

Les systèmes multi-agents et la modélisation de la pêche dans le Delta Central du Niger : remarques sur une expérimentation

François Bousquet*

Cirad-Green
42 rue Scheffer
75116 Paris

* **Modélisateur**

Effectué au Mali puis en France, ce travail est le fruit d'une collaboration entre le programme Delta Central du Niger (Orstom - IER) et le Laboratoire d'Informatique Appliquée de l'Orstom.

Résumé

Dans le but de représenter des connaissances sociales et écologiques et de simuler la pêche, nous avons choisi d'adopter une démarche ascendante. Cette démarche consiste à représenter les différentes entités du système puis à simuler leurs interactions pour observer le fonctionnement global. Pour cela, nous employons la méthode des systèmes multi-agents. Nous discutons ensuite les différentes étapes du processus de modélisation (expériences, validation, utilisation).

Dans la deuxième partie du texte et à l'issue de notre expérience, nous proposons le cadre d'une méthode de représentation des connaissances et de simulation de l'interaction homme-ressource.

Abstract

The objective of our modeling is to represent ecological and social knowledge of a multidisciplinary team and to simulate a fishery. We study how complex behavior of a system emerge from its elements and their interactions: it's a bottom-up modelling. We briefly describe the multi-agents methodology we have chosen, and then discuss the modelling process.

In the second part of the text, we present a methodological frame to manage multidisciplinary knowledge and to simulate man resource interaction.

INTRODUCTION

Modéliser, simuler la pêche dans le Delta Central du Niger (DCN) c'est rentrer dans divers réseaux entremêlés : réseaux de communautés scientifiques (halieutique, environnement, ressources renouvelables, modélisation), réseaux thématiques (complexité, systèmes, interdisciplinarité, instabilité, espaces, connectivité), réseaux disciplinaires (écologie, sciences sociales, mathématiques, statistiques, intelligence artificielle distribuée), réseaux institutionnels (programme Delta Central du Niger, département Eaux Continentales, unité de Modélisation de l'Environnement, Laforia de Paris 6, programme Environnement du CNRS). La recherche que nous avons effectuée est une expérience singulière, un parcours particulier au sein de ces réseaux. Nous nous attacherons à présenter le contexte scientifique et notre positionnement dans le domaine de la recherche sur les pêches.

Nous développerons peu les modèles élaborés, les représentations informatiques et les différentes simulations effectuées sur le sujet de la pêche dans le DCN. Ces réalisations ont été présentées dans les diverses réunions de l'action incitative Orstom "Dynamique et Usage des Ressources Renouvelables" et publiées par ailleurs (Bousquet *et al.*, 1993 ; Bousquet, 1994). Nous essayons dans ce texte de livrer quelques réflexions, en nous appuyant sur quelques exemples de simulations succinctement présentés.

La recherche sur l'environnement est de plus en plus souvent pluridisciplinaire : la réalité est observée par différents scientifiques qui ont chacun leurs points de vue, leurs outils, leurs modèles. La simulation permet-elle, entre autres, de tisser des liens entre différents points de vue ? Effectuer une simulation, c'est passer par plusieurs phases qui chacune apporte des réponses différentes et complémentaires à cette question. Le processus de modélisation est généralement décomposé en plusieurs phases : définition d'objectifs, formulation et test, étude de validité et utilisation (Cheruy, 1988). Nous nous intéresserons aux phases :

- d'élaboration d'un modèle ou simulateur. Pourquoi et selon quels principes avons nous créé un simulateur de la pêche ?

- de choix d'une expérience particulière. Quelle partie du système observer ?

- de validation et utilisation des résultats. A quoi cela sert-il ?

Enfin, nous essayons de montrer comment nous nous sommes focalisés sur la représentation de l'espace et des processus de décision pour étudier l'interaction homme-ressource.

1. ÉLABORATION D'UN SIMULATEUR

1.1- La relation homme-ressource comme objet d'étude

1.1.1- Une recherche pluridisciplinaire

Est-il vraiment nécessaire de s'interroger sur la pluridisciplinarité pour des recherches sur l'interaction entre des sociétés humaines et leur environnement naturel ? Des sciences sociales et des sciences de la nature doivent être impliquées. C'est le cas de l'équipe DCN qui regroupe des démographes, économistes, anthropologues, géographes, biologistes, écologistes et halieutes. L'idée de la pluridisciplinarité mérite que l'on s'y arrête car elle pose à la fois des problèmes d'organisation de la recherche et des problèmes de production scientifique. Les problèmes de production de connaissances interdisciplinaires sont au coeur de la question posée. A la suite de plusieurs années d'étude, les différents chercheurs de l'équipe DCN ont acquis des connaissances. Relatives aux démarches de chaque discipline, ces connaissances sont exprimées en utilisant des concepts précis, construits en cohérence avec des modèles disciplinaires.

Selon Colin (Colin, 1989), une démarche disciplinaire est définie "par un regard spécifique sur un champ d'investigation, regard fondé sur un jeu de postulats fondamentaux et de concepts, sur un niveau d'analyse (spatial et temporel), sur une logique de démonstration, sur une catégorisation des entités observables, en d'autres termes une carte cognitive".

Sans aller jusqu'à créer une carte cognitive commune à plusieurs disciplines ou "dégager le substratum commun susceptible de constituer l'ossature d'un langage plus ou moins unifié" (Delattre, 1982), le fondement des recherches pluridisciplinaires est bien de faire communiquer ces cartes cognitives, ces concepts. Cette communication ne se produit pas toujours aisément et une part de la recherche sur l'environnement se consacre à la création et au développement d'outils de communication (Pavé et Rieu, 1993). C'est là que se situe notre sujet :

Les simulations peuvent-elles être, sinon un outil de production de connaissances transdisciplinaires, du moins un outil de communication entre les chercheurs de différentes disciplines ?

1.1.2- Un objet d'étude complexe

Considérer l'environnement comme un objet complexe permet de se joindre à un courant scientifique très productif et de proposer un modèle et des méthodologies d'études adaptées.

La complexité est le plus souvent abordée en relation avec d'autres concepts : ordre, équilibre, variabilité, résilience, instabilité, réversibilité, projets, observateur, hasard, etc. Avec Atlan (Atlan, 1991) "Comme nous n'en sommes pas au stade où les formalisations existantes, d'ailleurs multiples et non unifiées, recouvrent et épuisent ces descriptions, il était important de maintenir cette diversité. De cette façon, il nous sera possible, je l'espère, d'en apprendre le maximum", nous voyons dans cette créativité et cette diversité les effets de l'ouverture d'un nouvel espace théorique.

Il ressort de la littérature qu'un objet est complexe, a un comportement complexe, si on peut le considérer comme une organisation d'éléments en interaction. Sur l'échelle des organisations, à un niveau donné, des éléments interagissent et, en conséquence, forment une organisation, un système qui possède des propriétés propres.

Pour aborder la complexité, c'est à dire ici pour étudier l'organisation, deux voies sont possibles :

- choisir le système comme objet et niveau d'étude et rechercher ses lois d'organisation et de fonctionnement. "L'idée de système renvoie à l'unité complexe du tout interrelationné, à

ses caractères et ses propriétés phénoménales. L'idée d'organisation renvoie à l'agencement des parties, en et pour un Tout" (Morin, 1980). C'est ainsi que naissent des néologismes pour nommer le niveau d'intégration, "holon" (Koestler, 1968), "intégron" (Jacob, 1972), "systémon" (Bouché, 1990), ou apparaissent des outils d'observation conceptuels tel que le "macroscopé" (De Rosnay, 1975).

- choisir comme objet d'étude les différents individus et leurs interactions pour rechercher les conditions d'une possible organisation : "L'idée d'interrelation renvoie aux types et aux formes de liaison entre éléments/individus et le Tout." (Morin, 1980).

La première des deux voies relève de la démarche systémique, la seconde s'intéresse aux relations entre un niveau local et un niveau global.

1.1.2.1- Systémique (démarche descendante ou "top-down")

Fondée par les travaux d'automaticiens, ingénieurs, électroniciens (Wiener, Shannon, MacCulloch, Forrester) la science des systèmes s'est donné et traite un objet d'étude abstrait, le système : "Ainsi, il existe des modèles, des principes et des lois, qui s'appliquent aux systèmes généralisés ou à leurs sous-systèmes ; ils ne tiennent pas compte de leur espèce particulière, de la nature de leurs éléments et des relations ou forces entre ceux-ci. Le besoin d'une théorie qui ne s'applique pas à des systèmes d'un type plus ou moins spécial, mais aux principes des systèmes en général est donc légitime" (von Bertalanffy, 1973). Orientées par cette ambition, les recherches ont été poursuivies et des méthodes, des formalismes de représentation ont vu le jour. Ce domaine fut conceptuellement fécond : y sont apparues ou ont été précisées les notions de feedback, de délais, de flux d'informations, de contrôle et bien d'autres. La systémique a développé des méthodologies et des outils de modélisation. De Rosnay (De Rosnay, 1975) reprend la modélisation par les diagrammes de Forrester : "Le comportement de tout système, quelle que soit sa complexité, dépend essentiellement de deux types de variables : les variables de flux et les variables d'état (ou de niveau). Les premières sont symbolisées par des vannes qui contrôlent les flux, et les secondes (indiquant ce qui est contenu dans les réservoirs), par des rectangles. Les variables de flux ne s'expriment qu'entre deux instants, ou pendant une durée déterminée, et sont donc essentiellement dépendantes du temps. Tandis que les

variables d'états (les niveaux) indiquent l'accumulation au cours du temps d'une quantité donnée. Ils expriment donc le résultat d'une intégration." Ces méthodes furent surtout appliquées aux domaines de l'ingénierie, de la gestion.

Dans le monde de la recherche sur l'environnement la méthode systémique se présente tout d'abord comme l'étendard du rejet des méthodes analytiques et cartésiennes, puis comme une méthode de formalisation de l'organisation du monde observé en décomposant celui-ci en compartiments ou en filières ou encore en réseaux d'échanges, enfin comme une aide à l'organisation des recherches. "L'utilisation de schémas systémiques ou de diagrammes fléchés avec des rectangles, des ronds et des flèches est très fréquente pour représenter l'objet de la recherche et pour organiser ou rationaliser après coup l'intervention des différentes disciplines impliquées dans un programme de recherche pluridisciplinaire" (Godard et Legay, 1992).

La première phase d'une étude systémique est celle de la reconnaissance du système et de sa téléonomie, "Sa seule vertu (de la méthode systémique), mais elle reste essentielle, est de replacer l'étude des pêches devant son objet" (Quensiere, 1993). Dans la deuxième phase la démarche se caractérise comme une démarche descendante (top-down). Le système est décomposé en sous-systèmes qui sont indépendamment analysés. Dans la troisième et dernière phase est abordée une phase dite de recomposition (Le Fur, 1993) qui vise à apporter une représentation globale du système. Cette phase de recomposition, de re-création de complexité est généralement abordée par le moyen de juxtapositions plus ou moins organisées des connaissances acquises lors des analyses de sous-systèmes.

1.1.2.2- Du local vers le global ou l'analyse ascendante (bottom-up)

La théorie des structures dissipatives a permis d'aborder l'étude de l'organisation dans le sens ascendant : "D'une façon générale, les structures dissipatives correspondent à l'émergence, apparemment spontanée, d'un ordre, c'est-à-dire d'une morphologie spatiale ou temporelle, au sein d'un système constitué d'un grand nombre d'entités atomiques soumis à des contraintes externes particulières" (Boutot, 1993). Ce problème d'émergence se pose dans toutes les disciplines de l'environne-

ment : en écologie comment passer de l'individu à la population puis à la communauté, en sciences sociales comment passer de l'individu aux sociétés, et pour l'ensemble des deux comment passer des individus à l'écosystème anthropisé ? "Tous (le holisme et les différents structuralismes) partagent en effet le défaut rhédibitoire de poser la totalité comme toujours déjà donnée -que ce soit sous les dehors de la hiérarchie de la structure ou du symbolique- alors que tout le problème est de penser sa genèse, ou mieux sa morphogenèse" (A.Caillé, 1993).

Etudier un objet complexe, dans cette perspective, c'est donc essayer de comprendre comment les interactions entre individus au niveau inférieur peuvent créer une organisation au niveau supérieur. L'écosystème et son fonctionnement tel qu'on l'observe est issu de l'interaction de différents éléments. Contrairement à certaines disciplines comme la physique statistique (Diu *et al.*, 1989) qui étudient sous une forme probabiliste les différentes combinaisons moléculaires possibles, dans un écosystème ces éléments ne sont pas tous les mêmes, ils ne forment pas des réseaux homogènes, ils ne s'associent pas de façon aléatoire. Par fragments, les chercheurs donnent des indications sur des organisations locales. Comment ces organisations locales s'assemblent-elles et sous quelles conditions voit-on apparaître au niveau supérieur une organisation générale telle que d'autres chercheurs l'observent par ailleurs ? C'est la question posée lorsqu'on suit la démarche ascendante (bottom-up).

Souhaitant transposer ce mode d'analyse de la complexité sur le cas particulier de la pêche dans le DCN, nous nous sommes heurtés à la difficulté supplémentaire de la multi-disciplinarité. En effet s'il est aisément concevable au sein de chaque discipline de s'interroger sur les unités élémentaires d'observation et sur les organisations étudiées, le problème se complique lorsque plusieurs disciplines interviennent, ne regardent pas les mêmes unités, ne s'intéressent pas aux mêmes organisations, donc ne considèrent pas les mêmes dimensions spatiales ou temporelles, et en conséquence produisent des concepts, des langages différents. De par la nécessaire multiplicité des points de vue sur un objet complexe, "l'analogie avec un ensemble de poupées russes emboîtées (Jacob) est caduque et fait place à celle de hiérarchies enchevêtrées dynamiques" (Ploman, 1986).

En bref, l'étude de la complexité devient une étude des relations entre le local et le global. Il s'agit d'étudier d'une part quels sont les éléments qui composent le système, quelles sont leurs interrelations, comment émerge de ces éléments en interaction une organisation et comment cette organisation, en retour, exerce une contrainte sur les éléments.

1.2- Méthode : la représentation et la simulation multi-agents

Dans une discipline donnée, la définition des éléments se fait en cohérence avec le point de vue, avec le sens de cette discipline. Si les disciplines construisent différentes abstractions, se font des représentations propres, elles observent par contre les mêmes acteurs : des poissons, des milieux, des pêcheurs, des villages, des pirogues, un marché... Passer de l'élément à l'acteur, c'est se donner la possibilité de représenter la complexité vue par plusieurs observateurs. C'est le choix d'un objet concret, à partir duquel il est possible de reconstruire des abstractions ou des agrégats disciplinaires. En reconstituant le point de vue de chacun sur les acteurs, on cherche à faire apparaître le mode d'expression de chaque discipline : pour communiquer, il ne suffit pas d'échanger des informations ou des connaissances, mais il faut posséder des connaissances sur ces échanges (les méta-connaissances), savoir comment son interlocuteur construit sa communication. D'une part, extraire une connaissance de la construction qui l'abrite peut être scientifiquement dangereux, d'autre part considérer l'autre comme un pourvoyeur d'information augure mal de la relation pluridisciplinaire.

Dans un système multi-agents (Ferber, 1989) on construit une réalité "virtuelle" (un monde artificiel) qui reflète en réduction la réalité ; on effectue une fragmentation de la connaissance disponible et chaque fragment va être identifié à une entité informatique pourvue d'un comportement : un agent. Il ne s'agit pas de recréer la réalité, ou le monde tel qu'il est, mais de générer un petit "bocal de vie" où interagissent des composants qui sont "palpables", observables et d'où un certain nombre de lois globales peuvent être extraites. Cette méthode de simulation est utilisée dans des domaines très variés (simulation d'insectes sociaux comme les fourmis, planification,

contrôle automatique des plans de vols temps réel, résolution de problèmes du type taquin, poursuites entre proies et prédateurs etc.) avec des résultats prometteurs. Nous avons élaboré un simulateur multi-agents (figure 1).

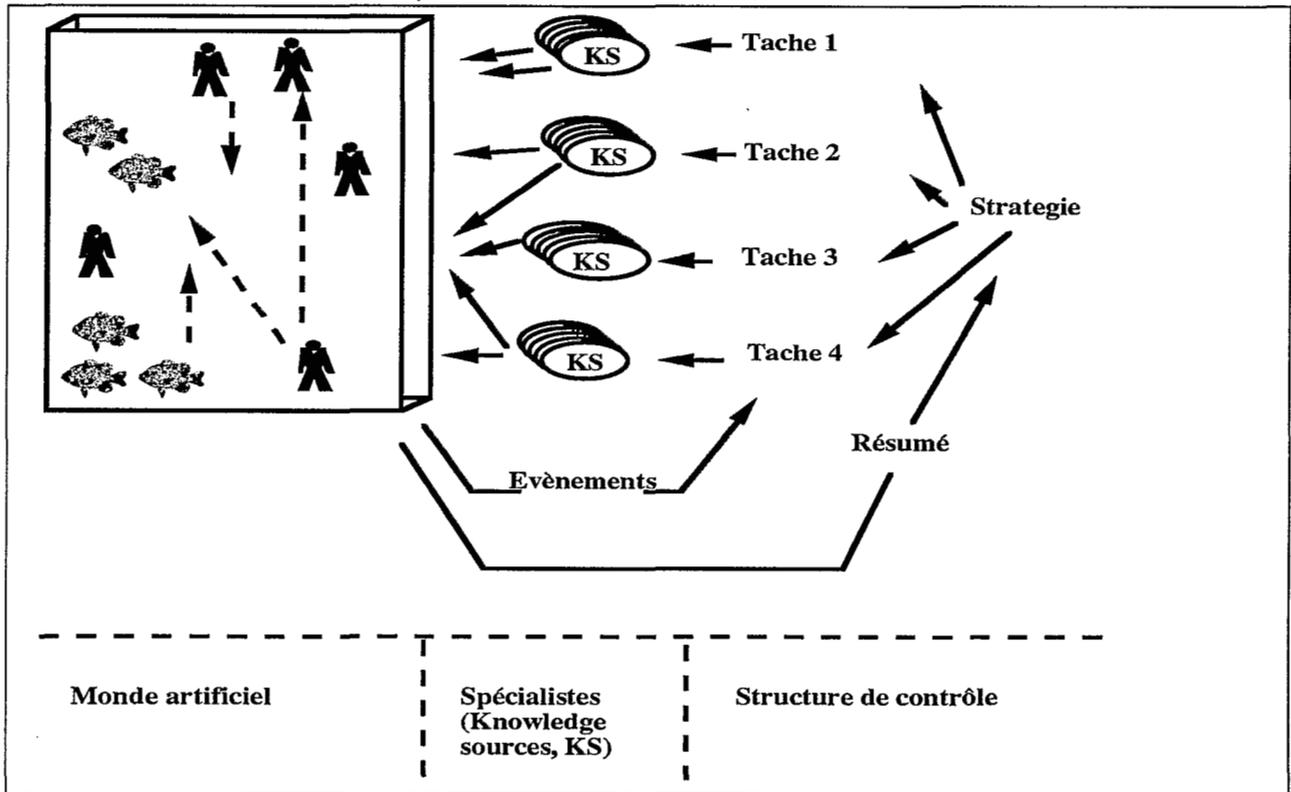


Figure 1 - Architecture du simulateur

Le simulateur permet de représenter :

- un monde artificiel composé de plusieurs agents qui interagissent : le fleuve, les biotopes (environ 4), les cohortes de poissons (environ 500), les ménages de pêcheurs (environ 100), etc. Chacun des objets est décrit comme une petite unité élémentaire, en définissant ses attributs. Ainsi, il est possible de représenter plusieurs points de vue sur cet objet. L'halieute décrira l'objet pêcheur par le nombre d'engins qu'il possède, le nombre de pirogues, l'économiste par les attributs dette, bénéfiques, l'anthropologue par les attributs ethnie, lignage...
- différents spécialistes (l'hydrologue, l'économiste, l'halieute, l'anthropologue, etc.), auxquels sont associés des lots de règles, qui représentent leurs connaissances, leurs points de

vue sur cet univers artificiel : c'est la réalité vue par les chercheurs qui est simulée. Chacune de ces règles représente le fonctionnement des agents en fonction de leurs attributs, de leurs interactions. Par exemple :

Soit un Pêcheur, Si son ethnique = somono, Alors accès au biotope mare = interdit

La transmission de l'information est gérée par une architecture dite blackboard : lorsqu'un événement se passe dans le monde artificiel les spécialistes concernés sont informés, activent leurs règles, font évoluer les agents concernés et transforment ainsi le monde artificiel. Ces transformations peuvent à leur tour constituer un événement pour un autre spécialiste, etc.

Tout le programme est écrit en langage orienté-objet Smalltalk sur station de travail SUN.

2. QUELLES SIMULATIONS ?

Si le simulateur offre la possibilité de représenter beaucoup de connaissances, il est nécessaire, dans le but de conduire des expériences qui débouchent sur des résultats intéressants, de s'orienter vers des études particulières. Il était possible, et cela reste envisageable pour le futur, de chercher à simuler par exemple la formation des prix du poisson dans un marché en relation avec l'activité des populations, de simuler sur des temps très courts les processus de migration d'un peuplement de poissons pendant la phase de montée ou de retrait des eaux, ou encore de simuler la genèse de structures spatiales à travers les règles de parenté de la société.

Nous avons choisi de nous focaliser sur l'interaction entre la dynamique de populations de poissons et le processus de décision des pêcheurs. En conséquence nous avons fait des choix de niveaux d'organisation.

2.1- Choix de niveaux d'organisation

Simuler la pêche revient à considérer en même temps un très grand nombre de poissons, un espace fragmenté et des

pêcheurs. Nous avons fait le choix :

- de représenter individuellement chaque pêcheur car nous nous intéressons aux processus de prise de décision des individus,
- de représenter des fragments d'espace à l'échelle des grands types de biotopes identifiés (mares, plaines inondables, chenaux, bras de fleuve, etc.) en précisant pour chacun la dynamique des entités qui constituent l'offre de nourriture pour les poissons (microparticules, macroparticules),
- de représenter des poissons à l'échelle du groupe. Le groupe comprend les poissons d'une même cohorte localisés dans un biotope particulier. La croissance des poissons est modélisée à l'échelle de l'individu. Les interactions de compétition et prédation sont modélisées.

De cette façon on met en relation l'individu pêcheur avec un espace composé de quelques biotopes dans lesquels se déplacent des groupes de poissons.

Pour représenter une dynamique écologique ont été créées des super-populations de poissons qui constituent des regroupements d'espèces similaires. Disposant à la fois de connaissances sur les individus et les populations et sur la dynamique de la communauté, il est enrichissant d'essayer de résumer et synthétiser les premières pour les relier aux secondes. Cela oblige à associer, à relier des connaissances variées (reproduction, croissance, migration, etc...) et à les résumer. Cette phase est très propice à la discussion et à la synthèse de connaissances. En outre, une fois élaboré, le modèle offre, vis à vis de l'extérieur, une bonne lisibilité de la place de chaque connaissance dans la représentation de la dynamique écologique. Par jeu de simulation, il est possible de tester des hypothèses en observant l'évolution du peuplement artificiel.

Du côté social, comme pour la dynamique écologique, il s'agit de représenter des pêcheurs "résumés". La représentation des connaissances dans le but de simuler des actes de pêche favorise aussi la discussion. Les connaissances qui s'appliquent à la décision des pêcheurs relèvent de données collectées sur différents terrains, à différentes échelles d'organisation. Elles ont ensuite été interprétées. Le pêcheur est donc modélisé à partir de formes, de connaissances qualitatives, de résumés et de synthèses, de distributions de données.

2.2- Un thème : l'intensification d'exploitation

La plupart des recherches menées au sein de l'équipe DCN s'inscrivent dans une démarche qui vise à caractériser le changement dans l'histoire de cette région. Si les anthropologues et les écologistes s'intéressent parfois à des échelles temporelles très longues, il apparaît clairement que les chercheurs s'appliquent à comprendre l'évolution de la pêche dans le delta au cours des cinq dernières décennies. Il s'agit de l'étude des changements climatiques avec la sécheresse, des changements sociaux avec l'apparition de nouvelles règles d'accès, des changements techniques avec l'apparition de nouveaux matériaux et de nouveaux engins. C'est dans l'articulation de ces changements, dans l'étude de leurs importances relatives, que l'équipe cherche à comprendre l'état actuel du système. C'est donc ce débat que les simulations doivent enrichir.

Pour cela, nous avons réalisé une série de simulations qui concernent toutes une intensification d'exploitation. En modifiant les formes sous lesquelles cette intensification est représentée, et en étudiant l'influence de certains facteurs, les résultats des simulations permettent d'accroître les capacités d'argumentation et de spéculation sur l'importance de ces formes et de ces facteurs, dans un contexte multi-disciplinaire. Nous avons mené plusieurs séries de simulations, que l'on peut séparer en deux grands groupes, eux-mêmes subdivisés en plusieurs opérations.

Le premier groupe de simulations consiste à étudier un écosystème soumis à un effort de pêche imposé : on ne représente pas de pêcheurs. Il s'agit d'un modèle écologique ou halieutique. La question posée est de définir la réponse de l'écosystème à ce stress imposé, d'observer et de caractériser cette réponse sous diverses contraintes : il s'agit en termes de modélisation d'analyser la sensibilité à divers paramètres. Dans un deuxième temps, nous nous posons la question de la représentation de l'hétérogénéité de l'espace et des variations de l'environnement dans le temps. Ce premier groupe de simulations correspond à des études plutôt classiques en modélisation halieutique. Elles servent à intégrer des connaissances biologiques, pour en observer les conséquences au niveau de l'écosystème (figure 2).

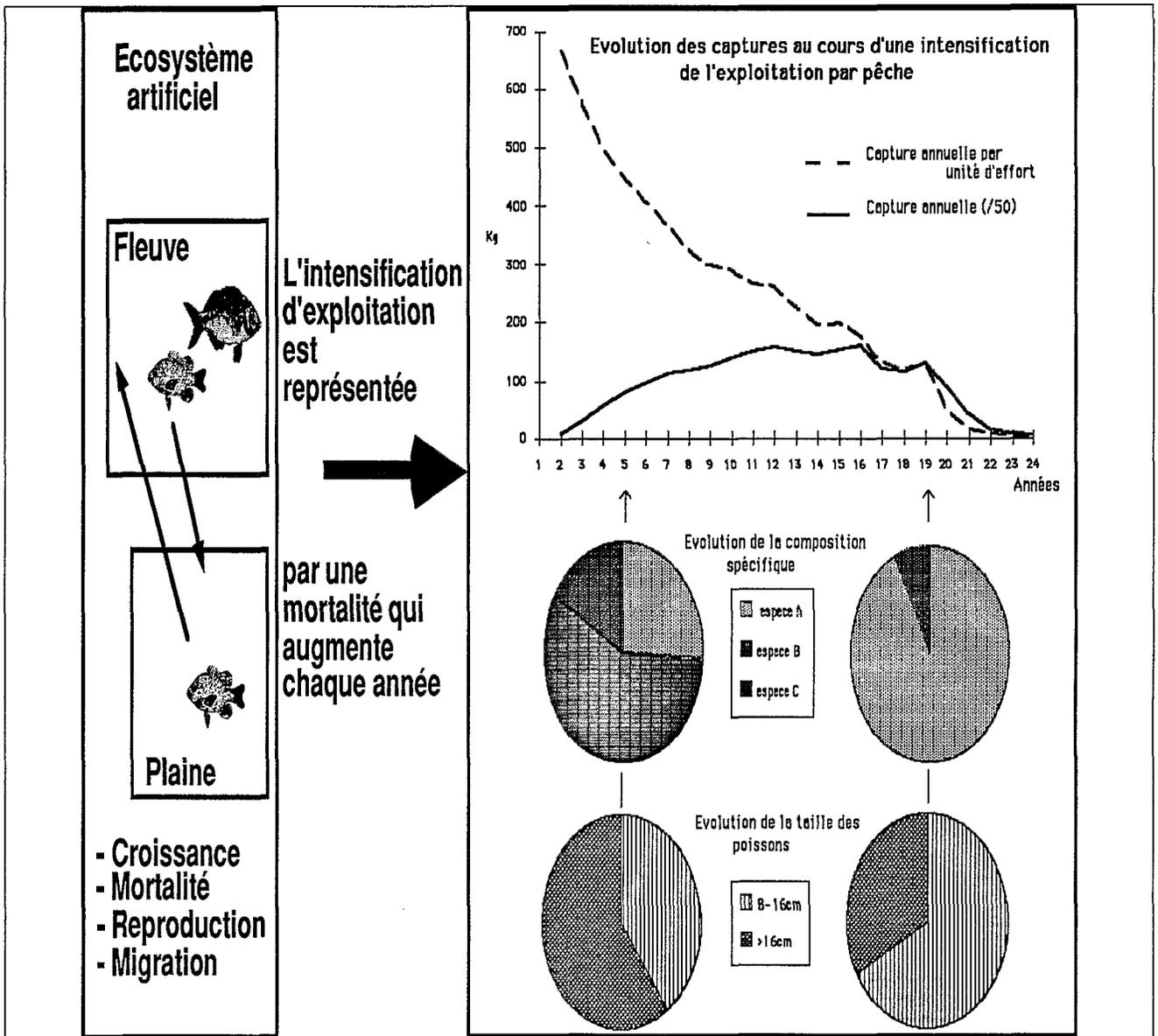


Figure 2: Expérience d'intensification d'exploitation. Des poissons de 3 espèces différentes interagissent dans deux milieux. On soumet ce système à une augmentation de l'effort de pêche c.a.d. à capturabilité constante, à une augmentation de mortalité par pêche. En résultat on observe la courbe des captures et l'évolution de a composition spécifique et des tailles des poissons.

Dans un deuxième temps nous représentons des pêcheurs, avec leurs processus de décision. Il ne s'agit plus d'augmenter l'effort de pêche, mais d'augmenter la population de pêcheurs. Nous nous posons alors la question de l'influence des comportements individuels, c'est à dire de certains processus de décision, sur la dynamique globale de l'écosystème. On observe en particulier comment des règles d'accès à l'espace peuvent changer la dynamique des populations de poissons.

3. OBSERVER L'ÉCOSYSTEME ARTIFICIEL

3.1- Cohérence avec le "réel"

La phase de validation est une étape clé dans le processus de modélisation. En général, le modèle a été bâti pour avoir un comportement analogue au système étudié. Pour cela il a été calibré avec des jeux de données de façon à attribuer aux paramètres des valeurs qui reproduisent ces jeux de données. Puis le modèle est appliqué et comparé à d'autres jeux de données. C'est sur le résultat de cette comparaison que la qualité du modèle est jugée et que son utilisation est encouragée à des fins de prévision et de gestion.

Dans le cas de notre expérience, l'approche de la validation est un peu différente: c'est la recherche d'une cohérence avec le réel. Le modèle et la réalité doivent être comparés par des résumés de même niveau d'abstraction. C'est en s'appuyant sur des théories, des formes, des indices, des modèles qualitatifs, des typologies, des distributions censés représenter une compilation de connaissances que s'est construit l'univers artificiel. Il serait donc inadapté de comparer les résultats de la simulation à une réalité précise, à un groupe de pêcheurs observés dans le delta. C'est à des connaissances formalisées, à des théories, à des formes, des indices, des modèles qualitatifs, des typologies ou des distributions concernant les niveaux d'organisation supérieurs que doivent être comparés les résultats des simulations. Cela suppose aussi de s'assurer que les conclusions obtenues sont robustes : pour cela il faut provoquer plusieurs simulations et vérifier que l'on obtient des résultats homogènes.

Prenons les simulations sur l'intensification de l'exploitation. Basées sur une représentation de l'espace par deux milieux fleuve et plaine, sur des typologies d'espèces de poissons, sur une pêche représentée par un effort qui augmente, on obtient en résultat une courbe d'évolution des captures qui suit une forme très caractéristique et robuste : après une montée, les captures stagnent longtemps en raison de l'augmentation de la production biologique, avant de s'effondrer.

Cette courbe, cette forme qualitative, qui caractérise le peuplement et l'espace dans leur globalité est validée (dans notre accep-

tion de la validation), non pas par des observations sur le DCN, mais par un modèle conceptuel qui synthétise un ensemble de données sur des hydrosystèmes africains (Welcomme *et al.*, 1989). Modélisé et simulé à l'échelle des populations de poissons, on retrouve une réponse à l'échelle de l'écosystème qui est validée par un modèle conceptuel. La simulation est validée par ces transferts entre deux niveaux d'organisation. D'autre part, ce modèle est aussi validé par l'écho qu'il reçoit des chercheurs de l'équipe DCN. Les résultats de cette simulation correspondent à la construction que se font les biologistes de l'équipe, à savoir que le milieu naturel résiste bien à des perturbations fortes telle une intensification de la pêche. On peut alors, sur le modèle, rechercher au niveau micro les structures ou les processus qui modifient la réponse observée au niveau macro.

3.2- Utilisation

Après la phase de validation (dans le sens expliqué ci-dessus) on aborde l'utilisation du modèle. L'utilisation du simulateur découle elle aussi de l'esprit avec lequel il a été élaboré puis validé. Bâti à partir de différents corpus de connaissances disciplinaires, le simulateur produit des résultats qui ont vocation à être orientés vers les chercheurs dans le but que chacun puisse illustrer son discours à partir d'une même dynamique simulée. La simulation est donc utilisable pour d'une part enrichir les corpus théoriques de chacun en les reliant à d'autres constructions et d'autre part à fournir une lisibilité des interactions entre connaissances.

Les premières opérations de simulation peuvent servir d'amorce pour d'autres expériences. C'est autant par réaction que par construction que les chercheurs participent aux simulations. Envisager un univers complexe c'est considérer que beaucoup de phénomènes interviennent. Par exemple, si on simule une pêcherie amenée à une surexploitation, les pêcheurs s'appauvrissent et se pose la question des mécanismes de maintien ou de sortie de la pêcherie. S'ouvrent alors des expériences spécifiques sur par exemple l'accès au crédit, ou bien sur la comparaison de diverses hypothèses sur les mécanismes de maintien dans la pêcherie et leurs effets répercutés à l'échelle du groupe. Les simulations ont pour but d'illustrer les liens entre des ques-

tions scientifiques qui peuvent paraître éloignées, et pourquoi pas d'orienter les recherches sur des mécanismes que la simulation aurait montré structurants sur des univers artificiels.

Pour mener ce travail il est nécessaire que les constructions de chacun soient bien identifiées. Il faut que les connaissances fournies soient bien reliées à des modèles, à des points de vue sur le monde, à des théories. En conséquence, la lisibilité et la place de ces points de vue, par rapport à l'ensemble, seront améliorés par la simulation.

Comme exemple reprenons la simulation d'intensification d'exploitation. Au cours du temps, on peut observer la diminution des prises par unité d'effort, ce qui illustre la crise ressentie par les pêcheurs, et observer la diminution des tailles de poissons et de la composition spécifique. Au cours d'une même simulation, on représente donc l'évolution globale du système, à laquelle on associe des connaissances sur l'évolution biologique et sur l'évolution halieutique. On illustre ainsi en quoi ces recherches sur les tailles de poissons et prises par unité d'effort sont des indicateurs de l'état du système et en les mettant en parallèle, on enrichit les constructions disciplinaires.

Par ailleurs nous avons mené des expériences où l'on simule la dynamique d'un écosystème exploité par une population de pêcheurs dont l'effectif augmente au cours du temps. En comparant (Bousquet, 1994) plusieurs hypothèses sur le processus de prise de décision des pêcheurs, on observe différents comportements de l'écosystème global (évolution des compositions spécifiques, des captures totales, des revenus des pêcheurs).

Le principe de nos expériences est le suivant (figure 3). Le monde réel est caractérisé par une hétérogénéité, une complexité, tant pour les milieux, pour les poissons et les hommes. Cependant on observe le fonctionnement d'une organisation globale. Comment expliquer le fonctionnement de cette organisation à partir des diverses entités ?

Les chercheurs font des typologies, des modèles pour réduire cette diversité: ils parlent de stratégies, de fragments d'espace, de processus de décision. Mais comment ces modèles s'assemblent ils ? Quelles règles d'accès à l'espace doit-on considérer en fonction du degré de fragmentation de l'espace ? Quelles stratégies écologiques représenter en fonction du processus de décision? Les agents forment des supports dynamiques pour

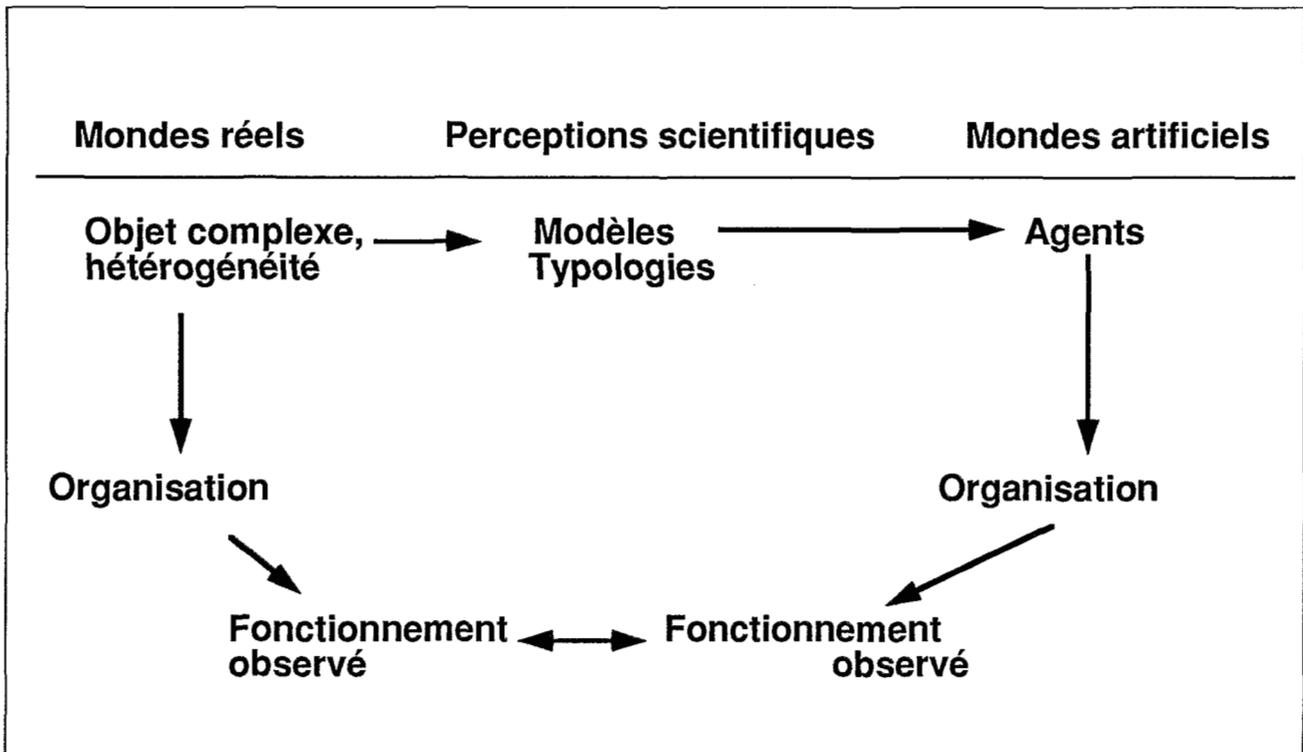


Figure 3 - Principe des simulations.

tester ces typologies les unes en regard des autres en observant le fonctionnement des organisations artificielles. On peut ainsi faire des liens entre les connaissances sur la ressource, les milieux, les hommes. "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'origines différentes" (Legay, 1986).

4. ESPACE ET DÉCISION

Nous essayons de dégager de notre réalisation expérimentale quelques principes qui pourront peut-être servir pour des études similaires. "Les solutions ou configurations observables à un moment donné renvoient par ailleurs à un contexte. Elles constituent des états provisoires d'achèvement toujours susceptibles de transformation en fonction de ce que l'on a appelé l'environnement (...). C'est la façon dont sont posés et articulés les questions et leurs processus de résolution qui ont un inté-

rêt, sinon universel du moins général, en donnant lieu à comparaison (dans le temps et dans l'espace) et à recherche de constantes, traits de longue durée ou structures inconscientes" (Verdeaux, 1992). Transposons à la modélisation cette démarche définie par l'auteur comme spécifiquement anthropologique, et extrayons de ce qui a été présenté des formes, des traits dont la solidité pourra être éprouvée par d'autres cas d'étude sur la modélisation de la dynamique et l'usage de ressources renouvelables. Ainsi, il ne s'agit pas, dans ce chapitre, de présenter précisément notre modélisation et les résultats que nous avons obtenus, mais nous tentons de fournir un cadre, une architecture de modélisation.

Espace-ressource et décision : c'est autour de cette articulation, de cette problématique, que notre recherche peut rentrer dans la discussion générale sur la dynamique et l'usage des ressources renouvelables.

La représentation passe par trois phases de modélisation distinctes : la création d'un espace, le choix de différents agents qui interagiront dans cet espace, et la représentation des processus de prise de décision.

4.1- Modélisation d'un espace

A l'origine, l'espace est considéré comme une surface de support (Lacour, 1986) : il s'agit de représenter la scène ou va se jouer la pièce. Généralement fragmenté, l'espace est représenté comme plusieurs milieux entre lesquels sont établis des liens de voisinage (grilles, réseaux réticulés ou autres).

Dans le cas de ressources renouvelables cet espace, cet ensemble de biotopes, est aussi un support de vie. Dans un deuxième temps l'espace est donc perçu à travers une dimension qui représente sa potentialité d'accueil (volume, surface, offre de nourriture, "carrying capacity", ...) et qui va permettre un développement de la vie des agents. Pour figurer les variations environnementales, il est possible de représenter une variabilité au cours du temps de cette potentialité d'accueil.

Traditionnellement les modèles multidisciplinaires sont construits autour d'une ou plusieurs variables d'interface

assurant la circulation des données et des résultats (Godard et Legay, 1992). Ici c'est l'espace qui supporte la circulation des agents et accueille leurs interactions. L'ensemble des lieux constitue donc un véritable objet d'interface entre dynamiques sociales et écologiques.

4.2- Modélisation des agents

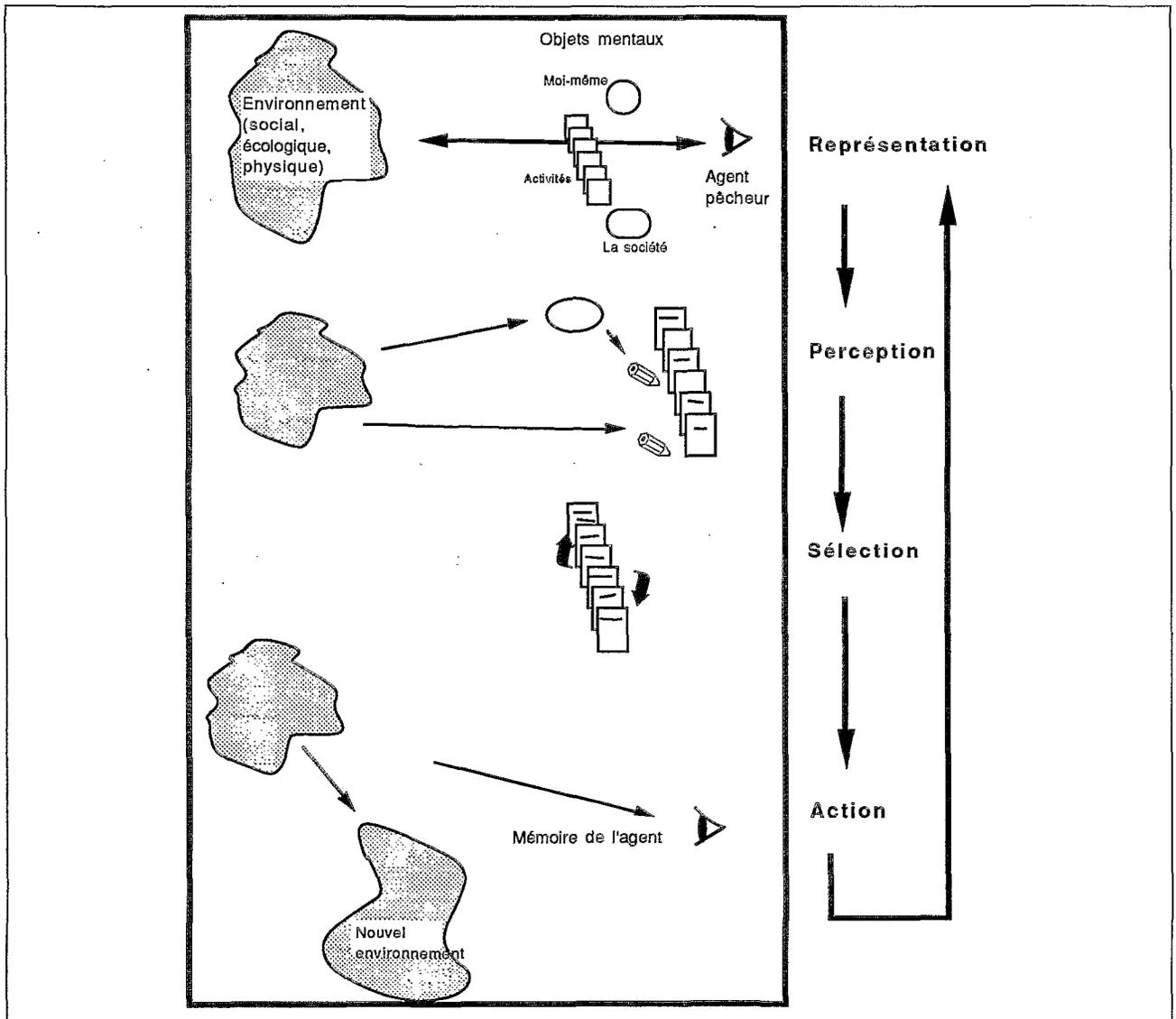
Il importe avant tout que les agents concernés soient localisables dans l'espace précédemment défini; leurs processus vitaux peuvent être représentés de façon plus ou moins complexe, mais ils doivent être localisés. Dans le cas de la pêche il y a deux types d'agents, les poissons et les pêcheurs. Les poissons vont de déplacer dans l'espace qui va de ce fait prendre une dimension supplémentaire pour devenir un espace-ressource (Lardon *et al.*, 1990; Morand *et al.*, 1993), objet de la décision et des mouvements spatiaux des pêcheurs. Au fil de la représentation des agents, l'espace est passé d'un espace-support, à un ensemble d'agents qui interagissent dans différents lieux.

4.3- Modélisation des processus de décision spatiale

Le moteur de l'organisation de l'espace est le processus de décision, de choix d'action dans un lieu. Dans le cas d'une ressource vivante cette décision concerne à la fois la ressource et la société. Il est possible de dégager l'esquisse d'un processus de prise de décision en le décomposant en quatre phases (figure 4) : (i) la représentation ou construction de l'espace ; (ii) la perception d'information pour meubler cette construction ; (iii) la sélection ou le choix d'une alternative ; (iiii) l'action localisée qui est le résultat de la décision et le moteur de l'interaction. Cette classification concerne essentiellement les connaissances qui se rapportent à la dynamique des acteurs humains, mais on peut l'appliquer aussi à des ressources qui ont la possibilité de se déplacer dans l'espace.

4.3.1- La représentation du monde

Le mot représentation a déjà été utilisé plusieurs fois en particulier pour discuter la transcription des connaissances dans des formalismes informatiques. Ici, nous introduisons ce terme



suivant la définition du Larousse : "idée que nous nous faisons du monde". Il s'agit de définir comment l'agent pense ses rapports au milieu naturel (Friedberg, 1992).

Pour représenter (au sens représentation des connaissances) ces représentations (au sens des constructions que se font les agents), nous utilisons le concept d'objet mental (Changeux, 1983). "Nul doute que des représentations d'objets complexes existent et sont manipulées dans le système nerveux central : grâce à ces représentations que nous avons construites et

Figure 4: Schéma du processus de décision

Lors de la phase de représentation, un objet mental est créé pour chaque activité potentielle. Lors de la phase de perception, chacun des objets mentaux est documenté en fonction de la perception de l'environnement. Lors de la phase de sélection, l'agent choisit une activité en fonction d'un critère de choix prédéterminé. Lors de la phase d'action, l'agent transforme son environnement et mémorise les résultats de son action.

mémorisées nous simulons le monde extérieur, anticipons les événements futurs et établissons des stratégies de comportement". (Bienenstock, 1991). Cette approche est surtout utilisée pour la pensée humaine, bien qu'on puisse voir dans certaines études éthologiques, c'est à dire chez l'animal, des mécanismes de représentation de l'espace. Il en est ainsi par exemple des oies de Konrad Lorenz qui se représentent leur mère à travers le premier être vivant qu'elles rencontrent après l'éclosion. De même les phénomènes d'appropriation de l'habitat chez les animaux territoriaux montrent bien des représentations de l'espace chez l'animal.

Il s'agit dans cette phase de relever les différents filtres que les agents construisent entre eux et la réalité, de reconstruire l'environnement tel qu'ils se le représentent, ou plus exactement la représentation que les chercheurs se font de leurs constructions. Ainsi, par exemple dans notre réalisation, les pêcheurs se représentent l'espace non pas comme un ensemble de lieux, mais comme différentes activités localisées dans le temps et dans l'espace. Il y a autant d'objets mentaux qu'il y a de combinaisons milieux-engins-saisons. Pour 4 milieux, 4 engins, 4 saisons on construira 64 objets mentaux différents. Ces objets mentaux concernant l'activité sont construits en fonction du point de vue de chaque chercheur. Ainsi, par exemple, on peut leur associer des coûts, des recettes prévisionnelles, des durées pour la représentation économique. Si cette construction mentale est ici tournée vers l'espace, il serait aussi possible de construire une représentation mentale de la société, c'est à dire la façon dont le pêcheur voit sa place au sein du groupe. Entrouvrir la porte à ce type de représentation et de simulations confirme bien tout l'intérêt de la modélisation à l'aide d'objets. C'est ainsi que des modélisations d'individus qui se communiquent et comparent leurs cartes mentales commencent à voir le jour (Treuil, 1993; Hutchins et Hazelhurst, 1993). La modélisation de l'épidémiologie des représentations (Sperber, 1992), c'est-à-dire l'étude de l'émergence d'un point de vue partagé devient un problème envisageable.

Il importe de faire la distinction entre plusieurs types d'objets mentaux. Nous avons présenté des objets mentaux qui correspondent à des activités possibles dans l'espace. C'est un ensemble de technotopes (Fay, 1989). Par ailleurs, il existe d'autres types d'objets mentaux. L'environnement d'un agent n'est pas seulement physique, réel. Il est aussi construit. D'un

point de vue hydrologique, la crue est-elle un objet réel ou un objet mental ? D'un point de vue social, la perception du groupe, si elle ne passe pas directement par la perception des autres individus, passe par l'existence construite d'objets particuliers. Il en est ainsi par exemple de l'objet "marché" qui est une représentation de la dynamique de groupe qui influera sur l'activité de l'individu. De même l'objet "génie" est la représentation collective de cet espace. A travers cette construction de groupe sont réglées les conditions de l'accès à l'espace.

4.3.2- Perception d'information

Les agents perçoivent leur environnement au travers des filtres qu'ils ont élaborés. Au départ les objets mentaux sont vierges de toute information sur le système. La phase de perception consiste à documenter ces objets mentaux en fonction de l'état du système en informant l'agent de façon complète ou incomplète, sur l'environnement, sur les objets qui l'entourent. Cette phase correspond à une lecture de l'environnement. Dans notre expérience de nombreuses règles sont dédiées à cette tâche, car elles expriment des interactions entre l'agent et les objets de son environnement. Cette lecture de l'environnement (naturel, social) amène :

- à une décision directe dans le cas d'agents uniquement réactifs (Si l'objet ConditionsHydrologiques montre un gradient de niveau d'eau positif, Si je suis dans le fleuve, Si je suis d'une espèce migratoire, Alors je migre vers la plaine),
- à l'enrichissement des objets mentaux pour des agents cognitifs (Si l'objet ConditionsHydrologiques est en saison basse, Si je suis d'ethnie somono, Alors la pêche de mare est interdite; Si je suis allochtone au territoire, Alors ma recette prévisionnelle doit être amputée de 20% pour des droits de pêche).

Des formalismes qualitatifs ou quantitatifs peuvent servir à cette lecture de l'environnement. L'individu peut avoir une attitude vis-à-vis de la perception : par exemple, il peut ne retenir que les informations favorables ou bien n'envisager que les pires éventualités.

4.3.3- Sélection

Au sein du processus de prise de décision, la sélection consiste à faire un choix, à décider d'une action, d'un déplacement. Deux cas de figure se présentent.

Soit l'agent est essentiellement réactif et la question ne se pose pas (Si je suis un poisson chronorégulé et que c'est la bonne période, Alors je migre; Si je suis bozo et que les Conditions Hydrologiques sont basses, Alors je pêche dans la mare avec un épervier) car la phase de sélection est confondue avec la phase de perception.

Soit l'agent examine différentes opportunités et dans ce cas des critères de sélection doivent être définis. Il peut s'agir d'heuristiques diverses, de modèles de sélection (optimisation des gains, théorie du vote, etc.).

4.3.4- Action

Après avoir choisi une activité ou un déplacement les agents se déplacent sur un lieu où ils agissent. Ainsi par exemple des poissons, qui après avoir "choisi" un endroit grossissent, se reproduisent, meurent, ou des pêcheurs qui après avoir choisi un endroit, et un engin, pêchent des poissons. C'est au cours de cette phase que les interactions ont lieu : interaction de compétition, interaction de prédation, interaction de pêche. Ces interactions produisent une information pour chacun des agents : ainsi, en résultat de la compétition l'agent peut être satisfait ou insatisfait. Sans aller jusqu'à interpréter l'information, l'agent peut mémoriser l'information par rapport à la représentation qu'il se fait du monde. Ainsi un résultat de pêche sera mémorisé et constituera une information supplémentaire pour les choix suivants. Lorsqu'intervient la mémoire, le processus de décision n'est jamais achevé car la perception du monde est sans cesse renouvelée. C'est une perpétuelle acquisition d'informations donc une décision continue (Simon, 1991).

CONCLUSION

En conclusion, les simulations ont un rôle d'aide à la recherche en permettant l'étude des transferts d'échelle et en intégrant des connaissances sur des dynamiques différentes. C'est un enrichissement pour les corpus théoriques impliqués. Elles tiennent aussi un rôle vis à vis de l'aménageur. Livrées, dans leur rôle et à leur place dans la recherche pluridiscipli-

naire, les simulations ont pour effet d'illustrer les connexions interdisciplinaires. En outre, en choisissant correctement les simulations menées, leurs résultats peuvent servir d'illustrations aux conclusions écologiques et sociales de l'équipe de recherche. Les simulations fournissent des indications qualitatives sur l'évolution de l'écosystème en fonction d'un jeu donné d'hypothèses, de contraintes et mettent en avant l'imbrication des différentes dynamiques et donc soulignent les conséquences d'aménagements éventuels. Ainsi, une conclusion du programme DCN est qu'il faut plus s'inquiéter des changements de la structure sociale (croissance démographique, changements de réglementation, changements techniques qui entraînent des conflits pour l'accès à la ressource) que d'une évolution écologique : ce résultat est illustré par les simulations que nous présentons (la production écologique peut compenser longtemps une intensification de la pêche (figure 2) et les changements de règles d'accès à l'espace sont un facteur sensible pour tout le système (Bousquet, 1994)).

Pour finir, rappelons que, de même que chaque corpus théorique est une construction de la réalité, le schéma que nous venons de fournir est lui-même une construction, basée sur une expérience menée de façon tout à fait particulière. C'est la construction issue du parcours d'un modélisateur particulier sur un terrain qu'il a contribué à modifier par son action. Dans le cas d'un univers multi-agents, tel que nous l'avons élaboré, il s'agit bien de fournir une représentation du monde par l'intermédiaire d'un choix d'acteurs, de typologies pour résumer la connaissance, de construction d'objets mentaux particuliers, de classification de la connaissance, tout cela orienté dans le but d'étudier les effets des interactions. En elle-même notre construction est présentable à la critique, c'est à dire à un processus de validation : "Pour conclure, je rappellerai qu'il a été remarqué que la construction d'une rhétorique s'apparentait à la construction d'un château de cartes : on effectue un assemblage complexe, et on ne sait si la raison de ce travail réside dans la beauté de l'objet construit ou dans la contemplation de sa destruction" (Mullon, 1987).

BIBLIOGRAPHIE

- Atlan H., 1991 - L'intuition du complexe et ses théorisations, Actes du Colloque de Cerisy, Les théories de la complexité autour de l'oeuvre d'Henri Atlan, Seuil.
- Bousquet F., 1994 - Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents. Le cas du delta central du Niger. Thèse de l'Université Lyon 1.
- Bousquet F., C. Cambier, C. Mullon, P. Morand, J. Quensière et A. Pavé, 1993 - Simulating the interaction between a society and a resource. *Journal of Biological Systems*, Vol 1, n°2.
- Biennenstock E., 1991 - Une approche topologique de l'objet mental. Actes du Colloque de Cerisy, Les théories de la complexité autour de l'oeuvre d'Henri Atlan, Seuil.
- Bouché M., 1990 - Ecologie opérationnelle assistée par ordinateur, Masson.
- Boutot A., 1993 - L'invention des formes, Editions Odile Jacob.
- Caillé A., 1993 - Coup de sonde : un regard neuf sur les sciences sociales (J.P.Dupuy), Revue Esprit, Juin 1993.
- Cheruy A., 1988 - Méthodologie de la modélisation, Cahiers d'EDORA, Rapport de recherche INRIA N°866.
- Colin J.P., 1989 - Farm management versus Production economists, de l'intérêt d'un vieux débat américain, in Couty P., (1990). La pratique multidisciplinaire à l'Orstom, rapport multigr.Orstom.
- Couty P., 1990 - La pratique multidisciplinaire à l'Orstom, rapport multigr.Orstom.
- Delattre P., 1982 - Théorie des systèmes et épistémologie, Système, Structure, Fonction, Evolution, 2ème éd., Ed. Maloine, Paris.
- Delattre P., 1985 - Interdisciplinaires (Recherches), Encyclopedia Universalis, CORPUS, vol n°9, pp 1261-1268.
- De Rosnay J., 1975 - Le macroscope, vers une vision globale, Seuil.
- Diu B., C. Guthmann, D. Lederer et B.Roulet, 1989 - Physique statistique, Hermann.
- Durand D., 1990 - La systémique, Que sais-je?, PUF.
- 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 ,1-2).
- Ferber J., 1989 - Objets et agents : une étude des structures de représentation et communication en Intelligence Artificielle, These d'état, Paris 6.
- Friedberg C., 1992 - Représentations, classifications : comment l'homme pense ses rapports au milieu naturel. M. Jollivet (Ed.), Sciences de la nature, Sciences de la société, Les passeurs de frontières, CNRS.
- Godard O. et J.M. Legay, 1992 - Modélisation et simulation : une approche de la prédictivité, Sciences de la nature, sciences de la société, Les passeurs de frontière, CNRS.

- Hutchins E. et B. Hazlehurst, 1993 - How to invent a lexicon: the development of shared symbols in interaction, Actes du colloque *Simulating Societies 2* (à paraître).
- Jacob A., 1972 - *La logique du vivant*, Gallimard.
- Koestler A., 1968 - Le cheval dans la locomotive, Calmann-Levy, in Durand D. (1990), *La systémique, Que sais-je?*, PUF.
- Lacour C., 1986 - *L'arbre et la forêt : la science régionale vue par un économiste*, Espace, Jeux et enjeux, Fayard.
- Lardon S., J.P. Deffontaines, J. Baudry et M. Benoit, 1990 - L'espace est aussi ailleurs. Brossier J., Vissac B., Le Moigne J.L. (eds.) *Modélisation systémique et système agraire*, INRA.
- Le Fur J., 1993 - Praticabilité de l'approche système pour la modélisation d'un système d'exploitation halieutique. *Forum Halieumétrics*, Rennes, (à paraître).
- Legay J.-M., 1986.- Méthodes et modèles dans l'étude des systèmes complexes. *Les Cahiers de la Recherche Développement*, n°11.
- Le Moigne J.-L., 1990 - La modélisation des systèmes complexes, *Afcet systèmes*, Dunod.
- Morand P., F. Bousquet et C. Cambier, 1993 - Un modèle d'écologie des pêches. *Forum halieumétrics*, Rennes (à paraître).
- Morin E., 1980 - *La méthode, La nature de la nature*, Seuil.
- Mullon C., 1987 - Rhétorique de la modélisation, *Séminfor 2, La modélisation : aspects pratiques et méthodologie*. Editions de l'Orstom.
- Pavé A. et M. Rieu, 1993 - Ecosystèmes intertropicaux, fonctionnement et usages : questions, perspectives et conclusions. *Lettre du programme environnement N°10*, CNRS.
- Ploman E., 1986 - Introduction. *Sciences et pratiques de la complexité*, Actes du colloque de Montpellier, IDATE-UNU, La Documentation Française.
- Quensière J., 1993 - Halieutique et pêcheries artisanales, *Natures Sciences et Sociétés*, Vol 1, N°3, Dunod.
- Simon H.A., 1991 - *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel*, Dunod.
- Sperber D., 1992 - Les sciences cognitives, les sciences sociales et le matérialisme. D.Andler (ed.) *Introduction aux sciences cognitives*, Gallimard.
- Treuil J.P., 1993 - Emergence of representation of territory and kinship structures: a multi-agent approach. Actes du colloque *Simulating Societies 2* (à paraître).
- Verdeaux F., 1992 - Sociétés de pêcheurs et environnement, savoirs et appropriations halieutique du milieu, *Instituer et parler du développement Itinéraires*, Orstom.
- Von Bertalanffy, 1973 - *Théorie générale des systèmes*, Dunod.
- Welcomme R.L., R.A. Ryder and J.A. Sedell, 1989 - Dynamics of fish assemblages in river systems - a synthesis. pp. 567-577. In D.P.Dodge [ed.] *Proceedings of the international large river symposium*. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 106.