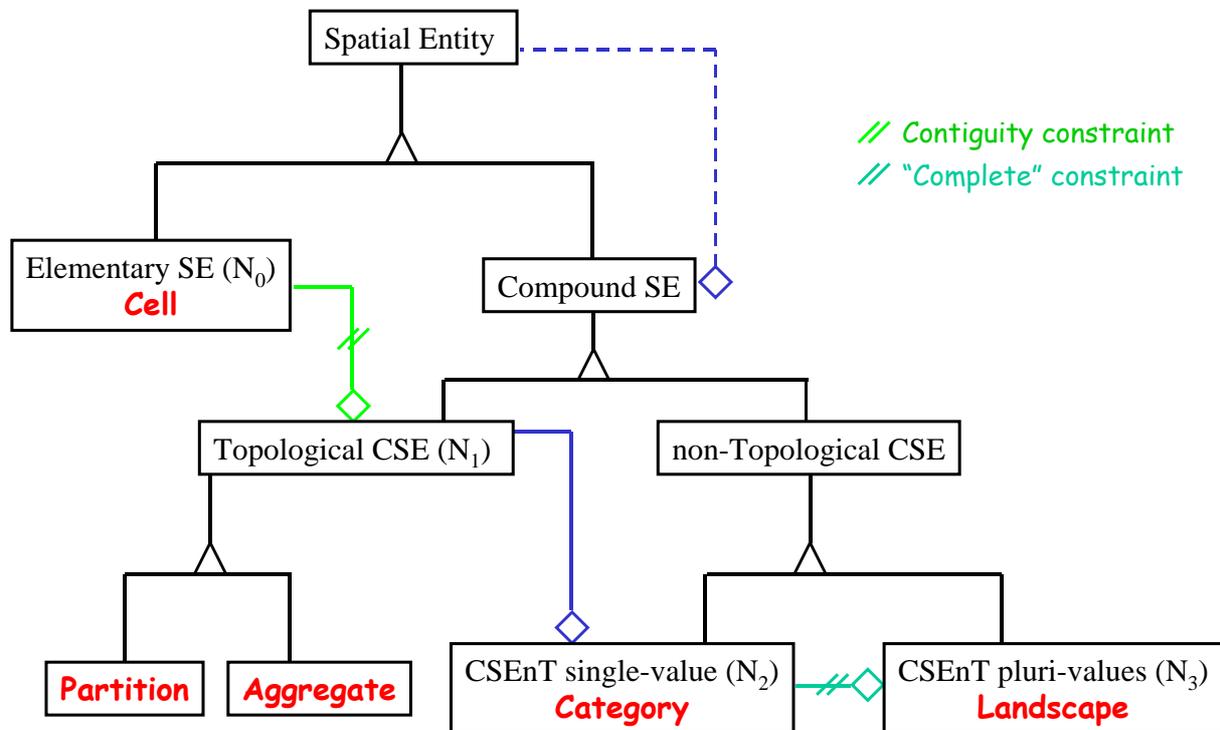


Figure 14 Schéma d'héritage des entités spatiales de Cormas

La particularité de ce schéma repose sur la distinction de deux types d'entités spatiales composées jointives (i.e., dont les composants sont contigus). Dans le cas de l'entité «Partie », deux parties contiguës seront considérées voisines, alors dans le cas de l'entité «Agrégat », de par la nature même de cette classe, deux agrégats contigus ne peuvent coexister et fusionnent obligatoirement.

Cette structure permet de distinguer des relations de composition simples (sans contrainte de voisinage) des relations de composition avec contrainte de voisinage (dans ce deuxième cas, on parle d'agrégation).

Ainsi, une partition correspondra à un découpage de la zone d'étude (ici, la grille spatiale), en «Parties » composées d'entités spatiales liées par une relation de voisinage (cellules ou parties de niveau inférieur).

Un agrégat est un regroupement de cellules (cf. par exemple les entités de type «Pelouse » du modèle de la section 3.2) ou de parties (cf. les entités de type «Forêt » du modèle de la section 3.3). L'ensemble des agrégats de même nature constitue des entités spatiales non connexes (pas de contrainte de voisinage) liées par une similitude d'état (par exemple la collection des agrégats de type «Pelouse » du modèle de la section 3.2).

4.4 Les applications.

Les modèles qui ont été présentés ci-dessus sont des modèles théoriques qui ne sont que très peu inspirés par des questions dites de terrain. Parallèlement de nombreux modèles ont été développés pour réfléchir un problème concret d'interaction dynamique des ressources, dynamique sociale. Pour

la plupart ils intègrent les différentes dimensions sociales et spatiales évoquées ci-dessus. En retour, la mise en application de ces concepts a alimenté les considérations théoriques.

- Le modèle Shadoc élaboré par O. Barreteau traite de la viabilité dans les périmètres irrigués sur le fleuve Sénégal. Ce modèle intègre de nombreuses dynamiques d'échanges de biens, de services, de représentations à des niveaux d'organisation multiples. L'environnement dynamique représente un ensemble de parcelles qui se partagent de l'eau. Olivier discute de l'importance de la cohérence des règles qui s'appliquent à différents niveaux d'organisation [Barreteau, 1998; Barreteau, 1998; Barreteau and Bousquet, 1998; Barreteau and Weber, 1998; Barreteau and Bousquet, 1999; Barreteau and Bousquet, 2000; Barreteau and Bousquet, 2000].
- Le modèle Orizi élaboré par Nicolas Becu et Pascal Perez [Becu, 1999] étudie les conséquences des pratiques des agriculteurs sur la dynamique de la ressource eau en Indonésie.
- Le modèle Raphia élaboré avec Vestalys Herimandimby et Elineo Randriaona traite de la modélisation de la filière raphia à Madagascar. Il est une application directe du modèle filière présenté ci-dessus [Herimandimby, 1998].
- Le modèle [Antona, 2000] est à nouveau une application du modèle filière à la gestion du bois énergie au Niger.
- Le modèle Kayanza élaboré avec P. Guizol qui traite de l'évolution du paysage d'une région du Burundi sous l'effet de la collecte de bois de feu prend en compte les dynamiques spatiales sur différentes échelles et examine l'effet des configurations spatiales, de l'imposition exogène de droits d'accès et d'échange de droits d'usage [Bousquet, Le Page et al., 2000].
- Le modèle Djemiong élaboré avec de nombreux collègues, dont A. Takforyan, qui traite de la chasse au Céphalophe dans les forêts Camerounaises, cherche lui aussi à comprendre quelles sont les relations entre le comportement d'une ressource dynamique qui a des comportements spatiaux, les espaces de chasse et leur inscription dans une structure sociale [Bousquet, LePage et al., 2000]. Il est montré que le système de rotation des chasseurs entre différents lieux de chasse, transmis de génération en génération, est adapté à la dynamique de la ressource.
- Le modèle Pasteur élaboré par P. d'Aquino géographe et A. Bah informaticien à Dakar sur la transhumance en région sahélienne [Bah, 1997; Bah, 1998]. Ce modèle met en œuvre des représentations des bergers et leurs décisions. Dans un processus de représentation de connaissances les deux auteurs ont tenté de construire petit à petit des algorithmes de décision. Les questions posées sont celles de la construction d'une carte mentale par les agents, et d'une capacité de décision pour évaluer des zones viables (agrégats). Un travail intéressant a été effectué par A. Bah en définissant des agents génétiques dont les traits correspondent aux tâches de perception, de décision, de déplacement et de communication. Cela se rapproche des travaux de J. Holland [Holland, 1995] ou de la plateforme Echo [Hraber, 1997].
- Le modèle SINUSE [Feuillette, Bousquet et al., 2000; Feuillette, Garin et al., 2000] élaboré par Sarah Feuillette pose la question des relations entre une nappe phréatique à Kairouan, et les comportements de pompage individuel ou collectif de paysans. Il prend en compte des échanges entre agents et plusieurs dimensions spatiales pour le partage de l'eau.
- Le modèle WSErosion [Kam, Castella et al., submitted] élaboré par G. Treuil et C. Baron s'intéresse à l'érosion sur des bassins versants du Nord Thaïlande, en fonction des stratégies des agriculteurs. Ce modèle nous a permis de développer l'implémentation d'une représentation spatiale en mode vectoriel.
- Le modèle Didy, élaboré par G. Abrami [Abrami, 1999], cherche à modéliser un écosystème forestier où se confrontent différents usages.
- Le modèle Camargue élaboré par R. Mathevet [Mathevet, 1998; Mathevet, 2000], sur l'activité de chasse en Camargue intègre lui aussi une structuration de l'espace en différents milieux, des décisions individuelles d'aménagements, des contrats de chasse entre agriculteurs et chasseurs.

- Le modèle proposé par M. Bonin [Bonin and Le Page, 2000] qui prolonge les réflexions théoriques sur les dynamiques d'entités spatiales et les applique en envisageant différents scénarios sur le massif de Tanargues.
- Le modèle SylvoPast élaboré par M. Etienne, sur l'aménagement de forêts méditerranéennes prend en compte les représentations spatiales de plusieurs acteurs qui négocient pour aménager ensemble un même espace dynamique soumis au risque de feu.

Chacune de ces opérations est venue à la fois confirmer la méthode de modélisation qui est proposée, à la fois dans la conceptualisation et dans l'implémentation, et la préciser en faisant évoluer les primitives Cormas proposées.

4.5 Modélisation d'accompagnement : usage des modèles et aide à la décision



Outre les questions de représentations des connaissances et de simulation, la question qui était posée au début de ce cycle de recherche portait sur l'usage des modèles et l'aide à la décision. La théorie de la décision telle qu'inspirée par les économistes ou les automaticiens est une théorie sur la rationalité d'un décideur, confronté à des choix potentiels.

L'équipe à laquelle j'appartenais, travaillant sur la gestion des ressources renouvelables avait fait du processus de décision un de ses thèmes de recherche. Par processus de décision, J. Weber entendait le processus d'interaction entre des acteurs individuels et/ou collectifs ayant des représentations et des poids différents dans la négociation. On a vu que cette définition présidait au choix des SMA comme méthode de représentation des connaissances. Si l'utilité du formalisme pour la représentation des connaissances était pour moi validée depuis la fin de ma thèse il s'est confirmé à travers différentes expériences comme celle de R. Mathevet sur la Camargue par exemple, où le modèle élaboré sert d'objet médiateur aux discussions entre différents chercheurs ou acteurs. Cependant les discussions portent alors soit sur les connaissances ou les données représentées ou encore sur les résultats du modèle. Il restait d'une part à trouver une méthode pour valider ce qui fait la caractéristique des SMA, les comportements, mais surtout les interactions entre les agents et leur organisation et, d'autre part, à réfléchir à l'insertion des simulations dans un processus de décision.

La méthode des jeux de rôles proposée au chapitre 2.3 a commencé à être testée. Deux jeux de rôles ont été effectués, deux autres sont en cours. Nous avons par ailleurs participé, d'un peu loin, aux tentatives menées par l'Ird (C.Mullon J.-P. Treuil) avec l'équipe Vittel de l'Inra (M. Benoit, J.-P. Deffontaines).

4.5.1. Du modèle au jeu de rôle.

La première expérience est celle menée à partir du modèle Shadoc créé par O. Barreteau sur les périmètres irrigués du fleuve Sénégal [Barreteau and Bousquet, 1999]. Il faut rappeler que l'élaboration du modèle Shadoc avait été effectuée au moyen d'allers et retours permanents entre le terrain et le modèle. Ce dernier fut démarré dès le début de la thèse, puis à la fin de la thèse que le comité de pilotage avait voulu canaliser vers la représentation des connaissances et la simulation, a débuté la réflexion sur le jeu de rôle. L'opération a tout d'abord consisté à créer un jeu plus simple que le modèle pour le rendre jouable tout en conservant une chance d'appréhender une forme de complexité (par exemple passer de 365 pas de temps à huit pas de temps pour une campagne agricole). Puis ce modèle a été testé dans différents villages. Des cartes ont été créées pour représenter le statut social, l'objectif de production, la règle de remboursement entre autres. Puis les joueurs s'engagent dans des phases de recherche de crédit, d'entretien de la lame d'eau dans une parcelle qu'ils doivent semer et récolter, et enfin d'apprentissage. Toutes ces phases supposent des coordinations entre les acteurs. Le jeu de rôle s'affranchit de l'ordinateur, il en représente le contenu.



Figure 15 Séance de jeu dans le village de Podor. Les villageois se concertent (échanges de crédit de services, d'information) pendant que les animateurs mettent à jour la dynamique de la ressource (l'eau dans les parcelles)

La première des observations est la validation du postulat principal de l'approche multi-agents : à partir de comportements simples d'agents en interaction avec un environnement dynamique émergent des phénomènes complexes. Dans le cas de ce modèle, dans des systèmes où l'eau est abondante, de nombreux agents (ou joueurs) ne font pas de bonnes récoltes. La raison réside dans la multiplicité des coordinations. Cette multiplicité existe dans le modèle ; elle est conservée dans le jeu malgré les simplifications. La validation du jeu réside tout d'abord dans ces résultats ces phénomènes qualitatifs qu'on observe dans le jeu et que l'on peut aussi observer dans la réalité. La deuxième validation passe par la discussion avec les acteurs. D'une part les acteurs qui jouent ce jeu sont en mesure de le comparer à leur réalité, et donc de le confirmer ou de proposer des modifications. D'autre part, elle passe aussi par les conversations entre les acteurs eux-mêmes : le jeu provoque des discussions entre les acteurs à propos de ce qu'ils vivent dans la réalité. Avant de commencer ces expériences nous avions l'idée d'un usage en deux temps. Tout d'abord de jouer le modèle pour une validation sociale, puis ensuite de s'en servir pour explorer des scénarios en commun avec les acteurs. Cette première phase de validation est moins simple qu'il n'y paraît, puisque tout jeu est en même temps une validation du modèle qui a servi à l'élaborer mais aussi une phase d'acquisition des connaissances sur la réalité.

Au cours de cette expérience, nous n'avons pas mené très loin la phase suivante qui consiste à explorer des scénarios. Ce que nous avons vérifié, c'est qu'une fois le jeu de rôle joué les acteurs sont capables de suivre le déroulement d'un scénario et de discuter les hypothèses à simuler. L'intervention dans le processus de décision ne peut cependant pas encore être bien décrit. Les acteurs ont réclamé le jeu comme support de discussion entre eux pour discuter de la réalité à différents moments d'une campagne agricole. Cela rejoint des idées que nous avons sur l'utilisation de ce type de modèle comme un outil qui pourrait aider au suivi d'un projet. On peut ainsi penser que ces modèles servent de support à la discussion sur les informations qu'il est nécessaire d'acquérir et de suivre. Il est aussi envisageable que dans un processus de suivi les successives versions d'un même modèle soient la trace écrite et dynamique de l'évolution des représentations. Pour conclure de façon anecdotique sur ce jeu, il a été demandé au paysans de donner un nom à ce jeu. Après des propositions telles *Miroir* (rappelons qu'un des premiers SMA créé par P. Hogeweg s'appelait *MIRROR* [Hogeweg and Hesper, 1990]), *cafard* (au sens de la petite bête fûtée qui espionne) dont la traduction en anglais était gênante, le consensus s'est fait sur *njoobari* qui veut dire "le minimum qu'un paysan emmène quand il voyage" que je m'empresse de considérer comme une définition de l'accompagnement. Une autre opération est en cours menée par O.Barreteau sur l'organisation d'un Sage (Schéma d'Aménagement et Gestion de l'Eau) dans la Drôme.

4.5.2 Du jeu de rôle au modèle.

La deuxième expérience fut menée par P. d'Aquino au Sénégal sur la gestion des espaces et des ressources par des communes rurales [Lynam, Bousquet et al., submitted]. Le but est de mettre en place des simulations qui aideront les Conseils Ruraux à décider de l'affectation des différents espaces de la Communauté Rurale, c'est à dire quels espaces seront réservés à quels types d'activités, quels espaces auront un accès contrôlé, quels types d'utilisateurs seront encouragés, quels autres types seront contrôlés, réduits, etc. L'interlocuteur, que l'on souhaite aider dans sa gestion, est donc le Conseil rural, collège élu de responsables paysans, qui ont à charge (décentralisation oblige) de gérer les ressources de la Communauté Rurale (qui regroupe entre 20 et 300 villages). Cela correspond à peu près aux communes rurales françaises (peut-être un peu plus grand). Dans le cadre de l'opération POAS (Plan d'Occupation et d'Affectation des Sols) du PSI-Sénégal, le Conseil Rural doit décider de règles d'accès à ses différentes ressources naturelles. Cela comprend le choix pour telle ou telle activité (la pluri-activité est cependant possible et même recherchée : trouver des solutions qui permettent au maximum d'usages différents de coexister sur un même espace) pour chaque type de zone. L'approche tentée est ici un peu différente puisqu'il s'agit tout d'abord de créer un jeu de rôles avec les acteurs avant de le transformer en SMA. Cette opération fut menée au cours d'ateliers de trois jours dans plusieurs villages sur le thème des relations agriculture-élevage. La démarche est la suivante :

- identification des besoins des différents acteurs (qualité du sol, salinité de l'eau, distances à l'eau, distances entre champs),
- création d'une carte représentant la zone et jeu de rôle qui consiste à demander aux acteurs, mois par mois quelles sont leurs activités et où elles se localisent. Chaque joueur dispose d'un post-it qu'il vient coller sur la carte. Les autres joueurs peuvent évidemment réagir.
- analyse des scénarios possibles d'évolution ou des aménagements de l'espace
- simulation de ces différents scénarios et aménagements sur ordinateur.

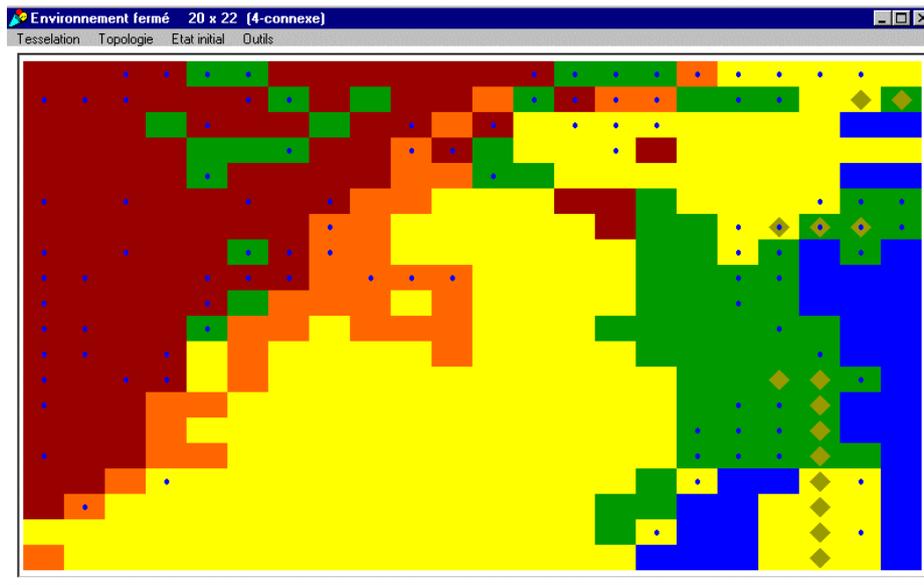


Figure 16 La carte initiale de la zone du village de NGnith. Le lac en bleu, les points d'eau sont des points bleus. Les losanges représentent des pistes pour pouvoir accéder aux presqu'îles.

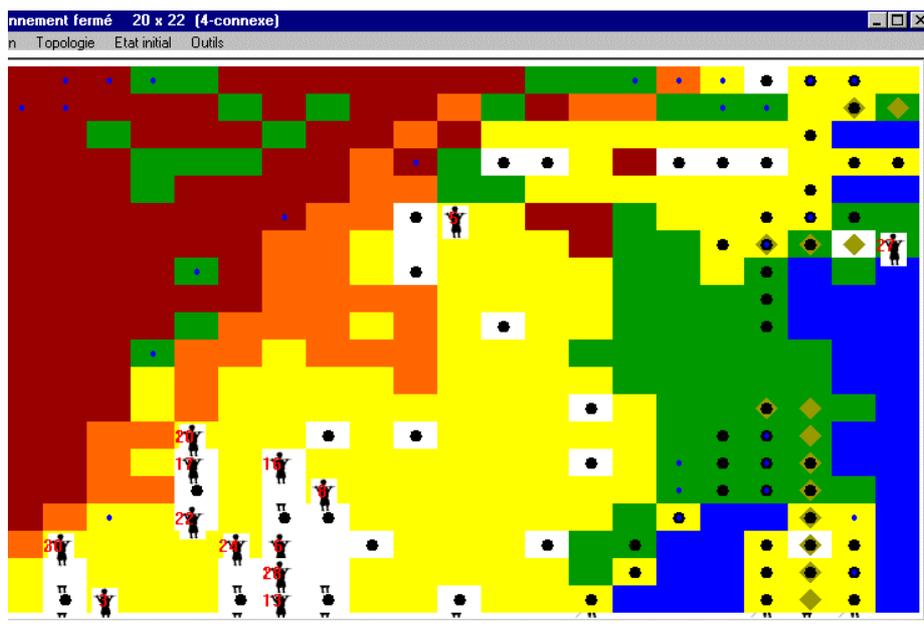


Figure 17 Fin de simulation. Les points noirs sont les champs. En blanc les zones où la ressource a disparue. Les agents qui ne peuvent avoir accès au lac en raison des champs vont à l'Ouest.

Lors de cette opération nous avons eu confirmation de la faisabilité de ce processus. Les acteurs sont capables de suivre à l'écran les différents scénarios, de les discuter et d'en proposer de nouveaux. Les principaux problèmes de gestion de l'espace et des ressources apparaissent aisément dans la simulation. Il n'est point besoin d'agents très compliqués. Les événements que les acteurs reconnaissent à l'écran sont porteurs de beaucoup de discussions. Dans un contexte conflictuel, il semble que le simulateur puisse favoriser une discussion plus canalisée que la discussion libre. Par exemple dans le contexte d'un des villages (Nboundoum), l'atelier de trois jours a permis de discuter du besoin et de la localisation d'aménagements pastoraux, ce qui était un sujet non abordé jusqu'alors. Décision fut prise de faire une formation sur les aménagements pastoraux. Il ne revient pas au modèle de donner des solutions aux problèmes mais de favoriser la discussion sur les différentes alternatives, d'envisager collectivement des actions. Le recours à l'expertise technique est l'étape qui suit cette

décision collective. Cette expertise peut à son tour utiliser des modèles, plus précis, plus alimenté en données et connaissances. Dans le village de Ngnith, le problème n'est pas la quantité d'espace disponible mais l'accès à l'eau. Les simulations ont permis de discuter les règles collectives pour qui régularaient l'accès à des canaux qui seraient construits à partir du lac. La proposition fut de réserver le dernier kilomètre du canal à l'usage des éleveurs.

En résumé, les idées que nous avons sur l'utilisation d'un modèle en accompagnement d'une recherche interdisciplinaire d'une part et en accompagnement d'un processus de décisions semblent se valider. Un autre jeu de rôle a été créé par M. Etienne (SylvoPast) suite à l'élaboration d'un SMA pour la négociation d'aménagement de forêts méditerranéennes par la négociation entre forestier et éleveurs. Stanislas Boissau a aussi utilisé des jeux de rôles au Nord Vietnam pour acquérir des connaissances sur les comportements et interactions afin de mettre au point un simulateur. Cette recherche sur la place des modèles dans le processus de décision ne fait que débiter et plusieurs instituts s'intéressent maintenant à cette double formalisation en modèle et jeu de rôle. Bien que ce ne soit qu'un début ce type d'usage des modèles multi-agents constitue ma proposition (avec d'autres chercheurs cités ici) pour intégrer cette forme de modélisation dans une démarche d'aide à la décision.

4.6 Validation, vérification des SMA, approches formelles

Le problème de la validation se traite en fonction de l'usage de ce modèle. Très généralement les SMA sont utilisés pour étudier des propriétés qui s'expriment sous forme de distributions ou d'indicateurs [Hraber, 1997], des configurations spatiales, des formes de réseau. Cependant il existe une opposition méthodologique entre l'approche qui recherche les propriétés génériques d'un système et une approche plus inductive. Dans le premier cas des utilisations possibles de ces simulations l'approche est en concordance avec les principes de la vie artificielle. Le modélisateur met en place des mécanismes et observe les réponses émergentes. Eventuellement ces formes existent. La raison de ces recherches vient des résultats et de la démarche de la physique [Weisbuch, 1991; Weisbuch, 1991] : on s'intéresse aux transitions entre phases d'un système. Il s'agit alors de construire des modèles très simples d'interaction et rechercher les coefficients critiques qui caractérisent les transitions. On suppose que le modèle et le système étudié appartiennent à la même classe d'universalité dont on a ainsi décrit les propriétés qualitatives. Le principe de comparaison à la réalité est alors le principe de la Vie Artificielle « la vie telle qu'elle pourrait être plutôt que la vie telle qu'elle est » [Langton, 1988]. Une autre utilisation, plus empirique, vient plutôt de la communauté des modélisateurs issus des sciences de la vie et de la société directement ou indirectement impliqués dans des problèmes de gestion des ressources. L'idée sous-jacente, qui est de faire un système qui se comporte comme la réalité (la vie telle qu'elle est), est toujours présente avec comme objectif de se servir du simulateur pour se poser la question « et si... ? ». Cette adaptation du modèle à la réalité n'est pas destinée à faire du modèle un outil de prédiction mais plutôt à comprendre des dynamiques existantes. Les auteurs cherchent le comportement, identifient les paramètres pour proposer non pas une explication mais une simulation des observations sur la réalité : l'hypothèse testée permet de simuler ces observations mais d'autres hypothèses pourraient aussi simuler cette réalité.

Traiter de validation, dans ce deuxième cas, c'est alors s'intéresser à la cohérence entre le modèle élaboré et la réalité. En sus des opérations classiques de modélisation qui consistent à vérifier que des indicateurs observés sur le modèle sont qualitativement comparables à la réalité (ordres de grandeurs, sensibilité) nous avons choisi de traiter cette question à travers le jeu de rôle qui est une validation sociale. Les SMA sont une méthode de modélisation des phénomènes complexes à partir de la représentation des comportements et des interactions. Le jeu de rôle permet de valider ces comportements et interactions et de faire le lien avec les processus résultants.

Par ailleurs peut se poser le problème de la vérification : le modèle représente-t-il ce pourquoi il a été conçu ? Pour cela nous avons investi dans des méthodes de représentation telles UML, Unified Modelling Language, qui permet de prévoir une représentation graphique du modèle. Il peut aussi être intéressant de comparer les modèles multi-agents à d'autres modèles formels. Dans la littérature on peut trouver ce type de travaux, en particulier chez les physiciens qui se sont intéressés au multi-agents. Ainsi, G. Weisbuch [Weisbuch, Kirman et al., 1997], dans une étude sur les relations de

fidélité sur le marché aux poissons à Marseille, traite d'abord le problème par une modélisation probabiliste et donne les propriétés du modèle grâce à la méthode du champ moyen. Les simulations multi-agents peuvent alors prendre appui sur ces résultats pour étudier des phénomènes plus complexes. Deux opérations ont été conduites à cet effet.

Lors d'un stage de quelques semaines, M. Valeix a comparé une approche multi-agents et une approche par équations différentielles pour modéliser le problème de la compétition entre faucons et colombes, modèle classique en écologie [Valeix, 2000]. Elle reprenait le type de modélisation accomplie par Cazoulat [Cazoulat and Victorri,] entre autres. En se plaçant dans des conditions très particulières comme par exemple une reproduction probabiliste, il est possible de retrouver les résultats prédits par la dynamique des systèmes. L'intérêt des SMA est bien sur de pouvoir tester des hypothèses beaucoup plus réalistes en regard de la réalité, même si le traitement par simulation ne permet pas de donner les propriétés qualitatives du système.

Innocent Bakam, thésard en informatique à Yaoundé, dont le professeur M. Tchuenté est un spécialiste du parallélisme, a conduit des recherches pour une approche formelle des SMA à l'aide des réseaux de Pétri. Outil du parallélisme, les réseaux de Pétri permettent une modélisation formelle de systèmes distribués, et donc d'exprimer des propriétés d'un modèle sans avoir à le simuler. Innocent a donc travaillé sur le modèle de chasse (Djemiong). Ce travail fut l'occasion d'une collaboration avec F. Kordon du Lip6 à Paris. Après quelques mois de travail Innocent a réussi à proposer un modèle spatialisé de la chasse et de présenter des propriétés du modèle. Une propriété est par exemple le fait que, pour un système donné de piégeage, la ressource ne peut pas disparaître. Cependant pour aboutir à ce résultat, les simplifications du modèle furent drastiques : quatre cellules, sept «agents» qui n'ont pas d'âge, etc... La comparaison avec le modèle multi-agents ne peut alors être que qualitative. Nous avons étudié sur le réseau de Pétri l'influence relative de systèmes de gestion basés sur une interruption temporelle de la chasse ou de systèmes basés sur une rotation des actes de chasse dans l'espace [Bakam, 2000].

En conclusion : les systèmes multi-agents offrent de grandes possibilités de représentation des connaissances pour la gestion des ressources. Cette richesse les condamne à des traitements par simulation. Des travaux ont été effectués qui montrent la convergence de certains protocoles de négociations par exemple. Ces algorithmes sont utilisés pour partie des simulateurs développés. On peut donc utiliser des méthodes de conception pour favoriser la rigueur de l'implémentation. Sargent [Sargent, 1999] et Axelrod [Axelrod, 1997] proposent aussi de réécrire les modèles en d'autres langages, avec d'autres plateformes, ce que nous avons effectué avec le modèle Jumel par exemple. Certaines méthodes formelles permettent de faire des modèles des simulateurs multi-agents et ainsi exprimer des propriétés. Cela se fait cependant au prix de telles simplifications qu'on peut se demander ce que ces méthodes valident. On peut proposer une utilisation complémentaire des différents types de modèles : les modèles multi-agents permettent de modéliser des problèmes complexes et de construire des mondes virtuels assez proches de la réalité. Par simulation, il est possible d'identifier des questions plus générales pour lesquelles il existe des méthodes de validation formelle.

5 PROJET DE RECHERCHE

Au cours des dernières années, grâce à mon entourage scientifique et aux étudiants que j'ai eu la chance d'encadrer, j'ai pu développer des travaux qui permettent aujourd'hui de proposer une démarche de modélisation avec les systèmes multi-agents. Cette démarche propose :

- une méthode qui se concrétise dans un outil de modélisation. Cet outil, Cormas, est tout à la fois une proposition technique qui intègre la plupart des principes classiques des SMA et une concrétisation de nos recherches conceptuelles en particulier dans le domaine de la représentation de l'espace et des différents niveaux d'organisation. Cet outil est aujourd'hui utilisé par de nombreux chercheurs. Pour indication, la liste électronique Cormas compte actuellement une centaine d'abonnés. On peut considérer qu'une vingtaine de personnes utilisent Cormas pour leurs recherches.
- une approche pour l'usage des modèles dans un processus de décision. Nous avons appelé cette approche modélisation d'accompagnement. L'originalité principale de ces travaux réside dans la proposition de couplage des modèles avec des jeux de rôles dans le double objectif de construire le modèle avec les acteurs et de le leur restituer.

Bien sûr beaucoup reste à faire pour améliorer cet outil et éprouver cette démarche. L'expérience que j'ai acquise me permettra de poursuivre ces tâches et d'encadrer avec une certaine légitimité ceux qui voudront tester la démarche proposée. Ils sont déjà relativement nombreux. L'opportunité me sera sans doute donnée par le Cirad de m'expatrier, dans le but de valoriser cette démarche sur de nouveaux terrains.

Dans le prolongement immédiat du travail effectué se dégagent deux sujets de recherches.

1. Le premier des sujets, que nous avons seulement abordé est celui des relations entre différents niveaux d'organisation. L'accent est aujourd'hui sur les « nested models » qu'on pourrait traduire, dans l'esprit et non dans la lettre, par modèles emboîtés. L'idée menée essentiellement par géographes et écologues est de considérer des modèles pour différents niveaux d'organisation et de tenter de faire le lien entre eux. Nous avons déjà présenté notre approche qui est un peu différente et qui s'inspire entre autres de la théorie de la hiérarchie en écologie qui fait interagir différents niveaux d'organisation et de notre approche des SMA qui considère les interactions entre niveaux d'organisation. Une des recherches à mener dans les prochaines années est de préciser cette approche pour aborder un problème à différentes échelles. Ce sujet de recherche est a priori celui de C. Le Page en relation avec les géographes dont nous avons présenté les travaux et avec les écologues mathématiciens qui s'intéressent au transfert d'échelle [Auger, 1993].
2. Le second des sujets concerne l'usage des jeux de rôles et des SMA dans des processus de décision. Suite aux travaux de Mermet en particulier nous avons testé la méthode sur le terrain qui s'est avérée efficace. De nombreuses applications débutent, de nombreuses questions se posent. Je n'ai cependant pas la compétence pour animer une dynamique scientifique autour de ce sujet qui relève des sciences sociales. Deux jeunes chercheurs ont démarré des thèses en cette fin d'année 2000 sur le sujet, Stanislas Boissau qui effectue sa thèse avec Nils Roling en anthropologie à Wageningen, et Williams Darré qui effectue sa thèse encadré par J. Weber et O. Barreteau.

S'il est donc possible de définir des perspectives de recherche pour prolonger les dynamiques entreprises depuis ma thèse, je pense cependant que l'année 2000 représente pour moi la fin d'un cycle de recherche. Hors les quelques actions qui restent à mener pour éprouver la démarche proposée, il me semble nécessaire de définir de nouveaux horizons, de nouveaux sujets sur lesquels je pourrai à nouveau apprendre, identifier des questions, développer, tester, restituer et bien sûr encadrer. Le sujet général auquel je m'intéresse est celui de la modélisation des interactions sociales et économiques. Plusieurs raisons président à ce choix. La première raison était indiquée dès l'introduction de ce mémoire. Très interdisciplinaire ma recherche sur la modélisation de la gestion des ressources renouvelables m'a conduit à aborder des sujets en écologie, géographie, économie. En témoignent les publications issues de ces travaux. Si les multi-agents sont la matérialisation d'un paradigme qui

traverse les champs disciplinaires, il demeure que j'ai eu des accès assez superficiels sur le cœur des raisonnements disciplinaires en particulier en sciences sociales et économiques. La seconde raison est que, paradoxalement, les sciences économiques et sociales sont parmi les dernières à envisager l'utilisation de ces méthodes de modélisation des comportements et des interactions. On trouve à cela des raisons diverses et parfois opposées. Ainsi, d'une part beaucoup d'économistes sont imprégnés d'autres types de modèles plus synthétiques qui ne leur permettent pas de repenser des comportements hétérogènes, des représentations et des interactions distribuées et d'autre part beaucoup d'anthropologues, sans doute inquiets d'usages normatifs ou par rejet d'un point de vue fonctionnaliste, s'opposent à toute velléité de traduction formelle. Cependant ces dernières années, un courant de recherche sur la modélisation de type multi-agents, s'est développée en sciences économiques et sociales. Les communautés comme l'ACE [Tefstation, 1997] (Agent-based economics) se structurent, des journaux comme *Journal of Economic dynamic and control*, *Journal of Economic behaviour and organization* publient de nombreux articles du domaine, des numéros spéciaux de revue comme *Jasss*¹¹ sont consacrés à des expériences de modélisation de sociétés par des anthropologues.

Cette ouverture à la modélisation interactionniste pose de nombreuses questions. Nous avons commencé à aborder quelques-unes d'entre elles et au cours des prochaines années, c'est sur ces questions que j'aimerais focaliser ma recherche. Pour être plus précis que la simple description d'une approche, le programme de recherche que je propose s'appuie sur :

- des problèmes concrets identifiés pour lesquels l'approche peut permettre des avancées et pour lesquels on dispose d'observables. Le problème qui m'intéresse le plus concerne les processus d'échanges, marchands ou non, qui sont à l'œuvre dans les problèmes de gestion des ressources. Après avoir mis l'accent sur les relations entre les hommes et les ressources, je voudrais mettre plus l'accent sur les relations entre les hommes à propos des choses. Il s'agira de travailler sur des filières de commercialisation de produits agricoles ou de la biodiversité, sur l'usage d'outils de régulation et sur les mécanismes d'échanges entre acteurs qui exploitent différentes ressources dans un même espace. Il s'agira aussi de travailler sur des systèmes de gestion en propriété commune où des règles sociales organisent les modes d'appropriation de la ressource. Concrètement je démarrerai en 2001 un projet de recherche en Asie du Sud Est avec l'International Rice Research Institute (IRRI) : les questions seront celles de l'organisation de filières de riz, de coordination des usages agricoles, d'élevage et de gestion de la forêt sur des terrains situés au Nord-Est de la Thaïlande, et au Vietnam.
- Des questions sur les fondements de la modélisation de l'individuel et du collectif que l'on peut traiter comme une question sur la cognition. Arthur et al. [Arthur, 1997] qui résument les diverses contributions du livre « *The economy as an evolving complex system* » [Arthur, 1997] posent la question qui était la nôtre (§3.1.4) de la cognition. On peut envisager de la situer entre les deux extrêmes de la rationalité individuelle et l'adaptation collective. En conséquence, la première des questions est celle de la confrontation entre deux points de vue: la modélisation d'une rationalité des agents qui postule que ceux-ci mettent en cohérence leurs actions, leurs objectifs ou leurs croyances en allant jusqu'à ignorer les autres agents (infinite-horizon optimization), et la modélisation de l'adaptation qui fait l'hypothèse d'une co-évolution entre les agents et leur environnement, en allant jusqu'à refuser la cognition individuelle (myopic adaptation), avatar de l'individualisme méthodologique. Mais il est une troisième voie : la représentation de la relation entre l'individuel et le collectif passe par le contexte dans lequel les agents sont plongés et qu'ils se donnent. La deuxième question est donc celle de la modélisation des organisations sociales (réseaux, institutions¹², normes, territoire) qui permettent l'échange. Les agents sont socialement situés, dans des réseaux, dans des hiérarchies au sein desquelles ils s'expriment suivant des règles, des lois, des codes donnés par des institutions qu'ils contribuent à construire. Dans le domaine des

¹¹ <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html>

¹² Le mot institution a plusieurs définitions suivant les auteurs. Pour Ostrom [Ostrom, 1990] par exemple c'est simplement « a set of rules in use ». Arthur [Arthur, 1997] qui résume plusieurs essais présente trois sens : des règles, des entités qui ont le pouvoir social et politique de les promouvoir, des constructions légitimées qui instancient les règles et à travers lesquelles des agents agissent.

sciences sociales ce sont plus ces processus d'interactions qui m'intéressent qu'une modélisation de la cognition, des stratégies que l'agent construit pour s'engager dans l'échange.

5.1 Rationalité et adaptation

L'idée de la rationalité économique, définie par Allais comme un processus de mise en cohérence entre des actions et des objectifs poursuivis, fonde la plupart des modèles économiques utilisés en économie des ressources naturelles ou renouvelables. Le modèle sous-jacent est celui d'une capacité de l'agent à effectuer un calcul de maximisation d'une utilité (on utilise la programmation mathématique) où à élaborer des stratégies pour prendre en compte l'autre (on utilise la théorie des jeux). Ce point de vue implique une représentation assez cognitive de l'agent ([Walliser, 2000] parle d'ailleurs d'Economie Cognitive) qui correspond bien aux approches de type BDI développées en SMA. Sans obligatoirement prétendre définir une utilité, les agents ont des objectifs, une mémoire, des représentations et peuvent agir. Le problème est celui de la mise en cohérence entre ces objectifs et la sélection d'actions.

L'économie évolutionnaire propose une alternative depuis quelques années en se fondant sur les paradigmes Darwinien et Lamarkien de l'évolution. L'idée est de rechercher comment des individus, des stratégies, des processus sont adaptés à leur environnement. Pour peu que cet environnement puisse lui aussi évoluer, on parlera de co-évolution. Ce point de vue implique une modélisation plutôt basée sur les interactions. Peu importe les représentations, et les calculs de l'agent ; les actions ou stratégies sont données, et elles peuvent évoluer, soit par mutation soit par interaction avec les autres stratégies (croisement, imitation). Le moteur de l'évolution est mesuré par la capacité adaptative (la fitness). En restant proches de la métaphore de l'évolution les chercheurs utilisent les algorithmes génétiques [Holland, 1995; Arthur, 1997], ou la programmation génétique [Koza, 1994]. Une des critiques possibles en sciences sociales est que ces modèles prennent peu en compte les représentations des individus.

On oppose classiquement ces deux formes de modélisation : Axelrod [Axelrod, 1997] présente ainsi l'adaptation comme la seule alternative à la rationalité. La plupart des articles prospectifs des chercheurs économistes qui utilisent les outils de la complexité posent cette question d'une alternative entre l'apprentissage individuel ou l'adaptation collective, entre l'apprentissage et l'évolution [LeBaron, 2000].

Une des recherches que je souhaite mener consiste à confronter ces deux approches, soit en les comparant soit en les associant, au sein d'une même modélisation. Deux projets ont débuté sur ce thème. Ils seront poursuivis ou serviront comme base méthodologique pour d'autres travaux. Je présente tout d'abord les travaux que j'ai commencés et que je vais mener sur le thème de la modélisation de la rationalité. Puis, je propose un travail sur l'utilisation de la métaphore évolutionnaire pour étudier la rationalité.

5.1.1 Utilité, stratégie et simulations multi-agents.

Pour modéliser la décision d'agents qui ont à choisir une action il existe bien entendu d'autres méthodes de modélisation que les SMA. Au cours de l'année 1999, j'ai commencé à m'intéresser plus précisément à deux d'entre elles qui sont particulièrement utilisées dans le domaine de la gestion des ressources naturelles et renouvelables : la programmation linéaire et la théorie des jeux.

Le formalisme le plus utilisé pour représenter la décision en agronomie est la programmation mathématique. Le principe de base est celui de la maximisation d'une satisfaction (une fonction d'utilité ou un profit) sous contraintes, monétaires, de travail ou autres. De nombreux raffinements que je connais mal ont été proposés ces dernières années pour introduire des données qualitatives, pour optimiser plusieurs critères à la fois, pour introduire des non-linéarités. Cette méthode semble particulièrement indiquée pour représenter la décision d'un agent qui optimise l'usage des ressources qu'il peut contrôler, un agriculteur par exemple. Cependant cette méthode ne permet pas de modéliser les interactions entre agents. Depuis quelques années un groupe de chercheurs allemands animé par Alfons Balmann [Balmann, 1997] spécialisé dans ce type de méthode a tenté d'intégrer ces modèles

dans une approche distribuée, en utilisant des automates cellulaires. Les exploitations agricoles sont spatialisées : chaque agent est capable de prendre des décisions rationnelles grâce à la programmation linéaire mais aussi de s'adapter à son environnement en communiquant avec ses voisins. Damien Jourdain, économiste du Cirad et du Cymmit, a pris l'initiative de nous rapprocher de ces chercheurs et nous avons débuté un projet commun qui vise à explorer les formes de couplage entre ces méthodes à la fois d'un point de vue technique (couplage de Cormas avec un logiciel type Gams) et d'un point de vue conceptuel : l'agent prend-il en compte son environnement social dans son calcul ? Au contraire prend-il des décisions sur son exploitation avant d'envisager des échanges avec son environnement ? D. Jourdain s'engage dans une thèse sur le sujet qui devrait nous éclairer sur cette complémentarité. Je suis prévu dans l'entourage de cette thèse pour travailler sur ce sujet. D'autres occasions me seront données de travailler sur la comparaison et l'association des modélisations. Ainsi, l'IRRI au sein duquel je devrais travailler utilise depuis des années la programmation mathématique pour modéliser des dynamiques régionales.

Il est une méthode éprouvée pour modéliser l'interaction entre agents en économie : la théorie des jeux. On a vu qu'elle est utilisée dans le domaine des sciences environnementales et des biens communs. Le problème pour un agent est de décider, d'adopter une stratégie, en tenant compte de ce que va faire l'autre agent (joueur). Les rapports entre SMA et théorie des jeux ont déjà été étudiés sur plusieurs aspects. Pour les approches évolutionnaires de nombreux travaux dont ceux d'Axelrod [Axelrod, 1997], et de Lindgren [Lindgren, 1997] en particulier ont montré que les SMA pouvaient être un outil de simulation tout à fait approprié. Pour les approches dites rationnelles, des auteurs comme Zlotkin et Rosenchein [Rosenchein and Zlotkin, 1994] d'une part ou Durfee [Durfee, 1999] d'autre part ont depuis longtemps utilisé la théorie des jeux pour respectivement définir des stratégies d'agents compatibles avec des protocoles d'interaction ou pour que des agents soient capables de se construire des croyances sur les autres. En Mars 2000 j'ai co-organisé avec R. Lifran (économiste à l'Inra) un atelier de travail sur le thème de la confrontation entre théorie des jeux et SMA. Notre problème n'était ni de concevoir des robots efficaces ni de traiter de l'évolution, mais plutôt de comparer des méthodes de modélisation de groupes d'agents qui utilisent des ressources communes, pour une meilleure compréhension de leurs possibles coordinations. Cet atelier de trois jours nous a permis de nous poser des questions sur plusieurs thèmes. Comment la théorie de jeux et les SMA modélisent-ils la rationalité ? l'interaction ? Comment passe-t-on d'un problème théorique ou appliqué à une formalisation ? Quels sont les méthodes de comparaison des résultats avec la réalité ? Je retiens de l'organisation de cet atelier que l'on peut présenter une complémentarité entre les deux approches. Les SMA permettent une modélisation empirique, donc plus proche de la réalité tandis que la théorie des jeux donne un cadre théorique, éloigné de la réalité mais plus généralisable : il s'agit de passer d'une réalité à une classe de problèmes. Comme pour nos travaux sur les systèmes dynamiques on peut considérer que les SMA pourraient être utilisés comme modélisation intermédiaire entre la réalité et une formalisation de type théorie des jeux. Il s'agira soit d'une opération de simplification de la complexité du terrain pour identifier un jeu donné, soit d'une opération de complexification d'un jeu pour simuler des hypothèses réalistes. On s'aperçoit en effet que les calculs de la théorie des jeux pour modéliser par exemple un marchandage, ou pour identifier le nucléole d'un processus de négociation sont une formalisation de protocoles d'interaction qu'il serait aisé de représenter avec des SMA. Sandholm propose déjà des modélisations multi-agents des processus que la théorie des jeux formalise comme la valeur de Shapley ou le noyau [Sandholm, 1999]. Il subsiste quand même la différence suivante : nous utilisons les SMA pour simuler des agents dans un réseau d'interaction souvent complexe tandis que la théorie des jeux recherche à caractériser les stratégies en fonction du réseau d'interaction. Les complémentarités ici discutées et les idées que je restitue n'ont pour l'instant pas été testées sur un problème concret. Je suis certain que c'est un problème que j'aurai à travailler dans les années à venir, à la fois parce qu'il m'intéresse mais aussi parce que la coexistence de ces deux méthodes en économie de l'environnement provoquera cette demande.

En résumé, je propose de mener des recherches sur le thème des modèles de décision économique intégré dans des systèmes multi-agents. Ce travail pourra permettre de faire créer un lien avec différents chercheurs et me permettra de rentrer dans le cœur des raisonnements des économistes, pour mieux comprendre et mieux proposer des modèles alternatifs.

5.1.2 Systèmes multi-agents et algorithmes évolutionnaires.

La rationalité des agents consiste à mettre en cohérence, la perception, la mémoire, les méthodes d'inférences, d'action. Dans un environnement dynamique, cette mise en cohérence, cette coordination interne n'est pas aisée. C'est ainsi que certains auteurs, sous l'influence de Holland et autres auteurs qui ont travaillé sur les classifieurs et les algorithmes génétiques, utilisent des approches évolutionnaires pour faire émerger les bonnes combinaisons, c'est à dire les agents dont la rationalité est la plus adaptée. Vriend, par exemple utilise des algorithmes génétiques pour identifier les processus individuels les plus efficaces pour l'échange marchand [Vriend, 2000].

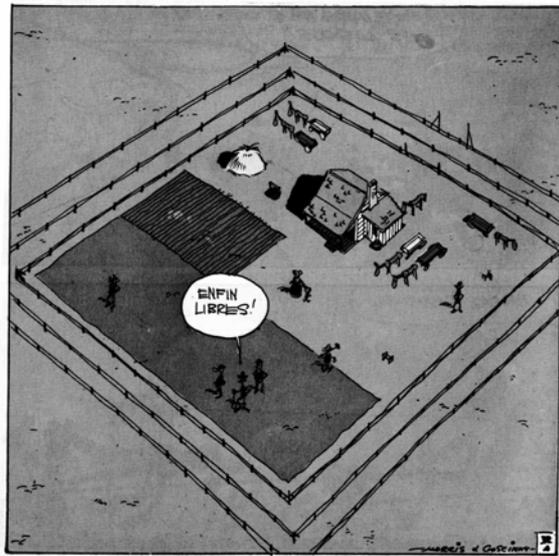
Un des premiers modèles de l'équipe fut celui réalisé par A. Bah et P. d'Aquino [Bah, 1997; Bah, 1998] sur la modélisation des déplacements de troupeaux en région sahélienne. Le principe était de préparer une carte de ressources (eau, différents types de pâturages) distribuées dans l'espace et de modéliser des stratégies d'agents pour exploiter ces ressources. L'idée sous-jacente était celle d'une nécessaire hétérogénéité des agents et des représentations, favorisant par exemple une cohabitation entre sédentaires et transhumants. Le processus a conduit les deux auteurs à modéliser des agents dotés de représentations (de l'espace, des autres), capables d'échanger de l'information, de s'engager à des déplacements longs. Ces agents sont donc capables d'apprendre par accumulation d'information. Successivement quatre stratégies furent élaborées pour représenter des agents « intelligents » (rationnels) qui utilisent au mieux leur espace. Finalement, la quatrième et dernière stratégie modélise des agents capables de calculer la viabilité d'une zone (un ensemble de cellules de la carte qu'ils connaissent qui sont complémentaires et séparées par des courtes distances). Le processus de modélisation d'accompagnement a consisté à modéliser cette stratégie (ce qui rejoint les problématiques de roboticiens). Tous les agents ont la même stratégie.

Il a été décidé de coupler cette modélisation avec une modélisation évolutionnaire. A. Bah a élaboré une plateforme basée sur Cormas qui permet de représenter des agents génétiques. Ainsi, un chromosome code les comportements de déplacement, de communication, de mémorisation des agents. L'ensemble forme une stratégie. Par mutation et croisements entre agents et en sélectionnant les agents les plus adaptés, on laisse le système « découvrir » les agents les plus adaptés. Les résultats ne sont que préliminaires, mais un des enseignements, classiques avec ce genre d'algorithmes, est remarquable : c'est un ensemble de stratégies qui survivent ensemble, chacune d'entre elles, prise isolément n'étant pas la stratégie optimale.

Là où l'on cherchait à modéliser l'hétérogénéité on a défini une et une seule stratégie. Là où on a utilisé un algorithme de recherche opérationnelle coupé d'interprétation avec la réalité, on a mis en évidence des processus de co-évolution, et souligné l'intérêt de l'hétérogénéité.

Cet exemple me semble porteur de questions pour mes recherches futures. Comment associer une démarche de modélisation « réaliste », qui s'inspire des observations sur des systèmes pour lesquels on ne peut postuler de processus Darwinien et pour lesquels on postule que l'apprentissage et l'adaptation s'effectuent par un processus cognitif, et une approche évolutionnaire qui fournit des enseignements sur l'adaptation collective, l'existence d'attracteurs locaux, la stabilité ou l'instabilité de ces attracteurs ?

5.2 Simuler des interactions économiques et sociales



Comme on l'aura compris les recherches qui m'intéressent le plus concernent la simulation d'échanges économiques, de relations sociales. Cependant, je pense que le point le plus important pour simuler des groupes d'agents qui utilisent des ressources est le système d'interaction et l'organisation des échanges. Dans la suite des travaux qui m'ont captivé en sciences cognitives ou en sciences sociales, je vais continuer à rechercher la compréhension des phénomènes dans l'organisation collective plutôt que dans la rationalité individuelle. D. North [North, 1997] : « *the rationality assumption of neoclassical economics assumes that the players know what is in their self interest and act accordingly. Ten millenia of human economic history says that it is a wildly erroneous assumption* ». Il est possible que cette hypothèse trouve sa réalisation dans les futures sociétés de robots, de même qu'on pourra sans doute faire apprendre des agents ou des robots avec des algorithmes purement adaptatifs. Entre les modèles de rationalité forte et les modèles évolutionnaires qui, selon mon point de vue, ne sont pas une représentation appropriée pour les réalités que j'étudie, des modèles s'inspirant plus de processus sociaux dans un environnement dynamique, articulant ainsi décision individuelle et adaptation collective, fournissent une meilleure proposition. Ma vision des cas concrets sur lesquels je travaille et serai amené à travailler est celle de sociétés dans lesquelles les réseaux d'échanges sont organisés, sont en relation avec des institutions qui évoluent ou que l'on veut mettre en place.

Les études de terrain auxquelles je vais participer correspondent à des systèmes que l'on a décrit comme des systèmes «en transition ». Sous l'effet de contraintes extérieures comme l'ouverture à une économie de marché, ils passeraient de systèmes de gestion qui se comprennent dans l'organisation sociale, à des systèmes conduits par les échanges marchands et les représentations individuelles associées.

Parmi les travaux que j'envisage certains s'effectueront avec des économistes qui proposent des mondes virtuels pour étudier sous un angle original des questions formulées par la communauté économique. L'avantage de ce type de travaux est que de nombreuses discussions ont eu lieu sur ces questions économiques et que la discussion des modèles produits est déjà cadrée. Différentes approches (néo-classiques, cognitivistes, etc...) proposent des cadres d'interprétation.

D'autres travaux prennent plus appui sur la compréhension des systèmes de gestion des ressources dits coutumiers ou traditionnels. Ces systèmes sont d'une immense diversité et la modélisation peut servir à représenter les échanges et leur inscription dans un système social. Ces échanges peuvent être marchands mais c'est le cadre d'interactions dans lequel ils s'insèrent qu'il faut représenter.

5.2.1 Interactions économiques : échanges marchands décentralisés.

Nous avons déjà démarré ce type d'approche avec M. Antona, ma collègue économiste. Pour de nombreuses ressources naturelles ou renouvelables il est proposé de contrôler la gestion économique en maîtrisant les flux de produits au sein d'une filière qui part du producteur, ou collecteur dans le cas d'une ressource renouvelable, au consommateur, ou à un autre intermédiaire comme un exportateur, un centre de transformation comme une usine. Il existe plusieurs méthodes de modélisation, en considérant des flux de produits par exemple entre un bassin de production et des consommateurs. Il nous semble que les comportements d'échange et l'hétérogénéité des agents sont un facteur important à prendre en compte et légitiment l'utilisation d'une approche de modélisation distribuée.

Deux thèses sont en cours sur ce type de projet et un troisième a été initié.

- Pour M. Antona qui s'intéresse à des filières de produits de la biodiversité que l'on cherche à organiser en de nombreux endroits la recherche porte sur l'efficacité comparée des différents outils de régulation économique. Le cas d'application est celui du bois de feu au Niger où ont été organisés des marchés locaux et où s'appliquent différents mécanismes comme des taxes. Les échanges sont organisés dans des réseaux évolutifs, dépendent de divers contextes géographiques. Il a déjà été montré de façon théorique [Antona, Bousquet et al., 1998] et appliquée [Antona, 2000] que les outils économiques peuvent avoir des effets plus complexes qu'une vision centralisée ne le laisse supposer.
- Pour F. Galtier qui s'intéresse à la commercialisation des céréales au Mali et au Bénin la recherche porte sur les différentes institutions qui se mettent en place. Certaines sont mises en place pour développer les échanges d'information entre acteurs du marché (mise en place de systèmes d'information du marché), d'autres sont plutôt destinées à encadrer les interactions (marchés de gros). Cela correspond à différentes visions de l'efficacité d'institutions sur la régulation d'échanges marchands qui considèrent que les agents ont différentes représentations et que l'environnement évolue rapidement. De plus il existe différents modes d'organisation (en réseaux, avec un seul type d'acteur qui s'occupe de la filière, en marchés libres, en marchés où le prix est fixé par des associations). Les simulations pourront permettre de tester l'efficacité des institutions dans ces différents contextes.
- Pour P. Guizol qui s'intéresse aux multiples usagers de la forêt naturelle la recherche porte sur le partage de la rente issu de l'exploitation du bois. Des filières d'exploitation du bois sont organisées, du bûcheron au marché local. Les simulations consistent à étudier les règles du partage de la rente entre les différents acteurs pour une soutenabilité de cette exploitation et une augmentation du revenu, localement et globalement.

D'un point de vue représentation des connaissances les travaux que je mènerai dans cet axe de recherche s'inspireront des formalisations qui émergent dans le domaine Agent-Based Computational Economics. Certains ont étudié les réseaux d'échange [Ioannides, 1997; Kirman, 1997], d'autres les mécanismes distribués de fixation de prix [Cheng and Wellman, 1998; LeBaron, 2000], d'autres encore les relations de fidélité [Weisbuch, Kirman et al., 1997]. Ces études sont encore très théoriques et sont formalisées à l'aide de méthodes semi-distribuées (qui prennent en compte la multiplicité des agents sous forme de distributions : physique statistique, champ moyen), ce qui présente l'avantage d'offrir des résultats assez généraux. Les opérations de modélisation multi-agents se placeront dans une approche qui permet à la fois une fine représentation de l'hétérogénéité rencontrée sur le terrain et à la fois une comparaison avec ces modèles plus généralisables.

Par ailleurs un des sujets de recherche est ici la formalisation des institutions et leur rôle, qu'il s'agisse d'institutions existantes ou d'institutions que l'on veut créer. Le cadre de pensée est celui des néo-institutionnalistes tels North [North, 1997] ou les chercheurs du domaine de la gestion des biens communs comme Ostrom [Ostrom, 1990; Ostrom, Gardner et al., 1994]. Les agents sont confrontés à des incertitudes qui affectent leur capacité d'investir dans le futur et, entre autres, de préserver la ressource. Les règles institutionnelles permettent de réduire cette incertitude. Dans cette vision l'efficacité de ces règles peut se mesurer par le calcul de coûts de transaction. En orientant les formes d'interactions entre les agents ces règles permettent de réduire les coûts et de rendre plus

efficace le système. D'un point de vue multi-agents je trouve là le cadre théorique correspondant à ma vision d'interactions entre un environnement dynamique, des agents qui sont contraints par un ou des niveaux collectifs qu'ils entretiennent et transforment.

5.2.2 Interactions sociales : réciprocité

La modélisation des échanges économiques présentée ci-dessus s'insère dans un cadre de pensée assez restreint, ce qui facilite la modélisation des dynamiques. En revanche il est d'autres points de vue scientifiques pour étudier et comprendre l'usage des ressources. Selon un point de vue plus social, les mécanismes d'accès, d'usage, de transfert des ressources, bref de leur appropriation doivent être étudiés comme un des aspects de l'organisation sociale. .

Comment les hommes pensent leur rapport à leur environnement? Cette question ramène à la question du rapport aux autres: "*Lévi-Strauss a suffisamment démontré, par exemple, comment, loin qu'elles leur soient imposées par le milieu écologique ou par leur base matérielle, les cultures choisissent leurs représentations mythiques par oppositions différenciantes avec celles des cultures voisines* » [Caillé, 1992]. L'accès aux ressources passe par des représentations issues d'un ensemble de valeurs, de catégorisations construites et partagées par une communauté, exprimant pour cette communauté et ses individus les rapports qu'elle a avec le monde. Ces deux aspects des représentations, naturel et social, sont liés car pour l'anthropologue les représentations des individus renvoient le plus souvent à des "systèmes de représentations" issus de l'ensemble des idées et des valeurs de la société dont ils font partie [Friedberg, 1992]. Si certains économistes conçoivent l'action de l'homme sur les ressources comme un calcul utilitariste, d'autres chercheurs voient dans cette interaction l'expression et la conséquence de traits culturels. Plus précisément [Sahlins, 1980]: "*la culture apparaît simplement comme un médiateur, ou un environnement de la dynamique constitutive des desseins humains. C'est un médiateur au sens d'un ensemble de moyens mis à la disposition du sujet, grâce auquel il parvient aux fins qu'il s'était fixées ; et c'est un environnement non seulement en tant qu'ensemble de contraintes extérieures à l'individu, mais quelque chose sur lequel il forge ses intentions et, ce faisant, ordonne les propriétés du milieu.*"

L'objectif de modéliser une culture paraît bien ambitieux. Si certains auteurs, qui appartiennent à la communauté de la mémétique¹³ [Bura, 1994; Hales, 1997; Gabora, 1998] se sont donnés pour objectif de modéliser l'émergence de culture et les phénomènes de diffusion, mon travail consiste plus à représenter les schémas d'interactions entre agents. Ces schémas, ces transactions, sont l'expression et la réalisation d'un système social. La définition des transactions par F. Barth¹⁴ [Barth, 1981] correspond parfaitement à une approche que l'on peut adopter avec les SMA. « *The patterns are generated through process of interaction and in their form reflect the constraint and incentive under which people act. (...) We may thus construct a model whereby complex and comprehensive patterns of behaviour (roles) may be generated from simpler specifications of rights (statuses), according to a set of rule (...) One basis for such rules may be found in the transactional nature of most interpersonal relations, in the reciprocity which we impose on ourselves and others. (...). One may call transaction those sequences of interaction which are systematically governed by reciprocity.* »

Cette vision de la transaction inclut la vision des néo-institutionnalistes sur l'échange mais ne se limite pas à l'échange marchand ou à l'échange d'information qui lui est associé. La notion de réciprocité renvoie aux combinaisons d'échanges (femmes (parenté), biens (économie), représentations, mots) essentiellement étudiées par les anthropologues [Godelier, 1996]. Les travaux de Juliette Rouchier, au cours de son Dea [Rouchier, 1998] et de sa thèse [Rouchier, 2000], ont initié ces travaux de modélisation SMA. L'échange non-marchand également appelé système de don-contre-don a été ainsi modélisé. Les modèles présentés cherchent à comprendre l'organisation de sociétés à partir de ce type d'échange. Ce sont des modèles théoriques qui permettent de comprendre l'existence de propriétés de systèmes comme l'apparition d'une élite au sein d'une hiérarchie dynamique. Par

¹³ Le terme mémétique s'appuie sur l'idée de meme, présentée par R. Dawkins [Dawkins, 1976 (1989)]. Un meme pourra être considéré comme une idée, une représentation. On cherchera à modéliser la dynamique de populations de memes.

¹⁴ Merci à M. Requier-Desjardins pour l'analyse dont je me sers ici qu'on trouvera dans un chapitre de sa thèse

ailleurs, comme Rouchier l'a montré, la question de la réciprocité dans l'échange pose rapidement celle de l'observation, donc de la réputation et de la confiance (dans les autres individus ou dans les institutions). Réciprocité, réputation et confiance sont les trois concepts qu'Ostrom [Ostrom, 1998] donne comme éléments de base pour la définition de « *second generation model of rationality* ». Ainsi donc, le lien serait fait : les thèmes de recherches que je propose pour participer à la construction d'une alternative au modèle de calcul individuel sont d'ores et déjà considérés comme la future génération des modèles de rationalité. L'analyse d'Ostrom n'est cependant pas la mienne. La réciprocité, la réputation et la confiance sont pour elles analysées comme des facteurs permettant la baisse du coût estimé d'une action, où comme garantie d'un profit à long terme. Je pense que l'utilisation de méthodes comme la théorie des jeux entraîne les chercheurs à penser le monde comme un ensemble de stratégies. En conséquence le contexte social est rendu contingent au calcul stratégique individuel. Sur ces thèmes, ma motivation pour utiliser les SMA est autant idéologique que méthodologique. Je pense que la formalisation de stratégie individuelle calculatoire n'est pertinente que dans de rares cas. Méthodologiquement, la conjonction de la méthode simulateur (et non analytique), et des SMA (en particulier lorsqu'on met plus l'accent sur l'organisation des interactions que sur la rationalité individuelle) offre des outils pour qui veut comprendre et analyser les phénomènes à partir du lien social. Le lien préexiste au calcul. A l'inverse de la déformation stratégique, il serait intéressant de ne considérer la rationalité que dans sa fonction du maintien du lien.

Au cours des prochaines années, je voudrai développer des modélisations sur ce type de sujets. Par le passé j'ai pu mesurer l'intérêt de mener conjointement des recherches sur des modèles théoriques (modèles prédateur-proie, tragédie des communs, potlatch, échanges de produits, filière spatialisée) et des modèles appliqués. Pour les prochaines années je compte donc adopter la même attitude en m'orientant donc sur la simulation de sociétés en relation avec un environnement commun. Le but est d'une part d'étudier théoriquement des notions comme celle du pouvoir, de la structuration des sociétés par la dette [Weber, 1992] plutôt que par l'intérêt égoïste (la sympathie d'Adam Smith), et d'autre part de proposer des modèles qui servent à comprendre des réalités de terrain. Les recherches sur les systèmes traditionnels de gestion des ressources et de l'espace peuvent être comprises à travers des échanges autres que les biens comme la parenté par exemple. Un premier modèle que nous avons commencé à développer avec B. Moiso, anthropologue, envisageait la circulation conjointe des femmes, des terres et des zébus à Madagascar. Sans préjuger des applications il me semble que les SMA permettent de modéliser ces dynamiques sociales et à travers elles de comprendre les systèmes de gestion des ressources, et de poser la question d'une fonctionnalité de ces organisations sociales. Lansing et Kremer [Lansing, 1994], les premiers avaient proposé des modèles de gestion de l'irrigation à partir des pratiques religieuses.

5.3 Conclusion du projet de recherche

A la suite des recherches que j'ai menées, dans un collectif, ces dernières années, différents projets se dessinent pour approfondir des questions que nous avons identifiées ou des démarches que nous avons proposées. Ainsi, la question des dynamiques sur plusieurs échelles, la question de l'association jeux de rôles-SMA sont déjà appropriées par des chercheurs en écologie, en géographie et en sciences sociales. Plusieurs thèses ont débuté.

Le thème sur lequel je voudrais axer mes recherches dans le futur est celui de la modélisation de l'interaction sociale, de l'échange. De nombreux systèmes d'échanges ont été théorisés et parfois modélisés (programmation mathématique, théorie des jeux) en économie comme en anthropologie. Par ailleurs les SMA offrent de multiples algorithmes pour modéliser les interactions, selon que l'on mettra l'accent sur le calcul individuel ou sur les dynamiques collectives d'adaptation. C'est sur ces thèmes que des terrains d'application me seront proposés par le Cirad dans les prochaines années.

Si les SMA peuvent apporter beaucoup aux questionnements en sciences économiques et sociales, j'ai aussi la conviction que le travail théorique et applicatif que je mènerai permettra un enrichissement des recherches sur les SMA. Aujourd'hui des champs d'application comme Internet, le commerce électronique utilisent des algorithmes de coordination et d'échange (comme le marché Walrasien) qui ne représentent qu'une petite partie de ce que les sciences sociales peuvent proposer. C'est ainsi par

exemple que les informaticiens ont commencé à s'intéresser au concept de tragédie des communs [Turner, 1993]; mais les solutions envisagées restent pour l'instant exclusivement marchandes. L'enrichissement mutuel que nous avons connu dans les domaines de l'éthologie, de l'écologie devrait se reproduire dans cette nouvelle démarche interdisciplinaire.

6 Conclusion générale

A partir du problème posé par l'analyse de la gestion des ressources halieutiques dans le Delta du Niger, les recherches que j'ai menées pendant ma thèse identifiaient un ensemble de questions sur la gestion des ressources renouvelables et leur modélisation à l'aide des SMA. Au long du parcours que j'ai depuis effectué au sein du Cirad, j'ai mené de nombreux projets de modélisation appliqués aux territoires de parcours, à la gestion de la faune sauvage, aux dynamiques forestières, à la gestion de l'eau. Aussi différentes que soient ces applications le groupe de recherche auquel j'appartenais et j'appartiens s'est construit sur le thème général de la gestion des ressources renouvelables. Pour cela il s'est donné des thèmes de recherche, dans le cadre de l'étude des interactions entre dynamiques naturelles et dynamiques sociales :

- Les modes d'appropriation (représentations, usages, accès, transfert et répartition)
- Les processus de décision, processus d'interaction entre des acteurs qui ont des poids et des représentations différents.

Les applications nourrissent la réflexion théorique et méthodologique qui, en retour, propose une approche pour aborder de nouvelles applications. Pour un modélisateur dans ce collectif interdisciplinaire, le processus de recherche fut à la fois rationaliste car, avec d'autres, j'ai tenté d'étudier au moyen des SMA des problèmes théoriques (tragédie des communs, filières économiques, dynamiques des entités spatiales) et inductif car de nombreuses applications furent menées dans une approche constructiviste, en tentant pour chacune des applications de créer un monde artificiel *ad-hoc*. Au centre de ce processus double se trouve l'outil de modélisation Cormas. Il est la capitalisation du générique et le support de l'appliqué.

Les SMA sont une méthode de modélisation des interactions. Tels que nous les pratiquons, ils offrent des avantages pour prendre en compte des dynamiques spatiales et les interactions sociales. Je développe ces aspects sur des modèles théoriques au chapitre 4. Par ailleurs de nombreux modèles montrent comment nous appliquons les SMA pour simuler les interactions entre dynamiques naturelles et dynamiques sociales.

L'usage des SMA dans un processus de décision était une question à traiter : nous faisons une proposition qui se positionne dans le contexte des approches patrimoniales. Pour cela nous développons une démarche qui utilise le jeu de rôle à la fois pour construire le modèle, pour le présenter et pour introduire des simulations de scénarios.

Suite à cette phase de recherche interdisciplinaire plusieurs sujets de recherche sont identifiés : en écologie et en géographie le thème de la dynamique spatiale modélisée sur plusieurs échelles, en sciences sociales le thème de l'usage des modèles et des jeux de rôles dans un processus de décision. Si j'ai l'intention de participer à ces recherches c'est plutôt sur une troisième problématique que je voudrai investir dans les années à venir : la modélisation des interactions économiques et sociales, et plus précisément la question de la structure et du fonctionnement de systèmes d'échange. Le thème de l'économie computationnelle émerge depuis peu de temps (Agent based computational economics). Les recherches menées s'appuient en général sur une modélisation de la décision individuelle, de la stratégie des agents ou bien fait l'hypothèse de mécanismes d'adaptation de populations d'agents ou de stratégies. Tout en développant de tels modèles pour mieux en comprendre les fondements, les domaines d'application et les limites, je compte m'intéresser aux systèmes d'échanges entre les agents. Ces systèmes sont d'une très grande diversité (marchés, réseaux, hiérarchies). L'hypothèse est que ces systèmes d'échange qui contraignent les agents mais que ceux-ci maintiennent et transforment, constituent un facteur primordial pour comprendre la gestion des ressources naturelles. Les avancées sur l'élaboration de sociétés artificielles passeront à nouveau par un enrichissement mutuel entre les applications, les modèles théoriques et les méthodes informatiques.

7 Bibliographie

- [Abrami, G., 1999] Abrami, G. Modélisation multi-agents pour l'aménagement forestier : Usages multiples dans l'écosystème forestier de Didy. Strasbourg, Université Louis Pasteur, : 58,1999. .
- [Allen, T. F. H. and T. W. Hokstra, 1992] Allen, T. F. H. and T. W. Hokstra (1992). *Toward a unified ecology*, Columbia University Press.
- [Allen, T. F. H. and T. B. Starr, 1982] Allen, T. F. H. and T. B. Starr (1982). *Hierarchy: perspectives for ecological complexity*, University of Chicago Press.
- [Andler, D., 1992] Andler, D. (1992). Calcul et représentation : les sources. *Introduction aux sciences cognitives*. D. Andler, Folio essais.
- [Antona, M., 2000] Antona, M. Régulation d'une filière d'exploitation d'une ressource renouvelable : le bois énergie au Niger. Montpellier, Université Montpellier 1 - ENSAM: 90,2000. .
- [Antona, M., F. Bousquet, et al., 1998] Antona, M., F. Bousquet, et al. (1998). Economic Theory of Renewable Resource Management: a Multi-Agent System Approach. *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*. J. S. Sichman, R. Conte and N. Gilbert. Paris (France), Springer-Verlag. **1**: 61-78.
- [Arthur, W., Durlauf S., Lane D., 1997] Arthur, W., Durlauf S., Lane D., Ed. (1997). *The economy as an evolving complex system II*. SFI Studies in the Sciences of Complexity, Addison-Wesley.
- [Arthur, W., Durlauf S., Lane D., 1997] Arthur, W., Durlauf S., Lane D. (1997). Introduction. *The economy as an evolving complex system II*. D. Arthur, Lane, Addison-Wesley. **XXVII**: 1-14.
- [Attonaty, J. M., M. H. Chatelin, et al., 1990] Attonaty, J. M., M. H. Chatelin, et al. (1990). L'évolution des méthodes et langages de simulation. *Modélisation systémique et système agraire*. J. Brossier, B. Vissac and J. L. Lemoigne. Paris, INRA Editions.
- [Aubin, J. P., 1993] Aubin, J. P. La mort du devin, l'émergence du demiurge. Essai sur la contingence et la viabilité des systèmes,1993. .
- [Auger, P., 1993] Auger, P. (1993). Quelques outils mathématiques pour l'analyse hiérarchique. *Hiérarchies et échelles en écologie*. P. Auger, J. Baudry and F. Fournier, Naturalia publications.
- [Axelrod, R., 1997] Axelrod, R. (1997). "Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences." *Lecture notes in Economics and Mathematical systems* **456**: 21-40.
- [Axelrod, R., 1997] Axelrod, R. (1997). *The Complexity of Cooperation. Agent Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton University Press.
- [Bah, A., 1997] Bah, A. Simulation Multi-Agents des modes d'utilisation des ressources en propriété commune; le cas de la mobilité pastorale en zone intertropicale sèche, Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar,1997. .
- [Bah, A., Canal Richard, d'Aquino Patrick, Bousquet François ., 1998] Bah, A., Canal Richard, d'Aquino Patrick, Bousquet François ., (1998). Les SMA génétiques pour l'étude de la mobilité pastorale en zone intertropicale sèche. Smaget, Clermont-Ferrand, Cemagref Editions.
- [Bakam, I., Kordon F., Le Page C., Bousquet F. ., 2000] Bakam, I., Kordon F., Le Page C., Bousquet F. . (2000). Formalization of a spatialized multi-agent system using coloured Petri nets for the study of a hunting management system. *Lecture Notes in Computer systems*, Springer.
- [Balmann, A., 1997] Balmann, A. (1997). "Farm based modelling of regional structural change. A cellular automata approach." *European review of agricultural economics* **24**(1).
- [Barreteau, O., Bousquet, F., 1998] Barreteau, O., Bousquet, F., (1998). Systèmes multi-agents et viabilité des systèmes irrigués. 4ème colloque africain sur la recherche en informatique CARI98, Dakar Sénégal.
- [Barreteau, O., 1998] Barreteau, O. Un Système Multi-Agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et modes d'organisation. Montpellier, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts: 260,1998. .

- [Barreteau, O. and F. Bousquet, 1998] Barreteau, O. and F. Bousquet (1998). Un système multi-agents représentant les modes d'organisation dans un système irrigué. Colloque SFER : Irrigation et gestion collective de l'eau en France et dans le monde, Montpellier.
- [Barreteau, O. and F. Bousquet, 1999] Barreteau, O. and F. Bousquet (1999). Jeux de rôles et validation de systèmes multi-agents. *Ingénierie des systèmes multi-agents JFIADSMA'99*, Hermès: 67-80.
- [Barreteau, O. and F. Bousquet, 2000] Barreteau, O. and F. Bousquet. (2000). "SHADOC: a Multi-Agent Model to tackle viability of irrigated systems." *Annals of Operations Research* **94**: 139-162.
- [Barreteau, O. and F. Bousquet, 2000] Barreteau, O. and F. Bousquet. (2000). "Systèmes multi-agents et viabilité des systèmes irrigués." *Techniques et Sciences Informatiques* **19**(7): 943-962.
- [Barreteau, O., F. Bousquet, et al., 1997] Barreteau, O., F. Bousquet, et al. (1997). Modes de gestion et viabilité des périmètres irrigués: questions de représentation. *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*. F. Blasco. Paris, Elsevier: 153--159.
- [Barreteau, O. and J. Weber, 1998] Barreteau, O. and J. Weber (1998). Cohérence Entre Règles Collectives Et Comportements Individuels Dans Des Systèmes Irrigués. *Journées de L'association Française de Sciences économiques - économie de L'environnement et Des Ressources Naturelles*.
- [Barth, F., 1981] Barth, F. (1981). *Process and forms in social life, selected essays of F. Barth*. London, Routledge and Kegan Paul Ltd.
- [Becu, N., 1999] Becu, N. Importance du facteur social dans la gestion collective de la ressource en eau, *ESITPA*: 45,1999. .
- [Berkes, F., D. Feeny, et al., 1989] Berkes, F., D. Feeny, et al. (1989). "The benefits of the commons." *Nature* **340**: 91-93.
- [Boissau, S., B. Locatelli, et al., 1999] Boissau, S., B. Locatelli, et al. (1999). Population and environment relationship : a U-shaped curve hypothesis. Planetary garden 99, Chambéry.
- [Bommel, P., 1999] Bommel, P. Analyse et amélioration d'un modèle multi-agents. Application à la modélisation des dynamiques sylvo-pastorales (modèle forpast). Montpellier, Université Montpellier II: 58,1999. .
- [Bommel, P. and S. Lardon, 2000] Bommel, P. and S. Lardon (2000). Un simulateur pour explorer les interactions entre dynamiques de végétation et de pâturage. Impact des stratégies sur les configurations spatiales. *Géomatique*. **10**: 26.
- [Bommel, P., T. Libourel, et al., 2000] Bommel, P., T. Libourel, et al. (2000). Conception objet dans le cadre des systèmes d'information spatiaux. Agrégation spatiale et généralisation. *Conférence INFORSID*. Lyon: 14.
- [Bonabeau, E., M. Dorigo, et al., 1999] Bonabeau, E., M. Dorigo, et al. (1999). *Swarm Intelligence. From natural to artificial systems*, Oxford University press.
- [Bonin, M. and C. Le Page, 2000] Bonin, M. and C. Le Page. (2000). "SIG, SMA, connaissances et gestion de l'espace. Le cas du Massif du Tanargue." *Revue de Géomatique*.
- [Bonnefoy, J. L., C. Le Page, et al., 2000] Bonnefoy, J. L., C. Le Page, et al. (2000). Modelling spatial practices and social representations of space using multi-agent systems. *Applications of simulation to social sciences*. G. Ballot and G. Weisbuch, Hermès.
- [Bonnefoy, J.-L., F. Bousquet, et al., à paraître] Bonnefoy, J.-L., F. Bousquet, et al. (à paraître). Modélisation d'une interaction individus, espace, société par les systèmes multi-agents : pâture en forêt virtuelle. *L'espace géographique*, Dion Paris.
- [Bousquet, F., 1995] Bousquet, F. (1995). Resource-space, individuals and ecosystems : Emergences and représentations. European Conference of Cognitive Science, Saint-Malo.

- [Bousquet, F., D. Gautier, 1999] Bousquet, F., D. Gautier. (1999). "Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches spatiales et acteurs." *Revue Européenne de géographie Cybergeog.*
- [Bousquet, F., I. Bakam, et al., 1998] Bousquet, F., I. Bakam, et al. (1998). "Cormas : Common-Pool Resources and Multi-Agent Systems." *Lecture Notes in Artificial Intelligence* **1416**: 826-837.
- [Bousquet, F., Y. Duthoit, et al., 1996] Bousquet, F., Y. Duthoit, et al. (1996). Tragedy of the commons, game theory and spatial simulation of complex systems. Ecology, Society, economy. In pursuit of sustainable development, St Quentin en Yvelines (France).
- [Bousquet, F., C. Le Page, et al., 2000] Bousquet, F., C. Le Page, et al. (2000). Ecological Scales and Use Rights : the Use of Multiagent Systems. *Forest and society : the role of research Sub-plenary session XXI IUFRO World Congress 2000*. Baskaran Krishnapillay, E. Soepadmo, Najib Lotfy Arshadet al. Kuala Lumpur. **1**: 730-742.
- [Bousquet, F., C. LePage, et al., 2000] Bousquet, F., C. LePage, et al. (2000). "A spatially-explicit individual-based model of blue duikers population dynamics: multi-agent simulations of bushmeat hunting in an eastern cameroonian village." *Ecological modelling*.
- [Brunet, R., Ferras R., Théry H., 1992] Brunet, R., Ferras R., Théry H. (1992). *Les mots de la géographie*. Paris, Reclus - La Documentation Française.
- [Bura, S., Guérin-Pace F., Mathian H., Pumain D., Sanders L., 1993] Bura, S., Guérin-Pace F., Mathian H., Pumain D., Sanders L. (1993). Multi-agent systems and the dynamics of a settlement system. Artificial societies, Siena, UCL Press.
- [Bura, S., 1994] Bura, S. (1994). Minimeme : Of Life and Death in the Noosphere. *From Animals to Animats*. J. Meyer and S. Wilson, MIT Press.
- [Caillé, A., 1992] Caillé, A. (1992). Sujet individuel et sujet collectif. *Philosophie et Anthropologie*, Editions du centre de Pompidou.
- [Cazoulat, R. and B. Victorri, 2000] Cazoulat, R. and B. Victorri. Etude de la dynamique des populations par simulation. <http://www.univ-caen.fr>.
- [Cheng, J. and M. Wellman, 1998] Cheng, J. and M. Wellman. (1998). "The WALRAS algorithm: A convergent distributed implementation of general equilibrium outcomes." *Computational Economics* **12**: 1-24.
- [Cheylan, J.-P., S. Lardon, et al., 1994] Cheylan, J.-P., S. Lardon, et al. (1994). "Les Problématiques Liées Au Temps Dans Les SIG." *Revue Internationale de Géomatique* **4**: 287-305.
- [Claramunt, C., M. Thériault, et al., 1997] Claramunt, C., M. Thériault, et al. (1997). A Qualitative Representation of Evolving Spatial Entities in Two-Dimensional Spaces. *{GIS} Research {UK}: 5th National Conference*.
- [Clark, C., 1976] Clark, C. (1976). *Mathematical bioeconomics*. New York, Wiley.
- [Conte, R. and C. Castelfranchi, 1995] Conte, R. and C. Castelfranchi. (1995). "Norms as Mental Objects, from Normative Beliefs to Normative Goals." *Lecture Notes in Artificial Intelligence* **957**: 186-196.
- [Costanza, R., R. Arge, et al., 1997] Costanza, R., R. Arge, et al. (1997). "The value of the world's ecosystem services and natural capital." *Nature* **387**: 253-260.
- [Costanza, R., L. Wainger, et al., 1993] Costanza, R., L. Wainger, et al. (1993). "Modelling complex ecological economic systems: toward an evolutionary, dynamic understanding of humans and nature." *BioScience*.
- [Dawkins, R., 1976 (1989)] Dawkins, R. (1976 (1989)). *The Selfish Gene (Le Gene Egoiste)*, Armand Colin.

- [Doran, J. and M. Palmer, 1993] Doran, J. and M. Palmer (1993). The {EOS} Project : Integrating Two Models of Paleolithic Social Change. *Artificial Societies*. N. Gilbert and R. Conte, UCL Press.
- [Drogoul, A., 1993] Drogoul, A. De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agent. Paris, These de Paris VI, 1993. .
- [Dumouchel, P., 1992] Dumouchel, P. (1992). Systèmes sociaux et cognition. *Introduction aux sciences cognitives*. D. Andler, Folio.
- [Durfee, E., 1999] Durfee, E. (1999). "Practically coordinating." *AI Magazine* **Spring 1999**: 99-116.
- [Epstein, J. and R. Axtell, 1996] Epstein, J. and R. Axtell (1996). *Growing Artificial Societies. Social Science from the Bottom Up*, Brookings Institution Press/ The MIT Press.
- [Fay, C., 1989] Fay, C. (1989). "Systèmes halieutiques et espaces de pouvoirs: transformation des droits et des pratiques de pêche dans le Delta Central du Niger (Mali) 1920-1980." *Cahier des sciences humaines* **25**.
- [Ferber, J., 1988] Ferber, J. Objets et agents : une étude des structures de représentation et communications en intelligence artificielle, Paris 6, 1988. .
- [Feuillette, S., F. Bousquet, et al., 2000] Feuillette, S., F. Bousquet, et al. (2000). SINUSE, un outil d'interactions distribuées entre une nappe et ses usagers. GIRN-ZIT, Bamako.
- [Feuillette, S., P. Garin, et al., 2000] Feuillette, S., P. Garin, et al. (2000). Un modèle d'exploration des dynamiques ressource-usages pour la gestion intégrée d'une nappe surexploitée. Application à la nappe de Kairouan, Tunisie. Hydrologie des Régions Méditerranéennes, Montpellier.
- [Friedberg, C., 1992] Friedberg, C. (1992). Représentations, classifications: comment l'homme pense ses rapports au milieu naturel. *Sciences de la nature, Sciences de la société. Les passeurs de frontières*. M. Jollivet, CNRS Editions.
- [Frontier, S. and D. Pichod-Viale, 1993] Frontier, S. and D. Pichod-Viale (1993). *Ecosystèmes, structure fonctionnement évolution*, Masson.
- [Gabora, L., 1998] Gabora, L. (1998). "Autocatalytic closure in a cognitive system : a tentative scenario for the origin of culture." *Psychology* **9**(67).
- [Gasser, L. and A. Bond, 1988] Gasser, L. and A. Bond, Eds. (1988). *Readings in DAI*, Morgan et Kaufmann.
- [Gilbert, N., 1995] Gilbert, N. (1995). Emergence in social simulation. *Artificial societies. The computer simulation of social life*. R. c. a. N. Gilbert, UCL Press: 144-156.
- [Godard, O., 1992] Godard, O. (1992). La relation interdisciplinaire: problèmes et stratégies. *Sciences de la nature, Sciences de la société. Les passeurs de frontières*. Jollivet, CNRS editions.
- [Godelier, M., 1996] Godelier, M. (1996). *L'énigme Du Don*, Fayard.
- [Guessoum, Z., 2000, sous presse] Guessoum, Z. (2000, sous presse). Plateformes multi-agents. *Systèmes multi-agents*. B. (ed), Hermès.
- [Hales, D., 1997] Hales, D. (1997). "Modelling Meta-Memes." *Lecture notes in economic and mathematical systems* **456**: 365-384.
- [Hardin, G., 1968] Hardin, G. (1968). "The tragedy of the commons." *Science* **162**: 1243-1248.
- [Havelange, V., 1994] Havelange, V. (1994). "Sciences cognitives et tradition sociologique." *Revue internationale de systémique* **8**(1).
- [Henry, C., 1990] Henry, C. La nature, l'ingénieur et le contribuable : affrontement ou connivence?, Ecole polytechnique, 1990. .
- [Herimandimby, V., Randriajaona E., Barreteau Olivier, Bousquet François, Weber Jacques, 1998] Herimandimby, V., Randriajaona E., Barreteau Olivier, Bousquet François, Weber Jacques (1998).

Systèmes multi-agents et démarche patrimoniale : utilisation de jeux de rôle. Smaget, Clermont-Ferrand.

[Hogeweg, P. and B. Hesper, 1990] Hogeweg, P. and B. Hesper. (1990). "Individual-oriented modelling in ecology." *Mathl. Comput. Modelling* **13**: 83-90.

[Holland, J., 1995] Holland, J. (1995). *Hidden Order. How Adapdtion Builds Complexity*, Addison-Wesley.

[Holling, 1973] Holling. (1973). "Resilience and stability of ecological systems." *Annual Review of Ecological Systems* **4**: 1-23.

[Holling, 1987] Holling. (1987). "Simplifying the complex: the paradigms of ecological function and structure." *European Journal of Operational Research* **30**: 139-146.

[Hraber, P., T. Jones, S. Forest, 1997] Hraber, P., T. Jones, S. Forest. (1997). "The ecology of Echo." *Artificial life* **3**: 165-190.

[Hutzler, G., 2000] Hutzler, G. Du jardin des hasards au jardin des données : une approche artistique et multi-agent des interfaces homme / systèmes complexes, Thèse de l'Université Paris 6,2000. .

[Ioannides, Y., 1997] Ioannides, Y. (1997). Evolution of trading structures. *The economy as an evolving system II*. B. Arthur, S. Durlauf and D. Lane, Perseus books.

[Ito, A. and H. Yano, 1995] Ito, A. and H. Yano (1995). The emergence of cooperation in a society of autonomous agents - The prisoner's dilemma game under the disclosure of contract histories. *{ICMAS95}: proceedings of the first International Conference on Multi-Agent Systems*. V. Lesser, AAAI Press / MIT Press: 201-208.

[Jodelet, D., 1989] Jodelet, D. (1989). *Les représentations sociales*, PUF.

[Johnson-Laird, P. N., 1993] Johnson-Laird, P. N. (1993). La théorie des modèles mentaux. *Les modèles mentaux, approches cognitives des représentations*. Ehrlich, Tardieu and Cavazza, Masson.

[Judson, O. P., 1994] Judson, O. P. (1994). "The rise of the individual-based model in ecology." *TREE* **9**: 9-14.

[Kam, S.-P., J.-C. Castella, et al., submitted] Kam, S.-P., J.-C. Castella, et al. (submitted). "Methodological Integration : lessons from the ecoregional initiative for the humid and sub-humid tropics of Asia." *Conservation Ecology*.

[Kirman, A., 1997] Kirman, A. (1997). The economy as an interactive system. *The economy as an evolving complex system II*. B. Arthur, S. Durlauf and D. Lane, Perseus Books.

[Kohler, T., J. Kresl, et al., 2000] Kohler, T., J. Kresl, et al. (2000). Be there and then: a modeling approach to settlement determinants and spatial efficiency among late ancestral pueblo populations of the Mesa Verde region, US SouthWest. *Dynamics in human and primate societies*. T. Kohler and G. Gumerman, Oxford University Press.

[Kohler, T. A. and E. Carr, 1996] Kohler, T. A. and E. Carr (1996). Swarm based modelling of prehistoric sttlement systems in southwestern North America. Archaeological applications of GIS, UISPP XIIIth Congress, Forli, Italy.

[Koza, J., 1994] Koza, J. (1994). Artificial life: spontaneous emergence of self-replicating and evolutionary self improving computer programs. *Artificial life III*. C. Langton, Addison-Wesley.

[Laasri, H., Maitre B., 1989] Laasri, H., Maitre B. Coopération dans un univers multi-agents basé sur le modèle du blackboard : étude et réalisations, Nancy 1,1989. .

[Ladrière, J., 1990] Ladrière, J. (1990). Représentation et connaissance, Encyclopédia Universalis. **19**: 822-824.

[Langton, C., 1988] Langton, C. (1988). Artificial Life. *Artificial life*. C. Langton, Addison-Wesley.

- [Lansing, J. S., Kremer J.N., 1994] Lansing, J. S., Kremer J.N. (1994). Emergent properties of Balinese water temple networks: coadaptation on a rugged fitness landscape. Artificial life III, Santa Fe, Addison-Wesley.
- [Lardon, S., C. Baron, et al., 1998] Lardon, S., C. Baron, et al. (1998). Modéliser les configurations et les stratégies spatiales dans un système multi-agent pour la maîtrise de dynamiques d'embroussaillage. *Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires*. N. Ferrand. Clermont-Ferrand, Cemagref Editions: 169-185.
- [Lardon, S., P. Bommel, et al., 2000] Lardon, S., P. Bommel, et al. (2000). De la simulation de l'embroussaillage à un outil d'aide à la gestion de l'espace. *JFIADSMA 2000*, Hermès Editions.
- [Le Moigne, J. L., 1989] Le Moigne, J. L. (1989). *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod.
- [Le Page, C., F. Bousquet, et al., 1999] Le Page, C., F. Bousquet, et al. (1999). Simulations on virtual worlds: understanding the interactions between ecological and social dynamics. Planetary Garden'99, Chambéry (France).
- [LeBaron, B., 2000] LeBaron, B. (2000). "Agent-based computational finance : suggested readings and early research." *Journal of Economic Dynamics and Control* **24**: 679-702.
- [Lenay, C., 1994] Lenay, C. (1994). "Introduction." *Revue internationale de systémique* **8**(1).
- [Lenay, C., 1996] Lenay, C. (1996). Coopération et intentionnalité. *JFIADSMA*, Hermès: 265-271.
- [Lindgren, K., 1997] Lindgren, K. (1997). Evolutionary Dynamics in Game Theoretic Models. *The economy as an evolving complex system II*. W. A. a. S. D. a. D. Lane, Santa Fe Institute, Addison-Wesley.
- [Livet, P., 1987] Livet, P. (1987). Normes. *D'une science à l'autre, des concepts nomades*. Stengers, Seuil.
- [Lynam, T., F. Bousquet, et al., submitted] Lynam, T., F. Bousquet, et al. (submitted). "Adapting Science to adaptive managers." *Conservation Ecology*.
- [Mathevet, R., 1998] Mathevet, R. (1998). L'approche multi-agents comme outil de simulation de la gestion des marais de chasse dans les exploitations agricoles camarguaises. *Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires*. N. Ferrand, Cemagref Editions: 327-347.
- [Mathevet, R., 2000] Mathevet, R. Usages des zones humides camarguaises : enjeux et dynamique des interactions Environnement/Usagers/Territoire. Lyon, Thèse de Université Jean Moulin Lyon 3: 481 pages, 2000. .
- [Mermet, L., 1993] Mermet, L. (1993). *La nature comme jeu de société*, L'Harmattan.
- [Minar, N., R. Burkhart, et al., 1996] Minar, N., R. Burkhart, et al. The swarm simulation system : a toolkit for building multi-agent simulations, 1996. <http://www.santafe.edu/project/swarm>.
- [Minsky, M., 1975] Minsky, M. (1975). A framework for representing knowledge. *The psychology of computer vision*. Winston, McGraw Hill.
- [Montgolfier, J. and J. M. Natali, 1987] Montgolfier, J. and J. M. Natali (1987). Des outils pour une gestion patrimoniale. *Le patrimoine du futur*, Economica: 111-137.
- [Morin, E., 1977] Morin, E. (1977). *La méthode, la nature de la nature*. Paris, Ed. du Seuil.
- [North, D., 1997] North, D. (1997). Some fundamental puzzles in economic history/development. *The economy as an evolving complex system II*. D. Arthur, Lane, Addison-Wesley. **XXVII**: 223-237.
- [Nowak, M. A. and R. M. May, 1993] Nowak, M. A. and R. M. May. (1993). "The spatial dilemmas of evolution." *International Journal of Bifurcation and Chaos* **3**(1): 35-78.
- [Odum, H. T., 1957] Odum, H. T. (1957). "Trophic structure and productivity of Silver Springs Florida." *Ecol. Monogr.* **27**: 55-112.

- [Ollagnon, H., 1989] Ollagnon, H. (1989). Une approche patrimoniale de la qualité du milieu naturel. *Du rural à l'environnement, la question de la nature aujourd'hui*. ARF, l'Harmattan.
- [Ostrom, E., 1990] Ostrom, E. (1990). *Governing the Commons*, Cambridge University Press.
- [Ostrom, E., 1998] Ostrom, E. (1998). "A behavioral approach to the rational choice theory of collective action." *American political Science Review* **92**(1): 1-22.
- [Ostrom, E., R. Gardner, et al., 1994] Ostrom, E., R. Gardner, et al. (1994). *Rules, games, and common-pool resources*. Ann Harbor, University of Michigan Press.
- [Pigou, 1920] Pigou (1920). *The economics of welfare*, Mc Millan.
- [Piveteau, V., 1994] Piveteau, V. L'avenir a long terme des zones rurales fragiles, approche par le jeu prospectif d'une question complexe. Université Paris 1, 1994. .
- [Proton, H., F. Bousquet, et al., 1997] Proton, H., F. Bousquet, et al. (1997). Un outil pour observer l'organisation d'une société d'agents. Le cas d'une société d'agents chasseurs-agriculteurs. *Actes des 5èmes journées francophones sur {l'IAD} et les {SMA}*. J. Quinqueton, M. C. Thomas and B. Trousse. Paris, Hermès: 159--172.
- [Quensière, J., 1994] Quensière, J., Ed. (1994). *La pêche dans le Delta Central du Niger*, Karthala-Orstom.
- [Romagny, B., 1996] Romagny, B. Développement Durable, Bioéconomie et Ressources Renouvelables. Réflexion sur Les Modes D'appropriation et de Gestion de Ces Ressources. Une Remise En Cause de la Formalisation de la "tragédie" de L'accès Libre Par Le Dilemne Du Prisonnier., Université de Nice-Sophia Antipolis, 1996. .
- [Rosenchein, J. and G. Zlotkin, 1994] Rosenchein, J. and G. Zlotkin (1994). *Rules of encounter. designing conventions for automates negotiation among computers*, MIT Press.
- [Rouchier, J., 1996] Rouchier, J. Le potlatch: une modélisation par les Systèmes Multi-Agents Masters thesis., Université Orléans, 1996. .
- [Rouchier, J., Bousquet F., 1998] Rouchier, J., Bousquet F. (1998). Potlach and multi-agents systems, an analysis of structuring exchanges. Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation., Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer-Verlag.
- [Rouchier, J., 2000] Rouchier, J. La confiance à travers l'échange. Accès aux pâturages au Nord-Cameroun et échanges non-marchands : des simulations dans des systèmes multi-agents. Orléans, Université d'Orléans: 372, 2000. .
- [Rouchier, J., F. Bousquet, et al., 2001] Rouchier, J., F. Bousquet, et al. (2001). "A multi-agent model for transhumance in North Cameroon." *Journal of Economic Dynamics and Control* **25**: 527-559.
- [Sahlins, M., 1980] Sahlins, M. (1980). *Au coeur des sociétés, raison utilitaire et raison culturelle*, Gallimard.
- [Sandholm, T., 1999] Sandholm, T. (1999). Distributed rational decision making. *Multiagent Systems : a Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. W. G., MIT Press: 201-259.
- [Sargent, R., 1999] Sargent, R. (1999). Validation and verification of simulation models. Winter Simulation Conference.
- [Sébillotte, M. and L. G. Soler, 1990] Sébillotte, M. and L. G. Soler (1990). Les processus de décision des agriculteurs. *Modélisation systémiques et système agraire*. J. Brosseir, B. Vissac and L. J.L. Paris, INRA Editions.
- [Servat, D., E. Perrier, et al., 1998] Servat, D., E. Perrier, et al. (1998). When agents emerge from agents : introducing multi-scale viewpoints in multi-agent simulations. *Multi-agent systems and Agent-Based Simulation*. C. a. G. e. Sichman. Berlin, Springer-Verlag. **1534**.
- [Sperber, D., 1996] Sperber, D. (1996). *La Contagion Des Idées*, Odile Jacob.

- [Stevenson, G. G., 1991] Stevenson, G. G. (1991). *Common Property Economics. A General Theory and Land Use Applications*, Cambridge University Press.
- [Tefstation, L., 1997] Tefstation, L. (1997). How economists can get Alife. *The economy as an evolving complex system*. S. D. W.B. Arthur, D.Lane, Santa Fe: Addison-Wesley. **XXVII**: 533-564.
- [Théraulaz, G., 1994] Théraulaz, G. (1994). Du super organisme à l'intelligence en essaim : modèles et représentations du fonctionnement des sociétés d'insectes. *Intelligence collective*. E. Bonabeau and G. Theraulaz. Paris, Hermes: 29-109.
- [Treuil, J. P., E. Perrier, et al., 1997] Treuil, J. P., E. Perrier, et al. (1997). Directions pour une approche Multi-Agents de la simulation de processus physiques spatialisés. *Actes des 5èmes journées francophones sur {l'IAD} et les {SMA}*. J. Quinqueton, M. C. Thomas and B. Trousse. Paris, Hermès: 211--228.
- [Turner, R., 1993] Turner, R. (1993). The tragedy of the commons and Distributed AI systems. 12th International workshop on Distributed Artificial Intelligence.
- [Uchmanski, J. and V. Grimm, 1996] Uchmanski, J. and V. Grimm. (1996). "Individual-based modelling in ecology: what makes the difference?" *TREE* **11**: 437-441.
- [Valeix, M., 2000] Valeix, M. Différentes approches en modélisation de dynamique des populations, INA-PG: 28,2000. .
- [Varela, F., E. Thompson, et al., 1993] Varela, F., E. Thompson, et al. (1993). *L'inscription Corporelle de L'esprit, Sciences Cognitives et Expérience Humaine*, Seuil.
- [Von Bertalanffy, L., 1968] Von Bertalanffy, L. (1968). *Théorie générale des systèmes*. Paris, Editions Dunod.
- [Vriend, N. J., 2000] Vriend, N. J. (2000). "An illustration of the essential difference between individual and social learning, and its consequences for computational analyses." *Journal of Economic Dynamics and Control* **24**: 1-19.
- [Walliser, B., 2000] Walliser, B. (2000). *L'économie cognitive*, Editions Odile Jacob.
- [Weber, J., 1992] Weber, J. (1992). Environnement, Développement et propriété. Une approche épistémologique. *Environnement, développement, éthique*. V. Prades. Montréal, Fides.
- [Weber, J., 1995] Weber, J. Gestion des ressources renouvelables : fondements théoriques, Cirad: 21 p,1995. .
- [Weber, J., 2000] Weber, J. (2000). Pour une gestion sociale des ressources naturelles. *Administrer l'environnement en Afrique*. D. Compagnon and F. Constantin, Karthala-Ifra: 79-106.
- [Weber, J. and D. Bailly, 1993] Weber, J. and D. Bailly. (1993). "Prévoir c'est gouverner." *Natures, sciences, sociétés* **1**(1).
- [Weber, M., 1971] Weber, M. (1971). *Economie et société*. Paris, Plon.
- [Weisbuch, G., 1991] Weisbuch, G. (1991). *Complex systems dynamics*, Perseus book.
- [Weisbuch, G., 1991] Weisbuch, G. (1991). Systèmes complexes et comportement générique. *Les théories de la complexité. Autour de l'oeuvre de Henri Atlan*. F. Fogelman Soulié, Seuil.
- [Weisbuch, G., A. Kirman, et al., 1997] Weisbuch, G., A. Kirman, et al. (1997). "Market Organization." *Lecture notes in economics and mathematical systems* **456**.
- [Weiss, G., 1999] Weiss, G., Ed. (1999). *Multiagent Systems : a Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, MIT Press.
- [Zeigler, B. P., 1987] Zeigler, B. P. (1987). "Knowledge representation from Newton to Minsky and beyond." *Applied Artificial Intelligence* **1**.

