

# **Recherches-système en agriculture et développement rural**

**Symposium international**

Montpellier, France – 21-25 novembre 1994

## ***Systems-Oriented Research in Agriculture and Rural Development***

***International Symposium***

*Montpellier, France – 21 to 25 November 1994*

**Communications / Papers**



# Simulations multi-agents et gestion des ressources renouvelables

Bousquet François ; Antona Martine ; Weber Jacques

CIRAD, 42 rue Scheffer, 75116 Paris, France

## Résumé

*L'étude de la gestion des ressources renouvelables nécessite la présence de chercheurs qui proviennent d'horizons disciplinaires différents. La modélisation peut-elle être un outil d'intégration de ces points de vue ? Nous avons élaboré un simulateur à partir des principes de l'intelligence artificielle distribuée, qui permet de représenter un univers artificiel observé par des points de vue différents. Nous en présentons un exemple d'application sur la pêche et discutons la validation des résultats.*

## Mots clés

*Pluridisciplinarité, ressources renouvelables, point de vue, systèmes multi-agents, décision, validation.*

## Abstract

### **Multiagent Simulations and Management of Renewable Resources**

*We have developed an object-oriented framework based on the principles of distributed artificial intelligence for modelling man-resource interactions. We have studied the case of the inland delta fishery of the Niger in Mali, and attempted to contribute to a synthesis of the knowledge of a multidisciplinary research team. In this paper we describe the methods used and implementation of the simulator, and present simulations of a 'fishing-up process' that compare various hypotheses of object interactions. We then discuss the problem of validation.*

plinaires. Les connaissances diverses qui sont produites doivent être confrontées et discutées afin de constituer un corpus cohérent. Cette mise en cohérence est requise pour que la recherche joue son rôle d'assistance à la décision auprès des acteurs qui interviennent dans la prise de décision (aménageurs, décideurs, populations concernées).

Par ailleurs, les acteurs concernés et impliqués dans la gestion de l'écosystème sont le plus souvent multiples, se font différentes représentations de la gestion et proposent, en conséquence, différentes mesures d'aménagement.

La modélisation est une démarche qui peut, d'une part, catalyser la mise en cohérence de diverses connaissances disciplinaires, d'autre part, offrir un terrain (laboratoire) artificiel pour exprimer et confronter des points de vue sur la gestion et expérimenter des mesures d'aménagement.

Dans ce texte, nous présentons :

- des méthodes de modélisation qui nous semblent adaptées pour simuler les interactions homme-ressource au sein d'un écosystème ;
- la modélisation de différents points de vue sur un écosystème complexe ;
- une application à la pêche.

Nous discutons ensuite la question du passage du monde artificiel (virtuel) que constitue le modèle au monde réel. Sur ce point, nous présentons quelques axes de recherche que nous désirons explorer au sein de notre unité de recherche sur la gestion des ressources renouvelables et l'environnement.

## Problématique

Il ressort de la littérature qu'un système est dit complexe si on peut le considérer comme une organisation d'éléments en interaction. Pour aborder la complexité, nous avons choisi de représenter les différents individus et leurs interactions de façon à comprendre comment peut émerger une organisation. Cette démarche s'intéresse donc aux relations entre un niveau local et un niveau global.

## Introduction

Les relations entre l'homme et les ressources naturelles renouvelables qu'il exploite sont au cœur des problèmes environnementaux. Pour mieux comprendre les relations entre les dynamiques sociales et écologiques, les chercheurs de différentes disciplines se rassemblent en équipes pluridiscipli-

Par ailleurs, nous avons choisi de mettre en avant le caractère construit de la connaissance sur l'écosystème : ce n'est pas l'écosystème que nous voulons modéliser, mais l'écosystème vu par plusieurs points de vue. Les problèmes d'usage de ressources renouvelables impliquent de faire la synthèse des connaissances sur les structures et dynamiques sociales ainsi que sur les structures et dynamiques écologiques. Ces connaissances sont exprimées par des chercheurs provenant de divers horizons disciplinaires. La modélisation peut-elle aider à enrichir les différents points de vue, voire à créer un point de vue interdisciplinaire?

C'est donc avec l'ambition de trouver et de développer des outils de modélisation qui permettent une approche ascendante et qui prennent en compte explicitement l'intervention des observateurs du réel que nous nous sommes tournés vers la méthode des simulations multi-agents.

### La méthode des simulations multi-agents

Nous avons considéré que les approches des transferts d'échelle (Auger, 1993 ; O'Neill, 1989 ; Frontier, 1991) fondées sur la modélisation mathématique ne répondaient pas directement au problème de la prise en compte de multiples points de vue. Nous nous sommes intéressés aux courants de modélisation informatique, dont les principes semblaient mieux correspondre à notre approche : réseaux d'automates, réseaux de neurones et intelligence artificielle distribuée (IAD). Les deux premiers de ces courants représentent des interactions entre populations d'individus identiques ; l'IAD permet de représenter des relations entre des individus très différents. Nous avons donc choisi ce dernier courant de modélisation.

L'IAD s'intéresse à la résolution de problèmes par des communautés d'agents qui ont des points de vue différents et des connaissances parcellaires sur le problème : on parle de systèmes multi-agents (SMA). Dans le domaine informatique, on appelle agent "une entité réelle ou abstraite qui est capable d'agir sur elle-même et son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents" (Ferber et Ghallab, 1988).

Les connaissances sont propres à chaque agent, elles sont locales. Les recherches en SMA proposent différents protocoles de communication entre agents. Il est ainsi possible de s'intéresser à des agents simples, qui communiquent directement entre eux en s'envoyant des messages : cette technique est généralement utilisée pour créer des écosystèmes artificiels dont on simule le fonctionnement ; on parle parfois de vie artificielle. C'est une démarche de modélisation ascendante. On peut aussi s'intéresser à des agents plus compliqués, qui disposent chacun d'une expertise partielle sur un problème commun : on cherche à les faire collaborer pour résoudre le problème global. L'architecture, appelée tableau noir (*blackboard*), est en général utilisée pour créer des systèmes dits multi-experts.

### Un simulateur

Nous avons élaboré une architecture de simulation pour créer des univers artificiels observés par différents points de vue. Ce simulateur est séparé en trois parties (figure 1) :

- un monde artificiel, dans lequel on peut représenter différents agents correspondant au monde étudié (des pêcheurs, des poissons, des agriculteurs, des éleveurs, des vaches, des moutons, des marchés, des arbres, etc.). Ces agents peuvent interagir dans le temps et l'on observe globalement le fonctionnement du système ;
- différents points de vue, qui sont autant de connaissances sur le fonctionnement du monde artificiel. Ces connaissances, dites spécialistes, sont écrites sous forme de règles de production ;
- une structure de contrôle, qui gère la simulation. Informée de certains événements qui se passent dans le monde artificiel, la structure de contrôle fait appel à l'expertise de spécialistes donnés. Ceux-ci modifient le monde artificiel. Cette modification peut provoquer des réactions qui constituent de nouveaux événements pour la structure de contrôle, etc.

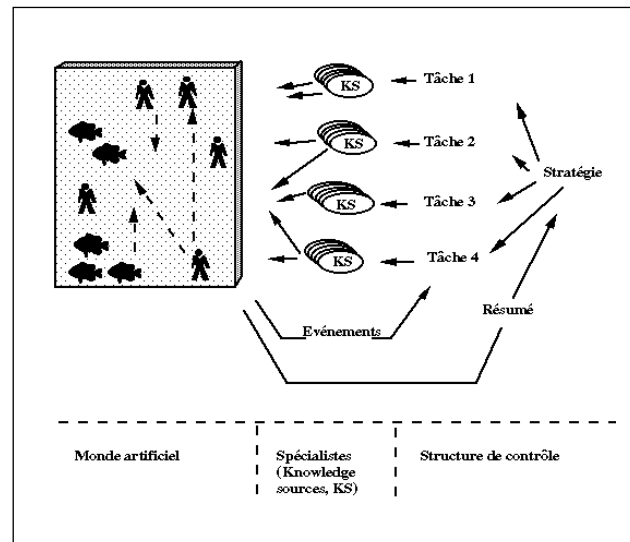


Figure 1. Architecture du simulateur.

Ce générateur de simulation a été programmé à l'aide du langage objet Smalltalk sur station Sun.

### Une application : la pêche artisanale

L'exemple d'application que nous présentons concerne la pêche dans le delta central du Niger, au Mali. Pour comprendre les raisons de la crise vécue par cette région depuis plusieurs années, une équipe pluridisciplinaire composée d'économistes, de démographes, d'anthropologues, d'halieutes et d'écologues étudie les interactions entre les hommes et les ressources (Quensière, 1993). La plupart des recherches menées au sein de cette équipe s'inscrivent dans une démarche qui vise à caractériser le changement dans l'histoire de cette région : il s'agit de l'étude des changements climatiques avec la sécheresse, des changements sociaux accompagnant les évolutions des

politiques coloniales ou nationales, des changements techniques mettant à disposition de nouveaux matériaux et de nouveaux engins.

Dans le but d'étudier les réponses de l'écosystème à l'ensemble de ces changements, nous avons effectué une série de simulations qui concernent toutes une intensification d'exploitation. Nous en présentons ici quelques unes.

### Le simulateur sur la pêche

#### **Les agents du monde artificiel**

La description de tous les objets du monde artificiel est assez longue (Bousquet, 1994 ; Bousquet *et al.*, 1994). Pour décrire précisément le monde artificiel que nous avons créé, il faut passer en revue toutes les classes d'agents, en précisant leurs attributs et les méthodes. Nous présentons ici brièvement les trois principaux types d'agents, à savoir les biotopes, les groupes de poissons et les pêcheurs :

- notre monde artificiel est constitué de quatre biotopes qui représentent deux bras de fleuve et deux zones inondables. Chacun de ces milieux offre de la nourriture aux populations de poissons. Les milieux de type plaine offrent beaucoup de nourriture à la crue et très peu à l'étiage. Le cycle est le même pour le fleuve, mais l'amplitude est beaucoup moins forte ;
- nous représentons des groupes de poissons qui meurent, grossissent, se reproduisent et migrent entre milieux suivant différentes modalités. Nous avons simulé la vie de trois espèces de poissons. L'espèce A, de petite taille, se reproduit à la crue, pond beaucoup de petits œufs. L'espèce C, de plus grande taille, est opportuniste à la fois pour la reproduction et pour la migration. L'espèce A et l'espèce C sont en compétition partielle pour la nourriture. L'espèce B est un prédateur, qui produit de gros œufs à la crue et migre de façon opportuniste ;
- les agents que nous représentons, les pêcheurs, possèdent des engins, ils peuvent acheter des engins, vendre le poisson pêché. Quatre types d'engins qui ont des pouvoirs de capture fort différents suivant le milieu et la saison sont en vente à des prix différents. Dans ce modèle simplifié, tous les prix sont fixes.

Nous avons simulé un processus de prise de décision des pêcheurs en quatre phases : a) le pêcheur construit les différentes activités imaginables (couples lieux-engins) ; b) le pêcheur perçoit, il acquiert des informations sur ces activités. Il fait appel à sa mémoire et peut communiquer avec d'autres agents pour échanger des informations ; c) le pêcheur choisit une activité suivant des règles données ; d) le pêcheur agit, il achète, pêche, rapporte du poisson, mémorise les résultats, vend.

#### **Les spécialistes et la structure de contrôle**

Les spécialistes contiennent des règles qui expriment des connaissances sur le fonctionnement du monde artificiel ; ils sont regroupés en tâche. Une tâche est chargée de provoquer la simulation écologique et trois autres concernent le processus de prise de décision : la phase de construction-perception, la phase de choix, la phase d'action.

La structure de contrôle permet de tester le fonctionnement du monde artificiel sous différentes hypothèses.

### Expériences

Les expériences sont menées sur le thème de l'intensification d'exploitation. Quelle est la réponse d'un écosystème à une augmentation du stress que constitue la pêche ? Nous avons choisi de simuler une augmentation du nombre de pêcheurs, chaque pêcheur possédant une capacité de choix en fonction des conditions de pêche qu'il rencontre. Augmentation linéaire du nombre de pêcheurs ne signifie donc pas augmentation linéaire de l'effort de pêche. Le pas de temps des simulations est la semaine. Au début de

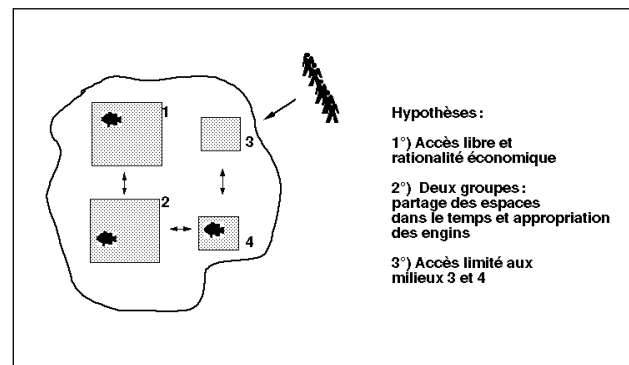


Figure 2. Schéma des expériences présentées.

chaque simulation, il y a dix pêcheurs. Chaque année, on ajoute trois pêcheurs (figure 2).

Nous avons comparé les résultats de trois hypothèses différentes :

- dans le système à accès social, la population est séparée en deux groupes qui n'ont pas les mêmes règles d'accès. Un des groupes n'a pas accès aux biotopes de type plaine, l'autre n'a pas accès au fleuve à l'étiage ;
- dans le système à accès totalement libre, c'est la capacité d'investissement qui détermine l'accès différencié à la ressource ;
- dans les réserves de pêche, les biotopes 3 et 4 ne peuvent recevoir plus de cinq pêcheurs à la fois. Une fois ces places occupées, les autres pêcheurs doivent aller pêcher ailleurs.

### Résultats

Pour comparer ces simulations, nous avons retenu les captures, leur composition spécifique et les revenus des ménages pêcheurs (figure 3).

- la durée de vie de la pêcherie est plus longue pour les simulations à accès social que pour celles à accès totalement libre. Quant aux simulations à réserves, elles montrent des captures durables et à un haut niveau (figure 3a) ;
- pour les simulations à accès réglé, la pêche est très majoritairement composée de l'espèce A. Les simulations à accès libre présentent des résultats moins homogènes : l'espèce A est d'abord exploitée, puis la pêche peut disparaître avec cette espèce ou bien rebondir sur l'exploitation d'une autre espèce. Pour les simulations à réserves, à la suite d'une très forte exploitation de l'espèce A, et d'une chute de cette espèce dans les captures, on assiste à une apparition de l'espèce C (figure 3b) ;

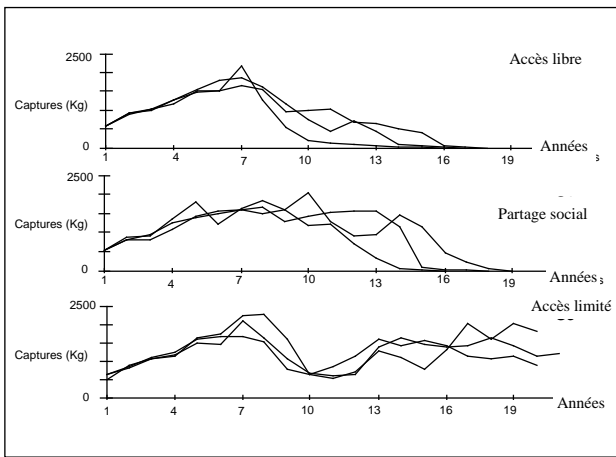


Figure 3 a. Comparaison des résultats : évolution des captures. Chaque courbe correspond à un pêcheur.

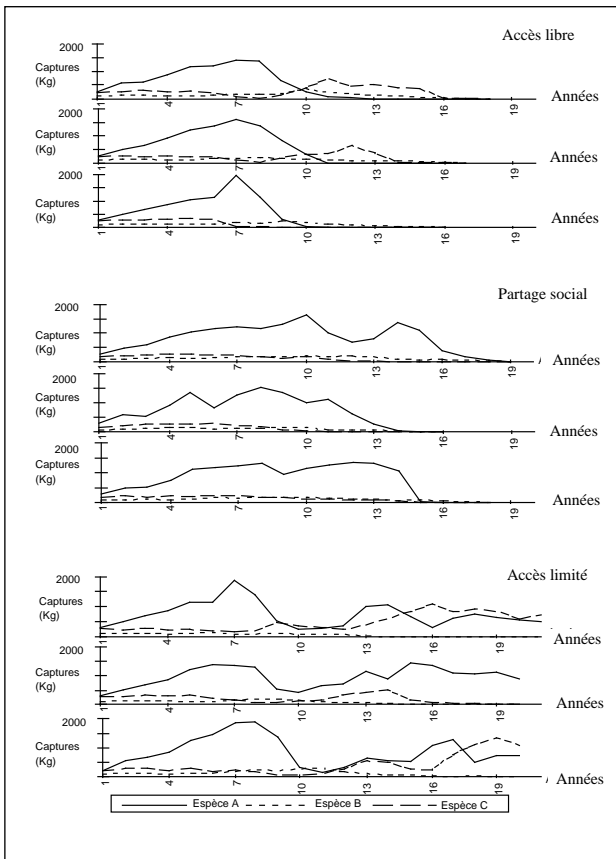


Figure 3 b. Comparaison des résultats : évolution des compositions spécifiques. Chaque courbe correspond à un pêcheur.

– les revenus des ménages pêcheurs sont homogènes dans la simulation à accès libre mais les deux groupes G1 et G2 se séparent très nettement lorsque l'accès est socialement réglé. Dans les systèmes à réserves, étant donné l'accès aléatoire, on observe une légère hétérogénéité des trajectoires (figure 3c).

Ces simulations ont été reproduites plusieurs fois pour vérifier la fiabilité des résultats.

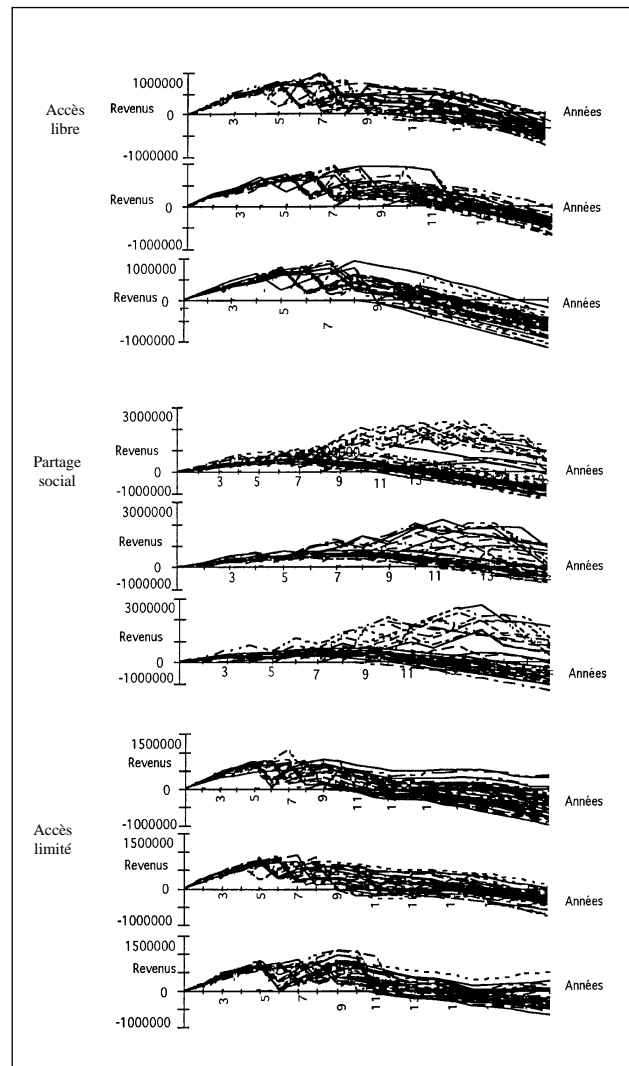


Figure 3 c. Comparaison des résultats : évolution des revenus des pêcheurs. Chaque courbe correspond à un pêcheur.

## L'interprétation

L'interprétation complète de ces résultats nécessiterait de longues discussions. Nous résumons ici quelques points importants.

Avec un accès totalement libre, les pêcheurs commencent par s'enrichir et achètent des engins performants. Ce faisant, ils pêchent préférentiellement l'espèce A, qui est plus accessible. Les autres espèces survivent et peuvent ensuite faire l'objet d'une pêche importante.

Lorsqu'il existe des règles d'accès à l'espace, des moments clés de la dynamique de l'espèce A sont protégés : tous les pêcheurs ne peuvent pêcher à l'étiage, moment où les poissons sont concentrés. En conséquence, l'espèce A survit jusqu'à la fin de la relation hommes-ressources et la pêcherie dure plus longtemps. Petit à petit, les différences d'accès à la ressource provoquent des différences de revenus.

Dans le cas des réserves de pêche, tout commence comme pour l'accès libre. Les pêcheurs commencent à épuiser le milieu. Mais les milieux protégés soutiennent le système. Il est intéressant de noter que ce mécanisme peut provoquer des changements de composition spécifique.



Étant donné notre modélisation du marché, dans tous les cas, on assiste à un appauvrissement général de la population de pêcheurs. Les différenciations d'accès à l'espace et d'appropriation d'engins ralentissent l'appauvrissement général mais provoquent une plus grande hétérogénéité des revenus en situation de crise avancée.

### Cohérence avec le réel

Ces simulations sur des mondes artificiels sont réalisées sur des systèmes très simplifiés, mais on peut, en s'appuyant sur leur résultats, s'interroger sur les conditions d'apparition de ces phénomènes et transposer certains sujets de discussion au monde étudié.

Il en ressort en particulier que la pression de pêche à l'étiage joue un rôle important dans la relation hommes-ressources, mais aussi que l'évolution de la composition spécifique des captures n'est pas indépendante du processus de prise de décision des pêcheurs (des différents types d'accès à la ressource). Il est possible de comparer ces résultats qualitatifs avec des phénomènes observés dans la réalité. En particulier, les courbes des compositions spécifiques des captures dans le delta central depuis vingt ans montrent, lors des grandes années sèches, des modifications de composition spécifique, qui peuvent soit disparaître en deux ou trois ans soit se pérenniser. On discute alors l'apport de la fragmentation de l'espace et de l'hétérogénéité de l'accès à la ressource pour favoriser la résistance de la ressource à l'intensification de la pêche. Cette discussion débouche naturellement sur des problèmes d'aménagement : protection de la ressource à l'étiage, préservation de l'hétérogénéité du milieu et de l'accès. D'un point de vue social, si l'on envisage de contrôler l'accès à certains milieux, on peut simuler différents processus de partage de cet accès en fonction de divers objectifs : rentabiliser l'activité de quelques-uns, limiter la différenciation économique, assurer un revenu minimal à l'ensemble des pêcheurs, etc.

### Discussion : perceptions du réel et existence de l'artificiel

Notre travail se situe dans un cadre de pensée où la recherche fournit un point de vue sur le monde observé. Ce point de vue est une construction à la fois disciplinaire et individuelle : d'une part, la description du réel par une école disciplinaire résulte d'un certain nombre d'outils de pensée (théories et modèles), d'autre part, l'emploi de ces outils renvoie à un parcours particulier du chercheur dans le réel qu'il veut décrire. La recherche sur un réel observé par plusieurs disciplines et plusieurs individus consiste à chercher les cohérences possibles entre les différents objets de pensée. *“La validation des connaissances ne peut reposer sur des vérités, mais seulement sur la cohérence entre toutes les connaissances acquises.”* (Tabary, 1991). Citons aussi Legay (1986) : “ Dans l'étude des systèmes complexes, le progrès de nos connaissances n'est pas le fait d'évidences successives, mais de cohérences entre des ensembles de résultats d'origine différente.” La confrontation des modèles permet, entre autres, de chercher ces cohérences, d'où l'utilité des univers artificiels.

Dans un système multi-agents, il s'agit de générer un petit bocal de vie, où interagissent des composants palpables, observables, et sur lequel un certain nombre de phénomènes peuvent être identifiés. Le principe est donc de fournir un terrain virtuel d'expérimentation sur lequel, dans un premier temps, les objets de pensée propres à chaque discipline se construisent et, dans un deuxième temps, les opérations sur ces objets sont mises en parallèle avec d'autres opérations sur d'autres objets. La comparaison est effectuée par l'intermédiaire d'indicateurs qui caractérisent l'évolution du système : chaque observateur peut construire son indicateur. La coévolution des indicateurs permet de discuter de façon pluridisciplinaire la cohérence des différents modèles.

La modélisation peut-elle aider à enrichir les différents points de vue disciplinaires ?

A l'issue de notre expérience d'utilisation des outils de l'intelligence artificielle distribuée ou de vie artificielle, nous distinguons deux phases distinctes à l'intérieur desquelles nous apportons des éléments de réponse à cette question.

Au cours de la phase de représentation des connaissances, il s'agit de créer, à plusieurs, un monde artificiel, semblable au monde réel. Les représentants de chaque discipline ayant la possibilité de décrire chacun des agents du monde artificiel suivant leurs propres concepts disciplinaires, les différentes perceptions disciplinaires sont mises en évidence. Ce travail fournit l'occasion non seulement de communiquer des connaissances, mais aussi de faire apparaître les différents modèles qui président à l'expression de ces connaissances. Il s'agit d'exprimer des métaconnaissances (comment l'espace est structuré ? comment le pêcheur décide ? quelles stratégies ont été développées par les ressources pour s'adapter à leur environnement ?).

La phase de simulation suit divers scénarios : on explore le fonctionnement du monde artificiel tel qu'il a été structuré. A partir des interactions entre les agents artificiels, on voit apparaître des formes, des structures, des événements particuliers. On s'interroge alors sur les conditions d'apparition de ces phénomènes et on cherche à les expliquer, non par des raisonnements disciplinaires, mais en liant des processus différents. Par exemple, nous avons indiqué que les changements de composition spécifique dans les captures pouvaient être discutés non par de simples points de vue écologiques ou économiques, comme c'est le plus souvent le cas, mais en liant des connaissances sur la fragmentation de l'espace, les stratégies adaptatives des poissons et le processus de décision des pêcheurs.

### Perspectives et conclusion

La recherche que nous avons menée et le simulateur que nous avons élaboré représentent une modélisation de savoirs disciplinaires. Le modèle est un système d'aide à la décision en ce sens qu'il offre une médiatisation relativement intégrée de connaissances scientifiques. Il est possible de simuler des hypothèses d'aménagement sur le système et d'observer la dynamique en résultant. Nous comptons utili-

ser et développer ce type de simulation sur d'autres relations hommes-ressources.

Par ailleurs, nous lançons une nouvelle recherche au sein de l'unité de recherche Green (Gestion des ressources renouvelables et environnement) du CIRAD. Il s'agit de contribuer à une représentation des modes de gestion de l'exploitation de ressources renouvelables et à une compréhension des interactions entre dynamiques naturelles et dynamiques économiques et sociales, ainsi que d'élaborer des outils et méthodes d'intérêt général pour l'analyse, l'évaluation économique et sociale, l'aide à la décision.

Deux axes de recherche liés structurent les travaux de l'unité de recherche :

- les modes d'appropriation, qui recouvrent les représentations ou systèmes de normes de comportement, les usages de la (ou des) ressource(s), les modalités d'accès et de contrôle d'accès à la ressource, les modalités de répartition ou partage de la ressource, les modalités de transfert intra- ou intergénérationnels en interaction ;
- les processus de décision, c'est-à-dire le jeu des interactions décisionnelles entre acteurs individuels ou collectifs participant directement ou indirectement de l'exploitation de la (ou des) ressource(s).

La plupart des recherches sur la prise de décision sont orientées vers la compréhension de la décision d'un individu et font le plus souvent l'hypothèse d'une rationalité économique donnée à priori ou substantielle. Il s'agit de maximiser une utilité sous contraintes. Le passage d'une rationalité complète à une rationalité adaptative ou procédurale est maintenant admis et les outils d'aide à la décision se sont adaptés : on utilise aujourd'hui des modèles à base de connaissance pour aider l'agriculteur dans ses décisions (Attonaty, 1994). D'une part, il est bien admis que la rationalité n'est qu'une hypothèse parmi d'autres, d'autre part, les mécanismes qui gouvernent l'accès d'un individu à la ressource sont souvent à rechercher dans ses interactions avec la (ou les) organisation(s) sociale(s) dont il fait partie. Nous proposons donc de nous intéresser au jeu des interactions décisionnelles entre différents acteurs qui ont différentes représentations de leur environnement.

Les théories de la décision considèrent des acteurs individuels ou collectifs faisant des choix sur la base de stratégies découlant d'une appréciation de celles des autres décideurs. En cela, la théorie des jeux est l'outil privilégié (Ostrom, 1990). Les théories de la décision postulent que les acteurs sont égaux, qu'ils perçoivent tous le monde de la même manière et que leur décision est arrêtée à un moment précis. Dans les faits, les acteurs ont des perceptions différentes,

utilitaristes ou non, de court terme ou patrimoniales. Ces perceptions ont des poids différents, elles interagissent dans le temps pour construire la décision. Il s'agit plus de processus que de choix. Les SMA permettent aujourd'hui d'aborder la modélisation de ces représentations et des interactions entre divers individus au long d'un processus de décision.

Les systèmes d'aide à la décision sont classiquement présentés aux individus chargés de la gestion. Les SMA ont été peu utilisés dans cette perspective. Confrontés à des réalités précises de terrain, pouvons-nous définir des interfaces qui permettent d'animer la discussion au sein de collectivités qui gèrent des ressources communes ? Cela implique d'intégrer non seulement différents points de vue scientifiques, mais aussi d'autres acteurs impliqués dans la gestion des ressources communes (administrations, industriels, agences de tourisme, etc.). Aujourd'hui, nous comptons développer cette réflexion, indispensable pour maîtriser le transfert des résultats de la modélisation vers les modes de gestion.

## Références bibliographiques

- Auger P., 1993. Quelques outils mathématiques pour l'analyse hiérarchique. *In : Hiérarchies et échelles en écologie*. P. Auger, J. Baudry et F. Fournier (eds), Naturalia publications.
- Attonaty J.-M., 1994. Gestion de l'entreprise agricole et instrumentation. 6p., mimogr.
- Bousquet F., 1994. *Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents. Le cas de la pêche dans le Delta Central du Niger*. Thèse de doctorat, Université Lyon 1.
- Bousquet F., Cambier C., Morand P., 1994. Distributed Artificial Intelligence and Object-Oriented Modelling of a fishery. *Mathematical and Computer Modelling*, vol 19, n°9.
- Ferber J., Ghallab M., 1988. Problématiques des univers multi-agents intelligents. *In : Actes des journées PRC-GRECO Intelligence Artificielle*.
- Frontier S., 1991. Les outils mathématiques nouveaux du transfert d'échelle, géométrie fractale, relateurs arithmétiques, théorie des catastrophes, dynamique chaotique, analyse non standard. *In : SE-MINFOR 4, Le transfert d'échelle*. C. Mullon (ed.), ORSTOM.
- Legay J.-M., 1986. Méthodes et modèles dans l'étude des systèmes complexes. *Les cahiers de la Recherche Développement*, n°11, 1986.
- O'Neill R.V., 1989. Perspectives in hierarchy and scales. *In : Perspectives in ecological theory*. J. Roughgarden, R. May, S. Levin (eds), Princeton University Press.
- Ostrom E., 1990. *Governing the commons, the evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.
- Quensière J., 1993. L'étude de la pêche dans le Delta Central du Niger : une approche pluri-disciplinaire. *In : La recherche face à la pêche artisanale*. J.-R. Durand, J. Lemoalle et J. Weber (eds), ORSTOM, 1991.
- Tabary J.-C., 1991. Cognition, systémique et connaissance. *In : Systémique et cognition*. E. Andreewsky et coll., Dunod.