

THESE

présentée devant L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

pour l'obtention
du DIPLOME DE DOCTORAT
(arrêté du 30.3.92)

Spécialité: Modélisation

par :
François BOUSQUET

**DES MILIEUX, DES POISSONS, DES HOMMES :
ETUDE PAR SIMULATIONS MULTI-AGENTS.**

LE CAS DE LA PECHE DANS LE DELTA CENTRAL DU NIGER

soutenu le : 11 Mars 1994

Président	A. PAVE	Professeur Lyon 1
Rapporteur	J. FERBER	Professeur Paris 6
Rapporteur	C. MILLIER	Directeur scientifique ENGREF
Examineur	J.-M. LEGAY	Professeur Lyon 1
Examineur	F. RECHENMAN	Professeur Grenoble
Examineur	P. DE REFFYE	Directeur de recherches CIRAD
Examineur	M. GRIFFON	Directeur de recherches CIRAD
Examineur	C. MULLON	Directeur de recherches ORSTOM
Examineur	J. QUENSIERE	Directeur de recherches ORSTOM

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON I -

Président de l'Université
1er Vice-Président Fédération Santé
1er Vice-Président Fédération Sciences
Président du Comité de coordination
des Etudes Médicales
Secrétaire Général

M. le Professeur G. FONTAINE
M. le Professeur P. ZECH
M. le Professeur Y. LEMOIGNE
M. le Professeur P. ZECH
M. J. FLACHER

FEDERATION SANTE

- UFR de Médecine GRANGE-BLANCHE
- UFR de Médecine ALEXIS-CARREL
- UFR de Médecine LYON-NORD
- UFR de Médecine LYON-SUD
- Institut des Sciences Biologiques
et Pharmaceutiques
- UFR d'Odontologie
- INSTITUT DES TECHNIQUES DE READAPTATION
- Département de Biologie Humaine
- Département d'INNOVATION ET DE
COORDINATION PEDAGOGIQUE

Directeur : Mme le Pr PELLET
Directeur : M. le Pr. EVREUX
Directeur : M. le Pr. PATRICOT
Directeur : M. le Pr. DEJOUR
Directeur : M. le Pr VILLARD
Directeur : M. le Pr. MAGLOIRE
Directeur : M. le Pr. EYSSETTE
Directeur : M. le Pr. BRYON
Directeur : M. le Pr. LLORCA

FEDERATION SCIENCES

- Institut DES SCIENCES DE LA MATIERE
- Institut DES SCIENCES DE L'INGENIE-
RIE ET DU DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUES
- Institut de CHIMIE ET BIOLOGIE
- Institut d'ANALYSE DES SYSTEMES BIO-
LOGIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
- Institut DES SCIENCES DE LA TERRE DE
L'OCEAN, DE L'ATMOSPHERE, DE L'ESPACE
ET DE L'ENVIRONNEMENT
- UF des ACTIVITES PHYSIQUES ET
SPORTIVES
- I.U.T. A
- I.U.T. B
- Département de 1er Cycle pluridis-
ciplinaire Sciences
- Département de 2ème Cycle
 - Sciences de la Vie et de la Terre
 - Sciences pour l'Ingénieur
 - Sciences de l'Analyse et de la
Matière

Directeur : M. le Pr. ELBAZ
Directeur : M. le Pr. DIMNET
Directeur : Mme VARAGNAT, MDC
Directeur : M. le Pr. LEGAY
Directeur : M. le Pr. ELMI
Directeur : M. le Pr. CABYL
Directeur : M. le Pr. GIELLY
Directeur : M. le Pr. PIVOT
Directeur : M. PONCET, MDC
Directeur : M. le Pr. BLANCHET
Directeur : M. le Pr. BETHOUX
Directeur : M. le Pr. VIALLE

Remerciements.

Je remercie Alain Pavé, Professeur à l'Université Lyon 1, d'avoir accepté d'encadrer cette thèse et de m'avoir toujours encouragé dans mon travail.

Je remercie Jacques Ferber, Professeur à l'Université Paris 6, de m'avoir initié aux joies du multi-agents et d'avoir accepté d'être le rapporteur de ma thèse.

Je remercie Claude Millier, Directeur scientifique de l'ENGREF, de s'être intéressé à mon travail et d'avoir accepté d'être le rapporteur de ma thèse.

J'associe dans mes remerciements Christian Mullon, Directeur de recherches et responsable du Laboratoire d'Informatique Appliquée de l'ORSTOM, et Jacques Quensière, Directeur de recherches et responsable du grand programme Delta Central du Niger de l'ORSTOM, pour m'avoir donné l'occasion de faire cette recherche, pour avoir réussi à la fois à orienter mon travail et à me laisser une grande liberté.

Je remercie Jean Marie Legay, Professeur à l'Université de Lyon1, et François Rechenman, Professeur à l'Université de Grenoble, dont j'apprécie particulièrement les travaux en modélisation de s'être intéressés à mon travail et de faire partie du jury.

Je remercie Philippe De Reffye, Directeur scientifique du CIRAD-GERDAT et responsable de l'unité de modélisation AMAP, de participer à ce jury et je remercie Michel Griffon, responsable de l'Unité de Recherche en Prospective Agricole du CIRAD-GERDAT, d'apporter le point de vue d'un chercheur en sciences sociales.

Merci à Christophe Cambier et Pierre Morand pour ce qu'ils m'ont appris. Qu'ils reçoivent toute mon amitié.

Je remercie Pascal Renaud, responsable de la Mission Technique Informatique de l'ORSTOM de m'avoir offert les moyens de mener ma recherche pendant trois ans.

Que toutes les personnes que j'ai rencontrées pendant ces quatre ans, de Bamako à Bondy en passant par Mopti, Dakar, Montpellier ou Paris, soient remerciées pour les discussions et échanges qui m'ont permis de progresser.

Je remercie les membres de l'équipe Delta Central du Niger et du Laboratoire d'Informatique Appliquée de Bondy de m'avoir offert d'effectuer une recherche passionnante dans une ambiance chaleureuse et stimulante.

"Mais il coule à l'envers!"
Chaussée submersible de Sotuba,
Bamako, Octobre 1988.

A Carole qui avait vite compris que ce long fleuve ne
nous apporterait pas toujours une vie tranquille
et qui m'a toujours accompagné.

A Lorène et à Juliette

TABLE DES MATIERES

1 INTRODUCTION	1
2 MODÉLISATION ET SIMULATION	9
2.1 Les modèles de simulation	10
2.1.1 Le processus de modélisation.....	10
2.1.2 Classification des modèles.....	11
2.2 La modélisation de la relation homme-ressource	12
2.2.1 Modélisation à partir de la ressource, modélisation à partir de la société.....	12
2.2.2 Modélisation et pluridisciplinarité.....	13
2.3 La modélisation de la pêche	14
2.3.1 Modèles de base de dynamique des populations exploitées.....	15
2.3.2 Développements récents des modèles de dynamique des populations de poissons exploitées.....	16
2.3.3 Les modèles bio-économiques.....	18
2.4 Représentation de connaissances et simulations	20
2.4.1 Les simulations qualitatives.....	20
2.4.2 Les simulations à base de connaissances.....	22
2.5 Conclusion	24
3 REPRÉSENTER ET SIMULER LES INTERACTIONS POUR UNE INTÉGRATION PLURIDISCIPLINAIRE	26
3.1 L'environnement comme objet d'étude	26
3.1.1 Une recherche pluridisciplinaire.....	27

3.1.2 Un objet d'étude complexe.....	28
3.2. Choix d'une méthode ascendante.....	29
3.3. De l'élément à l'acteur.....	32
3.4 Représenter les acteurs et leurs interactions.....	32
3.4.1 L'individu dans la recherche DCN.....	33
3.4.2 Du comportement aux processus de prise de décision.....	35
3.5 Le décor et la pièce.....	37
3.6 Le sujet de la recherche.....	38
3.6.1 Transfert d'échelle et intégration des connaissances.....	38
3.6.2. Validations conceptuelles et utilisation.....	39
4 LES SYSTEMES MULTI-AGENTS.....	40
4.1 Définitions.....	41
4.1.1 Principes de modélisation.....	41
4.1.2 Structure d'un agent.....	41
4.2 Les modes de communication et le contrôle.....	42
4.2.1 Transmission de messages.....	43
4.2.2 Partage d'information.....	43
4.3 Les experts et les fourmis.....	45
4.4 Conclusion.....	46
5 UN GENERATEUR DE SIMULATIONS.....	48
5.1 Agents, objets, acteurs.....	49
5.2 Représentation objet.....	51
5.2.1 Objet, encapsulation.....	51
5.2.2 Classe, instanciation.....	52
5.2.3 Message, requête dynamique.....	52
5.2.4 Héritage.....	53

5.3 L'architecture Informatique: un blackboard objet pour la	
simulation.....	54
5.3.1 La base partagée.....	54
5.3.2 Les spécialistes.....	55
5.3.3 La structure de contrôle.....	55
5.3.4 Aperçu du fonctionnement.....	56
5.4 Conclusion.....	56
6 LE SIMULATEUR SIM-DELTA.....	58
6.1 L'univers artificiel (la base partagée).....	58
6.1.1 Les objets qui représentent le temps.....	60
6.1.2 Les objets qui représentent l'environnement climatique.....	60
6.1.3 Les objets qui représentent l'espace.....	62
6.1.4 Les agents qui représentent la ressource.....	65
6.1.4.1 <i>Modèles.....</i>	65
6.1.4.2 <i>Représentation des connaissances.....</i>	68
6.1.5 Les agents qui représentent les pêcheurs.....	72
6.1.5.1 <i>Analyse.....</i>	72
6.1.5.2 <i>Représentation des connaissances.....</i>	73
6.1.6 Agents et objets divers.....	78
6.2 Les lots de connaissance (les spécialistes).....	79
6.2.1 Hydrologie-écologie.....	79
6.2.2 Spécialistes sur le processus de prise de décision.....	81
6.2.2.1 <i>Spécialistes de la construction-perception.....</i>	81
6.2.2.2 <i>Spécialistes de la sélection.....</i>	82
6.2.2.3 <i>Spécialistes de l'action.....</i>	83
6.2.3 Spécialiste bilan.....	83
6.3 La structure de contrôle.....	83
6.4 Conclusion.....	84

7 DES SIMULATIONS SUR LA PECHE.....	86
7.1 Hypothèses communes à toutes les simulations.....	88
7.1.1 L'environnement naturel (climat et milieux).....	88
7.1.2 Les espèces de poissons.....	89
7.1.3 Dynamique hors pêche.....	90
7.2 Intensification d'un effort de pêche.....	95
7.2.1 Hypothèses biologiques et halieutiques.....	95
7.2.2 Configuration du simulateur.....	96
7.2.3. Résultats.....	97
7.2.4 Interprétation écologique.....	107
7.2.5 Cohérence avec le réel.....	110
7.3 Intensification de l'effort de pêche et variabilité de l'environnement.....	113
7.3.1 Hypothèses biologiques et halieutiques.....	113
7.3.2 Configuration du simulateur.....	117
7.3.3 Résultats.....	117
7.3.4 Interprétation écologique.....	121
7.3.5 Cohérence avec le réel.....	122
7.4 Intensification d'exploitation de pêche et fragmentation de l'espace.....	124
7.4.1 Hypothèses biologiques et halieutiques.....	124
7.4.2 Configuration du simulateur.....	125
7.4.3. Résultats.....	126
7.4.4 Interprétation écologique.....	126
7.4.5 Cohérence avec le réel.....	129
7.5 Augmentation du nombre de pêcheurs.....	13
7.5.1 Contexte.....	131
7.5.2 Hypothèses communes à toutes les simulations.....	133
7.5.3 Hypothèses sur les processus de décision et l'accès à l'espace.....	135

7.5.4 Résultats.....	137
7.5.4 Interprétation.....	144
7.5.5. Cohérence avec le réel.....	149
7.6 Conclusion.....	156

8 DISCUSSION SUR LA METHODE DE MODELISATION PAR DES SYSTEMES MULTI-AGENTS ET SON APPORT A L'ETUDE DE L'INTERACTION HOMME-RESSOURCE.....158

8.1 Représenter des connaissances pluridisciplinaires.....	159
8.1.1 La représentation des connaissances.....	159
8.1.1.1 <i>De la modélisation à la cognitive.....</i>	<i>159</i>
8.1.1.2 <i>Représentation des connaissances et problématiques scientifiques.....</i>	<i>160</i>
8.1.1.3 <i>Perceptions de la représentation des connaissances: écueils.....</i>	<i>161</i>
8.1.2. Méthodes de représentation des connaissances.....	162
8.1.2.1 <i>Définir les objets (réification).....</i>	<i>163</i>
8.1.2.2 <i>Définir les règles.....</i>	<i>165</i>
8.1.2.3 <i>Objet ou règle ?.....</i>	<i>166</i>
8.2 Organiser les connaissances pour simuler.....	168
8.2.1 Une structure de contrôle.....	168
8.2.2 Une méthode.....	169
8.3 Simuler pour relier différents niveaux de complexité.....	171
8.3.1 Construction d'un niveau micro.....	172
8.3.2. Observation du niveau macro.....	173
8.3.3 Discussion sur des niveaux intermédiaires.....	175
8.4 Valider et utiliser les résultats.....	176
8.4.1. L'artificiel et le réel.....	176
8.4.1.1. <i>Perception du réel et univers artificiels.....</i>	<i>176</i>

8.4.1.2. Comparer le réel et l'artificiel.....	177
8.4.2. Utilisation.....	179
8.4.2.1 Le simulateur comme outil de construction théorique....	179
8.4.2.2 Le simulateur comme outil de décision.....	180
8.4.2.3 La formation.....	182
8.5 Une modélisation multi-agents de la dynamique et de l'usage des ressources renouvelables.....	182
8.5.1 Création d'un univers artificiel.....	183
8.5.1.1. Un espace.....	183
8.5.1.2 Des agents.....	184
8.5.2 Représentation des processus d'interaction.....	184
8.5.2.1 La représentation du monde.....	185
8.5.2.2 Perception d'information.....	186
8.5.2.3 Sélection.....	188
8.5.2.4 Action.....	189
8.6 Conclusion.....	189
9 CONCLUSION GÉNÉRALE.....	192

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TABLE DES FIGURES

1 INTRODUCTION

"Les eaux des rivières et des fleuves, qui avaient commencé à sortir timidement de leurs lits, étaient vite revenues s'y réfugier (...). En l'absence des pluies attendues, les rizières, les prairies, les champs de haute brousse virent leurs jeunes pousses griller (...). Même les poissons furent touchés. Faute d'un niveau d'eau suffisant, les femelles ne purent franchir les rives des cours d'eau pour aller, comme elles le faisaient chaque année, émigrer dans les plaines inondées où se trouvaient leurs lieux naturels de ponte. Affolées, elles pondirent au hasard dans le lit des rivières, demeure de leurs époux. Leurs oeufs, privés de protection, furent entraînés par le courant. La production saisonnière baissa de cinquante pour cent.

Pour se nourrir, les cultivateurs puisèrent dans leurs réserves, puis dans leurs semences. Bientôt, il n'y eu plus rien. L'hivernage calamiteux de l'été 1913 fut ainsi le générateur d'une famine effroyable qui, en 1914, devait causer la mort de près d'un tiers des populations dans les pays de la Boucle du Niger" (Hampaté Bâ, 1991).

Préoccupées par des problèmes d'équilibre entre l'homme et le milieu naturel, les sociétés poussent aujourd'hui leurs scientifiques à étudier les problèmes d'environnement. Parmi ces problèmes, celui des relations entre l'homme et les ressources naturelles renouvelables qu'il exploite se pose avec une acuité particulière. Conscients des limites des recherches monodisciplinaires, les chercheurs en sciences sociales et en sciences de la nature se rassemblent en équipes pluridisciplinaires. Tel est le cas de l'équipe de recherche sur le Delta Central du Niger (Mali) qui cherche à mieux comprendre les raisons de la situation de crise actuellement évoquée à la fois par les pêcheurs et les responsables politiques. Pour comprendre et décrire les interactions entre les sociétés de pêcheurs et la ressource ichtyologique, il importe donc de synthétiser diverses connaissances disciplinaires.

La modélisation et la simulation sont en général utilisées pour manipuler les connaissances afin de mieux comprendre, de mieux communiquer ou de mieux prévoir le fonctionnement du système étudié. Notre recherche consiste à développer, utiliser et discuter des outils et des méthodes de modélisation et de simulation adaptées au contexte de l'équipe Delta Central du

Niger (DCN), et plus généralement au contexte des recherches sur les relations homme-ressources naturelles renouvelables;

UN PEU DE GÉOGRAPHIE.

Prenant leur source sur les flancs orientaux du Fouta-Djalon en Guinée, les eaux du Niger s'écoulent tout d'abord vers le nord-est, bifurquent devant les portes de Tombouctou, forment une large boucle et redescendent vers l'embouchure au Nigeria. Environ 400 kilomètres en amont de la cité des sables, le fleuve, rejoint par son affluent le Bani, atteint une vaste plaine inondable de plusieurs milliers de kilomètres carrés de surface. Les eaux se séparent alors en de nombreux bras, serpentent dans la plaine, empruntent des chenaux et des marigots, se rassemblent dans des lacs, se séparent à nouveau, se perdent entre des dunes sableuses formant ainsi un véritable delta: le delta central du Niger (figure 1.1).

Le paysage de cette région se transforme au rythme des saisons. Au moment de la crue des fleuves Niger et Bani, les eaux envahissent les portions de plaine dont elles se retirent à la décrue pour laisser des mares, des bras isolés qui s'assèchent progressivement jusqu'à la crue suivante. Cette véritable respiration hydrologique annuelle confère à la région une très grande production ichtyologique. Parmi la centaine d'espèces de poissons recensées, la plupart migre dans les plaines inondées à la crue. Les poissons y trouvent une grande richesse alimentaire et des zones refuges pour les larves et alevins.

Terre de l'eau et terre de l'herbe (Gallais, 1984), le delta est peuplé de cultivateurs, d'éleveurs et de pêcheurs. Environ 200.000 personnes (Morand, 1988), appartenant essentiellement aux groupes ethniques bozos et somonos, font partie de ménages qui consacrent tout ou partie de leur activité à la pêche. L'exploitation de la ressource ichtyologique représente un apport alimentaire et un revenu crucial pour le pays. Naguère appréciée et distribuée du Sénégal au Ghana, la production halieutique s'est sensiblement réduite lors des 20 dernières années, chutant de près de 100.000 tonnes à moins de 50.000 tonnes de poissons commercialisés. C'est une des raisons qui explique la décision de

l'ORSTOM et l'IER (Institut d'Economie Rurale) de lancer en 1986, le programme "Delta Central du Niger".

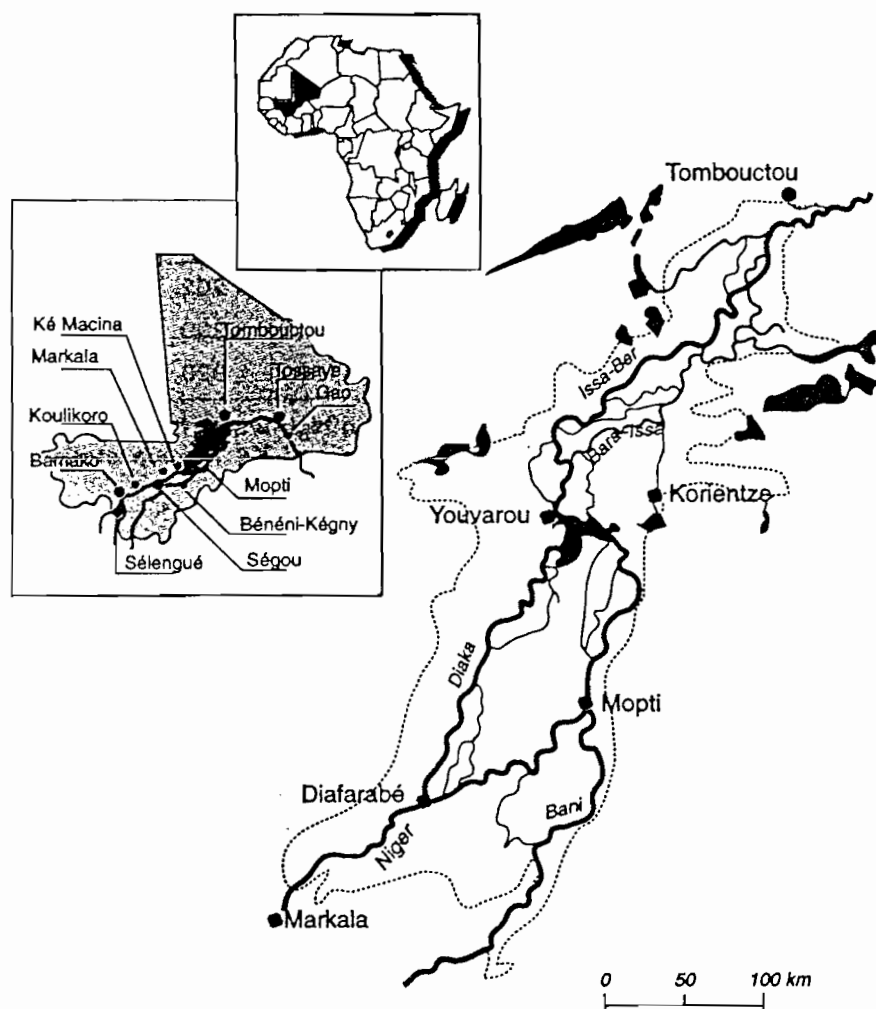


Figure 1.1: Le delta central du Niger

EVOLUTION DE LA SCIENCE HALIEUTIQUE.

Le dispositif de recherche mis en place par ces deux organismes reflète l'évolution de la pensée sur la recherche halieutique, et plus largement la pensée sur les usages des ressources naturelles renouvelables (Weber et al., 1990).

De nombreux modèles de gestion des pêches qui faisaient figure de paradigmes, sinon de dogmes (Larkin, 1977), ont été remis en cause au cours des années 80. A la suite des travaux théoriques menés dans les années 70 par des chercheurs comme Atlan (1979), Jacob (1970), Morin (1977), Koestler (1968), les recherches appliquées sur les ressources et leurs usages ont progressivement pris en compte la complexité de leur objet d'étude. L'halieutique, science de la pêche, est touchée par ces bouleversements (Fontana, 1989; Charles-Dominique, 1991; Quensière, 1991). Ainsi, les chercheurs délaissent l'hégémonique concept d'équilibre pour s'intéresser à la variabilité, l'instabilité, le changement (Allen et McGlade, 1986; Cury et Roy, 1989). Comme dans le domaine de l'agronomie (Brossier et al., 1990), on se tourne vers une approche systémique pour mieux aborder la complexité. Cela se traduit principalement par la prise en compte de facteurs économiques et sociaux et par l'affirmation de la nécessaire pluridisciplinarité pour offrir une plus complète compréhension de l'organisation dynamique de la pêche.

LA RECHERCHE SUR LE DELTA CENTRAL DU NIGER.

C'est dans ce contexte que l'équipe de recherche ORSTOM-IER voit le jour en 1986. Pluridisciplinaire dès son origine, la recherche de cette équipe fut à la fois le produit de la réflexion théorique sur la pêche et sa concrétisation expérimentale.

Une vingtaine de chercheurs représentant les domaines de la démographie, l'anthropologie, la géographie, l'économie, la biologie des pêches, la biologie, l'écologie, la biométrie, l'informatique ont travaillé dans cette équipe. Pour mener à bien ce projet de recherche dans les six ans impartis, les recherches furent séparées en trois grandes phases. Les connaissances sur l'objet d'étude étant peu nombreuses - entre autres Blanc et al. (1955), Daget (1949), Gallais (1984)- et trop locales, les deux premières années furent consacrées à l'acquisition de données multidisciplinaires grâce à des enquêtes communes et au traitement des données pour établir une description homogène de la pêche dans le Delta (Quensière, 1988). Sur cette base, lors de la deuxième phase de deux ans les chercheurs ont approfondi leurs problématiques selon des méthodes propres à chaque discipline. La dernière phase

correspond à une synthèse des connaissances dans le but d'offrir une image homogène de la pêche dans le DCN. Ce travail fait l'objet d'un livre de synthèse, réponse au contrat passé entre les chercheurs et l'administration malienne.

LA MODELISATION ET LA SIMULATION: OUTILS DE SYNTHÈSE?

Au long des deux premières phases l'adoption d'une démarche systémique par l'équipe DCN a permis d'organiser la recherche, d'orienter les discussions et les analyses et de préparer les conditions les plus favorables pour la phase de synthèse. Mais si la systémique conduit conceptuellement la recherche, elle n'apporte pas de méthodologie "clé en mains" pour la phase de synthèse ou recomposition des connaissances (Le Fur, 1993). La principale méthode fut bien sûr basée sur les discussions, les synthèses partielles, les réunions thématiques puis globales, etc.... La géographie, ou plus exactement la cartographie, fut un outil précieux. Le chapitre de conclusion du livre qui vise à donner un point de vue totalisant procède par les deux méthodes que Godard (1992) tient pour concurrentes dans l'exercice de la synthèse: la systémique et l'histoire.

Notre recherche sur la modélisation est intervenue au moment où l'équipe s'interroge 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 n'est pas très originale. De nombreux programmes pluridisciplinaires qui ont mené des recherches sur la relation entre l'homme et son environnement ont développé des modèles, dans le but d'intégrer les diverses connaissances. Des conclusions plutôt négatives ont été tirées sur l'espoir de modèles qui intègrent toute la connaissance: *"L'un des idéaux qui animent le projet interdisciplinaire face à une réalité complexe réside dans la construction d'un modèle global qui parviendrait à intégrer les contributions de chaque discipline associée, naturelle ou sociale, afin de restituer, dans son unité l'architecture et le*

comportement de l'objet à connaître. (...) Il n'est pas d'exemple abouti d'un tel modèle interdisciplinaire qui garde donc son statut d'idéal de référence, d'horizon de la modélisation" (Godard et Legay, 1992). L'ambition de notre thèse n'est pas d'invalider ce constat. L'objectif d'un projet de modélisation est soit d'établir un modèle général, ce qui est généralement le cas lorsque l'objet d'étude est très bien connu, soit de mieux comprendre l'objet d'étude. Nous nous plaçons dans ce deuxième cas: la modélisation permet d'accompagner la recherche, de poser des hypothèses sur l'objet d'étude et d'en explorer les conséquences.

Lorsque notre projet de recherche a débuté nous faisons face à un vaste espace de recherches possibles au sein duquel de nombreux parcours étaient envisageables. Nous posons trois questions pour préciser les problèmes que nous voulons aborder:

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

L'hydrosystème est composé par de très nombreux milieux dont les connexions évoluent au cours du cycle hydrologique annuel. On compte plus d'une centaine d'espèces de poissons aux comportements et aux interactions mal définies. On évalue à 30000 le nombre de ménages qui développent une activité de pêche. Des facteurs écologiques, sociaux et économiques se combinent pour produire une grande diversité des formes d'exploitation halieutique. Par ailleurs, sont impliqués dans cette étude des chercheurs de disciplines différentes qui apportent autant de points de vue sur la réalité complexe. Pour provoquer une communication entre chercheurs il faut représenter les modèles de chacun. Ce n'est pas le delta que nous devons représenter mais le delta vu par différents chercheurs, différents modèles.

- Quels peuvent être les apports méthodologiques des modélisations Informatiques proposées par le domaine de l'Intelligence Artificielle pour répondre à ces questions?

Si certains chercheurs développent et utilisent des modèles propres à leurs disciplines, d'autres chercheurs sont réticents à la démarche de modélisation car ils définissent leur

corpus de connaissance comme qualitatif. Par ailleurs, il est des connaissances qui ne sont pas exprimées, mais dont l'existence se révèle indispensable pour la simulation: elles sont qualifiées de connaissances "de bon sens". Pour chercher des méthodes de représentation des connaissances ouvertes à de nombreuses formes de connaissances, nous nous sommes tournés vers le domaine de l'Intelligence Artificielle. L'un des buts est d'évaluer l'adéquation des concepts et outils de cette discipline au problème de représentation de connaissances pluridisciplinaires.

- Quelles indications les simulations peuvent-elles apporter sur le fonctionnement du delta central du Niger, et plus généralement, comment peuvent être utilisés les simulations dans le domaine des interactions homme-ressource?

Nous ne désirons pas fournir un modèle synthèse de toute la connaissance disponible dans le but de prévoir l'avenir du delta et de le gérer. Cependant, l'objectif est bien de parvenir à des résultats qui donnent des indications sur des scénarios d'aménagements ou bien définissent des sujets d'expérimentation pour mieux comprendre la dynamique globale.

PLAN DU TRAVAIL.

Dans la première partie nous précisons notre réflexion sur la représentation des connaissances et faisons des choix méthodologiques. Nous rappelons brièvement quelques généralités sur la modélisation, sur la modélisation des relations homme-ressource naturelle, puis sur les modèles utilisés en halieutique; nous faisons état des avancées récentes dans les recherches à l'intersection des domaines de l'Intelligence Artificielle et de la simulation (chap2). Nous présentons ensuite nos principes méthodologiques pour aborder la complexité et la pluridisciplinarité (chap3). Nous présentons enfin la méthode de modélisation que nous avons choisie: les systèmes multi-agents (chap4).

La deuxième partie correspond à la partie modélisation. Nous présentons le générateur de simulations que nous avons élaboré (chap5). Nous décrivons la représentation des connaissances sur la pêche artisanale (chap6).

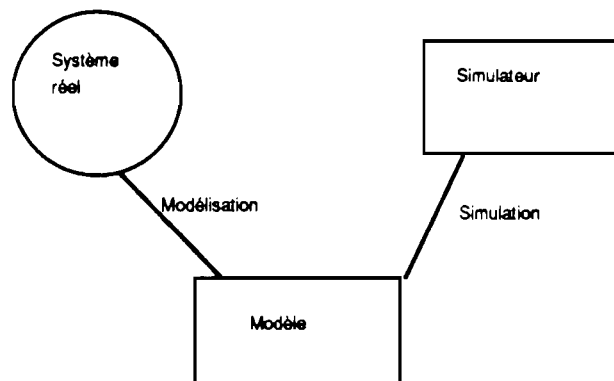
La troisième partie correspond aux expériences que nous avons effectuées (chap7). Nous avons simulé un écosystème soumis à une augmentation d'un effort de pêche, puis étudié les effets de la variabilité climatique, de la fragmentation de l'espace. Sur cet écosystème simulé, nous avons ensuite représenté des pêcheurs capables de prendre des décisions. Nous avons comparé trois processus de prise de décision différents. La cohérence des résultats avec les observations faites sur le delta est discutée après chaque expérience.

La quatrième partie correspond à la discussion, à un bilan de ce que nous avons retiré de ce travail. Nous présentons tout d'abord une discussion sur les phases de représentation des connaissances et de contrôle de la simulation. Nous proposons ensuite une architecture de modélisation et simulation de l'interaction homme-ressource. Enfin nous discutons successivement le problème du transfert d'échelle, de la validation des simulations et de leur utilisation (chap 8).

2 MODÉLISATION ET SIMULATION.

Quelle est la différence entre la simulation et la modélisation? Pour certains auteurs, la simulation est considérée comme un moyen d'utiliser des modèles, les modèles simulateurs (Gremy, 1990) ou modèles de simulation (Guinand, 1990) que l'on oppose à des modèles physiques ou matériels tels les maquettes ou les cartes. Zeigler (1976) présente un schéma qui résume cette position (Fig 2.1). Pour d'autres, la simulation peut être perçue comme la construction d'un modèle de la réalité pour conduire des expériences (Gremy, 1990; Shannon, 1992); la simulation intègre donc la modélisation. Pour tous ces auteurs la simulation est un processus de modélisation dynamique pour explorer des domaines mal connus, en particulier ceux pour lesquels il n'existe pas d'autre possibilité: impossibilité technique, financière, déontologique, etc...(Rothenberg, 1989).

Dans ce chapitre nous présentons brièvement des généralités sur les modèles de simulation. Nous donnons un aperçu de quelques travaux sur la modélisation de l'interaction homme-ressource, avec comme cas particulier le domaine de l'halieutique. Enfin, nous examinons ensuite quelques méthodes de simulation qui semblent convenir à notre problème de modélisation de connaissances multiples.



Figures 2.1: Modélisation et simulation (d'après Zeigler, 1976)

2.1 LES MODÈLES DE SIMULATION.

2.1.1 Le processus de modélisation.

Pour tous les auteurs, un modèle est une représentation de la réalité que l'on élabore :

- en référence à quelque chose: le modèle reproduit les propriétés de cet objet,
- avec un objectif qui est en général de mieux comprendre et décrire la réalité ou bien de prévoir le futur.

On remarque que suivant cette définition l'activité scientifique est une activité de modélisation. Dans le sens plus restreint de la simulation, la modélisation consiste à implémenter un modèle dans un ordinateur en utilisant des méthodes mathématiques et informatiques. Les auteurs qui ont étudié le processus de modélisation proposent des méthodologies de modélisation (Cheruy, 1988; Grant, 1986; Shannon, 1992; Zeigler, 1976; Widman et Loparo, 1989) qui comprennent les mêmes étapes. Schématiquement ces étapes sont:

Définition de l'objectif de modélisation. L'élaboration du modèle dépend de l'objectif fixé (explication, enseignement, prédiction, test d'hypothèses, ...).

Définition du système et formulation du modèle conceptuel. Lors de cette phase il s'agit de délimiter le système, d'en identifier ses composantes et leurs relations, de répertorier les connaissances. C'est un processus d'abstraction du réel discuté, entre autres, par Fishwick (1989a). A l'issue de cette phase on formule un modèle conceptuel ou schéma fonctionnel constitué le plus souvent de boîtes et de flèches.

Formulation du modèle mathématique ou Informatique. C'est la phase de traduction du modèle conceptuel dans un langage mathématique ou informatique. Il s'agit de faire des choix entre modèles déterministes ou stochastiques, linéaires ou non linéaires, continus ou discrets, des choix de langages informatiques.

Validation. La validation consiste à comparer le comportement simulé au comportement réel, à étudier la sensibilité du modèle aux paramètres. Sargent (1992), décrit plusieurs

procédures de vérification et validation (animation graphique, comparaison à d'autres modèles, etc ...).

Application du modèle. Le modèle est appliqué en fonction des objectifs prédéfinis. Pour cela, on définit des protocoles expérimentaux (Nelson, 1992). Goldsman (1992) décrit les méthodes d'analyse statistique des résultats de simulation.

2.1.2 Classification des modèles.

Même en restreignant le sens de la modélisation à l'écriture d'un modèle, l'univers des modèles reste très vaste. Pour réduire ce très large horizon, plusieurs auteurs ont éprouvé le besoin de classifier les différents types de modèles selon les principes et les méthodologies. C'est ainsi qu'on oppose (Rothenberg, 1989; Grant, 1986):

- les modèles statiques comme les modèles de régression et les modèles dynamiques qui représentent les changements de structure au cours du temps,
- les modèles prédictifs ou empiriques qui résument un ensemble de relations et les modèles explicatifs ou descriptifs qui s'attachent à comprendre ces relations,
- les modèles déterministes et les modèles stochastiques qui font intervenir le hasard à travers le tirage aléatoire de certaines valeurs de paramètres,
- les modèles qui peuvent être résolus analytiquement et les modèles qui nécessitent des simulations.

Il existe d'autres critères de classification. Dans une revue bibliographique sur la modélisation Rothenberg (1989) remarque que la plupart des auteurs suggèrent de classifier les modèles en fonction de leur domaine d'application. Shannon (1992) donne une liste de quelques domaines d'applications (informatique, industrie, gestion d'entreprise, sécurité publique, transports, écologie et environnement, société et comportement, biologie), avant de remarquer qu'il est difficile de trouver un domaine qui n'ait pas vu se développer des simulations.

2.2 LA MODÉLISATION DE LA RELATION HOMME-RESSOURCE.

La simulation de l'interaction homme-ressource est un domaine très vaste. Meyer (1979; 1983; Meyer et al. 1979) donne une revue des méthodes mathématiques et informatiques pour la simulation de l'environnement (programmation linéaire, non linéaire, théorie des jeux, langages de simulations, etc...). Coulson et al. (1987) présentent les potentialités de l'Intelligence Artificielle (voir § 2.4) et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour la gestion des ressources naturelles. Selon certains auteurs (Granger, 1990; Green et al., 1990; Norton et Williams, 1990) la combinaison des outils de représentation spatiale comme les SIG et des outils de simulation doit permettre une étude performante du paysage qui est un indicateur de l'interaction entre l'homme et son environnement. En pratique les chercheurs abordent la modélisation de la relation homme-ressource soit avec la modélisation de la dynamique de la ressource, soit avec la modélisation du système d'exploitation de la ressource. Ensuite ces modèles sont enrichis. Nous examinons ces deux éventualités, puis nous résumons l'état de la discussion sur l'intérêt de la modélisation pour la recherche pluridisciplinaire sur l'environnement.

2.2.1 Modélisation à partir de la ressource, modélisation à partir de la société.

Lorsque les auteurs modélisent la dynamique de la ressource, l'activité anthropique est considérée comme une perturbation dont on cherche à évaluer l'impact. Les modèles développés sont alors des modèles écologiques, hydrologiques, pédologiques, etc... Par exemple, les modèles hydrologiques dédiés à la gestion de l'eau (irrigation, protection contre les inondations, hydroélectricité, gestion des nappes phréatiques) peuvent aussi servir à l'évaluation de l'impact de pollutions d'origine anthropique (PIREN-Seine, 1992).

En écologie, on utilise en général des modèles de dynamique des populations. Il s'agit d'étudier les réactions de la ressource à une perturbation anthropique pour assurer sa conservation (Pimm et Gilpin, 1989) et pour aider à mieux gérer l'effort anthropique (Clarke,

1989). On trouve dans Frontier (1991) une description de ces modèles et de leurs limitations (non prise en compte de l'espace-temps, du caractère local des interactions, etc...). Pour remédier à ces problèmes, et grâce aux progrès méthodologiques et matériels, les chercheurs tentent d'améliorer les modèles: d'une part les chercheurs essaient d'élaborer des modèles qui intègrent la dimension spatiale (par exemple Possingham et al. 1990, Mackey et Bayes, 1990), d'autre part, de nouvelles techniques informatiques facilitent l'élaboration de modèles "basés sur l'individu" (Huston, 1989). Ces modèles permettent de rendre compte de la dynamique de populations en considérant des interactions entre les comportements des organismes individuels.

Dans le cas de la modélisation à partir de la société, la dynamique de la ressource et sa variabilité sont données comme des contraintes (Sabatier et al., 1991; Chéneau-Loquay et Matassaro, 1991; Galang et Bhuiyam, 1992, Duru et al., 1992, Monnypenny, 1992; Attonaty et al., 1992). Souvent utilisés pour l'étude de systèmes agraires, ces modèles font généralement appel à des techniques d'optimisation sous contraintes comme la programmation linéaire. La variabilité peut être traduite sous forme de risque: la modélisation a pour objectif d'analyser les attitudes face au risque ou à l'incertain. D'autres domaines faisant partie des sciences humaines, comme l'archéologie, font appel à des simulations. On trouve dans Mithen (1992) une revue des simulations archéologiques consacrées aux sociétés de chasseurs-cueilleurs.

Très récemment sont apparues des modélisations qui ont pour but d'étudier la genèse et le partage de schémas cognitifs. Ainsi, Hutchins et Hazelhurst (1993) et Treuil (1993) étudient la formation d'une perception commune à partir de représentations individuelles de l'environnement technique ou spatial. La modélisation ne s'applique plus seulement à l'action, elle permet d'étudier le processus de perception.

2.2.2 Modélisation et pluridisciplinarité.

Si beaucoup de disciplines ont développé, voire codifié, un art pratique de la modélisation, l'art de la modélisation interdisciplinaire en est encore à ses débuts (Godard et Legay, 1992).

Godard (1992) propose de comprendre les pratiques interdisciplinaires à partir de six figures stratégiques idéales. L'une d'entre elles nous intéresse particulièrement: il s'agit de *"la visée de l'intégration par le recours à un métalangage théorique unifié comme celui de la théorie des systèmes"*. La modélisation de systèmes (Le Moigne, 1984, 1989) est souvent considérée comme un outil essentiel de la recherche interdisciplinaire allant de pair avec la synthèse globale et finale des connaissances.

Quelques auteurs, à la lumière de leur propre expérience (Uvietta, 1989; Chaib et al., 1990) ou à l'issue d'une synthèse plus générale des programmes pluridisciplinaires français sur l'environnement (Godard et Legay, 1992) soulignent la grande difficulté, ou même l'impossibilité de l'existence d'un *"grand modèle global intégrateur"* représentant toutes les connaissances. Ces derniers auteurs montrent en particulier que les réalisations les plus achevées constituent en fait des modèles disciplinaires, faiblement enrichis par quelques variables provenant de disciplines autres. L'ensemble des auteurs (Uvietta, 1989; Jary et al., 1990; Godard et Legay, 1992) considèrent cependant que la démarche de modélisation, en particulier la phase de création du modèle conceptuel, ou la phase de décomposition du système est très enrichissante pour la communication entre disciplines. La modélisation accompagne la recherche: c'est une démarche de communication, d'aide à la compréhension. C'est aussi un moyen de poser des questions et donc de définir des expériences. Le modèle général reste toujours un horizon, de la même façon que la synthèse globale achevée est pour Barrué-Pastor (1992) un mythe.

2.3 LA MODÉLISATION DE LA PECHE.

L'apparition des modèles de la pêche date du début du siècle (Baranov, 1918). Depuis, de nombreux modèles ont été développés et sont devenus l'outil essentiel de gestion des pêches. En conséquence ceux-ci font l'objet d'une littérature très fournie. En 1981, Laurec et Le Guen présentent un ouvrage synthétique qui fait référence dans la communauté halieutique française: *"Dynamique des populations marines exploitées"*. L'approche ressource est donc explicite: la pêche est perçue comme un prélèvement. Par ailleurs les chercheurs ont

développé des modèles pour prendre en compte des facteurs économiques et sociaux. Nous décrivons les modèles de base de dynamique des populations exploitées ainsi que ces développements récents.

2.3.1 Modèles de base de dynamique des populations exploitées.

Les modèles de dynamique des populations exploitées sont divisés en deux classes: on oppose les modèles globaux aux modèles analytiques.

Modèles globaux (pour une description détaillée voir Laurec et Le Guen (1981) ou Laloë et Samba (1989)). Le but des modèles globaux est de reproduire les réactions d'un stock de poissons à une pression de pêche, sans en expliquer les mécanismes. Le premier modèle est celui de Graham-Schaefer (1935). Il exprime les variations de la biomasse exploitée suivant l'équation:

$$dB/dt = H B_t (B_t - B_v) - q f B_t$$

production capture

B_t : biomasse exploitée,

H : paramètre négatif,

B_v : biomasse à l'équilibre (en l'absence de pêche) aussi appelée biomasse vierge,

q : capturabilité (qB : capture par unité d'effort, CPUE),

f : intensité de la pêche (effort de pêche).

Ce modèle permet de représenter les captures et captures par unité d'effort (fig 2.2). Le point qui correspond au maximum sur la courbe de captures est appelé Maximum Sustainable Yield (MSY), en français Rendement Maximum Equilibré. Ce modèle est calé sur les données de pêches recueillies sur le terrain en ajustant les paramètres. Il est ensuite possible de définir f correspondant au MSY et de donner cette information aux décideurs de politiques des pêches. Le stock de poissons peut être plus fragile ou plus robuste que prévu par le modèle de Graham-Schaefer. Pour cette raison, Pella et Tomlinson (1969) généralisent le modèle:

$$dB/dt = H B_t (B_t^{m-1} - B_v^{m-1}) - q f B_t.$$

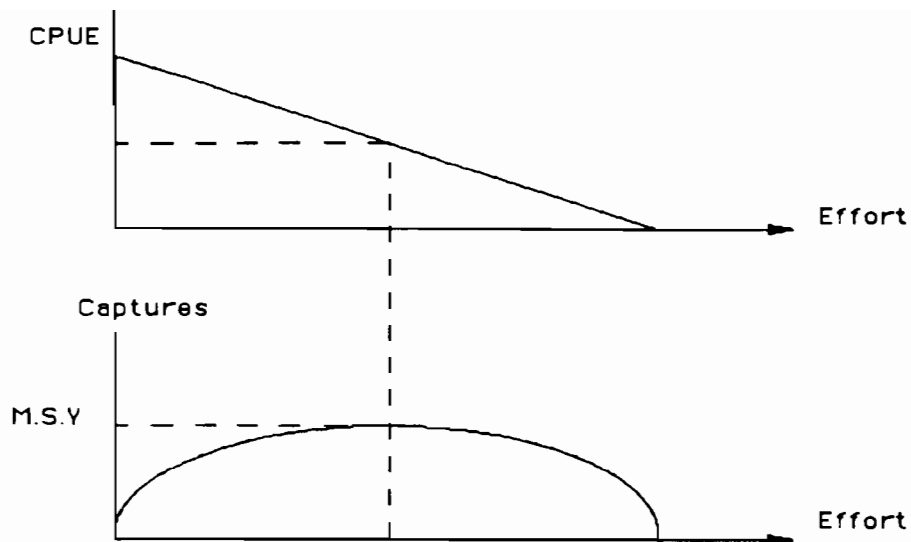


Figure 2.2: Evolution des captures et des captures par unité d'effort en fonction de l'effort (d'après Laurec et Le Guen, 1981)

Modèles analytiques (on se reportera entre autres à Laurec et Le Guen (1981) et Mesnil (1989)). Les modèles analytiques cherchent à prédire les captures en prenant en compte plus précisément les mécanismes biologiques du système: Ils comportent des sous modèles de croissance et de mortalité. Les modèles les plus connus sont les modèles de Beverton et Holt (1957) ainsi que le modèle de Ricker (1945). Ils s'appliquent exclusivement aux poissons qui entrent dans une pêcherie (on dit qu'ils sont recrutés). Dans l'histoire des modèles halieutiques, le développement ultérieur fut de prendre en compte la phase de prérecrutement pour une intégration complète du cycle vital des poissons (modèles autorégénérants).

2.3.2 Développements récents des modèles de dynamique des populations de poissons exploitées

Les modèles, tant globaux qu'analytiques ont été critiqués, en raison:

- des hypothèses de base qui supposent des situations d'équilibre des stocks (recrutements et diagrammes de mortalité) (Larkin, 1977; Allen et McGlade, 1986; May et al. 1979; Beddington et May, 1977),
- de la trop grande simplicité des modèles, mono-spécifiques et mono-engins (Kerr et Ryder, 1989).
- de la non prise en compte de facteurs économiques et sociaux (Larkin, 1977; Hilborn, 1985; Hilborn et Walters, 1987).

En réponse à ces critiques, au cours des années 80, les chercheurs ont fait évoluer les modèles. C'est ainsi que les modèles globaux sont utilisés pour présenter des simulations dynamiques (Lleonart et Salat, 1983; Yoshimoto et Clarke, 1993). Laloë et Samba (1989) présentent les nombreuses modifications auxquelles le modèle global peut être soumis. Ont été intégrés des modèles de croissance, des relations stock-recrutement, des variables environnementales. Les modèles globaux peuvent aussi être appliqués à des pêcheries multi-spécifiques et multi-engins.

De la même façon les modèles analytiques ont été enrichis pour étudier des pêcheries multi-spécifiques et multi-engins (Mesnil, 1992). En 1987, un rapport CEE (CEE, 1987) fait la revue des modèles analytiques. Ils sont séparés en modèles de long terme, basés sur l'hypothèse d'équilibre, et les modèles de court terme pour les situations dites de transition. Dans la littérature les modèles que l'on rencontre sont développés et utilisés pour des objectifs variés. Il s'agit le plus souvent d'estimer et de comparer différents modèles, soit en ajoutant des variables, soit en affinant des mécanismes, soit encore en analysant l'influence de la variabilité biologique, environnementale ou du prélèvement soit enfin en étudiant une hétérogénéité de l'effort dans l'espace (Fréon, 1989; Laloë, 1991; Jensen, 1991; Badjik et Schneider, 1991; Parma et Deriso, 1990; Die et Watson, 1992).

Dans le cas particulier des poissons d'eau douce d'Afrique de l'Ouest, le modèle le plus connu est un modèle mono-spécifique et pluri-engins qui étudie les relations entre la production halieutique et le régime hydrologique (Welcomme et Hagborg, 1977).

2.3.3 Les modèles bio-économiques.

La gestion d'une pêcherie fait intervenir des considérations d'ordre social et économique. Les modèles bio-économiques ont été développés pour prendre en compte ces facteurs dans la gestion des pêcheries. On se contente ici d'évoquer les principes de base; des présentations et des évaluations argumentées sont proposées par Gilly (1989), Réveret (1991), Gates (1989).

Le modèle économique de base, attribué à Gordon (1954), est associé à un modèle bio-écologique du type de celui de Graham-Schaefer. La figure 2.3 présente le modèle bio-économique résultant. La différence entre la courbe des revenus et celle des coûts constitue le surplus. Il est maximum pour la valeur d'effort E . Au delà de cette valeur, il y a surinvestissement, puis surexploitation lorsque la courbe des revenus décroît. Le niveau d'effort E pour lequel le surplus est maximum correspond au Maximum Economic Yield (MEY), en français (Rendement Economique Maximum). Il est situé avant le maximum biologique. Il s'agit d'un optimum purement économique qui n'intègre pas de considérations sociales ou politiques.

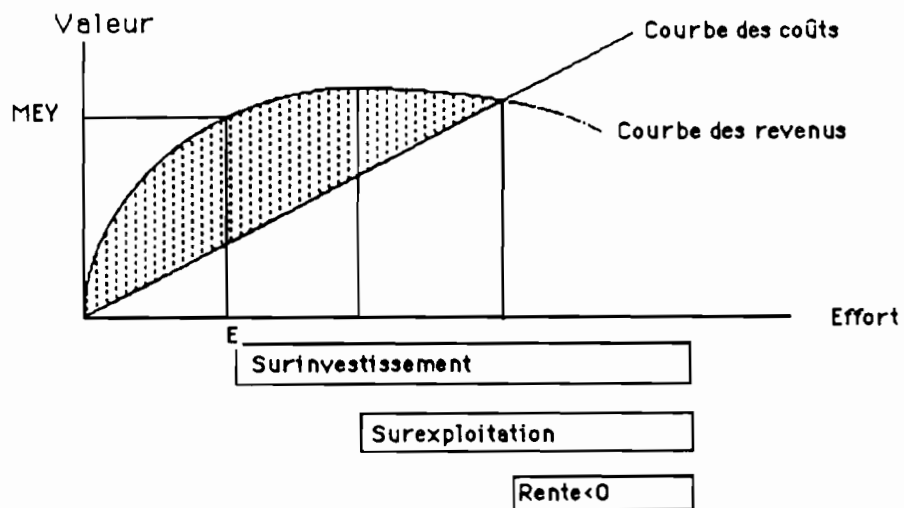


Figure 2.3: Représentation schématique de la dissipation du surplus

D'après les auteurs cités plus haut, les modèles développés par la suite diffèrent principalement par leur approche statique ou dynamique (les surplus sont pondérés différemment suivant les périodes) et par le choix de techniques d'optimisation ou de simulations. Bâti à partir des modèles bio-écologiques, le modèle bio-économique hérite de leurs hypothèses et de leurs limitations. S'y ajoutent des critiques propres comme par exemple l'hypothèse d'homogénéité des motivations et des comportements (Gilly, 1989), l'hypothèse d'information parfaite (Allen et McGlade, 1986). En allant plus loin (Réveret 1989) la discussion porte sur la théorie néo-classique de l'économie qui soutient cette modélisation.

Les modèles bio-économiques, plus récents que les modèles bio-écologiques, semblent encore à la recherche d'une place dans la gestion des pêcheries. Ainsi, on trouve des articles pour soutenir la démarche (Hilborn, 1985), et un grand foisonnement de propositions différentes. Les objectifs poursuivis sont variés: optimisation bio-socio-économique (Charles, 1989), répartition de l'effort dans l'espace (Hilborn et Walters, 1987; Allen et McGlade, 1986), sensibilité des modèles aux paramètres (Hilden et Kaitala, 1991), prise en compte d'attitudes face au risque (Kope, 1992), influence des politiques de partage de la ressource (Grafton, 1992; Lanfersieck et Squires, 1992).

Témoignent par exemple de cette productivité, les nombreux modèles bio-économiques présentés en 1992 lors de la 6ème conférence de l'IIFET (International Institute of Fisheries Economics and Trade). Parmi les modèles "avancés", citons, en France, le modèle bio-économique du Conseil Scientifique et Technique des Pêches (Souplet, 1994), le modèle SIMUCEL (Charruau et Biseau, 1989).

Enfin, il faut citer à part:

- le modèle de Laloë et Samba (1989, 1993), premier modèle, à notre connaissance, qui prend en compte les tactiques des pêcheurs dans un contexte de pêches artisanales.
- le projet MOPA (Le Fur 1991, 1993a, 1993b) dont la démarche est proche de la nôtre. Il s'agit d'un projet de recherche sur la pêche artisanale au Sénégal, mené de façon pluridisciplinaire, au moyen d'outils d'Intelligence Artificielle. La modélisation concerne

pour l'instant une représentation détaillée de la filière de pêche et de vente du poisson, faisant intervenir divers intermédiaires.

2.4 REPRÉSENTATION DE CONNAISSANCES ET SIMULATIONS.

En général la modélisation utilise des techniques numériques. Cela pose le problème de la représentation de connaissances qualitatives car toutes les quantités ne sont pas mesurables. Il est possible de pallier en partie à ce problème par une programmation procédurale. Loeihe (1987) indique cependant qu'il est difficile de manipuler de nombreuses connaissances.

De nouvelles méthodes de modélisation et de simulation, complémentaires aux méthodes numériques, apparaissent depuis quelques années. Elles offrent des possibilités de représentation des connaissances qui permettent de rapprocher la connaissance telle qu'elle est exprimée, et la connaissance telle qu'elle est introduite dans un ordinateur. Ces méthodes proviennent du domaine de l'Intelligence Artificielle (IA). De nombreuses publications discutent les techniques de l'IA employées pour la modélisation et la simulation. Au sein de ces références, et pour rentrer dans le domaine discuté, on peut distinguer deux entrées:

- les simulations qualitatives ou raisonnement qualitatif,
- les simulations à base de connaissances.

2.4.1 Les simulations qualitatives.

La simulation qualitative a pour origine des recherches dans le domaine de la physique qualitative, aussi appelée physique naïve. Quatre chercheurs sont précurseurs: De Kleer et Brown (1984), Forbus (1983, 1984), Kuipers (1984). La physique naïve est définie par ces auteurs comme la connaissance de sens commun sur le monde physique. Dans les trois approches, le système physique est modélisé par un ensemble de paramètres représentant des entités physiques et par un ensemble de relations reliant ces paramètres. Les variables des modèles utilisant des lois physiques peuvent prendre n'importe quelles valeurs réelles. La physique qualitative adopte elle aussi la notion de variables mais décrit chacune d'entre elles

par un petit nombre de distinctions (De Kleer et Brown, 1983). Par exemple la valeur d'une dérivée est habituellement décrite par un des éléments de l'ensemble $\{-, 0, +\}$ pour une variable qui décroît, reste stable ou augmente. Kuipers (1989) donne l'exemple suivant: en physique quantitative la trajectoire d'une balle de tennis lancée en l'air sera décrite par une équation qui, en fonction des conditions initiales, donnera la position et la vitesse de la balle au cours du temps. En physique qualitative on se contente de donner l'ensemble des événements suivants: la balle monte, s'arrête, descend. C'est selon l'auteur le niveau de description sur lequel les experts humains ont l'habitude de raisonner.

Aujourd'hui les auteurs considèrent les approches qualitatives et quantitatives comme complémentaires et de nombreux travaux proposent des combinaisons de ces deux démarches. Dans l'ouvrage collectif (Widman et al., 1989) consacré à l'IA et à la simulation, nombre de contributions discutent et utilisent la simulation qualitative. (D'ambrosio, Widman, Karp et Friedland, Chiu, Hardt, Oyeleye et Kramer). De plus l'algèbre des signes $\{-, 0, +\}$ a évolué vers des systèmes d'ordre de grandeur et la logique floue a été introduite dans certains programmes (Laurent et Vescovi, 1992).

Par ailleurs Puccia et Levins (1985) ont proposé une méthode de modélisation des systèmes complexes à partir de modèles de boucles. Ils ont qualifié cette modélisation de qualitative.

En assouplissant peu à peu les principes de base de la simulation qualitative jugés trop contraignants (Laurent et Vescovi, 1992), celle-ci est devenue un champ d'études très vaste. Dans la littérature consacrée aux simulations elle est devenue le synonyme de simulation par Intelligence Artificielle (Rajagopalan, 1986; Fishwick, 1989b). Selon Kuipers (1989), la principale qualité de ce type d'abstraction, c'est sa capacité à exprimer des connaissances incomplètes et d'exprimer des connaissances qualitatives sur un phénomène. Si beaucoup reste à faire, un acquis important de cette recherche est d'avoir uni les concepts modélisation et qualitatif, ouvrant à la modélisation des domaines d'application plus vastes et apportant à ces domaines un accès à la simulation respectueux de leur démarche.

2.4.2 Les simulations à base de connaissances.

La combinaison des concepts de l'Intelligence Artificielle avec la méthodologie de la simulation classique a donné un domaine de recherche appelé simulations à base de connaissances (Knowledge Based Simulation).

Si la simulation et l'IA poursuivent le but commun d'aider l'homme dans l'étude des systèmes complexes, il apparaît que leur fonctionnement est différent. Les simulations intègrent la dimension temporelle: elles autorisent un regard vers le futur. On simule des scénarios d'action sur le système. L'IA manipule les connaissances exprimées sous forme de règles pour proposer une action (par exemple diagnostiquer une maladie et proposer un médicament).

Pour combiner ces deux approches, différents groupes de chercheurs proposent des simulations à base de connaissances (Reddy, 1987). D'autres chercheurs qui avaient commencé à examiner les liens entre l'IA et la simulation se joignent à cette mouvance (Zeigler, 1984; Ören, 1986) pour proposer des méthodes et des outils. Pour éviter la confusion avec les simulations cognitives (qui cherchent à reproduire la connaissance de l'être humain) Ören (1987) propose le terme de "cognizant simulation" (simulations connaissantes). Il s'agit bien du même concept, puisque Ören (1987) et Reddy (1987) donnent le même cahier des charges. Pour eux un KBS system (fig 2.4) devrait idéalement (en résumé):

- en partant d'une description d'un problème, synthétiser un modèle de simulation en consultant une base de connaissances,
- lancer tout seul tout le processus de simulation. Il doit générer un espace des scénarios possibles et les tester,
- expliquer les raisons pour lesquelles certains scénarios ont été abandonnés,
- apprendre au cours du temps,
- savoir donner confiance à l'utilisateur.

Il s'agit donc de mettre au service de la simulation tous les avantages de l'IA. Il apparaît que pour ces auteurs la composante IA sert à remplacer l'expert en modélisation.

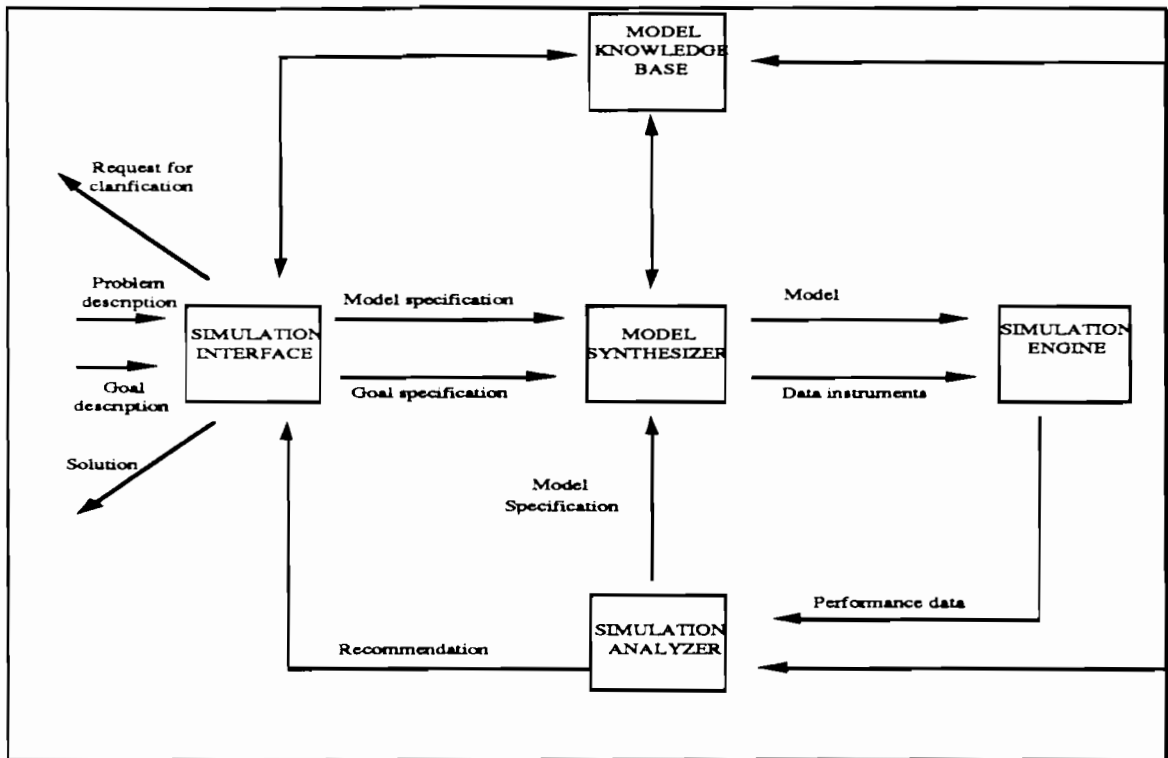


Figure 2.4: Un système à base de connaissance (d'après Reddy, 1987)

Après avoir écrit, dans le milieu des années 70 un livre qui fait référence en matière de théorie de la modélisation et de la simulation (Zeigler, 1976), B. Zeigler propose en 1984 un livre dans lequel il introduit le concept de modélisation "multifacette". Le terme multifacette caractérise une modélisation qui reconnaît l'existence de plusieurs objectifs qui correspondent à autant de points de vue sur le monde représenté. L'auteur propose des méthodes de simulations à événements discrets, mais aussi des méthodes de représentation des connaissances. Le système SES/MB (system entity structure / model base) différencie les entités du monde observé et une base de modèles qui peuvent s'y appliquer. A la différence des auteurs précédents, Zeigler ne considère pas seulement les apports de l'IA pour la gestion du processus de simulation. Il utilise des méthodes de représentation des connaissances de l'IA, en particulier la représentation orientée-objet, pour représenter non seulement les modèles mais aussi les entités du système. Il s'intéresse ainsi à la représentation des agents

du monde observé et à leurs interactions (Zeigler, 1990). Il rejoint ici tout un courant de l'Intelligence Artificielle, qui après avoir surtout travaillé sur des problèmes de représentation des connaissances et de résolution de problèmes, s'est orienté dans la fin des années 80 vers des problèmes de simulation de mondes artificiels. Il s'agit de simulations dites multi-agents sur lesquelles nous reviendrons dans les chapitres suivants.

Dans le domaine de la simulation, nous avons principalement exploré les productions de la Society for Computer Simulation (revue Simulation et de nombreuses conférences), parmi lesquelles on trouve des publications sur les simulations à base de connaissances (Rozenblit et Jankowski, 1991; Kaminsky et al., 1989; Huang et al., 1989; Sakthivel et Agarwal, 1992; Murray et Sheppard, 1988) consacrées le plus souvent aux méthodes de construction de ces systèmes.

En France, on retrouve une approche semblable dans les travaux du groupe Edora (Pavé et Rechenmann 1986; Pavé, 1988). Le but consiste à utiliser les possibilités de l'IA, et plus particulièrement du langage SHIRKA (Rechenmann et Uvietta, 1989), pour assister la modélisation biologique. Ce groupe a aussi posé les jalons de la réflexion sur l'utilisation des techniques de l'IA pour construire des modèles différents (Pavé et al., 1989). On peut citer aussi le modèle de simulation OTELLO développé pour simuler l'organisation du travail d'un exploitant agricole (Attonaty et al., 1991).

2.5 CONCLUSION.

En 1989, au moment où nous avons envisagé un projet de modélisation des connaissances du Delta Central du Niger, nous devons choisir entre deux possibilités:

- développer et utiliser les modèles de l'halieutique qui sont bien maîtrisés et qui sont utilisés dans le monde entier pour gérer la pêche.
- explorer de nouveaux domaines de modélisation et évaluer l'adéquation des méthodes proposés par l'Intelligence Artificielle.

Notre recherche se focalise sur l'étude des relations entre différentes connaissances disciplinaires dans le but de mieux comprendre le fonctionnement du système pêche. Il ne

s'agit pas d'élaborer un modèle de gestion halieutique. Pour ces raisons ainsi que celles que nous développons dans le chapitre suivant, nous avons choisi la deuxième possibilité.

3 REPRÉSENTER ET SIMULER LES INTERACTIONS POUR UNE INTÉGRATION PLURIDISCIPLINAIRE.

Modéliser, simuler la pêche dans le Delta Central du Niger c'est rentrer dans divers réseaux entremêlés: réseaux de communautés scientifiques (halieutique, environnement, ressources renouvelables, modélisation, écologie, sciences sociales, informatique), réseaux conceptuels (complexité, systèmes, interdisciplinarité, instabilité, espaces, connectivité, ...), réseaux méthodologiques (mathématiques, statistiques, intelligence artificielle), réseaux institutionnels (grand 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. Au cours de ce chapitre, en partant de l'étude scientifique de l'environnement illustrée par la recherche sur le DCN, nous décrivons une partie de ce chemin, les choix que nous effectuons, pour arriver à préciser la problématique de notre recherche.

3.1 L'ENVIRONNEMENT COMME OBJET D'ÉTUDE.

Aborder le problème des relations entre une société et les ressources qu'elle exploite revient à se placer dans le domaine des recherches sur l'environnement et donc à se positionner par rapport aux courants de pensée qui entraînent actuellement cette communauté scientifique. C'est en se référant à des constructions théoriques que la modélisation devient un outil d'exploration opératoire.

De nombreuses disciplines mènent depuis longtemps des recherches sur les milieux naturels ou sur la relation entre l'homme et le milieu naturel. Cependant, depuis quelques années, en réponse à une forte demande sociale, les communautés scientifiques concernées s'impliquent dans l'organisation d'une recherche unifiée sur l'environnement avec un objet scientifique défini, avec des problèmes théoriques posés et des méthodes et techniques

identifiées. En témoignent les colloques du programme environnement du CNRS et des publications (Jollivet et Pavé, 1992) qui cherchent à insuffler une dynamique et organiser ce champ de recherche. Ainsi, la définition suivante est proposée à débat:

"L'environnement est l'ensemble des milieux naturels ou artificialisés de l'écosphère où l'homme s'est installé, qu'il exploite, qu'il aménage, et l'ensemble des milieux non anthropisés nécessaires à sa survie. Ces milieux sont caractérisés:

- *par leur géométrie, leurs composantes physiques, chimiques, biologiques et humaines et la distribution spatiale de ces composantes;*
- *par les processus de transformation, d'action ou d'interaction impliquant ces composantes et les faisant changer dans l'espace et dans le temps;*
- *par leurs multiples dépendances par rapport aux actions de l'homme;*
- *par leur importance pour le développement des sociétés humaines."* (Jollivet et Pavé, 1992)

De nombreuses questions sont actuellement posées autour de cette définition et de l'organisation de la recherche mais d'ores et déjà apparaissent quelques points importants. Ainsi, dans le cadre de la recherche sur les interactions homme-ressource, et plus particulièrement dans le cadre de la recherche sur les pêches du DCN, deux points sont à souligner: la recherche est pluridisciplinaire et elle examine un objet complexe.

3.1.1 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?

3.1.2 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 (Nicolis et Prigogine, 1992), si on peut le considérer comme une organisation d'éléments en interactions. 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:

- ❶ choisir le système comme objet et niveau d'étude et rechercher les lois générales 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, 1977). 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 macroscope (De Rosnay, 1975).
- ❷ 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, 1977).

Nous avons choisi la seconde voie, celle qui s'intéresse aux relations entre un niveau local et un niveau global.

3.2. CHOIX D'UNE MÉTHODE ASCENDANTE.

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'environnement: 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 rhédictoire 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 morphogénèse"* (A.Caillé, 1993). L'approche ascendante existe tant en sciences sociales qu'en écologie.

En sciences sociales, porter son regard sur l'individu relève de l'individualisme méthodologique. *"Le principe de l'individualisme méthodologique affirme qu'un phénomène social, quel qu'il soit, quelles que soient sa nature et sa forme, et quelle que soit la science sociale dont il relève, doit pour être expliqué, être conçu comme le produit d'agrégations individuelles, action dont l'analyste doit par conséquent saisir la signification."* (Boudon, 1990). Certains auteurs, jugeant cette école détournée par la philosophie libérale et la pensée utilitariste, s'en éloignent en proposant d'autres concepts comme l'actionnisme (Boudon, 1993) ou l'individualisme complexe (Dupuy, 1993) mais ne renoncent pas à son point de départ individualiste.

En écologie, les chercheurs s'interrogent sur leurs modèles et cherchent à les enrichir des connaissances physiologiques, génétiques et plus particulièrement éthologiques. Cela rejoint l'approche mécaniste: *"Mechanistic approaches to community ecology are those which employ individual-ecological concepts -those of behavioural ecology, physiological ecology and ecomorphology- as theoretical bases for understanding community patterns"* (Schoener, 1986).

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., 1984) 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 dans la réalité? C'est la question posée lorsqu'on suit la démarche ascendante (bottom-up).

Intervenant au moment de la synthèse DCN notre recherche se penche sur ce problème de réassemblage des mécanismes, en cherchant des cohérences entre connaissances exprimées à diverses échelles et provenant de différentes disciplines.

En bio-écologie, on dispose, d'une part de tout un lot de connaissances sur la reproduction, les migrations, la croissance, etc.... d'espèces de poissons, et d'autre part de connaissances sur la dynamique des écosystèmes. Notre travail s'emploie à rechercher les liens possibles entre les deux niveaux, pour une meilleure compréhension de la dynamique écologique.

En sciences sociales, les liens entre logiques individuelles et logiques sociales, donc entre deux niveaux de hiérarchies, sont plus difficiles à effectuer car il existe différents modèles, différentes visions pour chacune des disciplines et parfois à l'intérieur d'une même discipline. Ainsi, si l'on se focalise sur l'étude des processus de prise de décision, il apparaît que les auteurs insistent tantôt sur les logiques individuelles souvent d'ordre économique (niveaux individu-ménage-concession), tantôt sur les logiques de groupe (lignage, ethnie) provenant de l'histoire de la société. Au sein du corpus de connaissances DCN, il est facile de projeter les connaissances acquises à l'échelle du groupe sur les individus qui le composent, mais il est plus difficile de s'interroger sur les effets de la décision individuelle sur l'organisation du groupe. Car c'est plus par l'analyse historique des groupes sociaux que les chercheurs ont trouvé les logiques de l'organisation que par l'examen des interactions entre acteurs.

Ainsi, s'il est 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 (biologie et sciences sociales) 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, 1972) est caduque et fait place à celle de hiérarchies enchevêtrées dynamiques" (Ploman, 1986).

3.3. DE L'ÉLÉMENT À L'ACTEUR.

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, savoir comment son interlocuteur construit sa communication.

C'est bien l'attitude adoptée par l'équipe de recherche au moment de la préparation de l'enquête pluridisciplinaire qui a inauguré les travaux d'acquisition de connaissances sur le Delta: les chercheurs se sont concertés pour la mise en relation, sinon la concordance, des unités élémentaires d'observation et les niveaux d'organisation. Cette enquête sur les pêcheurs, comportait différents questionnaires: ceux-ci contenaient des questions propres à chaque disciplines et s'appliquaient à différents niveaux d'organisation (Individu- Ménage -Concession - Village).

3.4 REPRÉSENTER LES ACTEURS ET LEURS INTERACTIONS.

Dans le but d'étudier une interaction entre l'homme et la ressource nous avons choisi de prendre comme niveau de base les individus. Ce sont les unités élémentaires de l'interaction. Pour représenter des connaissances diverses dans un cadre commun, nous faisons ce choix préalable.

Le terrain de notre recherche en modélisation-simulation n'est pas l'écosystème anthropisé DCN mais différents points de vues sur le DCN. Les diverses sciences impliquées dans la recherche environnementale en général et dans celle du DCN en particulier ne font pas toutes le choix de l'individu comme unité d'observation. Le comportement ne fait pas partie du bagage conceptuel de tous les chercheurs. Nous examinons comment les connaissances produites par les chercheurs des différentes disciplines se rapportent à l'individu et comment est perçu le concept de comportement.

3.4.1 L'individu dans la recherche DCN.

Les chercheurs en sciences sociales de l'équipe DCN appréhendent l'individu de diverses manières. Nous examinons ici quelles connaissances sont produites à l'échelle de l'individu et comment les autres connaissances peuvent se projeter sur cet objet d'étude.

Les recherches en socio-économie ou micro-économie apportent des connaissances qui peuvent être rapportées à l'individu car, soit elles le concernent directement, soit elles concernent des niveaux d'agrégation dont il est une composante directe (niveaux ménage, concession). La macro-économie et l'étude des flux commerciaux, qu'ils soient intra ou extra deltaïques, abordent le système à un niveau qui ne fait pas référence à l'individu.

Le regard des anthropologues sur l'individu est moins simple à percevoir puisque c'est à la fois dans l'histoire et dans l'économie que cette science trouve ses modèles: historique elle s'intéresse à la création des groupes sociaux et l'individu n'y a guère de place, économique elle porte son regard sur l'individu. Par ailleurs elle cherche à décrire les modes de représentation. Comment la société, et donc les individus qui en font partie, se représente-t-elle l'environnement dont elle fait partie? Dans l'autre sens: comment les individus se représentent la société dont ils font partie et l'environnement qui les entoure? *"Les choses sérieuses commencent. Par choses sérieuses j'entends par exemple les questions qui se posent à l'anthropologue. L'avènement de la notion d'individu. Sous tous ses aspects. (...). Nous passons insensiblement en Occident à un état de société où chaque individu prétend avoir sa représentation du monde"* (Augé, 1993).

La démographie, quand elle ne trouve pas ses appuis dans l'histoire, représente un cas de figure intermédiaire: l'individu y est seulement compté, additionné aux individus qui ont le même comportement que lui.

Enfin, toujours dans le cas du DCN et dans l'état actuel des recherches, la géographie peut être considérée comme une science de la représentation des connaissances et, à cet égard, présente les connaissances des autres sciences aux échelles où elles ont été produites ou à d'autres échelles. La recherche propre à la géographie sur les déterminismes induits par l'espace physique n'était pas commencée au début de cette thèse.

L'organisation des écosystèmes fluviaux sahéliens est un sujet de recherche privilégié à l'ORSTOM: à travers l'étude de différents hydrosystèmes, en particulier celui du Tchad, les chercheurs ont acquis de nombreuses connaissances à la fois dans le domaine de l'ichtyologie et dans le domaine de l'écologie. Les relations entre les poissons et leur environnement, entre les communautés et leur environnement ont été l'objet de nombreuses publications, et souvent, ce sont les mêmes groupes de chercheurs qui se sont penchés sur l'une ou l'autre des échelles d'observation.

Dans l'équipe DCN figurent des biologistes. Les connaissances qu'ils produisent portent sur des niveaux qui vont de celui de l'individu à celui de la communauté, de l'écosystème. Les halieutes quant à eux s'intéressent en même temps aux comportements humains (plus particulièrement l'individu dans son action de pêche), et aux dynamiques des stocks de poissons.

En résumé, les connaissances que l'on veut projeter sur l'individu (poissons et pêcheurs) proviennent de divers niveaux. Les individus peuvent être perçus comme des acteurs du système qui soit ont des comportements propres, soit subissent les contraintes provenant de niveaux d'organisation supérieurs. Dans le premier cas ils agissent comme des individus autonomes, dans le deuxième cas ils sont les représentants d'un ordre préétabli.

Pour représenter les diverses connaissances c'est bien l'individu en tant qu'acteur que nous proposons de représenter sans préjuger de la nature sociale ou individuelle des déterminants qui le font agir, sans émettre d'avis sur qui de l'acteur ou du système (Crozier

et Friedberg, 1977) conduit l'action. Car c'est à travers l'action que se concrétise l'interaction homme-ressource.

3.4.2 Du comportement aux processus de prise de décision.

A l'évidence, le comportement est un concept commun à la plupart des disciplines impliquées dans les études de l'environnement. Concept nomade (Stengers, 1987), il reçoit un accueil très différent suivant les communautés scientifiques où il s'est installé.

Gervet (1987) fait la revue des sciences qui s'intéressent au comportement, défini avec Kuo (Kuo, 1970) comme *"processus complexe d'interaction fonctionnelle entre l'organisme et son environnement"*. Cette revue est plus particulièrement orientée vers les sciences humaines. Très marquée par le behaviourisme, pour lequel le comportement est l'ensemble des réactions objectivement observables qu'un organisme exécute en réponse aux stimuli également observables provenant de l'environnement, la réflexion sur le comportement exclue toute référence à des états mentaux, refuse d'examiner l'intérieur de l'individu et ne se penche pas sur les processus de représentation. Le concept de comportement est toléré lorsqu'il devient purement descriptif au sein de recherches qui s'intéressent à des processus plus collectifs: ainsi en psychologie sociale, où le comportement intervient dans un contexte d'interdépendance sociale où il est à la fois stimulus et réponse, en économie où il a pour rôle d'indiquer la façon dont s'inscrit un agent économique dans le réseau des échanges. Par contre, en sociologie *"l'absence de référence à l'individu est sans doute liée à l'absence de tout concept de comportement"*(Gervet, 1987). Par ailleurs, il nous semble qu'une bonne partie des chercheurs en sciences sociales se représentent le comportement comme un immigré d'origine biologique, qui, directement ou indirectement à travers ses métissages, voudrait imposer sa religion dangereusement simplificatrice. *"D'une science du comportement à une police des moeurs, le glissement est facile dans l'imaginaire collectif et peut être dans la réalité"* (Gervet, 1987). Dans le cas des études sur la pêche, la conception de réglementation est plus facile à envisager si l'on considère des comportements que si l'on considère des faits sociaux.

Percevoir l'action de l'individu comme un comportement revient à lui ôter toute responsabilité, tout pouvoir de réflexion, à écarter l'existence et la complexité du processus de prise de décision ou à le considérer comme résolu. Or le processus de prise de décision est un sujet de recherche loin d'être résolu. Différents modèles théoriques sont proposés qui proviennent de l'économie (Simon, 1969), de la psychologie sociale (Moscovici et Dorsey, 1992; Tversky et Kahneman, 1981). Certains auteurs (Sfez, 1993) argumentent en faveur d'une multiplicité de rationalités différentes qui s'imbriquent, se superposent, se confondent.

La prise de décision est bien le processus qui détermine l'action et donc le rôle que joue l'individu dans l'organisation. La décision inclut des états mentaux, se penche sur les processus de représentation, accepte les lois de comportement. Par ailleurs, les processus de décision sont considérés comme des phénomènes clés dans le domaine de la recherche sur l'usage des ressources renouvelables. *"Les processus de décision constituent la dynamique des modes d'appropriation et concernent les usages, l'accès et le contrôle, la répartition, les modalités de transfert. L'analyse et la formalisation des processus de décision constituent la clef des modes de gestion des ressources renouvelables et des espaces en propriété commune, lorsqu'est connu le mode d'appropriation"* (Weber, 1993). Au sein de la recherche DCN, on peut considérer que de nombreuses contributions visent à comprendre des mécanismes de prise de décision et les déterminants qui les accompagnent plutôt qu'à définir des catégories de comportement, des idéaux-types.

La biologie est beaucoup moins réticente à la sédentarisation du concept nomade qu'est le comportement: un champ de recherche entier, l'éthologie, l'a adopté pour objet d'étude. L'écologie comportementale (behavioural ecology) figure parmi les perspectives de recherche de la théorie écologique. *"There appears to be a growing recognition that processes that occur at the level of individuals can form the basis for constructing a theoretical framework with which to interpret the properties of populations and communities"* (Koehl, 1989). De même que pour les sciences sociales, certains chercheurs se centrent sur les processus de décision. Ainsi, Krebs et Kacelnik (1991) discutent *"what we expect to see as a major growth area in*

the next 5 years: the integration of individual decision-making into population, and, eventually, community ecology".

En bref, le processus de prise de décision apparaît comme un point central de l'étude des interactions homme-ressource. C'est une problématique de recherche qui peut cristalliser la réflexion de plusieurs domaines scientifiques, à la fois en biologie et en sciences sociales. Certaines disciplines décrivent le processus de représentation, d'autres sont fondées sur des modèles de décision (la rationalité économique par exemple), d'autres apportent des lois de comportement. Les concepts de décision, stratégie, tactique n'ont pas les mêmes sens pour les différentes disciplines qui les utilisent. La décision renvoie aux problèmes de l'autonomie et du contrôle: quelle est la palette de choix de l'individu au moment de la décision, son degré de liberté? Chaque discipline, apporte une réflexion sur cette question, même si elle ne la formule pas dans ces termes. Certains chercheurs cherchent à mieux identifier ces choix tandis que d'autres cherchent à expliciter les contraintes qui déterminent la décision.

3.5 LE DÉCOR ET LA PIÈCE.

Après avoir indiqué notre intention de représenter les individus et les mécanismes par lesquels ils peuvent interagir, il s'agit d'animer ces interactions.

Pour cela, il faut identifier une scène, créer un décor pour que les acteurs puissent jouer la pièce. Ce support d'interactions c'est un espace. Qu'il s'agisse des relations entre poissons, entre pêcheurs, entre poissons et pêcheurs, les interactions sont localisées. C'est pour comprendre l'accès à un espace que de nombreux processus de prise de décision sont étudiés. Dans le cadre de l'étude de la dynamique et de l'usage de la ressource halieutique, l'espace (et son hétérogénéité) est un des seuls concepts qui soit abordé à la fois par les sciences sociales et les sciences biologiques. Les processus de représentation individuelle ou collective de l'espace, d'appropriation de l'espace et de la ressource qu'elle contient sont à la base de la réflexion sur l'usage des ressources renouvelable. De même, en écologie, la fragmentation de l'espace, les stratégies de colonisation de l'espace sont le sujet de tout un champ de recherche. *"L'hétérogénéité (...) caractérise l'organisation spatiale des systèmes écologiques:*

structuration en mosaïque, effets d'insularité, lisières, corridors. Différentes branches de l'écologie se sont développées au cours de ces dernières années pour prendre en compte ces notions: dynamique des structures spatiales (patch dynamics), écologie du paysage que l'on essaie d'appliquer aux fleuves, écocomplexes, avec pour certaines d'entre elles des perspectives d'aménagement et de gestion des écosystèmes" (Lévêque, 1991).

La simulation consiste à introduire les acteurs dans un décor en leur donnant un scénario. A partir d'un niveau inférieur, on cherche à observer les phénomènes qui caractérisent le niveau d'organisation supérieur: c'est un transfert d'échelle. Des méthodes mathématiques permettent d'aborder le transfert d'échelle (Frontier, 1991b; Auger, 1993). Par ailleurs de nouvelles méthodes de modélisation informatique, qui transforment les modèles en véritables générateurs de vie artificielle, permettent d'envisager la dynamique d'un système à partir de la représentation des acteurs et de leurs processus de décision.

3.6 LE SUJET DE LA RECHERCHE.

3.6.1 Transfert d'échelle et Intégration des connaissances.

Au cours des paragraphes précédents, nous nous sommes situés dans le contexte des études environnementales et plus particulièrement dans le domaine des interactions société-ressources naturelles. En s'appuyant sur un terrain de recherche (la pêche étudiée par l'équipe DCN), nous avons précisé notre problématique.

- Nous avons défini un environnement scientifique (c'est une recherche pluridisciplinaire concernant l'étude d'un objet complexe) et nous nous sommes posé une question: les simulations peuvent-elles être un outil d'intégration des connaissances nombreuses et diverses sur un objet complexe (chap 3.1)?
- Nous avons précisé des concepts et une démarche: nous étudions l'objet complexe à partir des éléments qui le composent et leurs interactions. Dans ce cadre, nous avons choisi de nous interroger sur les liens entre niveaux d'organisations (chap 3.2 et 3.3).
- Nous avons fait le choix de nous focaliser sur l'individu et ses comportements ou processus de décision (chap 3.4 et 3.5).

- Nous avons indiqué notre ambition de considérer l'espace comme support de l'interaction entre les dynamiques ichtyologiques et sociales mais aussi comme caractéristique de cette interaction. Les conditions et les motifs d'accès à l'espace semblent être le moteur de cette interaction et donc de la simulation (chap 3.6).

3.6.2. Validations conceptuelles et utilisation.

Ainsi, il ne s'agit pas d'élaborer un modèle aussi complexe que la réalité, ni même d'intégrer d'un seul coup toute la connaissance acquise par l'équipe DCN et encore moins de prévoir l'avenir de cette région. Nous avons fait le choix de nous centrer sur certains points particuliers, et, pour cela, nous utiliserons tour à tour des connaissances acquises sur des objets, des régions, des niveaux d'organisation différents.

C'est dans ce contexte que nous initions ici une discussion sur la comparaison entre la réalité et les données simulées. Nous proposons d'utiliser les simulations à des fins théoriques, en construisant un modèle, un système artificiel à partir de l'image que les chercheurs nous offrent d'une partie de la réalité à travers des corpus de connaissances, pour renvoyer à une réflexion sur ces corpus et leur assemblage. Les simulations sont ainsi, non pas un outil de prévision, mais un outil d'aide à la recherche, un outil de communication entre connaissances, avec pour conséquence de meilleures bases pour la prospective. La validation est donc perçue à travers ce contexte: les résultats des simulations constituent des typologies, des formes, des indices qualitatifs, des discours qui seront évalués à l'aune du degré d'intérêt suscité chez les chercheurs.

Fils du mariage de divers corpus théoriques, le résultat d'une simulation multidisciplinaire doit être lui-même un corpus théorique qui modifie, sinon ses parents, du moins la perception que l'on se fait d'eux. Ebauchée ici, nous illustrerons et argumenterons cette position dans les chapitres suivants.

4 LES SYSTEMES MULTI-AGENTS.

En précisant les objectifs et quelques principes de modélisation, nous avons fait le choix d'une part de nous orienter vers l'étude des individus pour observer comment, dans une approche ascendante, peuvent émerger des organisations, d'autre part de rechercher des liens entre points de vue scientifiques différents.

Nous avons considéré que les approches des systèmes multi-échelles (Auger, 1993; O'Neill, 1989; Frontier, 1991b) basées sur la modélisation mathématique ne répondent pas directement au problème de la prise en compte de la multiplicité des points de vue. Nous nous sommes intéressés aux courants de modélisations informatiques dont les principes semblaient mieux correspondre à notre approche: réseaux d'automates, réseaux neuronaux et Intelligence Artificielle Distribuée (IAD). Les deux premiers de ces courants représentent des interactions entre des populations d'individus identiques; l'IAD permet de représenter des relations entre des individus très différents. Nous avons choisi ce dernier courant de modélisation.

Alors que l'Intelligence Artificielle (IA) cherche à représenter une intelligence humaine et à reproduire ses raisonnements, l'IAD s'intéresse à la résolution de problèmes par des groupes d'agents travaillant en commun. Les domaines d'applications de l'IAD sont ceux où la connaissance est distribuée sur plusieurs agents qui ont des points de vue différents sur le problème et qui disposent de connaissances parcellaires. On parle de systèmes multi-agents. Marvin Minsky, un des pères fondateurs de la discipline, présente même l'intelligence d'un être humain comme le fonctionnement d'une société, la société de l'esprit (Minsky, 1988). Des idées semblables sont émises en neurologie où, par exemple, on peut percevoir la représentation du mouvement comme le résultat du vote d'une assemblée de neurones autonomes (Georgopoulos et al., 1986).

4.1 DÉFINITIONS.

4.1.1 Principes de modélisation.

Pour modéliser des phénomènes complexes, les systèmes multi-agents (SMA) représentent les agents du monde observé et leurs comportements. Elaborer un système multi-agents revient à reproduire un monde artificiel ressemblant au monde observé, en ce sens qu'il est composé de différents acteurs, de façon à y mener des expériences diverses et variées. Chaque agent est représenté comme une entité informatique dotée d'une autonomie, capable d'agir localement en réponse à des stimuli ou à des communications avec d'autres agents.

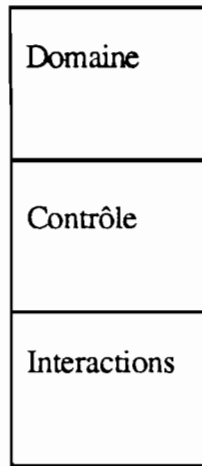
Plus formellement un SMA peut être défini comme un quadruplet:

<agents, objets, environnement, communication>

où les agents représentent l'ensemble des entités simulées, les objets sont l'ensemble des entités passives qui ne mettent en oeuvre aucun comportement, l'environnement représente un espace et une topologie, et où communication représente l'ensemble des stratégies de communication.

4.1.2 Structure d'un agent.

"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). Si la définition de l'agent est assez large, on peut considérer qu'un agent est composé de trois types de connaissances (fig. 4.1).



Un Agent

Figure 4.1: Schéma d'un agent et des types de connaissances qu'il comporte.

Les connaissances sur le domaine sont spécifiques de l'application. C'est par exemple le modèle de croissance pour un poisson, les connaissances sur le déplacement d'une fourmi, la connaissance d'un expert médical sur la maladie. Les connaissances sur le contrôle s'appliquent à ordonner, à planifier les activités de l'agent. Les connaissances sur les interactions avec les autres agents peuvent comprendre un langage de communication, des protocoles de communication (qui communique avec qui? quand? où?). Chaque agent a des accointances qui sont l'ensemble des agents connus; les accointances représentent à la fois la notion de carnet d'adresse et la représentation des autres.

Les applications des SMA sont très diverses. Le degré de complexité, on parle de granularité, des agents est très variable. Un agent peut être un être humain, avec des connaissances du domaine importantes, mais il peut aussi représenter un atome, une fourmi. Par ailleurs, les modes de communication et la représentation du contrôle fournissent aussi une classification des systèmes multi-agents.

4.2 LES MODES DE COMMUNICATION ET LE CONTRÔLE.

Concevoir un système à partir d'agents autonomes pose des problèmes d'ordonnement des processus d'activation de ces agents. La communication entre agents peut se faire soit par transmission de messages, soit par partage d'informations. Dans ces deux cas il s'agit de

communications intentionnelles. On les distingue de la communication par l'environnement qui est non intentionnelle: les agents laissent des traces de leur action, traces qui peuvent être perçues par d'autres agents.

4.2.1 Transmission de messages.

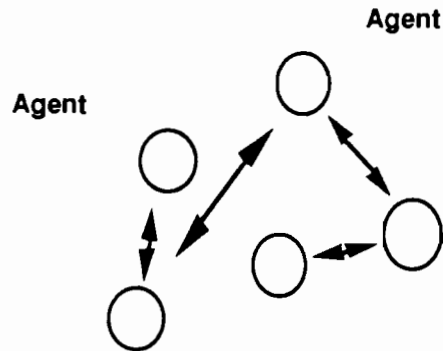


Figure 4.2: Communication par transmission de messages

Les connaissances, les résultats partiels et les méthodes utilisées pour aboutir à un résultat sont distribués entre les agents qui s'envoient des messages. Les agents connaissent l'adresse de leurs accointances. Le contrôle est local à l'agent. C'est lui qui reçoit une information, la traite et décide ou non d'envoyer des messages aux autres agents, avec des possibilités de continuation (A envoie un message à B en lui demandant d'adresser sa réponse à C). A la suite des travaux de C.Hewitt (Hewitt, 1976) ces agents sont aussi appelés acteurs. Parmi les langages d'acteurs les plus connus on cite Plasma (Hewitt, 1976), Act (Liebermann, 1981), ABCL (Yonezawa et al., 1986), et Mering IV (Ferber, 1983).

4.2.2 Partage d'information.

L'architecture dite du tableau noir est un système de communication très répandu.

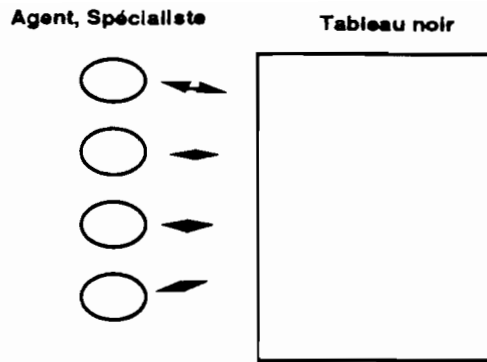


Figure 4.3: Communication par partage d'Informations

Elle permet de représenter :

- les agents ou spécialistes,
- la base partagée (le tableau noir proprement dit) qui représente les états partiels d'un problème en cours de résolution, l'état du système,
- un dispositif de contrôle qui gère les interventions des différents agents.

Il existe plusieurs modèles de tableaux noirs qui diffèrent essentiellement par le dispositif de contrôle (Haton et al., 1991; Ferraris, 1993; Laasri et Maitre, 1989). Ces auteurs distinguent plusieurs types de contrôle:

- ① procédural, où la structure de contrôle manipule un agenda des sources de connaissances. Dans cette catégorie se trouve le premier blackboard Hearsay II qui a été développé pour la reconnaissance de la parole.
- ② hiérarchique, où la structure de contrôle se divise en niveaux hiérarchiques qui vont des connaissances du domaine aux connaissances de contrôle. On cite les systèmes HASP/SIAP pour la reconnaissance de signaux sous-marins.
- ③ opportuniste, où la structure de contrôle est elle même un blackboard. BB1 est le système le plus connu.
- ④ hybride, où la structure de contrôle est un compromis entre ces sources de contrôle . le système le plus connu en France s'appelle ATOME, il est développé au CRIN/INRIA de Nancy.

Les deux modes de communication, par transmission de message et par partage d'information ne sont pas incompatibles. C'est ainsi que l'on trouve des systèmes où chaque agent est considéré comme un blackboard, et les agents entre eux communiquent par transmission de messages.

4.3 LES EXPERTS ET LES FOURMIS.

Il existe deux modes principaux d'utilisation des systèmes multi-agents.

Selon le premier, on utilise les systèmes multi-agents pour représenter des agents dits cognitifs, doués de capacités de raisonnement. Lorsque la compétence des agents correspond à une expertise, on parle alors de systèmes multi-experts. Dans le prolongement de l'IA classique, il s'agit d'étudier les collaborations possibles entre plusieurs intelligences pour résoudre un problème. Bond et Gasser (Bond et Gasser, 1988) parlent de Distributed Problem Solving (Cammarata et al., 1988; Lenat, 1988). L'intelligence de la société vient d'une interaction entre intelligences. Les images les plus souvent employées pour illustrer ce point de vue sont celles de l'entreprise: différentes compétences collaborent pour résoudre des problèmes communs. Le nombre d'agents est peu important, mais ces agents sont plutôt complexes. Ils ont en général des buts, une représentation des autres, des possibilités de raisonnement et une mémoire. Ce courant se développe surtout aux Etats-Unis et a gardé la dénomination Intelligence Artificielle Distribuée. Les domaines de recherche concernent les problèmes d'allocation de tâches, de formalisation de l'intention et des croyances, de planification, de coordination, de résolution de conflits, de négociation. Les recherches s'appuient sur des théories comme celle des actes de langage (Searle, 1969; Austin, 1962), sur des protocoles de communication comme le réseau contractuel (Contract Net)(Smith, 1980).

A cette conception plutôt sociale de l'intelligence on oppose une autre conception dite biologique. Cette approche ne suppose pas d'intelligence à priori des agents; l'intelligence est une émergence à partir des interactions entre agents. La conception des agents est plutôt behavioriste: l'agent répond à des stimuli. Les agents ne possèdent pas de croyances, de

représentation de leur environnement, ni de mémoire. Ils fonctionnent suivant le schéma stimulus-réponse. En contrepartie, ces agents sont très nombreux, et leurs possibilités d'interaction rendent impossibles les calculs combinatoires globaux. C'est une démarche ascendante qui cherche à étudier les conditions de l'émergence d'organisations, pour mieux comprendre les mécanismes du transfert entre les échelles micro et macro. L'image que l'on donne habituellement pour illustrer cette pensée est celle de la fourmilière. La colonie de fourmis présente une organisation complexe et exhibe une intelligence collective à partir des interactions de fourmis qui sont très réactives et peu intelligentes.

Autour de ce deuxième mode, on voit apparaître des domaines comme la Vie Artificielle, des méthodes comme l'écorésolution (Ferber, 1988) ou l'éthomodélisation (Drogoul, 1992). En écologie, on parle de individual-based modeling (Huston, 1988; Villa, 1992).

Ces deux grands groupes doivent être vus comme les deux bornes opposées d'un domaine au sein duquel on trouve des agents de taille variable. Suivant les applications, les agents sont plutôt cognitifs ou plutôt réactifs. Les conceptions sociales ou biologiques ne préjugent pas du domaine de l'application. C'est ainsi que la conception biologique est très souvent illustrée par les travaux en robotique de Rodney Brooks (Brooks, 1992) qui imagine des sociétés de petits robots qui se consacrent à des tâches très simples plutôt que des gros robots intelligents. Au contraire, dans le domaine des Animats, où les chercheurs cherchent à modéliser le comportement d'animaux artificiels, on trouve des agents qui perçoivent, peuvent apprendre, etc....

4.4 CONCLUSION.

Les questions que nous avons posées dans le chapitre précédent trouvent un écho très clair dans l'énoncé des principes des systèmes multi-agents.

Le monde que nous observons est constitué à la fois d'individus nombreux (pêcheurs) ou très nombreux (poissons) qui interagissent, mais aussi de chercheurs qui regardent ce monde. Il s'agit pour nous de représenter non seulement des interactions pour observer le fonctionnement de l'écosystème, mais aussi de représenter différents points de vue sur une

même réalité. Ces points de vue sont issus de la compétence (dans le monde scientifique on parlera plutôt du domaine) des différents chercheurs. La compréhension du système global passe par l'intégration de ces points de vue.

Les systèmes multi-agents nous fournissent des méthodes de modélisation, à la fois pour l'étude des transferts d'échelle, en représentant une vie artificielle ou un univers artificiel composés d'agents autonomes, mais aussi pour l'étude de l'organisation des différents lots de connaissances sur le monde observé, en représentant des agents cognitifs qui communiquent par partage d'information.

5 UN GENERATEUR DE SIMULATIONS

Les simulations multi-agents proposent de créer un monde artificiel semblable au monde observé en représentant les agents et leurs capacités d'interactions.

Dans notre cas le monde observé est constitué d'agents (poissons, pêcheurs, villages, pirogues, éperviers, biotopes, ...) et également de chercheurs étudiant l'écosystème. C'est à travers l'interaction entre les connaissances des chercheurs que se forme une image de la pêche dans le DCN. Le monde que nous voulons représenter n'est pas l'écosystème lui-même, mais plutôt l'écosystème vu par les différents chercheurs (fig. 5.1).

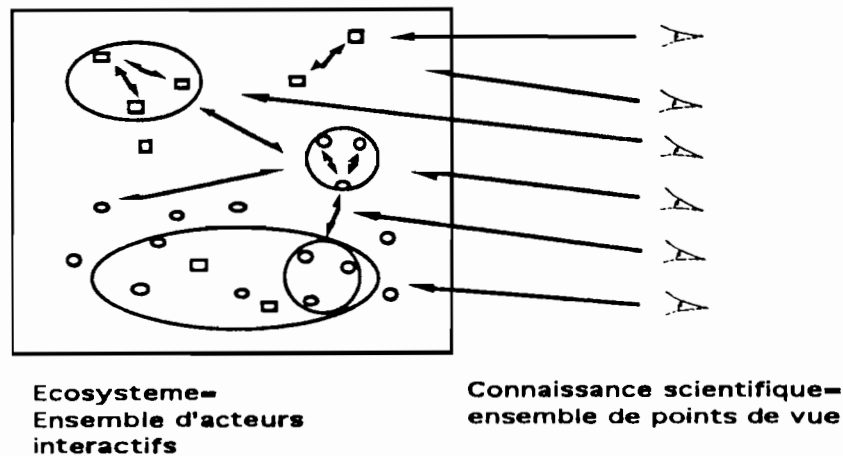


Figure 5.1: Schéma du monde observé

Pour cette raison le simulateur que nous avons élaboré intègre deux approches de la modélisation des Systèmes Multi-Agents:

- ❶ La première approche correspond à celle développée dans le domaine de la Vie Artificielle. Nous avons créé un univers artificiel dans lequel prennent place les différents agents, en leur offrant une grande autonomie. Ils ont un mécanisme de contrôle local et communiquent par messages ou par l'intermédiaire de l'environnement.

② La deuxième approche correspond à l'approche multi-experts qui consiste à représenter les différents points de vue sur ce monde artificiel pour étudier leur organisation. Les agents sont ici des lots de connaissances qui communiquent par partage d'information, la base partagée étant le monde artificiel qu'ils regardent.

L'architecture résultante est un système hybride à base de blackboard et d'agents autonomes.

Au cours de ce chapitre nous précisons quelques principes indispensables sur les techniques utilisées puis nous décrivons brièvement l'architecture qui a été élaborée. Ce volet du travail a été principalement accompli et présenté (Cambier et al., 1991) par C.Cambier et sera développé dans sa thèse. Il s'agit en fait d'un générateur de SMA.

5.1 AGENTS, OBJETS, ACTEURS.

Trois concepts peuvent être utilisés pour présenter les entités étudiées. Les différences entre ces concepts sont assez difficiles à cerner et leur emploi varie suivant les auteurs. C'est la raison pour laquelle nous précisons ici le sens que nous leur donnerons au long de ce texte.

agent: le mot agent a été défini au chapitre précédent: *"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). Un spécialiste peut être considéré comme un agent et l'ensemble des spécialistes comme un univers multi-agents de même qu'un poisson du monde artificiel peut être considéré comme un agent. Il ne suppose pas une représentation informatique particulière (objets, règles, procédures, structures, etc.).

objet: *"l'objet regroupe une partie statique, un ensemble de données, et une partie dynamique, un ensemble de procédures manipulant ces données. (...). Cela permet de réaliser l'abstraction de données: l'objet est muni d'une interface qui spécifie les interactions qu'il*

peut avoir avec l'extérieur et la seule manière de communiquer avec lui est d'invoquer une des procédures, ou méthodes de son interface". (Masini et al., 1989) (fig5.2).

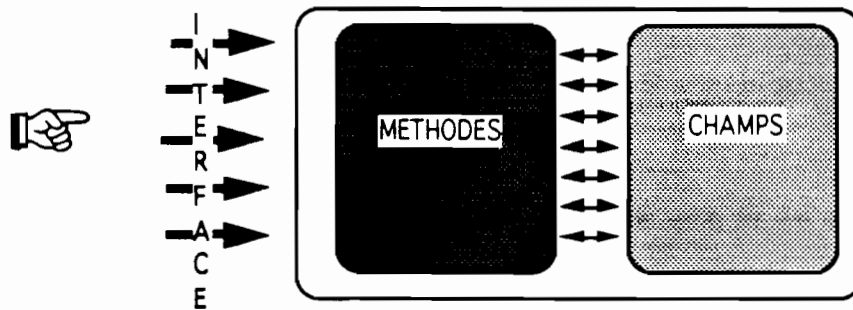


Figure 5.2: Le concept d'objet (d'après Masini et al. 1989)

Cette représentation s'oppose à la programmation classique, dans laquelle un programme est considéré comme un ensemble de procédures et un ensemble de données séparé sur lequel agissent ces procédures.

Dans le chapitre précédent l'objet est présenté au sein des systèmes multi-agents comme une entité passive qui ne présente aucun comportement. Malheureusement pour la clarté du discours il s'agit donc aussi d'un terme informatique qui suppose une représentation particulière dans un langage ou une base de données (bases de données objet, langages objet). Le mot objet recouvre trois aspects distincts (structurel, conceptuel et actanciel); l'objet est bien adapté à l'implémentation informatique des diverses entités d'un système multi-agents. Nous préciserons dans notre texte si nous parlons de l'objet comme méthode de représentation informatique ou comme entité passive d'un système multi-agents.

acteur: en informatique le mot acteur est un type d'agent reconnaissable par sa forme de traitement des messages. Les mots agents et objets recouvrent collectivement l'ensemble des sens que nous désirons utiliser. Nous n'emploierons donc pas le mot acteur.

La représentation orientée objet (ROO) n'est pas seulement une technique, d'autant que, en France, c'est à partir de la ROO qu'ont été élaborés les premiers outils informatiques destinés au type de modélisation que nous envisageons (Rechenmann, 1989), et qu'ont été

construites les premières applications pour des simulations écologiques (Pavé et al., 1989).

La représentation orientée objet s'est, comme son nom l'indique, surtout orientée vers les problèmes de représentation des connaissances en informatique, alors que les SMA, plus récents se posent plutôt des questions d'interaction, de communication et de partage d'une intelligence.

5.2 REPRESENTATION OBJET

Quelques plateformes pour représenter informatiquement les agents apparaissent (voir chapitre 4). Au début de notre thèse ces systèmes n'étaient pas encore disponibles et nous avons entamé une collaboration avec le Laforia avec l'objectif de construire un SMA (thèse de C.Cambier). Cet outil, à l'élaboration duquel j'ai participé, est entièrement implémenté à l'aide d'objets. Toute la programmation informatique a été faite à l'aide du langage objet Smalltalk.80 (version 2.5 puis 4.1) sur station de travail UNIX.

Les langages orientés objets reposent sur quelques concepts fondamentaux qui sont, en résumé (Masini,1989; Bailly,1989) l'encapsulation, la classe, le message, l'héritage.

5.2.1 Objet, encapsulation

Un objet est un module élémentaire réunissant des données qui lui sont propres et des procédures qui les manipulent (fig. 5.3). Un objet représente à la fois un savoir déclaratif (base de données locale: les champs) et un savoir procédural (les méthodes). C'est une portion de connaissance possédant son propre contrôle (notion d'encapsulation) et pouvant vivre indépendamment de ses congénères. La connaissance globale est répartie sur les différents objets. L'objet informatique peut correspondre simplement à des agents du monde réel ou à des concepts, des modèles.

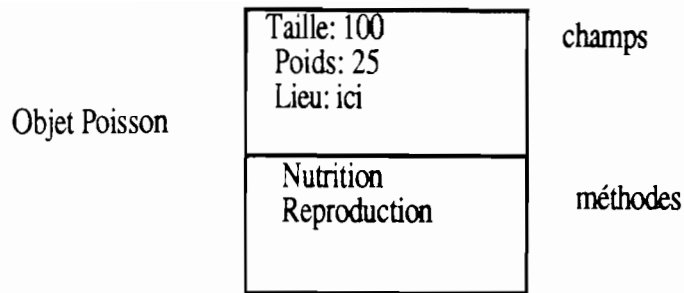


Figure 5.3: Schéma d'un objet

5.2.2 Classe, Instanciation

Les objets ayant une même structure et même comportement sont regroupés dans une classe: c'est une représentation de type abstrait, un moule à partir duquel on fabrique autant d'exemplaires (les instances) que l'on veut. La classe spécifie la structure des objets (fig. 5.4).

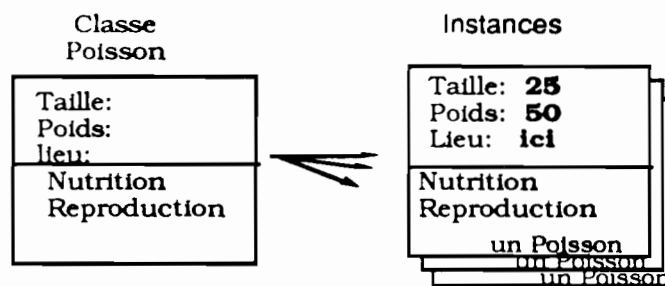


Figure 5.4: Classe et instances

5.2.3 Message, requête dynamique

La relation d'un objet à son environnement passe par l'envoi ou la réception de messages. L'objet confronte le message avec ses méthodes et active celle qui lui correspond (fig. 5.5).

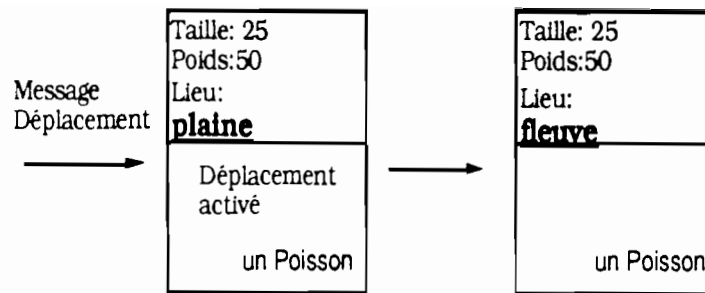


Figure 5.5: Activation d'un objet

Certaines classes prédéfinies du langage Smalltalk offre des protocoles de communication entre objets: il s'agit des dépendances. Dans le champ dependents d'un objet A on met l'adresse de tous les objets qui doivent être prévenus lorsque A le désire. Il suffit que A émette un signal de changement pour que tous ces objets soient automatiquement avertis et activent une méthode appelée update. Cette méthode update peut être programmée pour simuler les conséquences de cette information.

5.2.4 Héritage

Une classe peut être définie comme une sous-classe d'une autre: les instances de la sous-classe héritent alors automatiquement des propriétés de la classe mère (super-classe). Par exemple sans qu'il soit besoin de le définir l'objet Poisson possède les attributs poids et taille, car il hérite de la classe Animal (fig. 5.6).

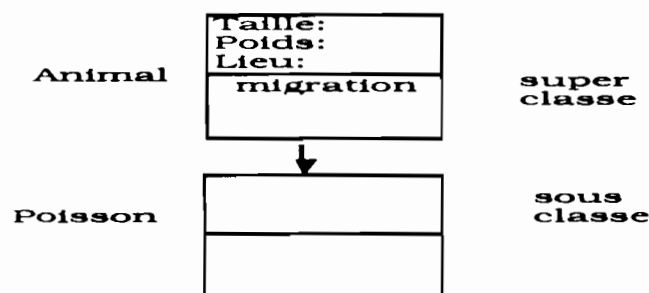


Figure 5.6: Mécanisme d'héritage

5.3 L'ARCHITECTURE INFORMATIQUE: UN BLACKBOARD OBJET POUR LA SIMULATION

Le blackboard que nous avons élaboré présente une architecture inspirée de l'architecture du blackboard ATOME développé au CRIN (Laasri et Maitre, 1988). Cette architecture a été utilisée pour plusieurs applications. Il est actuellement utilisé dans plusieurs laboratoires en France: à l'ONERA-CERT de Toulouse, université Lyon 1, ENST Paris, GERDSM de Toulon, ENSPS de Strasbourg, MATRA Défense. Il est également implanté aux laboratoires GTE aux USA et à DEPFL en Suisse.

Nous décrivons successivement la base partagée, les lots de connaissances et la structure de contrôle qui gère l'organisation du blackboard dans son ensemble.

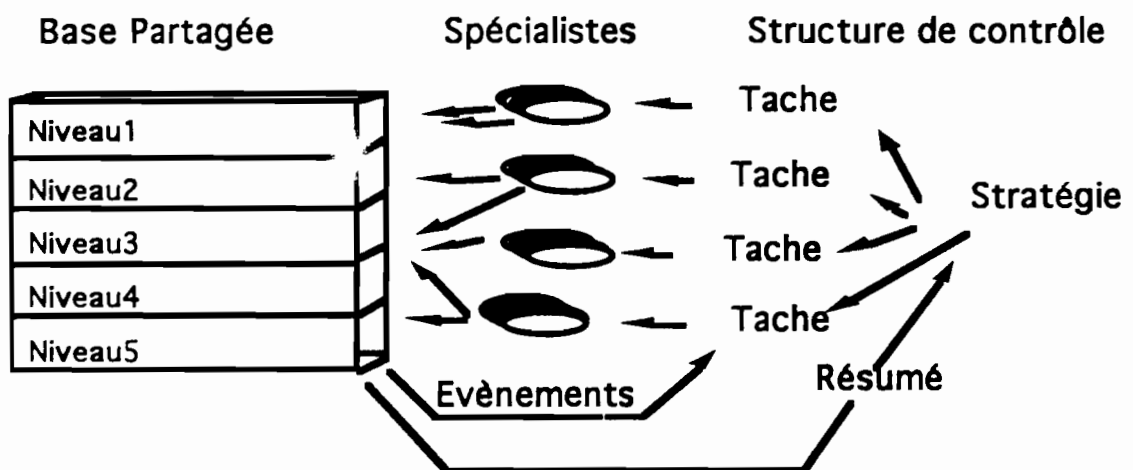


Figure 5.7: Architecture du générateur de simulations environnementales

5.3.1 La base partagée.

La base partagée, ou tableau noir proprement dit, est divisée en plusieurs niveaux. L'objet Blackboard représente uniquement la base partagée, et contient des objets Niveaux. Des objets qui représentent les éléments de la base partagée peuvent être introduits ou extraits de ces niveaux.

5.3.2 Les spécialistes.

Les spécialistes sont des lots de connaissances composés chacun d'un ensemble de règles. Ces règles sont écrites dans un éditeur de texte sous la forme suivante:

Soit x Poisson

Soit y Biotope

Si x lieu = plaine

Si y niveau_eau = descendant

Alors x lieu = chenal

Un interpréteur de règle lit un ensemble de règles ainsi écrites et crée un objet Spécialiste c'est à dire une instance de la classe Spécialiste. Celle-ci contient des instances de la classe Règle.

Un objet Spécialiste (nous employons ici le mot objet X pour désigner une instance de la classe X) est associé à un niveau de la base partagée. Il connaît les objets présents dans le niveau. Quant on fait appel à un objet Spécialiste, on parle d'activation du spécialiste: celui-ci applique aux objets de ce niveau les règles qu'il contient. L'utilisateur spécifie le type de fonctionnement du moteur d'inférence associé à la base de règles: en mode simple le spécialiste déclenche une seule fois la première règle activable, tandis qu'en mode multiple le spécialiste sature la base de règles. L'objet Spécialiste est le seul objet autorisé à écrire dans la base partagée, c'est à dire à la modifier.

5.3.3 La structure de contrôle.

La structure de contrôle est organisée sur deux niveaux hiérarchiques, auxquels correspondent 2 classes d'objets qui sont toutes les deux composées de lots de règles (comme le spécialiste). Son but est de pouvoir gérer l'activation des spécialistes.

L'objet Stratégie accède à un résumé (objet Résumé) qui traduit l'état général de la solution construite dans la base partagée. En fonction de ce résumé il active le second niveau de contrôle, en sélectionnant un objet Tache.

Le fonctionnement d'une tâche est conditionné par les modifications ayant eu lieu dans la base partagée. Au concept de tâche est associé le concept d'événement. Un objet Tache reçoit tout au long de la simulation des signaux (objet Evenement) de la base partagée. Un événement est un objet généré à la suite d'une modification d'un objet de la base partagée. Ces modifications sont prédéterminées au début de la simulation en imposant un filtre sur chaque niveau de la base partagée. L'objet Tache reçoit donc des événements. Quand il est activé, il gère ces événements dans une liste et active des objets Spécialiste en fonction de l'événement reçu.

5.3.4 Aperçu du fonctionnement.

Schématiquement le fonctionnement est le suivant: en fonction du résumé de l'état de la base partagée, la stratégie active une tâche. Celle-ci, en fonction des événements qu'elle a reçu depuis la dernière fois où elle a été activée, active un spécialiste. Ce spécialiste connaît un niveau, transforme les objets qui sont dans ce niveau suivant ses règles. Ces transformations peuvent constituer un événement ou s'intégrer dans le résumé de la stratégie. Une fois que toutes les tâches activées ont elles-mêmes activé les spécialistes, la main revient à la stratégie, et ainsi de suite...

5.4 CONCLUSION.

Le système à base de blackboard et d'objets que nous avons élaboré offre de très grandes possibilités de représentation des connaissances. Son architecture blackboard est inspirée d'ATOME et en conséquence il hérite des qualités que l'on attribue à ce modèle (Laasri et Maitre, 1988):

- **généricité**, plusieurs types de communications sont possibles, plusieurs formalismes sont disponibles pour coder l'information, plusieurs types de déclenchement des règles.
- **efficacité**, par des systèmes de gestion d'événements et de résumés qui limitent les délais de réponse,

- souplesse, les manipulations de connaissances (ajout, retrait, manipulations) sont faciles,
- modularité.

Par ailleurs la base partagée est destinée à contenir des objets divers. Représentés à l'aide du langage Smalltalk ces objets bénéficient de toutes les qualités attribuées au modèle objet. En particulier, il est possible de conférer aux éléments de la base partagée une grande autonomie par exemple en communiquant directement entre eux, sans passer par la structure de contrôle ni les spécialistes. On peut à l'intérieur de la base partagée développer une dynamique autonome, et régler à volonté, la fréquence d'intervention des différents spécialistes. En bref cet outil offre des moyens de représenter la plupart des modèles des systèmes multi-agents, de la fourmilière à la société d'experts.

6 LE SIMULATEUR SIM-DELTA

Nous avons utilisé le générateur de simulations multi-agents pour représenter les connaissances sur l'écosystème deltaïque. Dans ce chapitre nous reprenons l'architecture du simulateur (SIM-DELTA) en définissant dans l'ordre:

- la base partagée: elle comprend l'ensemble des milieux, des agents (poissons, pêcheurs) et des objets observés dans l'écosystème . Elle constitue un SMA que l'on appellera aussi un univers artificiel.
- les spécialistes: ils contiennent les lots de connaissances sur les interactions entre les éléments de la base partagée. Nous présentons les différents lots de règles utilisables. En construisant un scénario de simulation, l'utilisateur fera ensuite un choix parmi ces lots.
- la structure de contrôle: la structure de contrôle gère l'organisation de la connaissance.

Par ailleurs nous avons doté SIM-DELTA d'une interface (fig. 6.1), qui sert en partie à initialiser les différents agents. Nous utilisons des copies d'écrans pour illustrer la création des objets.

Ce chapitre présente donc le matériel mis à disposition par le simulateur. L'utilisateur fait des choix dans ce matériel pour créer un monde artificiel et provoquer des simulations suivant divers scénarios.

6.1 L'UNIVERS ARTIFICIEL (LA BASE PARTAGÉE).

Les niveaux de la base partagée représentent des niveaux géographiques. Nous avons créé les niveaux Village, Champ, Fleuve, Mare, Plaine, Chenal. Dans ces niveaux sont placés différents milieux qui constituent un espace, des entités passives et des agents qui communiquent.

Nous décrivons successivement les différentes classes d'objets informatiques, c'est à dire les moules à partir desquels on pourra créer des instances, qui prendront part à la simulation.

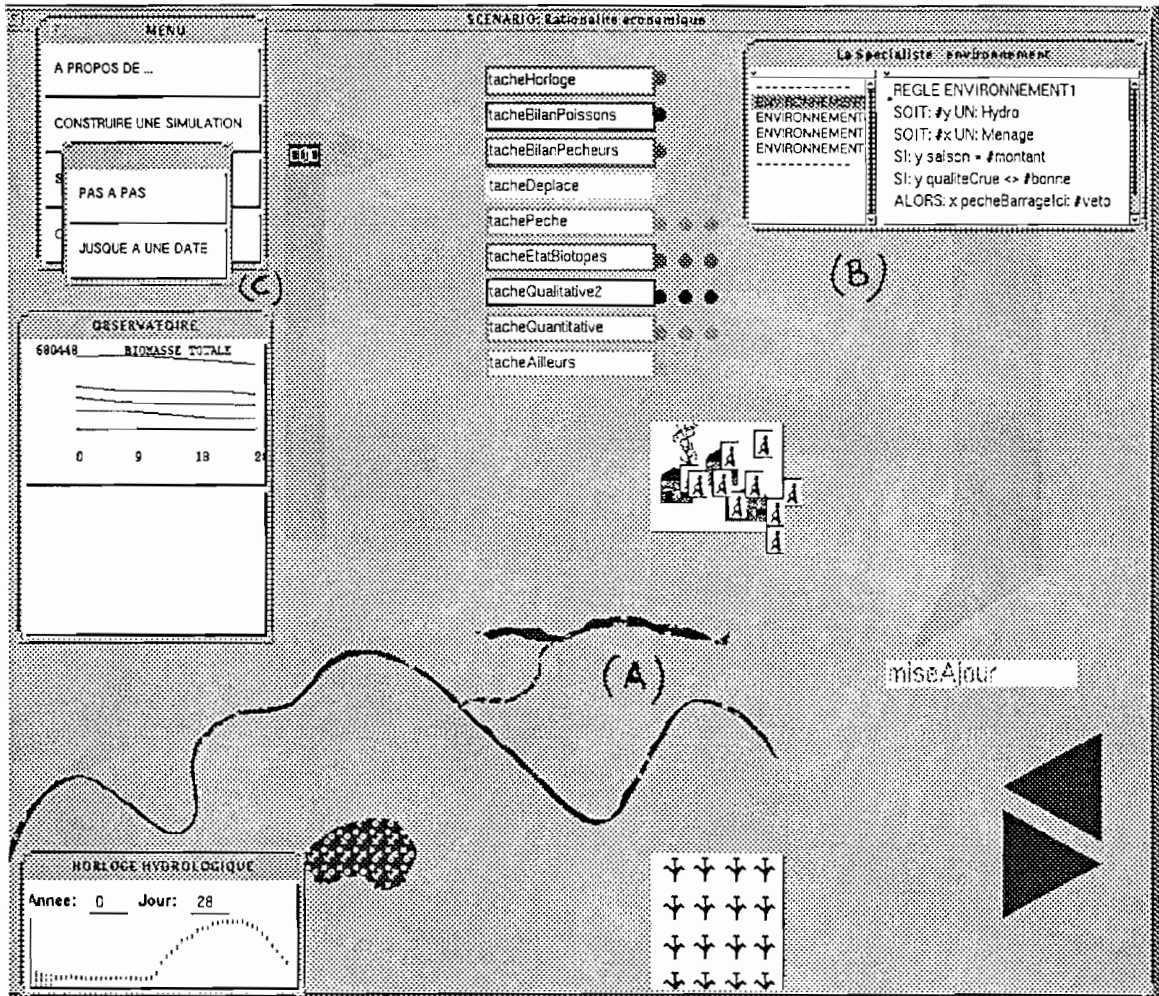


Figure 6.1: Interface de SIM-DELTA (Copie d'écran).

Le bas de l'écran (A) représente l'univers artificiel avec différents milieux, des populations de poissons de différentes espèces représentées par des carrés de différentes couleurs, des pêcheurs qui se trouvent ici dans le village. Le temps est figuré sur la courbe de crue en bas à gauche. Cet univers est animé: la taille des milieux varie avec la crue, les pêcheurs se déplacent, la densité des carrés de couleur évolue. En haut à droite (B), figurent les lots de connaissances (dans les petits ronds de couleurs), et les tâches (dans

les rectangles). Quand on clique sur un rectangle ou sur un rond une fenêtre apparaît en haut à droite. Y sont inscrites les règles. Les flèches ascendantes et descendantes servent pour l'animation: quand un spécialiste est activé, on voit son nom descendre dans la flèche de droite. Il va modifier le monde. Lorsqu'un événement se produit dans la base partagée, un symbole remonte la flèche ascendante et se positionne devant la tâche associée. En haut à gauche (C), figurent les menus, et une fenêtre qui sert pour des observations globales de l'écosystème.

Successivement, pour chacun des types d'agents de la simulation, nous présentons l'analyse, puis la représentation informatique que nous avons effectuée. Nous présentons d'abord les objets (entités passives d'un SMA) puis les différents milieux qui composent l'espace. Nous présentons ensuite les agents: les poissons et les pêcheurs. Enfin nous présentons divers objets qui ne sont pas toujours utilisés dans les simulations.

6.1.1 Les objets qui représentent le temps.

La gestion du temps est effectuée par un objet Calendrier. Il n'y a qu'une instance de la classe Calendrier.

A) Attributs.

numJourAbsolu: nombre de jours écoulés depuis l'origine.

pasDeTemps: pas de temps de la simulation. Nous avons ici choisi un pas de temps égal à une semaine.

B) Méthodes.

Lorsque l'objet est activé, la principale méthode consiste à mettre à jour le champ numJourAbsolu.

6.1.2 Les objets qui représentent l'environnement climatique.

Les conditions hydrologiques constituent la véritable horloge naturelle de l'écosystème: le niveau de l'eau et la pluie sont la source des changements. Nous avons créé une classe Hydro, dont il n'existe qu'une instance, qui représente cette horloge hydrologique. L'évolution de la

hauteur d'eau, ainsi que les différents événements hydrologiques sont déterminés par l'utilisateur au moyen d'une interface appropriée (fig. 6.2). On dessine une évolution de la forme de la courbe de hauteur d'eau au cours des 52 semaines de l'année, et on impose des dates pour certains événements qualitatifs:

- les dates de début de chaque saison. L'année est composée de quatre saisons (bas, montant, haut, descendant) qui correspondent donc à des états hydrologiques.
- les dates pour d'éventuels événements pluviométriques, par exemple la date des premières pluies, la date (ultérieure) où peut être évaluée la qualité de la pluie (bonne, mauvaise, irrégulière, etc....).

De cette façon l'utilisateur impose au début de la simulation un scénario climatique.

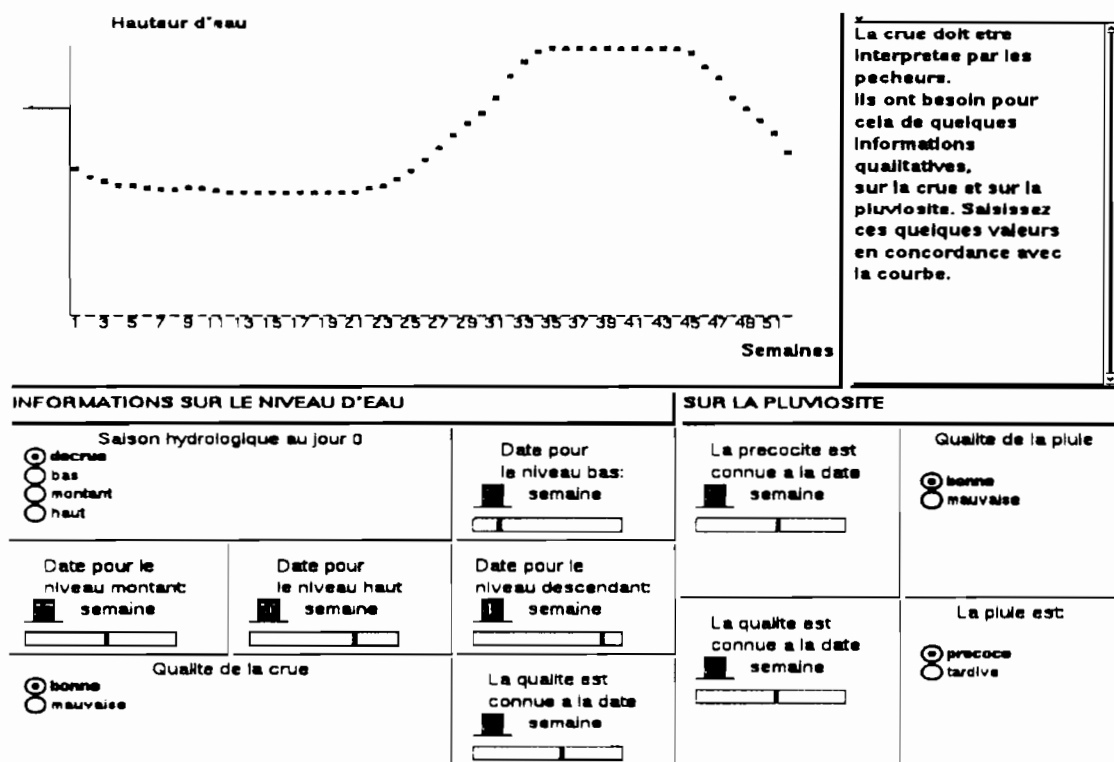


Figure 6.2: Interface de saisie et modification de l'objet Hydro

A) Attributs.

hauteur: c'est une hauteur sur une échelle verticale, le 0 étant le point le plus bas de l'écosystème.

saison: c'est la valeur de la saison (descendant, montant, haut, bas).

qualitePluie: c'est la valeur de la pluie (bonne, mauvaise ...).

B) Méthodes.

update: quand l'objet Hydro est informé que la date a changé il se met à jour. Il change sa hauteur d'eau en respectant la courbe prédéterminée, et si la date correspond à un événement qualitatif, il met à jour cet événement en changeant par exemple l'attribut saison ou qualitePluie.

6.1.3 Les objets qui représentent l'espace

L'hydrosystème est composé du lit mineur dans lequel s'écoule le fleuve et de ses extensions temporaires (plaine inondable) ou permanentes (lacs, bras de fleuve, mare). Il existe donc différents types de milieux. Au plus fort de la crue, l'eau occupe tout l'espace inondable puis se retire en laissant des biotopes isolés qui s'assèchent progressivement, certains restant inondés jusqu'à la crue suivante.

Un milieu n'est pas seulement un fragment d'espace, c'est aussi un lieu où se développe une vie correspondant à différents niveaux trophiques. Pour les poissons, un milieu est d'abord un lieu d'accueil qui leur offre une quantité de nourriture. Cette quantité varie au cours de l'année. Suivant la synthèse proposée par Lauzanne (Lauzanne, 1988), et pour représenter la diversité des sources de nourriture possibles, nous définissons trois catégories de nourriture:

- les petites particules qui correspondent au plancton et aux microphytes,
- les grosses particules, qui englobent les détritiques, macrophytes et invertébrés (annélides, mollusques, crustacés, insectes), donc des éléments majoritairement benthiques,
- les poissons, qui constituent une ressource alimentaire prédominante pour les poissons ichtyophages.

Les milieux sont représentés à travers l'objet Biotope. Cet objet est initialisé à l'aide d'une fiche (fig. 6.3).

A) Attributs.

hMin: cet attribut représente la hauteur d'eau nécessaire pour l'inondation du biotope.

hauteur: c'est la différence entre le niveau de l'eau et hMin.

type: plusieurs types peuvent être définis. Le besoin du type apparaîtra pour les migrations de poissons. Le type est une valeur comprise dans l'ensemble (fleuve, mare, plaine, chenal).

courbeKTemps: cet attribut contient une courbe de l'évolution de la quantité de nourriture offerte (52 valeurs pour l'année). Le milieu offre trois types de nourriture: des microparticules et des macroparticules dont les quantités sont fixées par des courbes imposées (c'est une contrainte: il n'y a pas de simulation dynamique des niveaux trophiques inférieurs aux poissons), et les poissons eux mêmes (qui sont la proie des poissons ichtyophages) et dont la dynamique est produite par la simulation.

biotopesVoisins: cet attribut contient les liens avec les autres biotopes. Ces liens sont représentés par un objet Vanne qui enregistre les dates de connexions entre les biotopes.

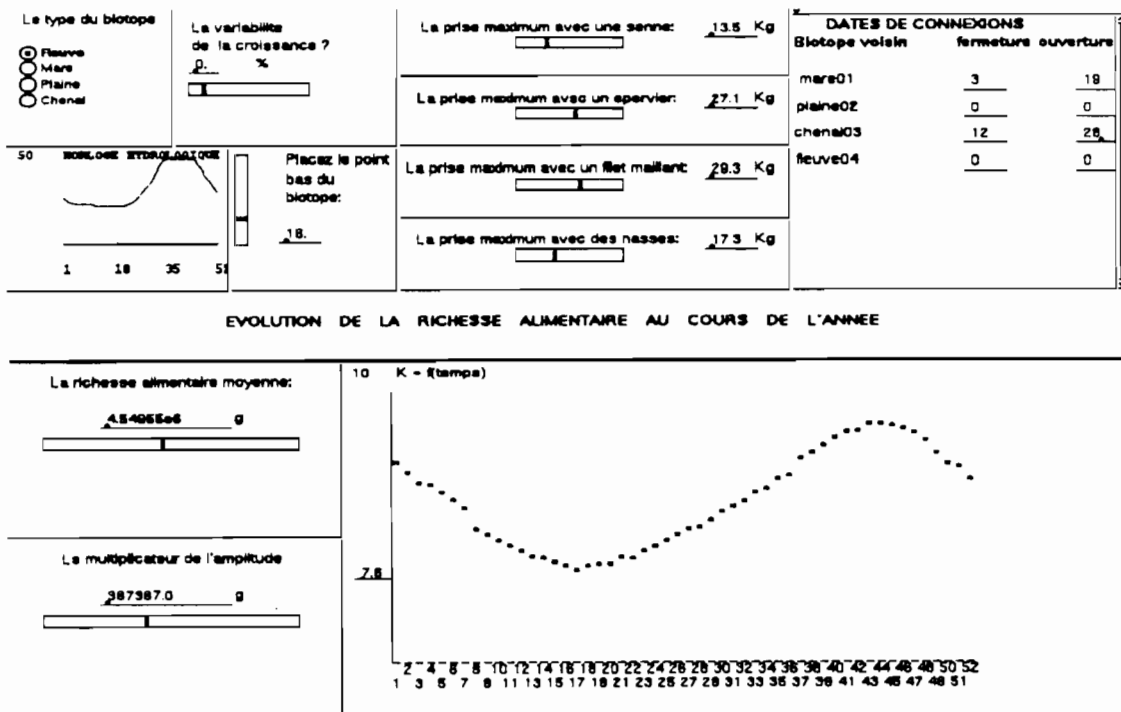


Figure 6.3: Interface de création d'un objet Biotope

Par ailleurs, l'objet **Biotope** comprend plusieurs attributs qui sont des tableaux de stockage. En effet, pour pouvoir analyser les résultats, il est indispensable de conserver les états successifs des populations de poissons. L'objet **Biotope** est utilisé pour les stockages de tableaux sur les poissons qu'il accueille (nombre de poissons total et par espèces, biomasse totale et par espèce, captures totales, par espèces et par taille ...).

B) Méthodes.

Le biotope est très utilisé pour faire des calculs divers sur les populations de poissons. La plupart des méthodes consistent donc à compter; quelques calculs issus de ces comptages sont plus importants que d'autres et seront nécessaires pour comprendre la dynamique des populations de poissons.

disponibilitésParticules: lorsqu'elle est activée, cette méthode renvoie le rapport entre la quantité de nourriture disponible Q d'un niveau trophique donné (microparticules, macroparticules) et la quantité de poissons qui désirent se nourrir sur ce niveau trophique D . (Ex: il y a 10 kg de microparticules, 3 poissons de 2kg sont demandeurs, le biotope renvoie la valeur $Q/D = 0,6$).

disponibilitésProies: cette méthode fait le même calcul que la précédente en comptant le nombre de proies que le biotope accueille par classes de tailles (de 4 à 8cm, de 8 à 16 cm, de 16 à 32 cm, de 32 à 64 cm, + de 64 cm) et en le divisant par la biomasse de prédateurs demandeuse.

priseAvecEngin: cette méthode renvoie la quantité de poissons prélevée avec un engin donné. Le pouvoir de capture des engins est différent suivant les milieux. L'utilisation d'un engin donne un résultat qui est fonction:

- d'une densité de poissons calculée par le rapport entre la biomasse présente et l'offre de nourriture (qui représente l'état de la crue),
- d'un coefficient propre à l'engin qui représente une sélectivité.

ImposerMortalité: au cours d'un pas de temps une mortalité par pêche ou par prédation peut avoir lieu. Cette mortalité qui peut être rapportée à des classes de taille

particulière est comptabilisée en biomasse dans l'objet biotope. Lorsque la méthode imposeMortalité est activée, elle fait disparaître des poissons. Une part de la mortalité totale est imposée à chaque groupe en fonction de sa contribution à la biomasse totale du milieu.

6.1.4 Les agents qui représentent la ressource.

Il est difficilement concevable de représenter la dynamique de toutes les espèces présentes dans le delta avec leurs caractéristiques biologiques. Pour mieux décrire la diversité les spécialistes des hydrosystèmes sahéliens parlent de stratégies adaptatives. *"La stratégie adaptative doit donc être comprise comme le bagage génétique acquis au cours de l'évolution permettant des adaptations immédiates aux variations du milieu. (...) On retrouve dans la faune soudanienne, comme dans beaucoup d'autres faunes ichthyologiques deux grands types de stratégies adaptatives. La première est basée sur l'exploitation par les poissons de la variabilité prévisible de l'environnement, c'est habituellement celle des migrateurs. Le second type de stratégie est basé sur une exploitation opportuniste des ressources présentes"* (Quensière, 1990). A travers l'étude de quelques espèces seulement, représentatives des stratégies possibles, on peut construire des schémas, des modèles concernant les mécanismes de migration, de reproduction, et les régimes alimentaires.

Nous décrivons tout d'abord ces modèles écologiques avant de se pencher sur la représentation des connaissances.

6.1.4.1 Modèles.

Régimes alimentaires, consommation et croissance

Le régime alimentaire des poissons se répartit sur les trois catégories de nourriture que nous avons décrits pour les milieux.

Deux facteurs principaux rentrent en compte pour déterminer le régime alimentaire: l'espèce et la taille du poisson. Lauzanne (Lauzanne, 1988) remarque que si certaines espèces de poissons se nourrissent à des niveaux trophiques particuliers et constants, la plupart ont

un spectre alimentaire étendu. Par ailleurs les régimes alimentaires des poissons évoluent en fonction de l'âge, les petits poissons se nourrissant tous de petites particules avant de se mettre au régime caractéristique de l'espèce.

A partir des trois types de nourriture (petites particules, grosses particules et poissons) des régimes alimentaires sont définis de façon souple. On conviendra par exemple que les poissons de moins de 80 mm sont microphages stricts (c.à.d. consommateurs de petites particules), quelle que soit l'espèce. Au delà de cette taille, il existe différents types de régimes issus de combinaisons en proportion variable de deux types de nourriture (microphage/macrophage, prédateur/macrophage). Un poisson ichtyophage ne prélève pas des proies de taille quelconque (Rice et Miller, 1993). A un poisson prédateur de taille donnée est associé un intervalle de tailles cibles. Les gammes accessibles sont définies de la façon suivante en fonction de la taille du poisson consommateur:

Prédateur de 8 a 16 cm: Proies de 4 à 8 cm

Prédateur de 16 a 32 cm: Proies de 4 à 16 cm

Prédateur de 32 a 64 cm: Proies de 8 à 32 cm

La consommation (CONSOM) d'un individu pendant un intervalle de temps augmente d'une part avec son poids W , qui, affecté d'un exposant allométrique m , fixe le niveau de satiété (i.e. la consommation potentielle), d'autre part avec la quantité (Q) de nourriture intéressante pour lui dans le dit milieu, évaluée en tenant compte de ses coefficients de préférence alimentaire. Par contre, la consommation est inversement proportionnelle à la demande concurrente (D) exercée sur ce même spectre de nourriture par les autres poissons présents dans le même milieu. Le rapport Q/D exprime donc une sorte de "disponibilité relative" DISP. Ceci permet au modèle d'exprimer de façon très naturelle la compétition pour la ressource. On écrira le modèle:

$$\text{CONSOM} = A(1 - \exp(-k \cdot \text{DISP})) W^m \quad (\text{eq.6.1})$$

avec:

W : poids de l'individu

DISP: disponibilité relative de nourriture dans le milieu (=Q/D)

dans son environnement. Durant les 6 premières semaines de sa vie, le poisson double son poids chaque semaine.

Migration

Deux modalités de mécanismes migratoires sont envisagées. La première (M1) suit de façon rigide le calendrier hydraulique: montée dans les plaines à la crue, retour au fleuve à la décrue. La seconde (M2) est liée à la satisfaction alimentaire: lorsque, dans un milieu donné, les poissons ont un bilan de croissance positif, ils restent sur place. Sinon, une fraction importante des effectifs gagne l'autre milieu (en proportion de 1/3 par semaine), à condition bien sûr que le passage entre les deux milieux soit possible (connexion hydraulique existante). Cette proportion a été estimée au vu du temps total de migration observé (Benech et al., 1993) qui s'établit à environ 6 semaines. On a voulu représenter ainsi une capacité de fuite hors des zones saturées. La migration d'une espèce donnée relèvera de l'un ou de l'autre de ces deux mécanismes, et ce de façon exclusive.

Mortalité naturelle

La mortalité naturelle (hors pêche et prédation qui sont traitées ailleurs) est caractérisée par un impact inversement proportionnel à la taille des individus:

$$\text{Mortalité (proportion de morts occurrant en un pas de temps)} = M * 1/L \quad (\text{eq.6.3})$$

où L est la longueur du poisson, M un paramètre contrôlant le niveau global de la mortalité.

6.1.4.2 Représentation des connaissances.

Le simulateur propose une fiche d'initialisation pour créer une espèce. Sur cette fiche l'utilisateur rentre:

- le coefficient de préférence alimentaire et les paramètres du modèle de croissance individuel,
- le poids des oeufs discrétisé en deux modalités (gros= 0,1g, petit= 0,05g), l'âge minimum de reproduction, la taille minimum de reproduction, la durée de latence entre

deux reproductions, la fécondité spécifique, la courbe de fécondité en fonction de la taille et la probabilité de pondre dans le cycle annuel de 52 semaines,

- le paramètre du modèle de mortalité naturelle en fonction de la taille,
- le type de mécanisme migratoire (opportuniste ou en fonction de la crue).
- les paramètres de la relation taille-poids.

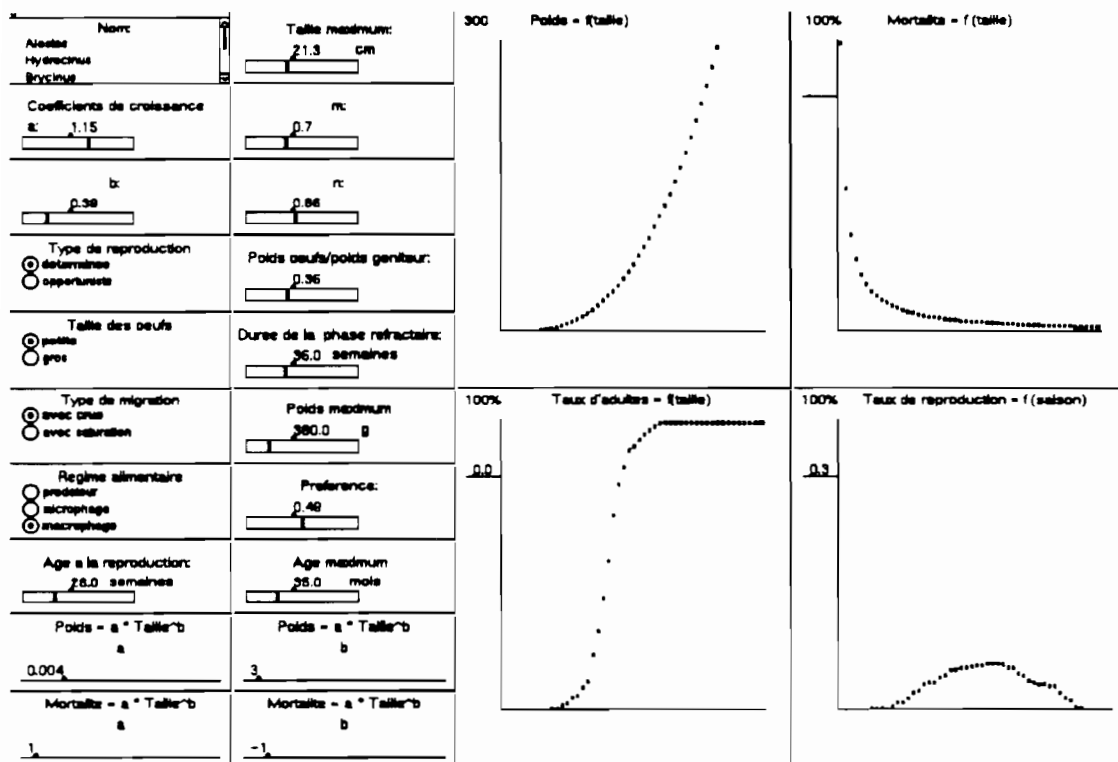


Figure 6.4: Interface de saisie d'une espèce de poisson

La ressource est représentée par trois objets différents: Espèce, Cohorte et Groupe.

Une instance de la classe Espèce est créée lorsque l'utilisateur le désire. Cet objet correspond à une base de données qui contient toutes les informations sur l'espèce. Il y a donc un attribut par paramètre (fig. 6.4).

Pour simuler des poissons artificiels nous avons défini les classes Cohorte et Groupe. La représentation idéale de l'agent engagé dans la simulation serait le poisson lui-même; malheureusement les ordinateurs ne peuvent représenter l'évolution parallèle de millions

d'objets. Il fallait donc trouver un objet plus agrégé: la composante du système à laquelle s'appliqueront les connaissances est le "groupe".

Lorsqu'un groupe de poissons se reproduit, est générée une nouvelle instance de classe Cohorte. Cet objet représente ainsi les poissons de la même espèce nés au même moment au même endroit. L'unité de base aurait pu être la cohorte mais l'espace intervient dans nos simulations et des membres d'une même cohorte peuvent être localisés dans des biotopes différents en fonction des migrations passées. C'est pour conserver les effets de ces différentes histoires locales que nous avons choisi de définir la classe Groupe, qui correspond à une partie de cohorte localisée.

A) Attributs de l'objet Cohorte.

espèce: cet attribut permet d'accéder aux données de l'espèce.

âge: l'âge de tous les poissons de la cohorte.

lesGroupes: l'ensemble de tous les objets Groupe qui font partie de cette cohorte.

B) Méthodes de l'objet Cohorte.

Toutes les méthodes intéressantes sont reportées dans l'objet Groupe.

C) Attributs de l'objet Groupe.

poids: cet attribut contient un tableau (poids, effectif). On obtient ainsi des classes de poids exprimées en 1/10ème de gramme.

cohorte: cet attribut fait référence à la Cohorte dont il fait partie.

lieu: le biotope dans lequel le groupe se trouve.

satisfaction: est un attribut booléen, qui indique l'état de satisfaction du Groupe.

aPondu: cet attribut indique le temps écoulé depuis la dernière ponte.

D) Méthodes de l'objet Groupe.

Les méthodes de l'objet Groupe correspondent aux différents processus:

mortalitéSizeDependent applique sur chaque classe de poids une probabilité de disparition.

semaineReprod examine si toutes les conditions nécessaires à la reproduction du groupe sont réunies. Si tel est le cas, le groupe est en phase de reproduction.

grossissementLarve: pour les groupes qui ont moins de 6 semaines, le poids est multiplié par 2.

grossissement: cette méthode calcule un nouveau poids suivant un modèle (équation 6.2). Séquentiellement les calculs sont les suivants. Pour calculer la consommation le Groupe demande à l'objet Biotope la disponibilité en nourriture: microparticules si le poisson fait moins de 8 cm ou bien un rapport entre 2 types de nourriture, prédateur/macrophage, microphage/macrophage. Si le groupe est en phase de reproduction, on retire au poisson un poids correspondant à la fécondité spécifique. Est créée à cette occasion une nouvelle cohorte (voir méthode nouvelleCohorte). Si le groupe correspond à une espèce prédatrice, on informe le biotope de la quantité de poisson ingérée (produit de la préférence alimentaire et de la consommation). Il est possible de représenter une variabilité de la croissance, en multipliant le nouveau poids par un coefficient tiré dans la distribution d'une loi normale.

nouvelleCohorte: chaque fois qu'un groupe se reproduit il émet des oeufs. L'ensemble de ces oeufs forme un nouveau groupe, une nouvelle cohorte. Les cohortes de la même espèce qui naissent au même endroit se regroupent.

migre: deux cas de figures sont programmés suivant que la migration s'effectue avec la crue ou en fonction d'une satisfaction alimentaire. Dans le premier cas l'espèce migre avec la crue: si l'eau monte, les poissons passent des biotopes de type fleuve vers les biotopes de type chenal, plaine ou mare adjacents; ils passent des biotopes de type chenal vers les biotopes de type plaine ou mare adjacents. A la décrue le sens de migration est inversé. Dans le deuxième cas l'espèce migre en fonction d'une satisfaction alimentaire, le groupe se déplace vers les milieux adjacents quels que soient leurs types. Dans les deux cas 1/3 du groupe migre à chaque pas de temps. Lorsqu'une partie de groupe arrive dans un milieu qui contient déjà un groupe de la

même cohorte, il y a agrégation de façon à ce que la cohorte n'ait qu'un groupe par biotope.

6.1.5 Les agents qui représentent les pêcheurs.

6.1.5.1 Analyse.

Il est difficile de résumer en quelques lignes l'analyse effectuée pour parvenir à une représentation du pêcheur. Il y a suivant les disciplines différents points de vue sur l'objet d'étude: unité de production, unité de commercialisation, unité de pêche. Un des premiers résultats de l'équipe DCN a consisté à adopter le ménage où la "marmite" (les gens qui mangent ensemble) comme objet d'étude et noeud de discussion interdisciplinaire. Ainsi le ménage est vu à travers différentes caractéristiques, comme sa taille, son ancienneté d'installation, ses engins, le nombre d'individus, ses finances, son ethnie, etc....

L'agent que nous représentons c'est l'individu, car c'est par l'individu que passe l'interaction avec la ressource. Cependant ce pêcheur est intégré au sein du ménage dont il fait partie avec des enfants qui peuvent l'aider à pêcher, des femmes ou des enfants qui mènent des activités de commercialisation, de conditionnement du poisson, etc.... L'objet s'appelle ménage, car il intègre toute cette activité, toutes ces dépenses, mais il n'y a pas d'actes de pêches simultanés. La pluriactivité halieutique n'est pas représentée au sein d'un ménage. Par contre il est tout à fait possible de rassembler plusieurs objets ménages pour simuler la coordination de leurs activités.

Comment représenter le ménage en tant que centre de décision? La décision que nous voulons simuler consiste à choisir une activité dans un environnement qui fluctue.

Nous avons considéré que le ménage, pour réfléchir, construit son futur, c'est à dire se fait une représentation de son environnement au sens large (écologique, économique et social). Il réfléchit à partir de l'image qu'il se fait de ses différentes activités. Les modèles du processus de prise de décision se rapprochent de cette conception. Ainsi, le modèle de H.Simon (Simon, 1991; Le Moigne,1993) relie les intentions et les perceptions du contexte.

Par ailleurs on trouve chez les anthropologues cette idée d'une relation à l'environnement construite. "Les droits sont donc attribués sur des pêcheries, c'est à dire sur l'exploitation de sous-milieux donnés, à des moments donnés du cycle, avec des engins donnés. Ces pêcheries ne correspondent pas au sens strict à des biotopes (un lieu de barrage, un vallonnement du fond fluvial permettant d'installer tel dispositif de piégeage -une fois qu'on l'a inventé- ne sont pas des biotopes). Ces pêcheries sont définies par le rapport intime entre le lieu, le type technique et l'époque du prélèvement, par l'idée qu'on a eu de cibler telles espèces en ce lieu en fonction d'un dispositif inventé. On a proposé de définir le système comme une répartition de technotopes, la notion désignant le rapport décrit entre temporalité, spatialité et imaginaire technologique." (Fay, 1990).

Le ménage décide en fonction de la représentation qu'il se fait de son environnement. Il y a d'un côté l'espace "réel", de l'autre côté l'espace construit par l'individu qui est un espace physique, un espace-ressource, un espace social. C'est en fonction de cet espace mental, de la carte dont il dispose que le ménage décide.

6.1.5.2 Représentation des connaissances.

Nous commençons par cette représentation mentale de l'environnement. Si le Ménage se fait une représentation d'une activité, il y a au total autant d'images que d'activités possibles. Puis le ménage compare ces images entre elles. Nous avons créé une classe Technotope. Une instance de cette classe correspond donc à la représentation d'une activité, c'est à dire d'un couple lieu-engin pour une saison donnée (fig. 6.5).

A) Attributs de l'objet Technotope.

nom: c'est le nom de l'activité, c'est à dire le couple lieu-engin (ex: MareEpervier)

début: date prévue du début d'activité.

fin: c'est le moment où l'activité prendra fin.

recette : recette attendue.

coût: coût estimé de cette activité.

Influence: c'est une collection dans laquelle peuvent être écrits des informations qualitatives (Ex: oui, non, veto)

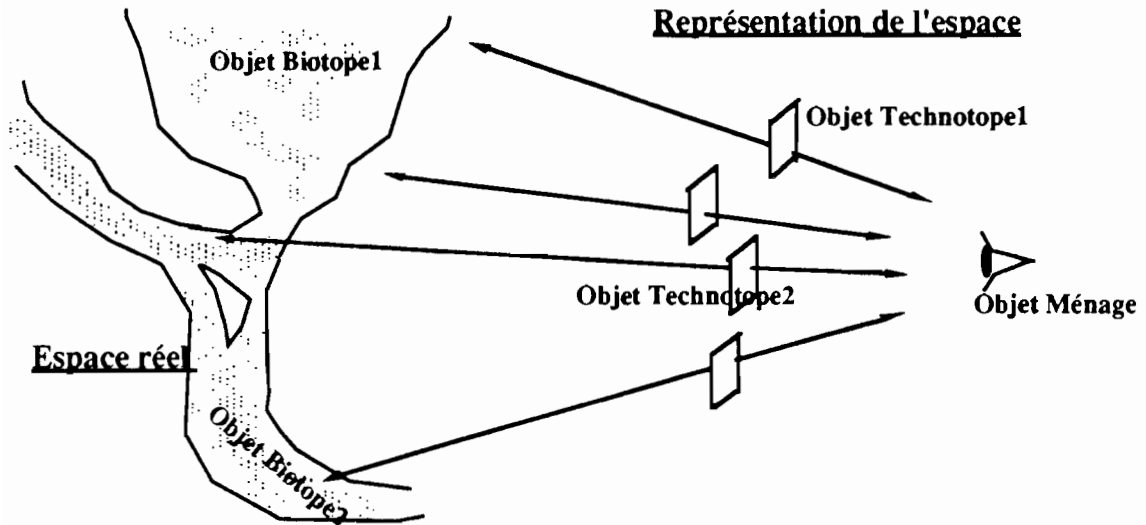


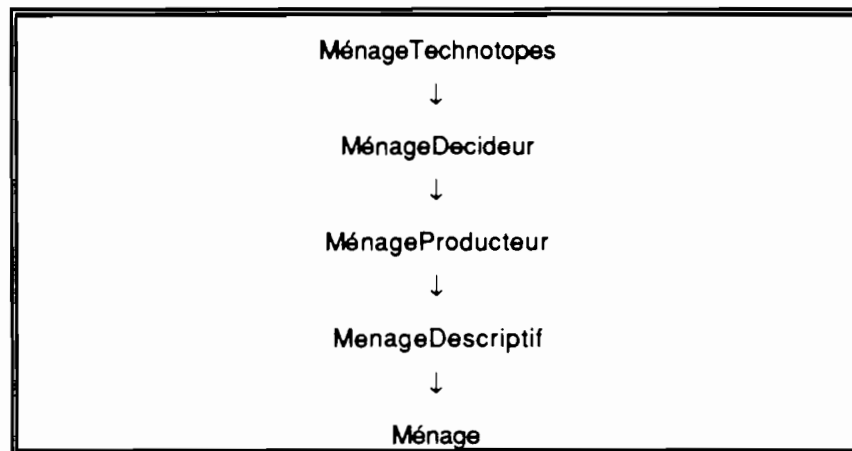
Figure 6.5: Espace réel et perception d'un ensemble de technotopes

Ainsi l'objet correspond à une image d'une activité que l'on construit sous forme de fiche sur laquelle on peut écrire des informations. Ces informations peuvent être quantitatives, elles sont alors exprimées en argent, à charge de l'utilisateur de transformer des informations en coûts et en recettes (Ex: coûts d'opportunité, de non opportunités). Les informations peuvent aussi être exprimées sous forme qualitative dans l'attribut influence. On notera les informations qui jouent en faveur (oui) ou en défaveur (non) de cette activité, on indiquera si des informations interdisent de construire cette image (veto).

L'objet Technotope correspond à un objet mental (Changeux, 1983; Biennenstock, 1991). Au moyen d'un ensemble d'objets Technotopes, on représente la carte que le ménage se fait de son environnement. Il existe donc un espace dans la tête du pêcheur. Un débat important dans le domaine des sciences cognitives a pour thème les mécanismes de perception de la réalité, les modèles mentaux ou cartes mentales qui se construisent dans le cerveau et leurs fondements neurologiques (Changeux, 1983; Jonhson-Laird, 1992; Cavazza et al., 1992). Ici

nous reprenons simplement l'idée d'objet mental pour souligner le fait que les individus se font une représentation du monde.

Pour représenter le ménage de pêcheurs nous avons utilisé le mécanisme d'héritage des langages orientés objet en construisant différents objets ménages comme différents points de vue qui héritent les uns des autres. Au bout de la branche d'héritage nous avons défini un objet **Ménage** qui représente la somme de points de vue. Le graphe d'héritage est:



A) Méthodes de l'objet **MenageTechnotopes**.

lesTechnotopes: cet attribut est un ensemble de **Technotopes** correspondant aux différentes activités possibles.

B) Méthodes de l'objet **MenageTechnotopes**.

Les méthodes ne servent que pour accéder aux objets **Technotopes**.

L'objet **MénageDecideur** est l'objet qui manipule les objets **Technotopes**. Il écrit dessus, les compare, etc.... C'est lui qui est impliqué dans la phase de prise de décision.

C) Attributs de l'objet **MenageDecideur**.

listeTriée: cet attribut est destiné à recevoir la liste des objets **Technotopes** triés lors du processus de décision.

choixTact: cet attribut enregistre le résultat du processus de prise de décision.

accointances: cet attribut correspond à l'adresse d'autres ménages. Chaque ménage peut avoir une perception de l'autre. Par exemple, le ménage X est le leader de mon groupe.

attitudeSociale: le ménage peut avoir différentes attitudes par rapport aux autres (décision individuelle, mimétisme, répulsion).

attitudeRisque: le ménage peut avoir différentes attitudes vis à vis du risque.

D) Méthodes de l'objet MenageDecideur.

Les méthodes sont nombreuses et certaines sont fondamentales pour le processus de prise de décision.

triActivités: cette méthode compare tous les objets Technotopes et les classe dans un ordre décroissant de bénéfice espéré.

choixTactique: cette méthode choisit l'activité la plus rentable, à condition qu'il n'y ait pas de veto.

decisionInteractive: cette méthode conduit le choix des ménages qui agissent par mimétisme ou par répulsion. Chaque ménage peut consulter ses accointances pour imiter leurs comportements ou au contraire pour faire autre chose. De cette façon on peut représenter la pluriactivité au sein d'un groupe.

ouvreUrnes: cette méthode fait la différence pour chaque objet Technotope entre le nombre de oui et de non que contient l'attribut influences puis choisit l'activité qui présente le meilleur résultat.

faisTonMarche: cette méthode tire les conséquences du choix en achetant les engins prévus et en mettant à jour quelques variables.

L'objet MenageProducteur correspond au volet action.

E) Attributs de l'objet MenageProducteur.

engins: cet attribut comprend une collection d'objets Engin.

prise: le résultat de la pêche.

pue: cet attribut stocke tous les résultats de pêche passés en fonction du milieu, de l'engin, de la saison. C'est la mémoire du pêcheur.

reserveGrain: cet attribut est prévu pour stocker les récoltes.

bilan: représente la quantité d'argent disponible.

F) Méthodes de l'objet **MénageProducteur**.

pueMilleuPrevue: **engln**: cette méthode interroge l'attribut **pue** qui stocke tous les résultats passés, de façon à estimer la prise que le pêcheur peut espérer en adoptant cette activité. La méthode prend comme référence les 6 dernières pêches. En fonction de l'attitude face au risque la méthode pourra considérer différentes valeurs de cette distribution. Si c'est la première fois que le ménage vient pêcher dans l'année la méthode prend en compte la moyenne de tous les résultats de la catégorie.

depenseAlimentaire: cette méthode calcule la dépense effectuée à chaque pas de temps par le ménage pour les denrées alimentaires.

G) Attributs de l'objet **MénageDescriptif**.

ethnie: c'est la représentation du groupe social auquel appartient le ménage.

nIndividus: représente le nombre d'individus du ménage.

origine: le ménage peut être allochtone ou autochtone.

H) Méthodes de l'objet **MénageDescriptif**.

Les méthodes ne servent qu'à accéder à ces attributs.

L'objet **Ménage** enfin ne comprend aucun attribut. Il hérite de tous les attributs et méthodes des autres objets **Ménage**. L'objet **Ménage** comporte une méthode d'initialisation des attributs. Pour préparer des simulations l'utilisateur crée une population de pêcheurs. Les connaissances sur les attributs des pêcheurs correspondent à des distributions (Ex: 75% bozo, 25% somono; la taille des ménages est une loi normale de moyenne 7 et d'écart-type 2; 48% des ménages ont un filet maillant). Pour cela nous avons créé une interface (fig. 6.6) qui permet de définir certains attributs suivant différentes modalités.

- la valeur est la même pour tout les pêcheurs: on rentre la valeur.
- il existe une distribution de l'attribut: on rentre les fréquences cumulées.
- il existe une distribution conditionnelle à un autre attribut: on rentre un tableau.

- pour l'attribut engin, qui est un autre type d'objet, on peut rentrer des distributions, conditionnelles ou pas.

Nombre de menages de pecheurs	LES ATTRIBUTS	PRINCIPE D'INITIALISATION	SAISIE								
	36.0	ACCES A LA MARE	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">La valeur est egale pour tous les pecheurs</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">La valeur suit une distribution</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">La valeur suit une loi normale</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">La valeur depend de la valeur d'un autre attribut</div>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>valeur</th> <th>frequence cumulee</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>bazo</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>somono</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>rmaibe</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table>	valeur	frequence cumulee	bazo	60	somono	90	rmaibe
valeur	frequence cumulee										
bazo	60										
somono	90										
rmaibe	100										
	ACCES A LA PLAIN										
	ACCES AU CHENAL										
	FACE AU RISQUE										
	ENGINS										
	ETHNIE										
	CREDIT										
	PROXEMIQUE										
	TAILLE DU MENAGE										
	ORIGINE										

Figure 6.6: Interface de création statistique d'une population de pêcheurs

6.1.6 Agents et objets divers.

Le ménage possède des engins. Nous avons créé une classe Engin qui comprend l'attribut **nom** et l'attribut **age**. Le nom permettra de définir la prise, l'âge permettra de remplacer l'engin si sa durée de vie est dépassée.

Nous avons représenté deux autres objets pour représenter le monde artificiel, les objets Génie et Marché. Ces deux objets sont des intermédiaires de la collectivité, de la société. Ils sont l'incarnation d'un ordre global et exercent un rôle de régulation. L'interaction entre l'objet Ménage et l'un de ces deux objets, selon que la logique est économique ou sociale, matérialise l'interaction entre le local et le global, entre l'individuel et le collectif.

L'objet Génie possède un attribut **lieu** qui est l'adresse du biotope dans lequel il se trouve. C'est en relation avec l'objet génie que se définit l'accès à l'eau dans les systèmes de pêche traditionnels. S'il est bien un agent du monde observé, il n'a jamais été utilisé. Nous en expliquerons les raisons dans le chapitre 8 .

L'objet **Marché** comprend une liste de prix pour chaque engin, ainsi que le prix auquel le poisson est acheté.

6.2 LES LOTS DE CONNAISSANCE (LES SPÉCIALISTES).

L'objectif est d'élaborer un simulateur qui permette de simuler en même temps la dynamique de populations de poissons et la prise de décision des pêcheurs. Les lots de connaissances sont donc élaborés en conséquence. Nous avons élaboré des lots de connaissances qui se classent en deux groupes:

- ① connaissances en hydrologie et écologie,
- ② connaissances sur la prise de décision des pêcheurs.

6.2.1 Hydrologie-écologie.

Nous avons choisi de ne pas représenter la dynamique hydrologique et écologique à l'aide de règles. C'est à l'aide des méthodes des objets **Biotope**, **Groupe**, **Hydro** que sont représentées les connaissances sur la dynamique du système. En effet, de nombreux processus réclament des calculs numériques, ce pourquoi les règles sont inadaptées, et concernent un nombre d'objets très grand (plus de 1000 groupes de poissons) dont le traitement par des règles serait lent. D'autre part, le modèle de production ichthyologique était surtout perçu comme un support dynamique pour la prise de décision des pêcheurs.

Pour toutes ces raisons les interactions entre les objets qui concernent la ressource sont animées de la façon suivante (fig. 6.7). A chaque pas de temps une règle du spécialiste **mise à jour** indique au **Calendrier** que la semaine change.

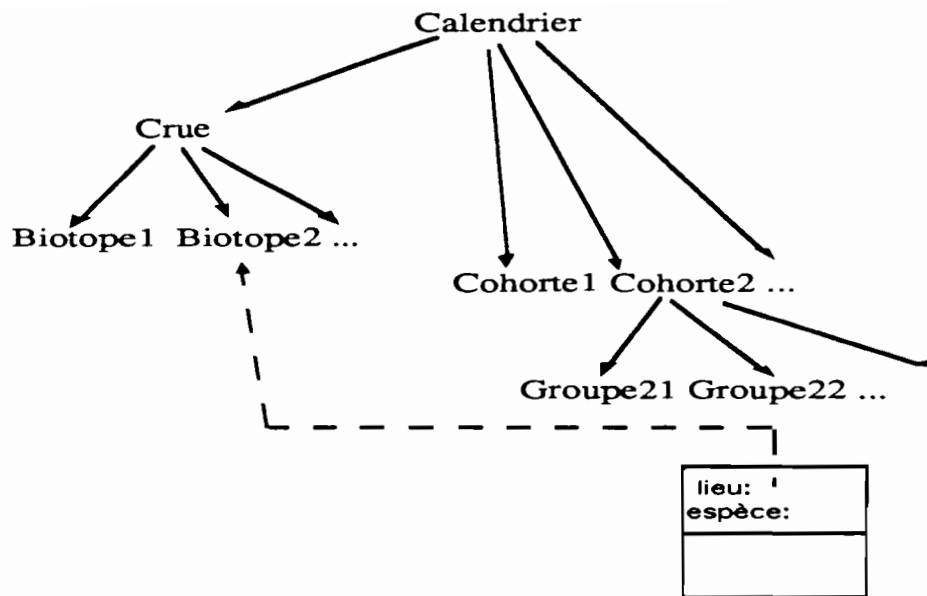


Figure 6.7: Schéma du réseau de communication pour simuler la dynamique écologique

De façon explicite la dynamique est la suivante. Lorsqu'il est activé l'objet Calendrier (puisque'on est rentré dans la dynamique simulée le terme objet désigne ici les instances de classe) informe:

- l'objet Hydro qui met à jour la hauteur d'eau. Les objets Biotope sont informés de ce changement de hauteur et en conséquence procèdent aux calculs de disponibilités à chaque niveau trophique et pour chaque classe de taille cible des prédateurs.
 - les objets Cohorte qui incrémentent leur âge et activent les objets Groupe. L'objet Groupe, lorsqu'il est activé, effectue dans l'ordre les opérations suivantes:
 - ⇒ **calcul de la mortalité**: la méthode mortalitéSizeDependent est activée.
 - ⇒ **est-ce un jour de reproduction?**: la méthode semaineReprod est activée.
 - ⇒ **calcul de la croissance pondérale**: suivant l'âge, la méthode grossissementLarve ou grossissement est activée.
 - ⇒ **calcul de la reproduction**: la méthode nouvelleCohorte est activée.
- La méthode de migration sera activée par un autre spécialiste, après que les pêcheurs aient effectué leur prélèvement par pêche.

6.2.2 Spécialistes sur le processus de prise de décision.

Le processus de prise de décision a été séparé en 4 phases distinctes qui sont: la construction, la perception, la sélection, l'action. Pour reprendre l'image des cartes mentales, la phase de construction consiste à élaborer un fond de carte, la phase de perception consiste à habiller ce fond de carte en fonction de l'interprétation que le pêcheur se fait de données écologiques et sociales. La phase de sélection consiste à faire un choix. La phase d'action consiste à agir, ce qui fait partie du processus de prise de décision (Simon, 1991), car la phase d'action en apportant des informations modifie la perception.

6.2.2.1 Spécialistes de la construction-perception.

Un spécialiste correspond à la phase de construction, les autres à la phase de perception. Après avoir construit les différentes activités possibles, la phase de perception va consister à remplir les objets Technotopes, comme des fiches. Chaque règle des spécialistes va écrire sur ces fiches ce qu'il pense de l'activité correspondante, en fonction de l'état de l'environnement écologique, social ou économique. Pour cela il dispose de deux syntaxes: une écriture quantitative, qui lui permet de traduire sa pensée en coûts et recettes, une écriture qualitative, qui lui permet de traduire sa pensée en avis favorables (oui), défavorables(non), en interdits (veto). Les spécialistes sont:

InitialisationMénage: ce spécialiste correspond à la phase de construction en ce sens qu'il crée tous les objets Techotopes. A l'issue du travail de ce spécialiste le pêcheur possède une carte vierge de l'espace des activités imaginables.

elaboreAgendas: cet ensemble de règles fixe la durée des activités imaginées.

sociologue: ce spécialiste comprend un ensemble de règles qui traduisent l'influence de la société sur le processus de prise de décision individuelle. Ce spécialiste contient des règles du type:

Soit x Ménage

Si x origine = allochtone

Alors x agriculture: veto

Soit x Ménage

Si x ethnie = somono

Alors x pechePlaine: veto

économisteQualitatif: ce spécialiste contient des règles qui traduisent des considérations économiques en influences qualitatives. Par exemple, pour un ménage, si dépense exceptionnelle dans l'année (mariage par exemple), alors pêche: oui.

environnement: ce spécialiste contient des règles qui interprètent l'état climatique pour faire des suppositions sur l'état ultérieur et ainsi, prévoir les pêches possibles.

agronome: ce spécialiste contient des règles qui interprètent l'état climatique pour réfléchir sur l'agriculture.

coutActivité: ce spécialiste contient toutes les règles qui permettent de calculer les coûts de chaque activité envisagée. Ces coûts correspondent à l'achat d'engins, les déplacements, les taxes de tous ordres, etc... Il peut aussi s'agir de coûts correspondant aux prix de ne pas faire une autre activité (coûts d'opportunité).

recetteActivité: ce spécialiste se charge d'estimer les recettes. Pour cela les règles font en général appel à l'attribut `pueMilieuPrevu`: engin: qui représente la mémoire du pêcheur. De cette mémoire et de l'attitude du pêcheur face à cette mémoire (attitude face au risque par exemple) résulte un pari sur l'avenir. Le produit de cette prise fictive par le prix au marché donne une recette attendue.

InfluenceRecettes: pour diverses raisons les recettes attendues peuvent être corrigées. Ainsi un ménage allochtone ne devra compter que sur 80% de la recette, le reste devant être payé sous forme de taxes.

6.2.2.2 Spécialistes de la sélection.

Après avoir perçu son environnement, le ménage doit choisir. Pour cela, le spécialiste **décision** fait successivement appel aux méthodes de sélection de l'objet `MénageDécideur`. Par exemple pour simuler des pêcheurs qui choisissent les activités les plus rentables, le spécialiste décision fera appel aux méthodes `triActivités`, `choixTactique`, `faisTonMarche`. D'autres processus de décision sont possibles comme par exemple faire la différence entre les influence positives ou négatives (vote), considérer des mécanismes de mimétisme ou répulsion, etc...

A l'issue de cette phase le **Ménage** a choisi une activité, c'est à dire un lieu et un engin pour l'exploiter.

6.2.2.3 *Spécialistes de l'action.*

L'action se déroule en deux temps qui correspondent tout d'abord à un déplacement puis à une action de pêche, voire suivant les scénarios à une action agricole. Les règles agissent principalement sur les attributs de l'objet **MénageProducteur**.

movePêcheur: ce spécialiste déplace l'objet **Ménage** du niveau village dans lequel se trouvait le pêcheur au moment de sa réflexion vers un autre niveau de la base partagée (fleuve, mare, plaine, ...).

peche: ce spécialiste contient des règles qui gèrent l'interaction entre l'engin et le milieu. En fonction de l'engin, la méthode **priseAvecEngin** de l'objet **Biotope** renvoie une biomasse pêchée, et enregistre la mortalité correspondante. Le ménage stocke cette valeur dans sa mémoire. Puis le ménage retourne dans le niveau village.

6.2.3 **Spécialiste bilan.**

Il n'y a qu'un spécialiste chargé de faire le bilan d'un pas de temps simulé.

bilan: ce spécialiste n'est pas vraiment un spécialiste de la prise de décision. Il consiste à activer les méthodes de mortalité de l'objet **biotope**, à activer les méthodes de migration des objets groupes. Une règle de ce spécialiste provoque la vente de la prise de poisson.

Au cours de ce pas de temps une règle permet au ménage d'écrire dans l'objet **Calendrier** une date. Nous verrons l'utilisation de cette date dans la structure de contrôle.

6.3 LA STRUCTURE DE CONTRÔLE.

Les connaissances de contrôle sont représentées sur deux niveaux hiérarchiques (la stratégie et les tâches). Chaque tâche exprime sous forme de règles les conditions nécessaires d'activation des précédents spécialistes.

tacheHorloge: active le spécialiste miseAJour.

tacheQualitative: active les spécialistes de la construction-perception qui s'expriment qualitativement.

tacheQuantitative: active les spécialistes qui calculent les coûts et recettes attendues.

tacheDecide: active le spécialiste de la sélection.

tacheDeplace: active le spécialiste des déplacements de pêcheurs et les spécialistes de l'acte de pêche.

tacheBilan: active le spécialiste du bilan.

La stratégie active ces différentes tâches. Le simulateur propose différents scénarios de simulations. En fonction du scénario et de l'état de la base partagée la stratégie fait appel à des tâches bien précises. Ainsi il n'est pas forcément nécessaire d'activer les tâches qui correspondent aux mécanismes de perception à chaque pas de temps.

La stratégie possède un résumé de la base partagée et s'active en fonction de ce résumé. Cet objet résumé contient l'adresse de l'objet Calendrier qui possède un attribut **modif**, dans lequel tous les agents peuvent venir écrire une date. Ainsi par exemple, un ménage qui commence une campagne de pêche de 30 jours peut demander à ce que son processus de décision soit relancé 30 jours plus tard. C'est un mécanisme de simulation événementielle qui comprend un échéancier: dans l'attribut **modif** de l'objet Calendrier, la stratégie prend la date la plus proche et active les tâches intéressées.

Nous avons utilisé les deux niveaux de contrôle offerts par le blackboard mais les tâches sont assez simples. L'événement qui fait réagir les tâches de perception et sélection (tache Qualitative, tacheQuantitative, tacheDecide) c'est aussi l'écriture dans le Calendrier. L'événement qui fait réagir la tâche tacheDeplace est créé lorsqu'un objet Menage change de niveau dans la base partagée.

6.4 CONCLUSION.

Le simulateur que nous avons élaboré permet de représenter à la fois un univers artificiel constitué d'agents autonomes et de représenter la connaissance de spécialistes sur l'évolution de cet univers artificiel. L'architecture du simulateur autorise de nombreuses modifications, qu'il s'agisse d'introduire de nouveaux agents, de modifier leurs comportements, d'introduire de nouvelles règles ou de nouveaux lots de connaissances, ou enfin de modifier la structure de contrôle pour étudier différents scénarios.

Dans le domaine des SMA il s'agit d'une réalisation originale:

- par un découpage des niveaux en fonction de critères géographiques,
- par une architecture de type blackboard où la base partagée est un univers artificiel animé,
- par l'existence dans un même outil d'agents de granularités très différentes; on trouve à la fois des agents plutôt réactifs (poissons) et des agents plutôt cognitifs (pêcheurs), des agents qui communiquent par partage d'information (les spécialistes), par l'environnement (les pêcheurs) par envoi direct de messages (les pêcheurs avec leurs accointances) ou par l'intermédiaire d'un objet représentatif du groupe (le Biotope partage la nourriture des poissons, le Marché ou le Génie sont des cristallisations collectives),
- par ses possibilités d'implémentation sur plusieurs machines, que nous n'avons pas approfondi ici car nous n'en avons pas profité pour les simulations sur le delta.

En contrepartie, la très grande souplesse et ouverture du simulateur, d'une part le rend difficilement utilisable sans une formation conséquente, d'autre part implique une réflexion pour préciser sur les scénarios que l'on veut simuler.

7 DES SIMULATIONS SUR LA PECHE.

Comme nous l'avons montré au cours du chapitre précédent, le simulateur permet de représenter des connaissances très diverses et de s'intéresser à différents processus. Cependant, nous avons fait le choix de nous focaliser sur l'étude de l'interaction entre la dynamique de populations de poissons dans un espace fragmenté et le processus de prise de décision des pêcheurs. En simulant en même temps ces deux processus et en jouant sur des hypothèses, on espère pouvoir favoriser l'intégration de connaissances biologiques et sociales. Pour cela, nous avons choisi de nous orienter vers l'étude d'un phénomène particulier: l'intensification d'exploitation. C'est autour de ce thème que nous présentons ici une série de simulations.

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 (Quensière 1993; Kassibo, 1991), il apparaît clairement que tous les regards se tournent vers 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 accompagnant les évolutions des politiques coloniales ou nationales, des changements techniques mettant à profit les nouveaux matériaux et les nouveaux engins. C'est dans l'articulation de ces changements, dans l'analyse de leurs importances relatives, que l'équipe cherche à comprendre l'état actuel du système. C'est donc à ce débat que les simulations doivent se joindre.

Dans le but d'étudier les réponses de l'écosystème à l'ensemble de ces changements, nous présentons une série de simulations qui concernent toutes une intensification d'exploitation. Nous prenons le terme intensification d'exploitation dans un sens volontairement large de façon à évoquer à la fois les changements de techniques de pêche, l'augmentation du nombre de pêcheurs et la diminution des surfaces inondées. 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 facteurs, dans un contexte multidisciplinaire.

Nous avons mené plusieurs séries de simulations, que l'on peut séparer en deux grands groupes, eux-mêmes subdivisés en plusieurs opérations.

Simulations sans pêcheur. Le premier groupe de simulations consiste à étudier un écosystème auquel on impose un effort de pêche synthétique: on ne représente pas de pêcheurs. Ces simulations correspondent à l'approche de l'halieutique classique (qui gère la pêche à partir de la dynamique des populations de poissons et des mortalités par capture qu'elles subissent). La question posée est de définir la réponse de l'écosystème au stress que constitue l'intensification de la pêche, d'observer et de caractériser cette réponse en fonction de la structure ou de l'environnement du système. Nous posons les questions de la représentation de l'hétérogénéité de l'espace et de la variabilité temporelle de l'environnement hydroclimatique. Ainsi nous proposons trois séries de simulations:

- simulations sans pêcheurs,
- simulations sans pêcheurs avec un environnement variable,
- simulations sans pêcheurs avec espace fragmenté et divers scénarios d'efforts sur l'espace.

Simulations avec pêcheurs. Dans un deuxième temps nous représentons des pêcheurs, avec des processus de décision. Il ne s'agit plus alors d'une augmentation d'un effort de pêche global ou synthétique, mais d'une augmentation de la population de pêcheurs. 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. Nous proposons trois séries de simulations:

- simulations avec un accès libre à l'espace,
- simulations avec des règles sociales d'accès,
- simulations avec un espace à nombre de places limitées.

Avant de présenter ces expériences nous décrivons les hypothèses communes à toutes les simulations .

7.1 HYPOTHESES COMMUNES À TOUTES LES SIMULATIONS.

L'univers artificiel est tout d'abord composé de deux objet Biotope (ce nombre passera ensuite à quatre), et de trois espèces de poissons.

7.1.1 L'environnement naturel (climat et milieux).

La diversité de l'environnement naturel est représentée par des objets Biotope correspondant à deux grands types de milieux: le fleuve, ses grands bras et le lac Central (Debo) d'une part, la plaine et ses mares d'autre part. La connexion entre ces deux milieux est supposée effective en crue, hautes-eaux et décrue, c'est à dire de mi-août à fin décembre.

La richesse en nourriture (attribut **courbeKTemps**) est représentée par une courbe (fig. 7.1) inspirée du cycle de crue (Chouret et Pépin, 1988), tel que celui-ci est connu dans le delta.

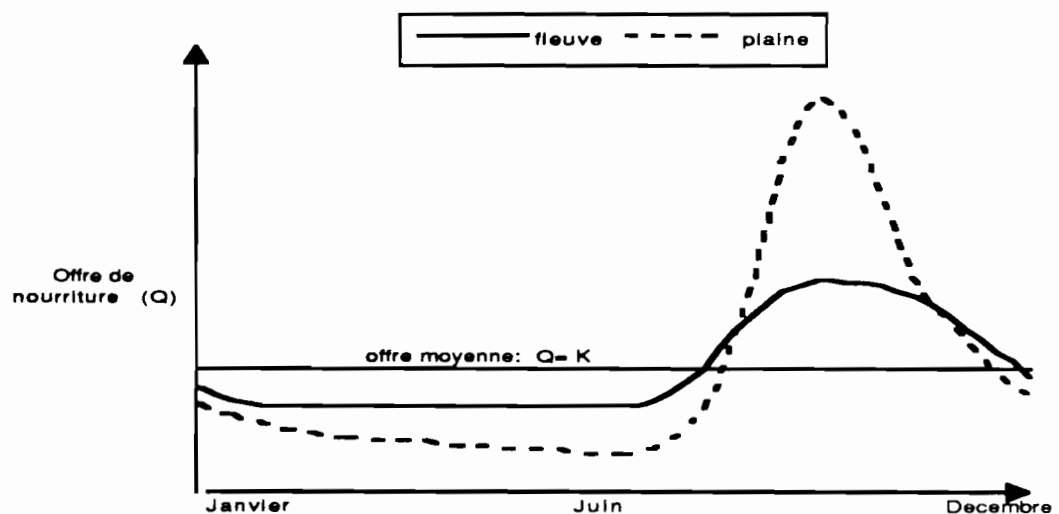


Figure 7.1: Cycle annuel de l'offre de nourriture pour les objets de type fleuve et de type plaine

On sait que la quantité de nourriture est, toutes variétés confondues, d'autant plus grande que la surface et/ou le volume d'eau est important (Welcomme, 1979). Pour cette même raison, l'amplitude de saisonnalité est moins forte dans le fleuve que dans le milieu plaine/mars, lequel devient très pauvre en fin de saison sèche mais offre une richesse surabondante en hautes-eaux. Enfin, on suppose que les sommes de quantités globales de nourriture offertes par chacun des deux milieux sont équivalentes sur l'ensemble de l'année, cas de figure médian parmi le large éventail de possibilités que peuvent sans doute produire les configurations variées des systèmes fleuve-plaine. Enfin, nous introduisons l'existence de deux fractions de nourriture (microparticules et macroparticules) dans les proportions constantes arbitraires de 1/3 et 2/3.

7.1.2 Les espèces de poissons.

Trois espèces "théoriques" ont été créées, en faisant en sorte que leurs différences soient représentatives des principales dimensions connues de la diversité trophique et biologique des peuplements ichtyologiques des fleuves soudano-sahéliens. Celles-ci concernent le régime alimentaire (donc la position trophique) ainsi que les modalités de reproduction et de migration. Le tableau 1 présente les valeurs des paramètres pour les 3 espèces. Voici quelques précisions sur chacune de ces 3 espèces:

- La plus petite (A) est plutôt microphage: elle a une préférence de 0.75 pour la nourriture fine (et de 0.25 pour la fraction grossière). Sa reproduction peut avoir lieu à partir de 6 mois et à partir d'une taille de 8 cm, mais elle est strictement limitée à une ponte annuelle entre fin juillet et fin août: stratégie "total spawner" selon la terminologie de Bailey et Petrere (1989). Cette ponte représente 20 % du poids de l'individu et est composée de petits oeufs. La migration est obligatoire et se produit à dates fixes: montée dans les plaines en août-début septembre, dévalaison dans le fleuve en novembre-décembre.
- L'espèce (B) est un prédateur ichtyophage, avec une préférence de 0.75 pour les poissons (et de 0.25 pour la fraction grossière de la nourriture offerte par le milieu).

Sa probabilité de maturité augmente peu à peu à partir d'une taille de 150 mm pour atteindre finalement 100% à 350 mm. Une ponte annuelle composée de gros œufs se produit systématiquement entre fin juillet et fin août, et représente 10% du poids de l'adulte. La migration d'un milieu à l'autre est par contre opportuniste, déclenchée par l'insatisfaction alimentaire.

- L'espèce (C) est essentiellement macrophage, donc avec des préférences inversées par rapport à l'espèce A: 0.75 pour la fraction grossière et 0.25 pour la fine. Elle se reproduit à partir de 6 mois et à partir d'une taille de 12 cm. Elle peut pondre toute l'année, à condition que son bilan énergétique soit positif depuis deux semaines au moins, et en respectant un délai de 6 mois entre deux pontes successives (stratégie "partial spawner"). Chaque ponte représente 15% du poids de l'adulte et se compose de gros œufs. La migration d'un milieu à l'autre est opportuniste, déclenchée par l'insatisfaction alimentaire, c'est-à-dire un bilan énergétique négatif.

Notons enfin que les paramètres qui concernent les termes du bilan énergétique ou bilan de croissance et ceux du processus de mortalité dépendant de la taille sont les mêmes pour les trois espèces. Les valeurs sont reportées dans le tableau I.

7.1.3 Dynamique hors pêche.

Avant de soumettre les populations de poissons à un effort de pêche, il est nécessaire de parvenir à un fonctionnement stable et convergent de l'écosystème. Pour cela, en partant de diverses conditions initiales nous avons vérifié la convergence des trajectoires vers un attracteur (fig. 7.2). Après une dizaine d'années de simulation les populations atteignent une dynamique saisonnière stable qui représente l'état du système hors exploitation. C'est à partir de cet état que nous discutons le réalisme du modèle d'un point de vue biologique. Les croissances individuelles de chacun des trois types de poissons, observées dans la simulation après installation de la dynamique stable et avant mise en exploitation sont satisfaisantes (fig. 7.3), comparables à celles décrites par Mérona et al. (1988).

paramètre/mécanisme	définition - contenu	valeurs/modalités
pz	coeff. de préférence pour un type z de nourriture (fraction fine: z=1; fraction grossière: z=2; poisson: z = 3)	spA spB spC p1:.75 0 .25 p2:.25 .25 .75 p3: 0 .75 0
A	niveau max. de consommation spécifique (satiété)	1.4/semaine
-k	freinage de la consommation lorsque la disponibilité de nourriture diminue	0,175
m	coeff. d'allométrie de la consommation	0,7
B	niveau des dépenses énergétiques spécifiques	0.42/semaine
n	coeff. d'allométrie des dépenses énergétiques	0,8
Tm	Taille minimale autorisant la reproduction	spA: 8 cm spB: 15cm spC: 12cm
Am	Age minimal autorisant la reproduction	spA: 6 mois spB: 18 mois spC: 6 mois
Fsp	Fécondité spécifique (poids de la ponte, en % du poids de l'indiv.)	spA: 20 spB: 10 spC: 15
w	Poids unitaire des oeufs	spA: 0.01 gr spB-C: 0.05gr
d	délai minimal entre deux pontes	6 mois
M	Facteur de contrôle du niveau de la mortalité "de base": $Morb=M \times (1/L)$ avec L longueur en cm	0,3
l	longévité maximale	spA: 36 mois spB: 84 mois spC: 72 mois
a,b	coefficients d'allométrie reliant le poids W (en gr.) à la longueur L (en cm): $W=a L^b$	a b spA: .0135 3 spB: .020 3 spC: .044 3
Ci, j	Contrôle du niveau de capturabilité des poissons de plus de 8 cm (milieu i et saison j) fleuve: i=1;plaine: i=2; crue et hautes-eaux: j=1; décrue et étiage: j=2)	j= 1, 2 i=1 1 2 i=2 2 3
cp	Facteur de minoration de la capturabilité des poissons de 8 à 16 cm	0,5
ei, j	contrôle de l'intensité de l'effort de pêche/ semaine, portant sur le milieu i, au cours de la saison j (i=1: fleuve; i=2: plaine; j=1: crue et hautes-eaux; j=2: décrue et étiage)	j= 1, 2 i=1 1 1 i=2 1 1

Tableau I

De même les structures de poids (fig. 7.4) sont réalistes, faisant apparaître des cohortes de plus en plus aplaties avec l'accroissement du poids. Le cycle annuel de la biomasse dans les deux milieux est logique avec un maximum décalé de quelques semaines entre la plaine (pic en hautes eaux) et le fleuve (pic en décrue) (fig. 7.5). De plus si on amalgame les deux milieux et qu'on représente sur un même schéma la biomasse B et la production somatique P (somme des croissances individuelles des poissons), on obtient également un cycle saisonnier vraisemblable, caractérisé par un pic de production en hautes-eaux suivi d'un pic de biomasse en décrue (fig. 7.6).

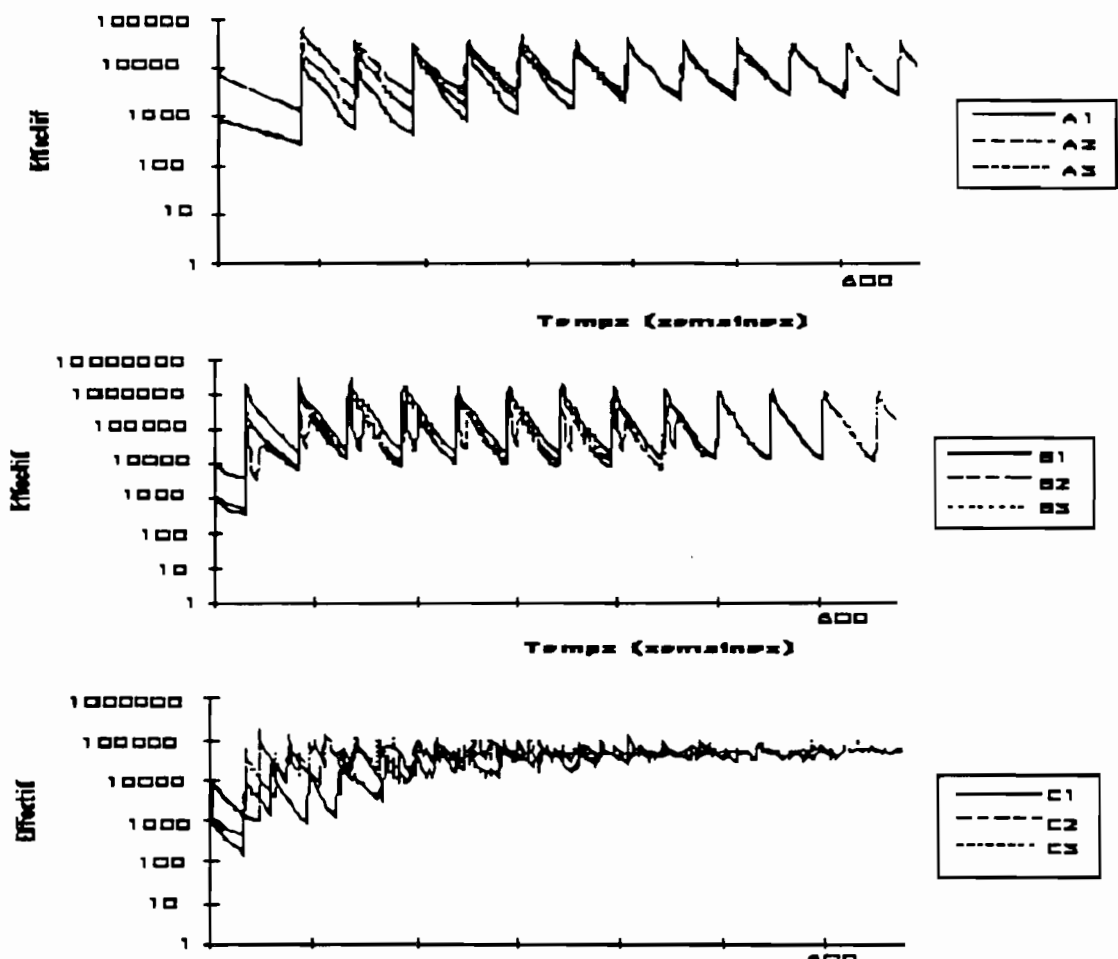


Figure 7.2: Existence d'un cycle stable pour les trois espèces.

Expérience avec 3 compositions spécifiques initiales différents, chaque graphe correspond à une espèce.

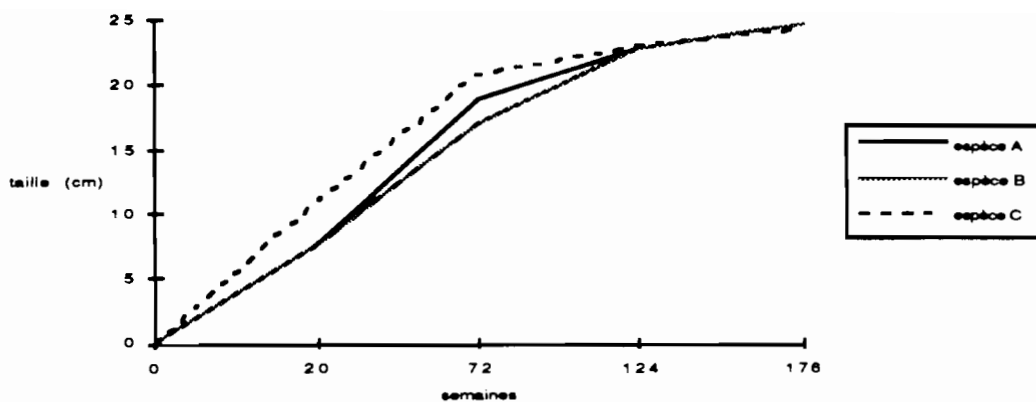


Figure 7.3: Quelques croissances individuelles issues des simulations.

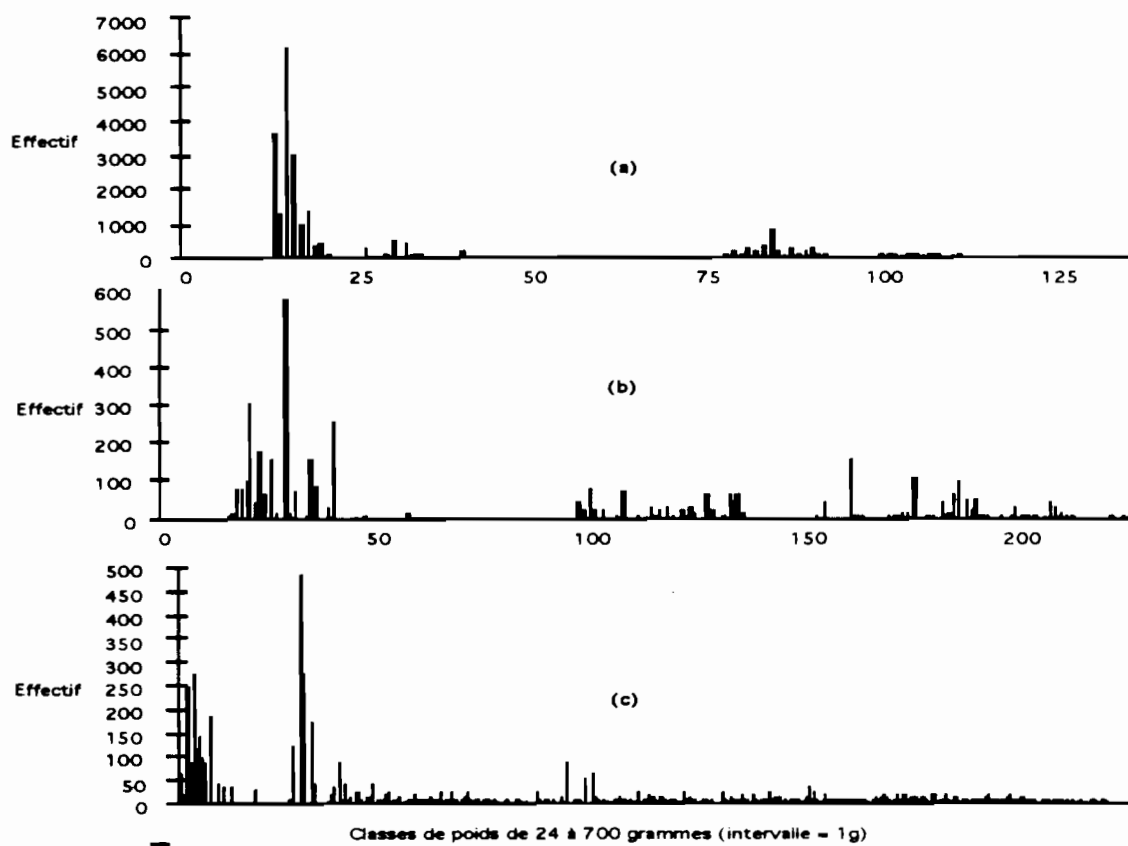


Figure 7.4: Structures de poids des trois espèces lors de la 28ème semaine de l'année.

a) Espèce A, b) Espèce B, c) Espèce C pour les poissons de poids > 24g

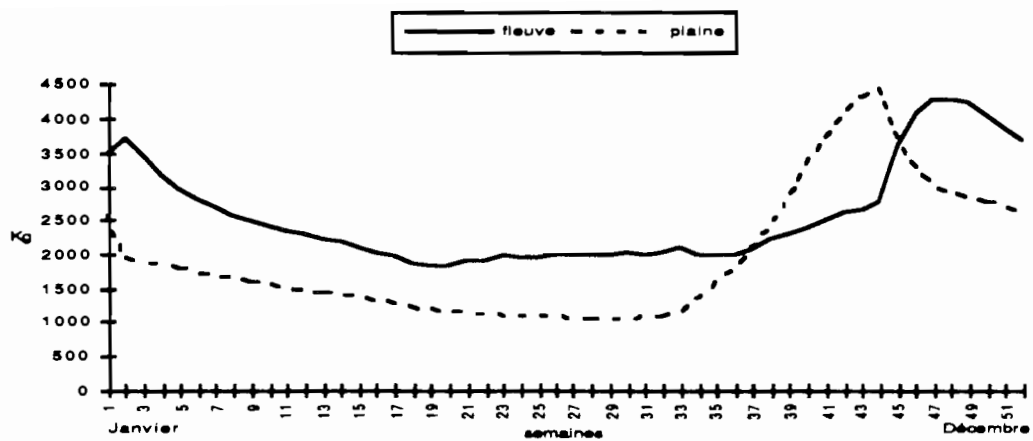


Figure 7.5: Cycles annuels de la biomasse pêchable

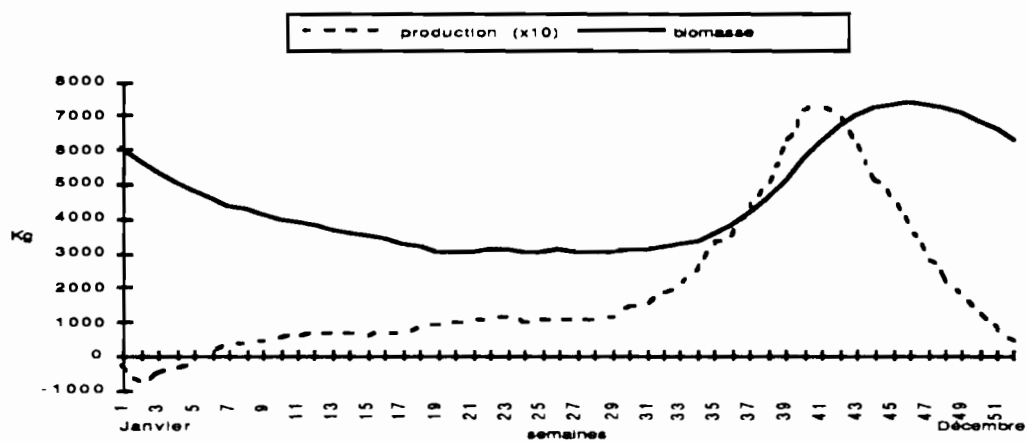


Figure 7.6: Cycle de biomasse et de production somatique pour les deux milieux.

En cumul annuel, la productivité (production naturelle moyenne/moyenne annuelle de la biomasse) simulée atteint hors exploitation une valeur proche de 2,2. Ce chiffre est du même ordre de grandeur que les estimations obtenues à partir d'études de terrain menées en zone intertropicale (Coulter, 1981).

Rappelons qu'il ne s'agit là que de simples contrôles qualitatifs du comportement du modèle. A présent nous détaillons la représentation de l'intensification de pêche.

7.2 INTENSIFICATION D'UN EFFORT DE PECHE.

7.2.1 Hypothèses biologiques et halieutiques

La première expérience consiste à représenter un accroissement de l'effort de pêche sur les populations de poissons. En conséquence, à capturabilité constante égale à 1‰, l'effort exercé dans chaque milieu va provoquer une mortalité croissante sur les poissons.

$$\text{Mortalité par pêche} = \text{Capturabilité} * \text{effort} \quad (\text{eq 7.1})$$

7.2.1.1 L'effort.

L'effort de pêche est composé de deux facteurs: le coefficient spatio-temporel d'effort (f), et le niveau global ou multiplicateur d'effort λ .

$$\text{Effort}_{i,j} = f_{i,j} * \lambda \quad (\text{eq 7.2})$$

Le vecteur des coefficients spatio-temporels d'effort $f_{i,j}$ répartit l'effort selon deux dimensions, les saisons et les milieux. Il s'agit donc d'un diagramme d'exploitation au sens de Laurec et Le Guen (1981). Dans le but de simuler une pêcherie semblable à celle du delta, nous avons défini une configuration où l'effort est davantage concentré sur la période de décrue et d'étiage (l'effort est multiplié par 1,33 sur 37 semaines) et plus lâche sur la crue et les hautes eaux (l'effort est multiplié par 0,19 sur 15 semaines entre la 29^{ème} et la 44^{ème} semaine). On veille à ce que la somme annuelle (sur les milieux et les saisons) décrite par le vecteur des $f_{i,j}$ soit toujours égale à 100. Les effets des diverses formes de schéma d'exploitation seront abordés lors des analyses de sensibilité.

Pour représenter l'intensification d'exploitation le facteur λ , tout d'abord égal à 1, est incrémenté de 2 en 2 chaque année.

7.2.1.2 La capturabilité.

Le niveau vrai des capturabilités reste toujours une inconnue. Cette inconnue constitue un facteur d'incertitude qui, cependant, peut venir s'agréger et se fondre dans le facteur

multiplicateur d'effort... Et comme celui-ci est traité par balayage systématique dans toutes les simulations, l'incertitude irréductible sur le niveau vrai de la capturabilité se trouve neutralisée. Nous manipulons donc seulement un vecteur C de paramètres destinés à contrôler, à un facteur près, les capturabilités et leurs variations.

Ces paramètres doivent traduire les différences de vulnérabilité du poisson vis-à-vis de la pêche. Dans cette simulation nous laissons de côté l'effet "engin", ce qui revient en fait à raisonner en termes "d'engin théorique moyen", amalgamant les propriétés de sélectivité des divers engins utilisés dans le Delta.

Les différences de capturabilité trouvent donc leurs justifications dans les caractéristiques de taille du poisson (nous excluons les effets liés à l'espèce) et dans le contexte spatio-temporel:

- les poissons inférieurs à 8 cm échappent à la pêche, les poissons supérieurs à 16 cm souffrent au contraire d'une pleine capturabilité, et les poissons de taille intermédiaire se situent à un niveau moitié moindre, soit une cotation en trois niveaux: respectivement: x_0 , x_1 , $x_{0.5}$.
- la capturabilité est globalement meilleure dans la plaine et les mares (effet multiplicateur x_2) que dans le fleuve (x_1) et, par ailleurs, elle est plus forte en décrue et lors de l'étiage (x_4) que durant la crue et les hautes-eaux (x_1). Par combinaison multiplicative le contexte spatio-temporel détermine une variation de capturabilité d'un facteur x_8 .

Les deux effets, liés respectivement à la taille et au contexte spatio-temporel, sont combinés de façon multiplicative ce qui détermine une gamme de variation de $x_{0,5}$ à x_8 . Par exemple, la capturabilité maximale de niveau 8 ($=1x_8$) est supportée par les gros poissons dans les mares et marigots de la plaine en décrue et en étiage, tandis que la capturabilité de niveau 0.5 ($=0.5x_1$) est subie par les poissons de 8 à 16 cm dans le fleuve en crue et hautes-eaux (Tableau I).

7.2.2 Configuration du simulateur.

Nous avons défini la capturabilité comme un attribut de l'objet Biotope; pour imposer une mortalité par pêche cet objet possède une méthode **ImposeMortalitéPêche** qui lui permet de calculer l'équation (7.1). L'effort par contre est perçu comme une quantité globale qui évolue au cours du temps et qui est répartie sur les différents milieux en fonction des saisons. Il existe un objet particulier (TableauPrélèvement) pour représenter l'effort: il s'agit d'un objet dont le seul attribut est une valeur d'effort. Chaque année, lors de la 28^{ème} semaine (la date correspond au début de la crue), cette valeur d'effort est incrémentée pour simuler l'augmentation d'effort. Le biotope interroge cet objet au moment de calculer la mortalité. L'objet TableauPrelevement renvoie une valeur qui dépend de l'attribut effort mais aussi de la saison et du milieu qui en fait la demande.

Concernant les lots de connaissances seuls les spécialistes miseAJour et Bilan sont activés par la structure de contrôle.

7.2.3. Résultats

Les figures 7.7, 7.8, 7.9, 7.10 présentent les principaux résultats tant écologiques qu'halieutiques. Sans prétendre à une exploration exhaustive de l'espace de variabilité des paramètres, nous proposons les résultats (fig. 7.11) de cinq autres simulations menées selon le même principe mais qui introduisent chacune une modification sur:

- un niveau moyen de richesse alimentaire K relevé de 100% ,
- un schéma d'exploitation différent avec un effort toujours égal dans le temps et dans l'espace ,
- une variabilité interindividuelle de la croissance des poissons ,
- le coefficient k qui fixe le freinage de la croissance et donc les effets de la compétition,
- la taille minimale de reproduction de l'espèce A égale à 10 cm au lieu de 8 cm, ce qui la place au dessus de la taille minimale de pêche. En effet les simulations précédentes protègent la reproduction de l'espèce A. Nous avons voulu tester une pêcherie où toutes les espèces sont exposées à la pêche avant leur première reproduction. Le résultat

donné par cette simulation s'avérant particulièrement intéressant, nous l'avons vérifié en reproduisant 5 fois cette simulation (fig. 7.12, 7.13).

Nous distinguons d'un côté les résultats halieutiques au sens propre du terme, qui concernent les captures et les captures par effort, et d'un autre côté les résultats écologiques qui concernent la biomasse, la production, la productivité, les changements de composition spécifique et de structure de taille du peuplement des poissons.

Du point de vue halieutique, les réponses enregistrées lors de ces différentes simulations d'intensifications d'exploitation présentent la même forme malgré des contextes différents; cette forme peut donc être considérée comme un résultat robuste. Elle est décrite par la séquence suivante: au début, les captures augmentent rapidement en fonction de l'effort, puis elles s'infléchissent progressivement à l'approche d'un maximum. Ce maximum, généralement annoncé par une courte mais sensible instabilité des captures, se prolonge ensuite en un véritable "plateau", avec des prises qui baissent lentement malgré la poursuite de l'intensification de l'effort. Enfin, l'effondrement des captures se produit. Dans le cas où la reproduction de l'espèce A n'est pas protégée (fig. 7.12), le plateau est marqué un niveau moyen de captures constant mais aussi par de grandes fluctuations qui vont en augmentant au cours du temps. Les captures par effort, quant à elles, diminuent dans tous les cas de façon régulière, en reproduisant les variations de la courbe des captures.

En comparant les différentes simulations (fig. 7.11) il apparaît que le niveau maximal (ou niveau du "plateau") de captures est essentiellement déterminé par les conditions environnementales, puisque l'on observe un très net rehaussement si l'on adopte une hypothèse plus forte pour K (100%), le paramètre qui fixe la valeur moyenne de l'offre de nourriture. Les autres facteurs, notamment la structure de l'effort, semblent avoir un rôle moindre dans la détermination du niveau maximum de captures.

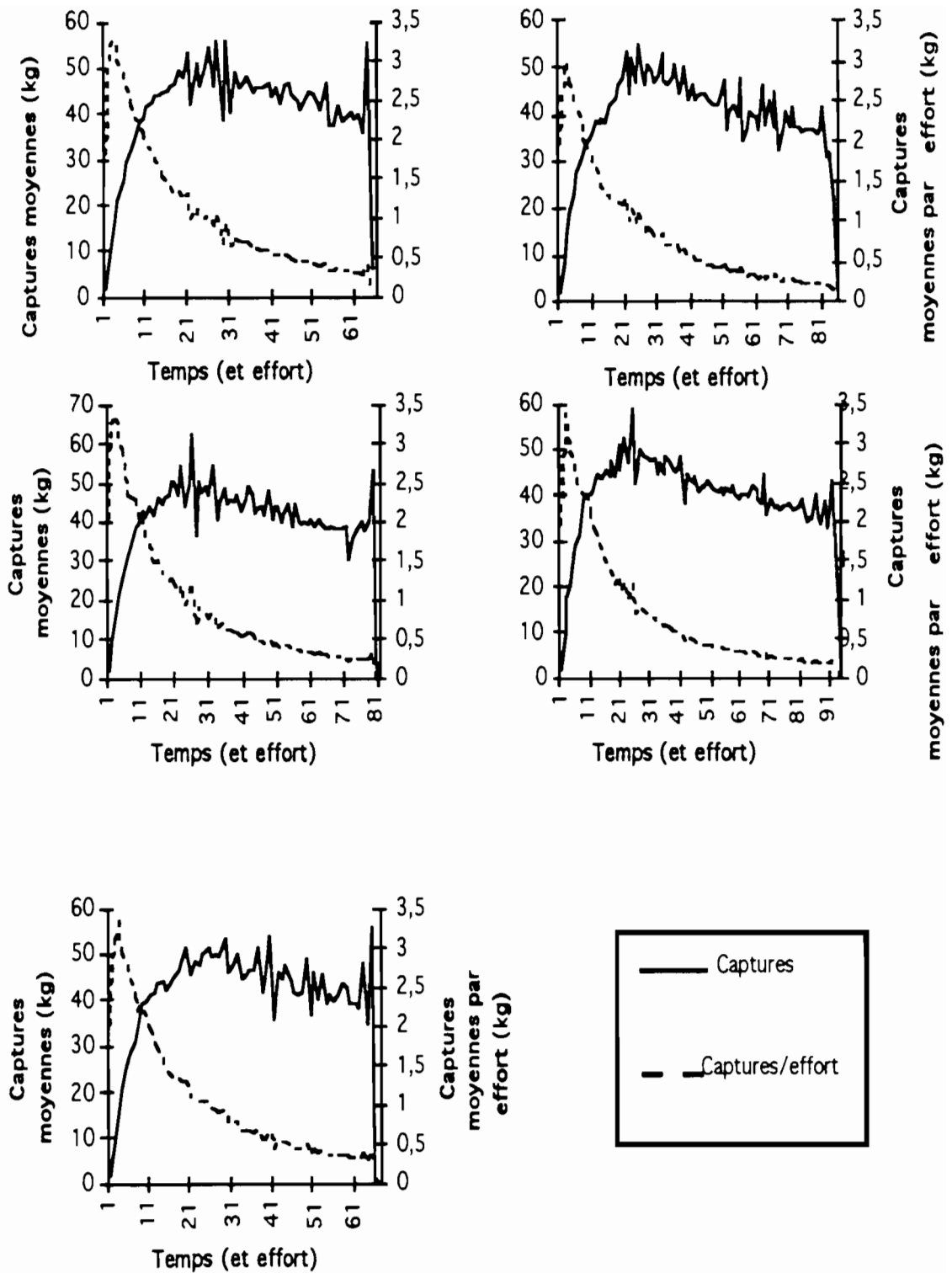


Figure 7.7: Captures et captures par effort pour 5 expériences d'intensification d'effort

Chaque année représente la moyenne des 52 pas de temps sur lesquels l'effort est resté constant

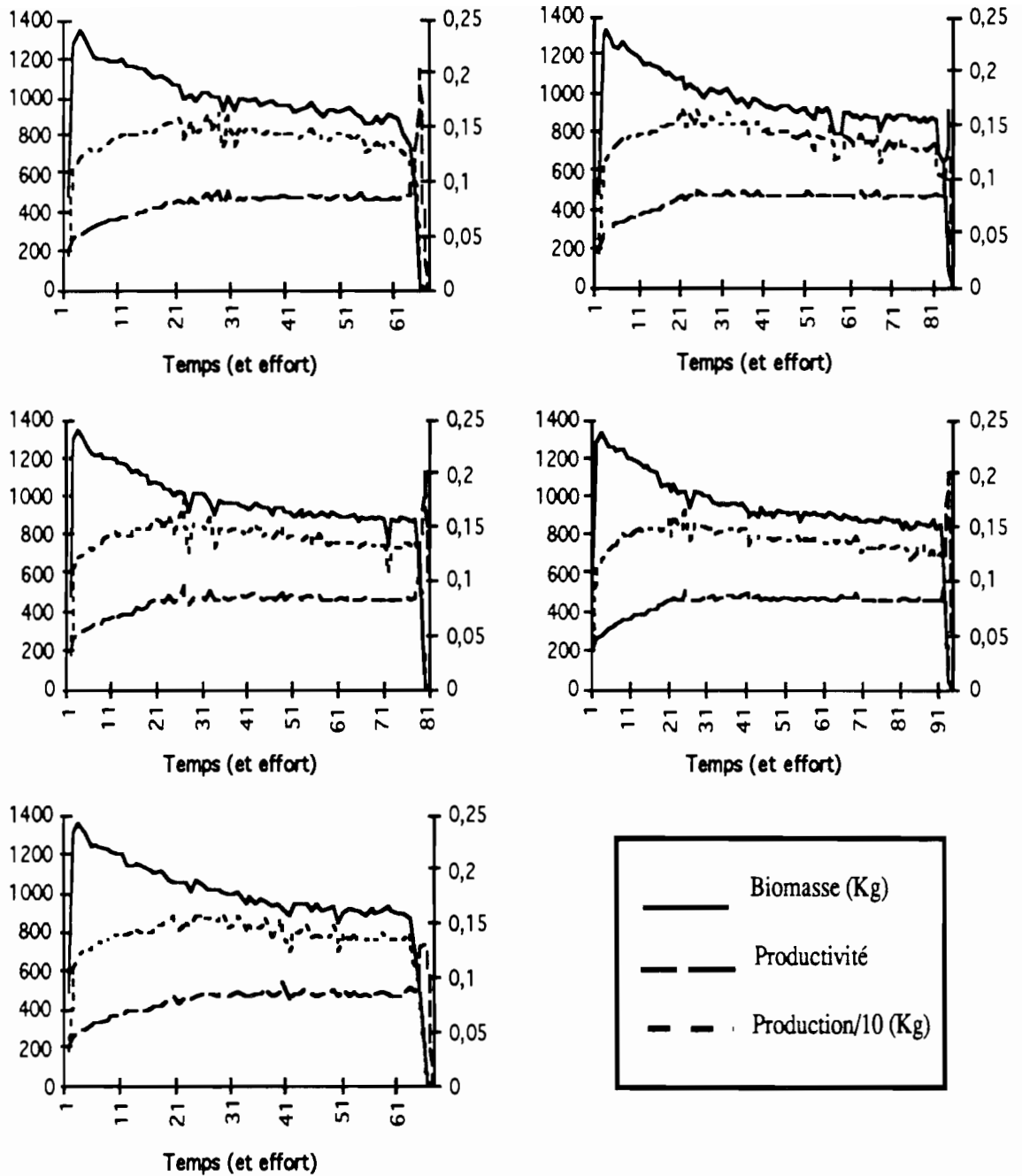


Figure 7.8: Évolution de quelques grandeurs écologiques pour 5 expériences d'intensification d'effort.

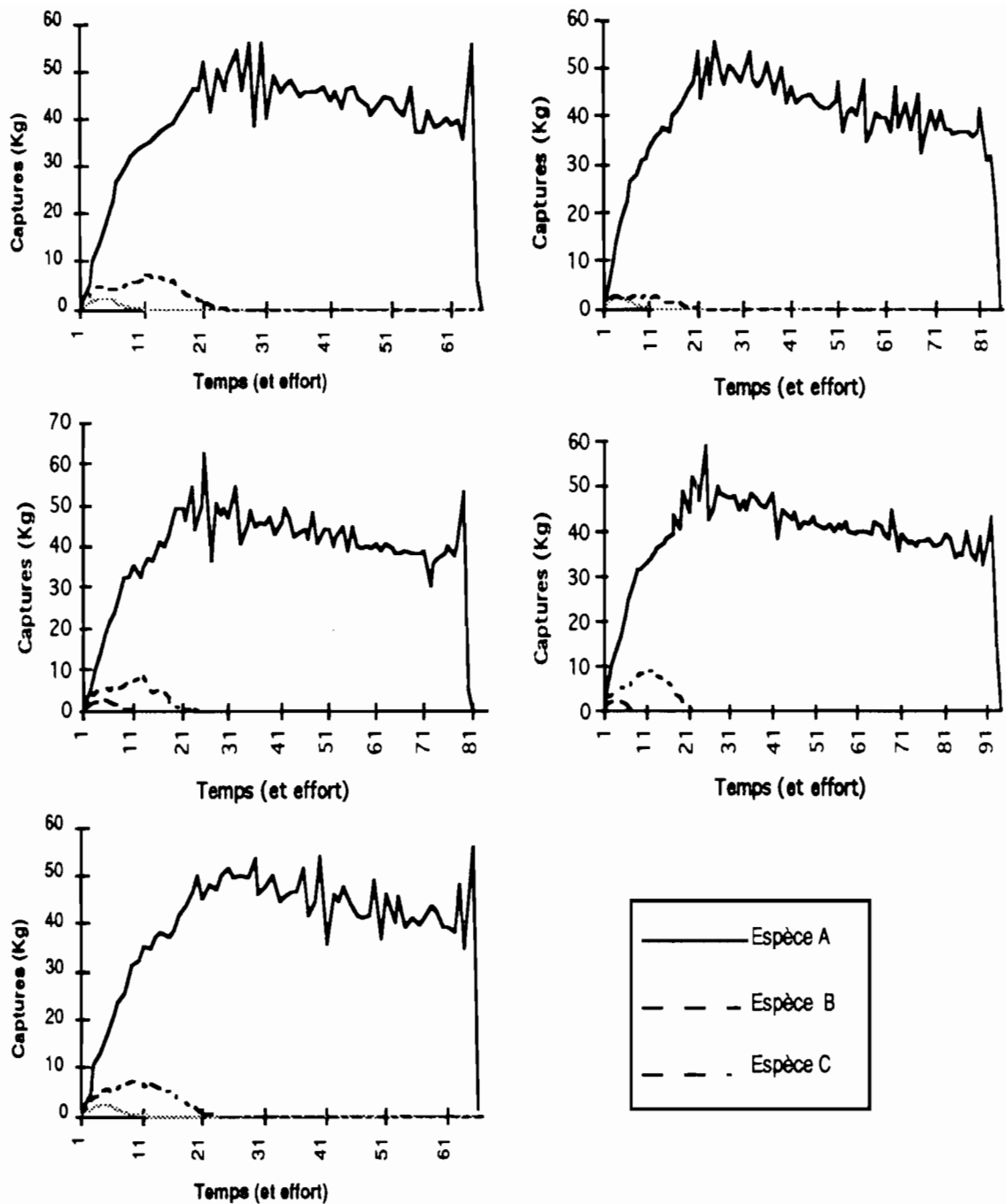


Figure 7.9: Évolution des compositions spécifiques des captures pour 5 expériences d'intensification d'effort.

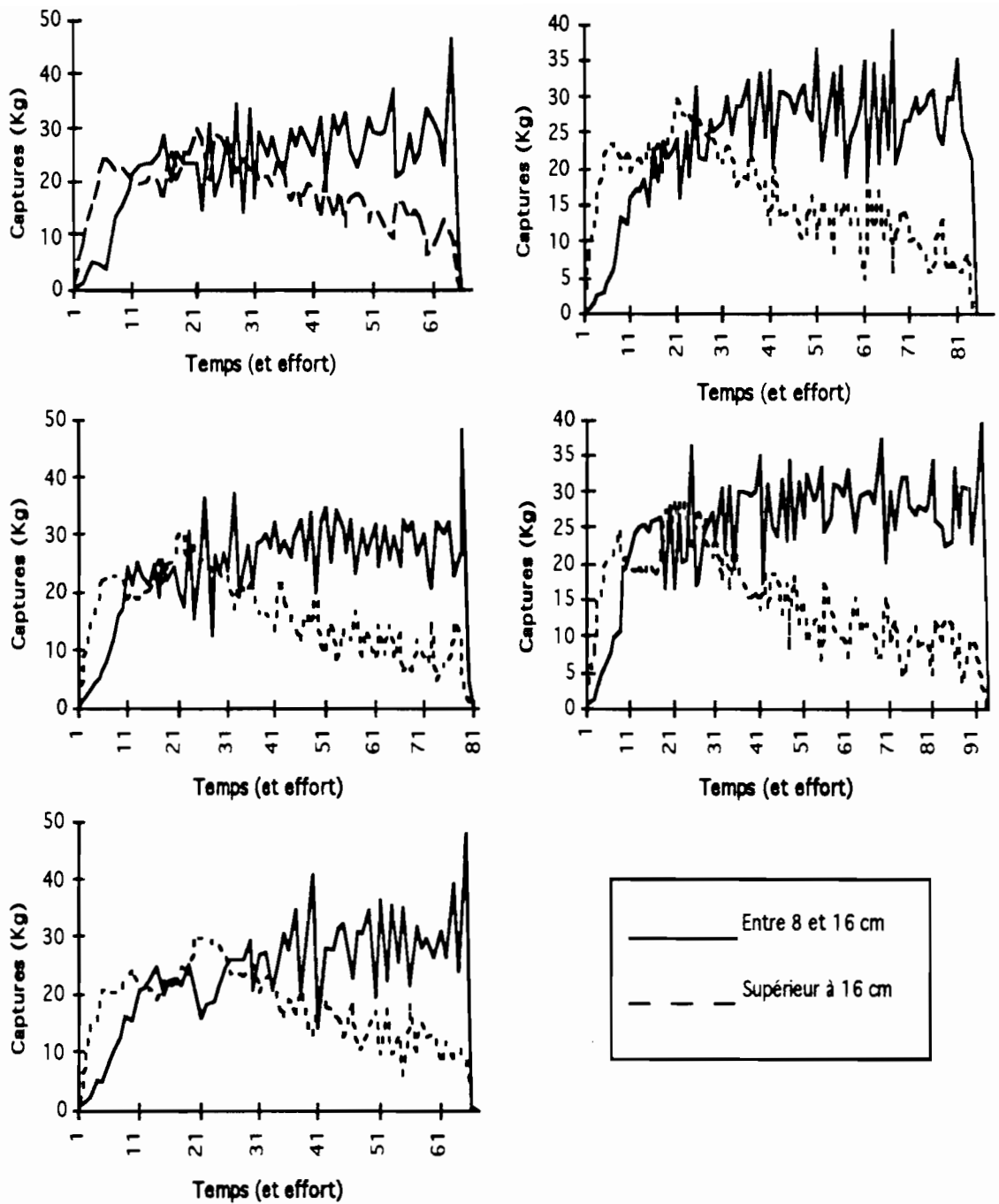


Figure 7.10: Évolution de la taille des captures en fonction de l'effort pour 5 expériences d'intensification d'effort.

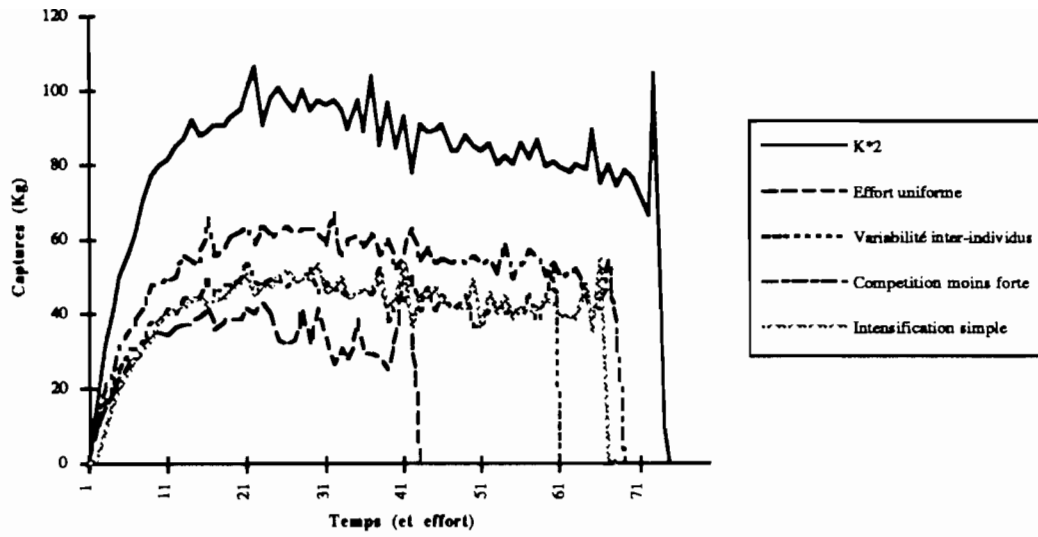


Figure 7.11: Évolution des captures en fonction de diverses hypothèses halieutiques ou biologiques.

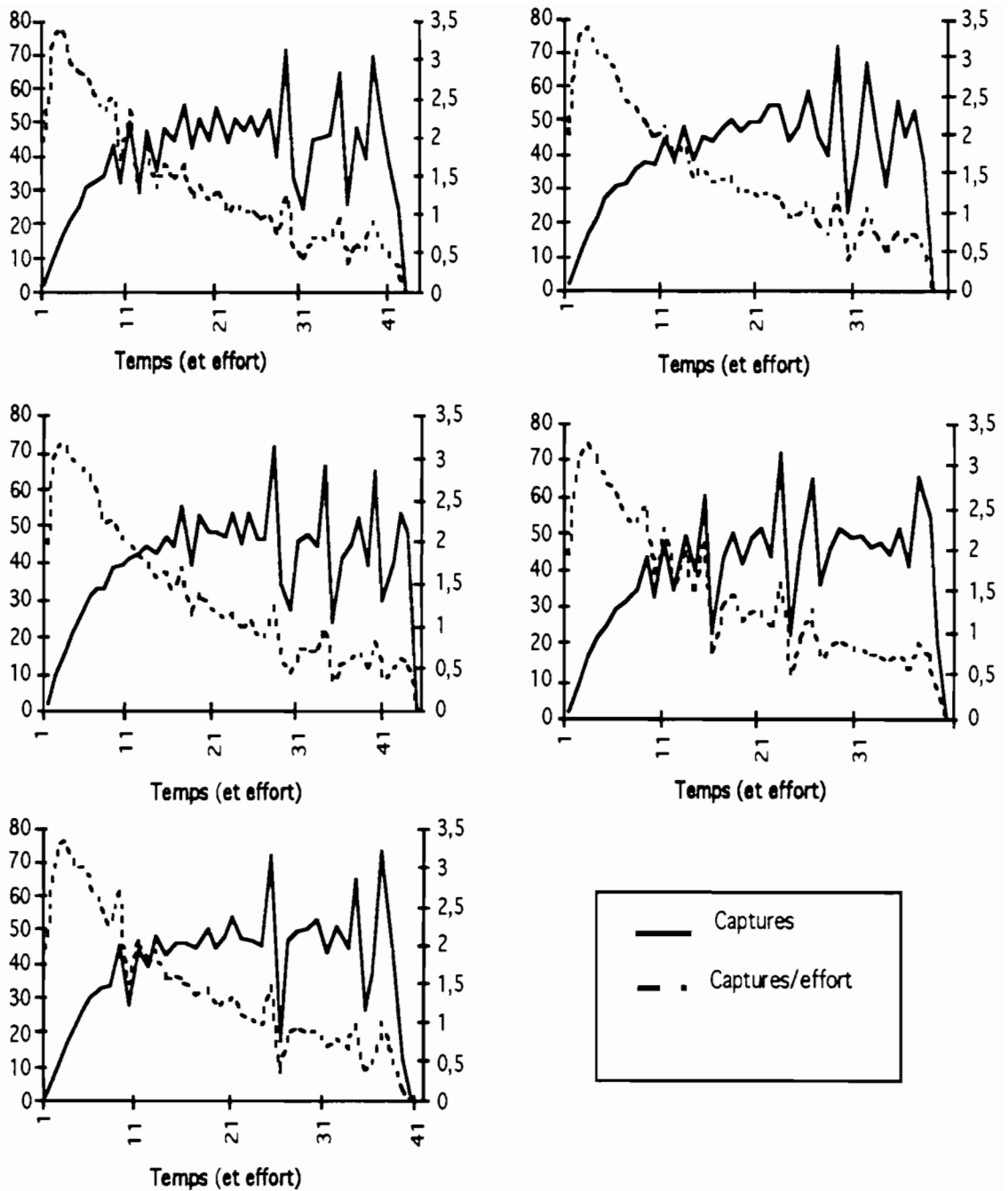


Figure 7.12: Évolution des captures et captures par effort pour 5 expériences d'intensification d'effort.

Espèce A se reproduit à 10 cm: les poissons peuvent donc être pêchés avant la reproduction

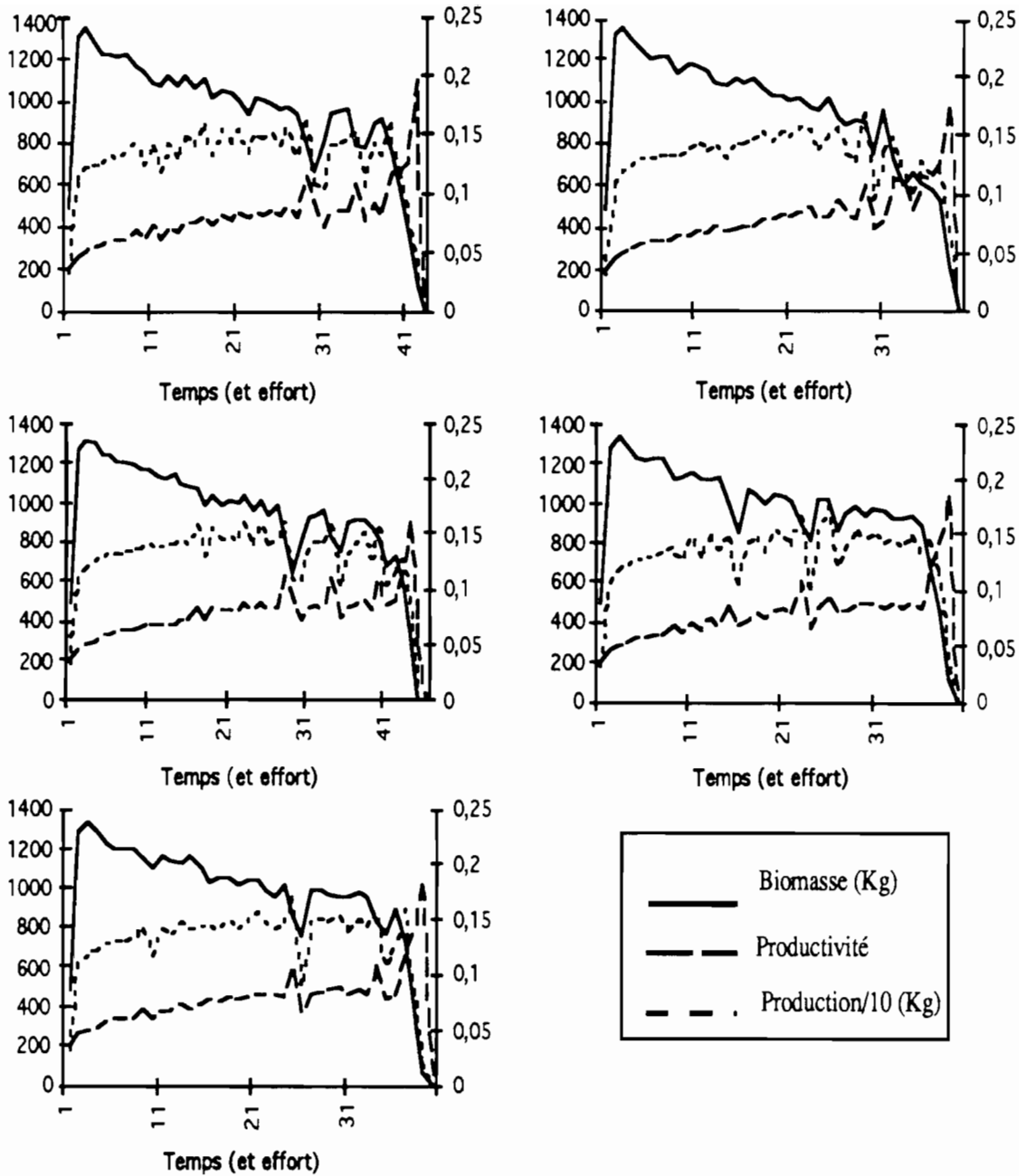


Figure 7.13: Évolution de quelques grandeurs écologiques.

Espèce A se reproduit à 10 cm.

Le moment de rupture mérite d'être examiné attentivement d'autant que la durée de vie de l'écosystème artificiel n'est pas déterminée par la configuration expérimentale. Ce moment semble annoncé par une anomalie négative du cycle de biomasse en fin d'étiage (fig. 7.14), et surtout, il s'accompagne d'une amplification des fluctuations, particulièrement marquée lorsque la reproduction de l'espèce A n'est pas protégée (taille à maturité égale à 10 cm).

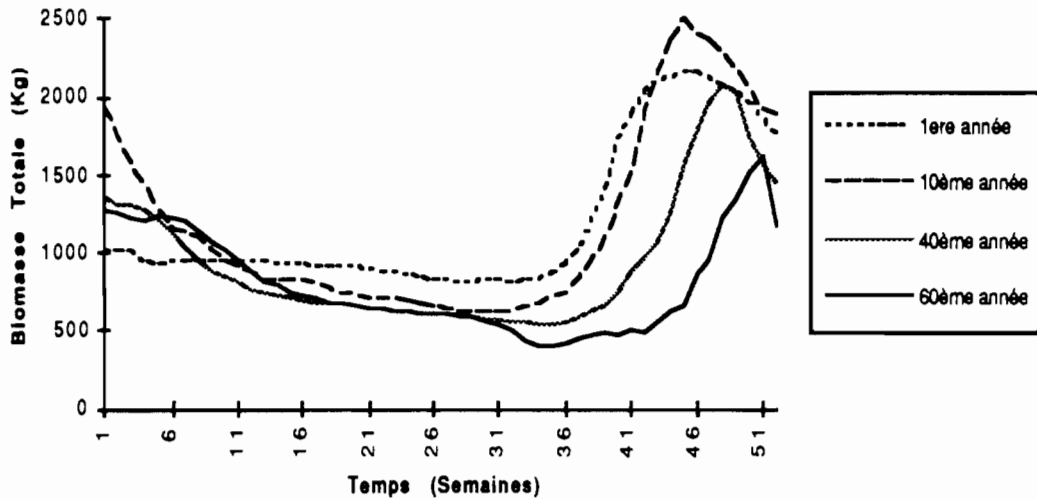


Figure 7.14: Cycle annuel de la biomasse total pour différents degrés d'exploitation de la ressource

Du point de vue écologique, il faut aborder distinctement les simulations où la reproduction de l'espèce A est protégée de celles où elle ne l'est pas. Si dans les deux cas, tout au long de cette phase plateau, la biomasse décroît, les trajectoires de la production écologique et de la productivité diffèrent:

- avec reproduction protégée (fig. 7.8), la production (P) après une forte augmentation décroît avec la biomasse. En conséquence la productivité écologique (P/B) s'élève puis reste stable longtemps, avant d'atteindre un bref maximum dû à la chute brutale de biomasse.
- lorsque la reproduction n'est pas protégée (fig. 7.13), la baisse de biomasse est beaucoup plus heurtée, la production et la productivité augmentant tout au long du plateau avant d'atteindre là aussi un maximum en fin de plateau.

En observant le peuplement ichthyologique (fig. 7.9 et 7.10), l'évolution de la structure en faveur d'un accroissement de la proportion d'individus de petite taille est l'une des composantes les plus évidentes de la réponse de la ressource à l'intensification d'exploitation de la pêche, et ce phénomène apparaît dès le début de l'exploitation. Par ailleurs, l'espèce A, de plus petite taille remplace rapidement l'espèce B qui présente des poissons de plus grande taille sans doute moins adaptés aux cycles de crue et de pêche.

7.2.4 Interprétation écologique.

En faisant une synthèse de différents travaux sur une écologie du stress, Rapport, Regier et Hutchinson (1985), présentent quelques grands traits généraux qui caractérisent la réponse d'un écosystème à un stress, une perturbation. En faisant de l'écologue un médecin au chevet de cet organisme malade, les auteurs identifient plusieurs symptômes d'aggravation liés:

- les changements dans le cycle des nutriments,
- les changements dans la productivité primaire,
- les changements de diversité spécifique,
- une "régression", le système régresse vers un état plus jeune auquel peut succéder une nouvelle phase de maturation,
- les changements dans les distributions de taille, allant vers une réduction des tailles.

Ils transfèrent à l'échelle de l'écosystème un modèle construit par Selye (1973) à l'échelle d'organismes: ce modèle découpe le comportement de l'objet stressé en trois phases. La première phase correspond à une phase d'alarme où l'organisme montre des changements caractéristiques de la première exposition à un stress, la seconde phase dite de résistance où les signes d'alarme ont disparu et où la résistance "dépasse la normale" et enfin la phase d'épuisement où l'énergie est épuisée, les signes de perturbation réapparaissent et la mort s'ensuit.

Pour la pêche, l'illustration au moins partielle d'une telle théorie peut être trouvée dans le modèle conceptuel proposé dès 1972 par Regier et Loftus, puis repris par Welcomme

(Welcomme, 1989) ainsi que par Malvestuto (Malvestuto et Meredith, 1989), sous le terme de "fishing-up process", terme dont la traduction littérale est "processus d'intensification du prélèvement", bien qu'il s'agisse essentiellement de la description de la réponse de la ressource à cette intensification (fig. 7.15).

Le modèle prédit que, grâce à des mécanismes dits compensateurs, la productivité naturelle du peuplement de poissons s'accroît au fur-et-à-mesure que le prélèvement qu'il subit augmente. Les deux processus se compensent jusqu'à un point de rupture. Dans le cas d'une ressource ichthyologique, ces mécanismes compensateurs peuvent relever de deux niveaux, impliquant d'une part la structure trophique du peuplement, d'autre part les structures démographiques de chaque population. Nos simulations permettent de vérifier le déclenchement de tels mécanismes et de suivre leurs effets sur la dynamique de la ressource.

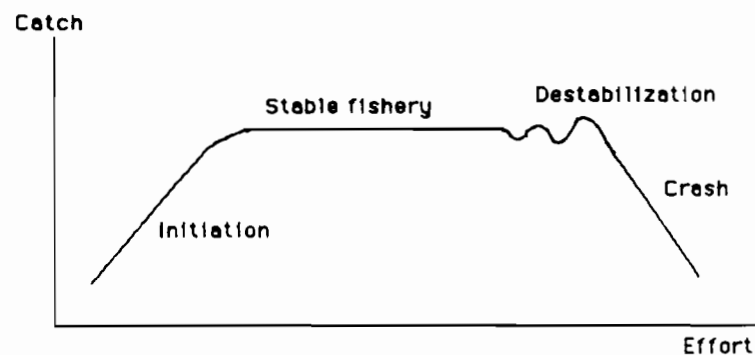


Figure 7.15: Modèle conceptuel du "fishing-up process". (d'après Malvestuto et Meredith, 1989)

Au niveau du peuplement (Caverivière, 1991), le point de départ du mécanisme compensateur est lié à la plus grande vulnérabilité des "gros" poissons par rapport aux engins de pêche en général, accentué par le fait que ces poissons sont souvent, en plus, l'objet d'une recherche particulièrement intense, liée à leur forte valeur commerciale. Ainsi, à un niveau trophique donné, c'est à dire entre espèces totalement ou partiellement en concurrence pour la recherche de nourriture, les espèces les plus petites, c'est à dire celles

qui se reproduisent le plus tôt remplacent rapidement les espèces les plus grandes. En général ces espèces présentent un renouvellement plus rapide donc une productivité plus élevée. L'accroissement de leur importance relative détermine logiquement un accroissement de la productivité globale.

Par ailleurs comme les espèces prédatrices sont généralement, pour des raisons évidentes, d'assez grande taille, il s'ensuit que le niveau trophique supérieur est le premier touché par la pêche. En conséquence, il y a allègement de la pression de prédation exercée sur les populations de proies, lesquelles vont pouvoir soit se développer d'avantage, soit supporter un prélèvement accru sans s'affaiblir si l'on se trouve dans un contexte d'exploitation intense. La part relative des poissons-proies s'accroît ainsi dans la composition de la ressource et dans les captures, au détriment des poissons-prédateurs. Il en résulte un raccourcissement de la longueur "moyenne" de la chaîne trophique aboutissant au pêcheur, situation énergétiquement rentable compte-tenu de la faible efficacité des transferts intercompartimentaux dans les écosystèmes. A noter cependant que, du point de vue de la valeur commerciale des captures, le résultat peut être moins positif.

Au niveau démographique, c'est-à-dire interne à chaque population, les mécanismes compensateurs sont un peu différents mais le plus important a aussi comme point de départ la mortalité différentielle plus forte sur les gros individus résultant de la pêche. Il s'ensuit un déplacement des structures démographiques (relatives) en faveur des classes jeunes ou petites (fig.7.10), lesquelles sont, en vertu des lois d'allométrie qui s'appliquent à l'assimilation et la croissance, les plus efficaces d'un point de vue bioénergétique - c'est-à-dire qu'elles développent un taux de croissance et un rendement net de croissance bien supérieurs. Aussi la productivité (production naturelle/biomasse) de chaque population augmente-t-elle -et il en est évidemment de même au niveau global, lorsque l'on somme les différentes populations- puis se stabilise (fig.7.8). Après ces changements de taille, de composition spécifique, l'écosystème rentre en phase de résistance, d'autant plus nette si la taille de première reproduction est faible et donc l'espèce protégée de la pêche. Ainsi, lorsque cette taille est fixée à 10 cm, l'écosystème résiste beaucoup moins longtemps (fig. 7.13).

D'autres mécanismes, plus subtils, pourraient intervenir au niveau démographique, et prolonger encore d'avantage la phase de compensation. L'un mettrait en jeu une souplesse de la taille et/ou de l'âge à la maturité, ce qui pourrait autoriser en certaines circonstances un raccourcissement du temps moyen de génération - par exemple en cas d'accroissement de la mortalité des adultes. Là encore, la productivité (P/B) de la population augmenterait sous l'effet d'une exploitation intensive. Un tel mécanisme adaptatif, dont la vraisemblance biologique est supportée par des observations au lac Tchad et dans le Delta (Durand, 1978), n'a toutefois pas pu jouer dans les simulations présentées ici - puisque cette dimension de variabilité biologique n'a pas été considérée.

L'explication de l'évolution de la variabilité au long de l'intensification d'exploitation n'est pas triviale. Beddington et May (1977) ont étudié les propriétés des modèles d'équilibre et ont montré que la variabilité relative des captures augmente avec l'intensification d'exploitation. Par ailleurs, Jensen (1991) montre à l'aide de simulations dynamiques le phénomène opposé: en prenant en compte des mécanismes de régulation comme la relation entre l'âge et la taille de première reproduction, on observe des fortes fluctuations au début de l'intensification et des faibles fluctuations lorsque la pêche est très forte. Les résultats de Jensen sont obtenus avec des prélèvements qui débutent à l'âge de première reproduction. Dans le cas de nos simulations, l'hypothèse est la suivante: lorsque la pêche commence au delà de la taille de reproduction et que le prélèvement est faible, les mécanismes de densité-dépendance jouent sur la croissance et donc sur la mortalité et la reproduction. D'une année sur l'autre ces effets de feed-back peuvent amplifier l'amplitude des fluctuations. Lorsque le prélèvement est fort, les mécanismes de densité-dépendance jouent moins et l'évolution des captures est plus stable. Lorsque la pêche commence avant la première reproduction, de fortes pêches de reproducteurs peuvent rapidement déstabiliser le système et le faire osciller entre des années à bonnes reproduction et croissance suivies d'années où les effets de la densité compriment le développement de la population de poissons.

7.2.5 - Cohérence avec le réel

De nombreux faits d'observation confortent l'existence de la phase "plateau" comme une caractéristique récurrente des pêcheries continentales (fig. 7.15). En particulier, seule une telle phase peut rendre compte de l'étonnante capacité des hydrobiologistes à ajuster des modèles statistiques où les captures observées sont bien expliquées par les variables environnementales (surface, profondeur, sels nutritifs, indice de crue...), c'est-à-dire par les seules capacités biotiques du milieu, indépendamment ou presque de toute considération sur l'effort de pêche déployé.

Il est tentant d'exploiter les constantes morphologiques du "fishing-up process" pour proposer un mode de diagnostic sur le degré d'exploitation d'une ressource halieutique continentale. Ainsi, en s'inspirant des résultats de simulation obtenus et des constantes qui s'en dégagent, on définira un séquençage qualitatif de l'intensification d'exploitation en trois phases, correspondant à des niveaux croissants de degrés d'exploitation.

Dans une première phase, les captures globales augmentent avec l'effort. Comme elles ne sont pas parvenues à leur maximum, on est bien alors en situation de sous-exploitation, au sens classique du terme. Cependant, les captures par unité d'effort fléchissent déjà.

Avec la poursuite de l'intensification de la pêche, on passe alors progressivement à la deuxième phase, caractérisée par le fait que les captures plafonnent à un niveau "plateau". Il n'y a plus alors de corrélation avec l'effort mais seulement avec les capacités biotiques du système. Quant aux captures par effort, elles continuent bien sûr à décroître. De façon un peu arbitraire, et sans avancer de limites précises, on distinguera conceptuellement deux stades au sein de cette seconde phase:

- en début de plateau, les gros poissons représentent encore une part importante des prises,
- si l'intensité de pêche augmente encore, le stade avancé "fin de plateau" apparaît, avec des prises qui se maintiennent en tonnage global mais ne sont plus constituées que de petits poissons (<16 cm). La prise par effort est devenue très faible car la biomasse est en chute. La productivité écologique est par contre à son maximum.

Enfin, une troisième et dernière phase est marquée par l'effondrement des captures. On retrouve là une définition de la surexploitation biologique.

En fonction des critères théoriques définis ci-avant, on peut tenter d'établir un diagnostic sur le degré d'exploitation de la ressource dans le Delta Central du Niger. Trois éléments observés nous seront utiles: le niveau des captures (rapporté à l'importance du système), le niveau des captures par unité d'effort, la structure de taille des prises.

Tout d'abord, d'après Laë (1992), les pêcheries du Delta Central du Niger produisent 45000 à 50000 t par an, ce qui, vu la surface actuelle de la zone d'inondation (environ 10000 km²), permet de définir une densité de production de 4,5-5 tonnes par km². Ces valeurs rentrent parfaitement dans la "norme" de 4-6 tonnes/km² établie par Bailey (1988) et par Welcomme (1989) en compilant les résultats de nombreuses études réalisées sur des régions fluviales intertropicales comparables - et où une exploitation conséquente existe. Sans insister sur de tels chiffres, sujets à discussion, il est cependant clair que la production halieutique du Delta Central ne présente pas une anomalie telle que l'on puisse parler de prises effondrées -ce qui signifierait que l'on se trouve à l'extrême droite de l'axe du fishing-up process. Et comme, compte-tenu de l'importance de la pêche présente (plus de 6 pêcheurs/km² de zone inondable), il est également hors de question d'envisager une sous-exploitation, on en déduira que l'on se situe, très probablement, quelque part dans la phase "plateau".

Cependant, la plupart des pêcheurs affirment qu'il y a moins de poissons qu'autrefois et les prises par pêcheur sont en effet plutôt faibles: 0,7 t/an dans l'ensemble, ou 1 t/an en excluant les agro-pêcheurs, ce qui est probablement bien inférieur à la situation des années 60 (Laë, 1992). Ces valeurs se situent dans la tranche basse des valeurs recueillies par Welcomme (1989) pour les régions comparables d'Afrique et sont, par ailleurs, très inférieures aux chiffres fournis par Bailey et Petrele (1989) pour le bassin Amazonien. Plus particulièrement, c'est la chute des captures de gros poissons qui est ressentie par les pêcheurs de façon très aiguë, ce qui a d'ailleurs conduit à un abandon des grandes tailles de maille (> 40 mm) pour les filets dormants. Tous ces signes laissent penser que l'on a affaire à

une ressource dont le degré d'exploitation s'est considérablement accru au cours des décennies récentes et est aujourd'hui très élevé. En d'autres termes, on se trouverait à un stade avancé de la phase plateau du fishing-up process, stade caractérisé par le paradoxe d'une production halieutique encore élevée alors que le poisson s'est déjà raréfié.

Cependant une observation sur le monde artificiel pose un problème: les simulations montrent un changement très net de la composition spécifique. Or dans la réalité, les biologistes de l'équipe considèrent que *"malgré l'ampleur des changements climatiques et hydrologiques survenus depuis 1972, malgré le développement important de la pêche au cours de la même période, il n'y a pas eu de bouleversements considérables dans la composition spécifique des captures"* (Quensière et al., 1994). Nous reviendrons sur cette incohérence au cours d'une simulation ultérieure.

7.3 INTENSIFICATION DE L'EFFORT DE PECHE ET VARIABILITÉ DE L'ENVIRONNEMENT.

L'expérience précédente, mère de toutes les simulations, montre l'évolution des captures au cours d'un processus d'intensification d'exploitation. Elle souligne que le niveau des captures ne suffit pas à lui seul à déterminer le degré d'exploitation de la pêcherie. En effet, les captures restent constantes pendant longtemps alors même que la structure écologique change. C'est donc surtout les indicateurs biologiques (taille et composition spécifique) qui sont pertinents pour donner un état de l'exploitation. Au cours de cette deuxième expérience nous désirons étudier la relation pêche-hydrologie: peut-on construire un indicateur de l'état d'exploitation à partir de cette relation?

7.3.1 Hypothèses biologiques et halieutiques

En phase de résistance, les captures ne changent pas mais la structure écologique se modifie. En conséquence il est possible que la réponse à une perturbation extérieure soit différente en début, au milieu et en fin de plateau. Cette perturbation est considérée à travers des variations inter-annuelles de l'environnement. Nous abordons ici le domaine des

recherches sur les relations entre l'environnement et la pêche, domaine principalement abordé à l'ORSTOM pour l'étude des ressources marines (Cury, 1989; Cury et Roy, 1991; Fréon, 1988).

La très forte réponse du système à l'intensité de la pulsation hydrologique, le flood pulse concept de Junk (Junk, 1989), est un fait reconnu par tous les acteurs du système, qu'ils soient chercheurs, aménageurs ou pêcheurs. Cependant cette observation n'est pas indépendante de l'état du système: *"Le fait que la variable hydrologique étendue aux années n et $n-1$ explique à elle seule 92% de la prise provient en grande partie de la composition en âge des captures (69% de 0+), elle même dépendante de la pression de pêche intensive à laquelle sont soumis les stocks"* (R.Laë, 1992). Ainsi, les prélèvements réalisés par la pêche font évoluer l'écosystème vers un état juvénile dans lequel il montre une sensibilité aux apports énergétiques (Cury et Roy, 1987).

Pour reprendre l'image de l'écosystème malade et du médecin à son chevet (pour l'instant c'est l'écologue), peut on caractériser l'état du patient par sa réponse, ses réflexes quand on le soumet à une perturbation? Tel est le thème des expériences suivantes.

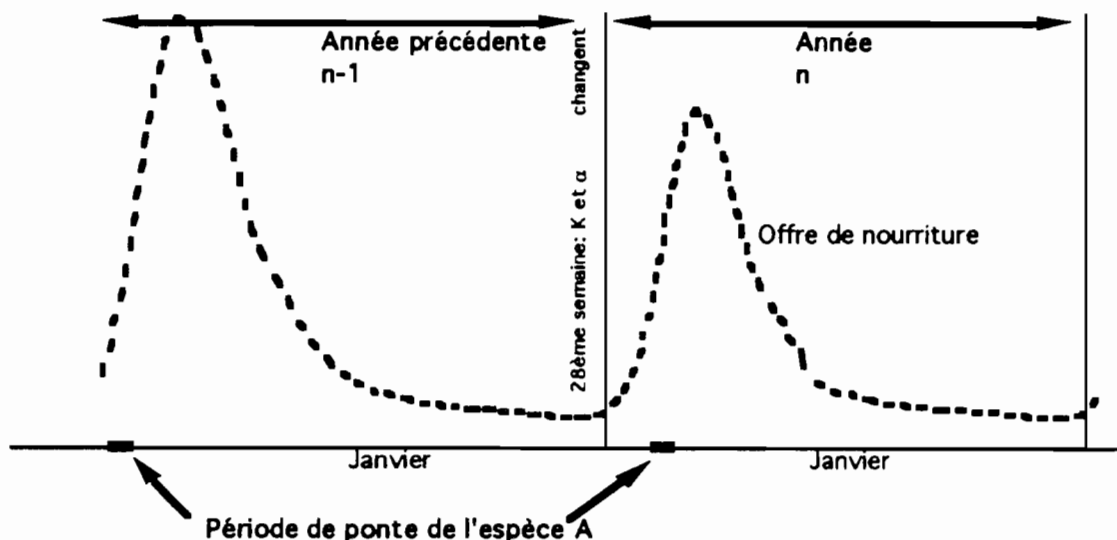


Figure 7.16: Représentation de quelques événements et périodes

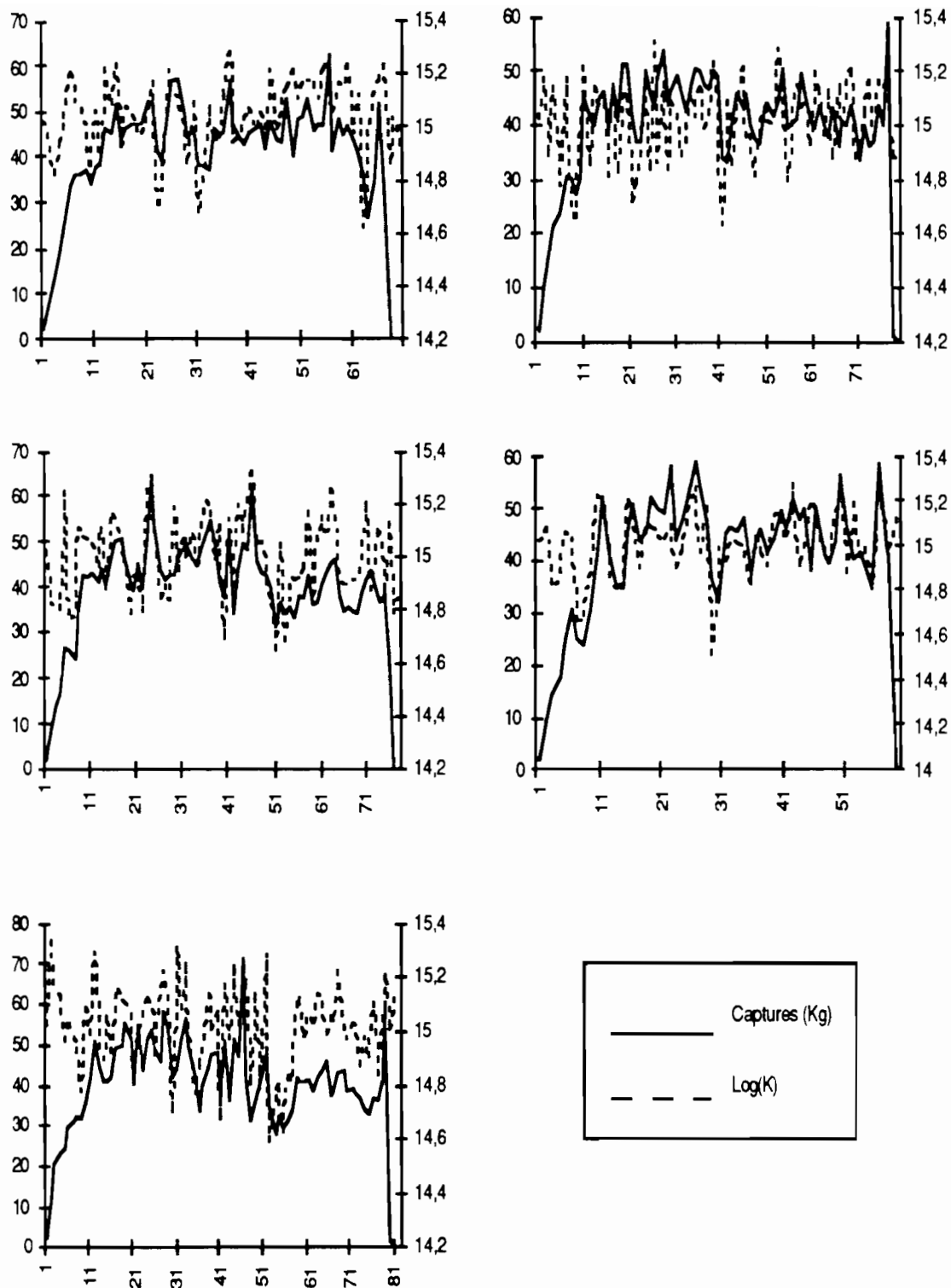


Figure 7.17: Évolution des captures en fonction des conditions environnementales de l'année en cours.

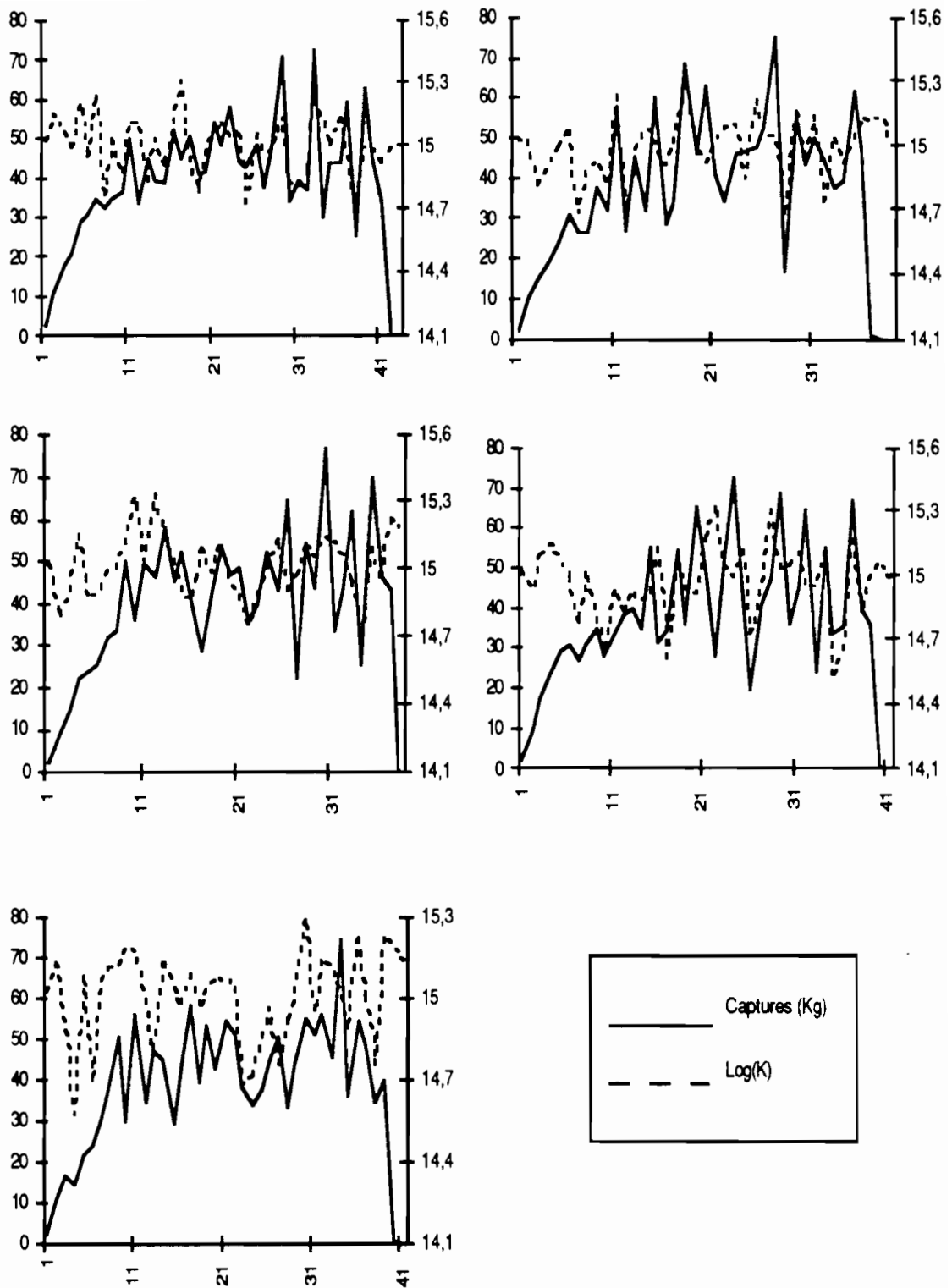


Figure 7.18: Évolution des captures en fonction des conditions environnementales de l'année en cours.

Espèce A se reproduit à 10 cm.

7.3.2 Configuration du simulateur.

Les conditions expérimentales sont les mêmes que pour les simulations précédentes à une exception près: chaque année lors de la 28^{ème} semaine (au début de la montée des eaux), pour chaque milieu, on tire un coefficient multiplicateur de K (le niveau moyen de l'offre de nourriture) et alpha (l'amplitude de la pulsation environnementale) dans une loi normale de moyenne 1 et écart-type 0,15 (fig. 7.16).

Cette simulation est reproduite cinq fois pour deux configurations biologiques: espèce A à taille de première reproduction égale à 8 cm et égale à 10 cm.

7.3.3 Résultats.

Les résultats sont présentés sur les figures 7.17 et 7.18

On considère en général que les captures sont fonction de l'effort de pêche et des conditions environnementales. Ces conditions, le plus souvent climatiques, doivent être considérées sur une fenêtre temporelle assez large de façon à couvrir une période au moins aussi longue que l'âge des plus vieux poissons. Les espèces que nous avons introduites ne vivent pas longtemps, et nous nous limiterons à la prise en compte des conditions hydrologiques de l'année des captures, ainsi que les conditions de l'année précédente (voir fig. 7.16 pour le temps).

Dans le cadre de cette expérience, nous voulons évaluer la réaction des captures aux conditions climatiques, tout au long de la phase plateau (par nature indépendante de l'effort de pêche). C'est la raison pour laquelle nous tentons d'expliquer les formes des courbes de captures par les variations de l'environnement.

La réponse de l'abondance et de la biomasse des poissons à la crue n'est pas linéaire. Welcomme (1989) propose une transformation logarithmique pour tenir compte de la forte sensibilité des peuplements aux faibles crues et de la baisse de sensibilité du peuplement envers des fortes crues. Ainsi, nous avons pris comme facteur environnemental le logarithme de l'offre de nourriture K.

Les courbes présentent les captures en fonction du facteur environnemental de l'année et du facteur environnemental de l'année précédente. L'observation des courbes donne des conclusions différentes selon que la reproduction l'espèce A est protégée ou qu'elle ne l'est pas. Dans le cas où la taille de première reproduction est fixée à 10 cm (fig. 7.18), donc fortement soumise au prélèvement halieutique qui commence à 8 cm, on observe tout d'abord que la durée de vie de la pêcherie est à peu près constante: c'est autour de la 40^{ème} année que la chute des captures se produit. Il semble difficile de corréler les captures aux conditions environnementales. Comme nous l'avons observé dans l'expérience précédente cette dynamique est caractérisée par de très amples fluctuations qui ne semblent pas sensibles aux variations environnementales: la dynamique propre du système est prépondérante.

Le cas où la reproduction débute à 8cm (fig. 7.17) semble plus complexe, et demande une analyse plus fine. La première remarque concerne les durées de ces simulations. Parmi les cinq simulations, trois ont une durée de vie d'environ 80 ans, une présente une durée de vie de 68 ans et une dernière ne survit que 59 ans. Nous décrivons séparément les trois simulations longues et les deux simulations courtes:

- Pour les simulations longues il semble que le plateau comporte deux phases distinctes.

La première phase est marquée par des fluctuations amples. Dans la deuxième phase par contre l'amplitude des fluctuations diminue nettement et les captures sont plutôt corrélées aux conditions de l'année précédente (fig. 7.19).

- Pour les simulations courtes il n'apparaît pas de différenciation entre le début et la fin du plateau: l'amplitude des fluctuations ne change pas et il n'y a pas d'inversion dans l'ordre de la relation entre les captures et la crue (fig. 7.20).

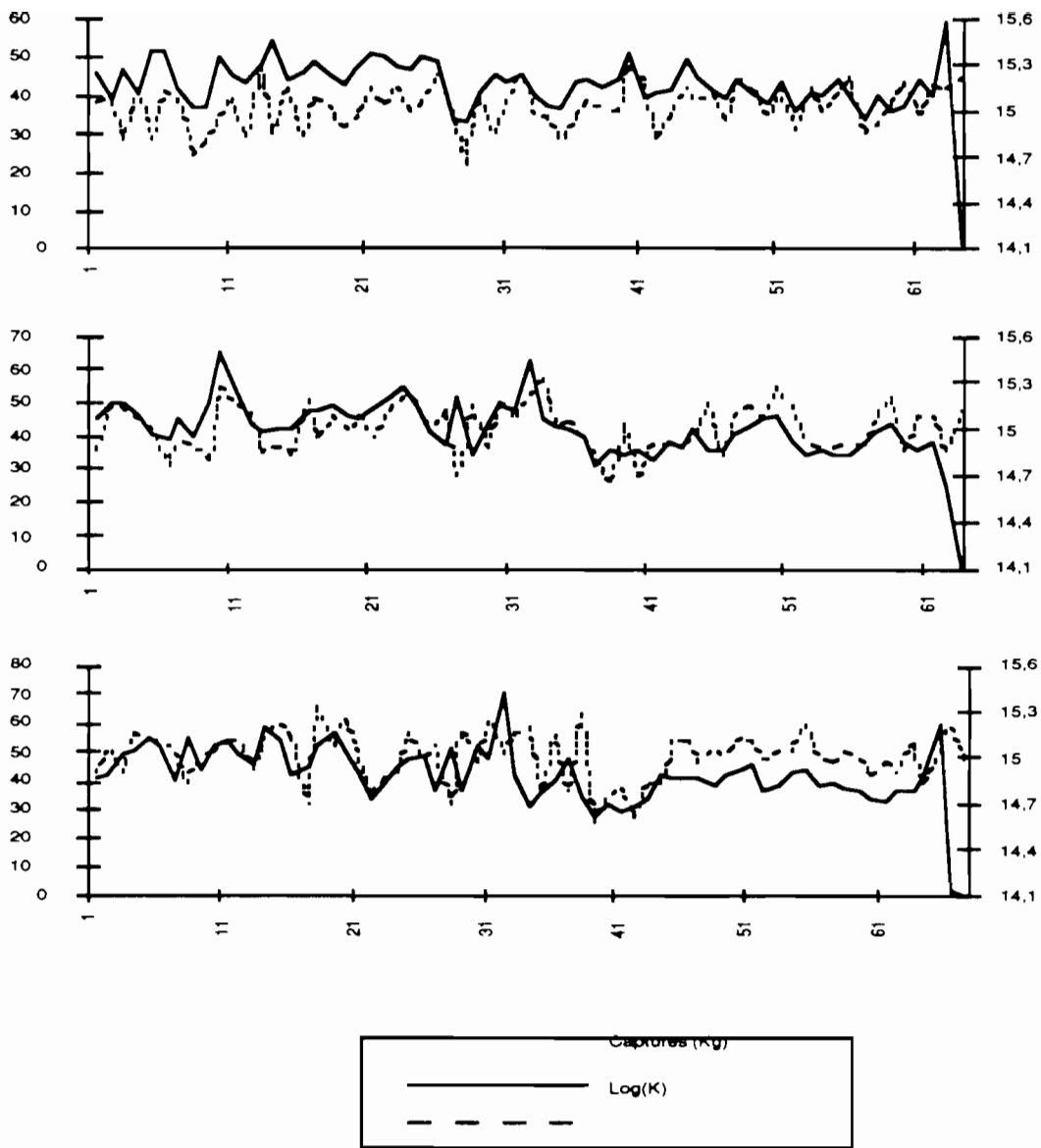


Figure 7.19: Évolution des captures sur le plateau en fonction des conditions environnementales de l'année précédente.

Simulations longues.

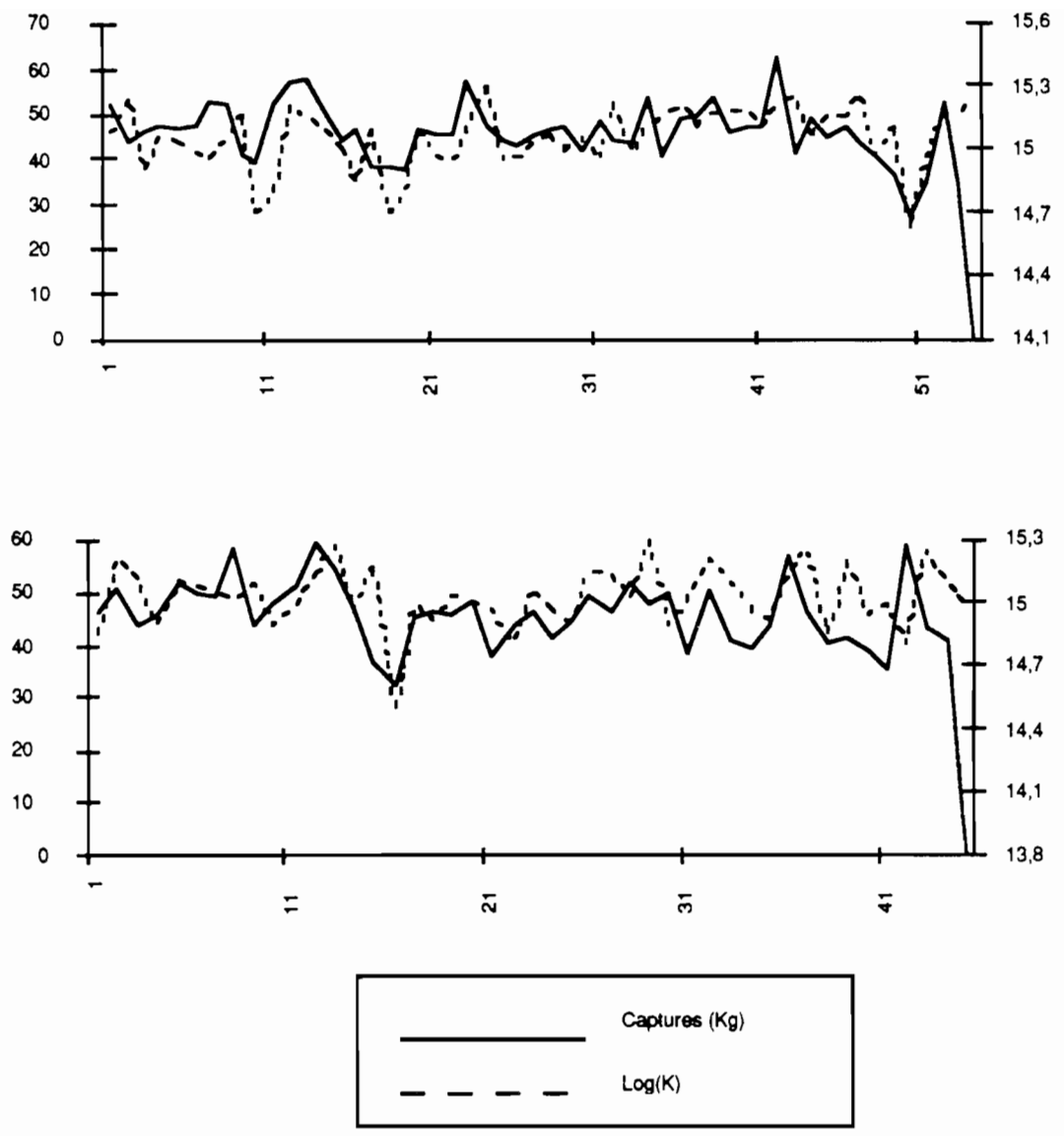


Figure 7.20: Évolution des captures en fonction des conditions environnementales de l'année précédente.

Simulations courtes

7.3.4 Interprétation écologique.

Proposer une interprétation écologique à partir de ces observations qualitatives, effectuées sur un si faible échantillon, peut paraître fantaisiste. C'est donc sous forme d'hypothèses que nous présentons la discussion suivante, en considérant cette expérience comme une sorte de pré échantillonnage au terme duquel on peut émettre des hypothèses et proposer une expérience pour les vérifier.

Au cours de l'évolution de la pêcherie, on identifie différentes phases écologiques qui conditionnent la relation à l'environnement.

Au début du plateau, les pêches sont constituées de poissons de grande taille. Lors de cette phase les captures sont sensibles à l'environnement et répondent amplement aux fortes variations. Puis, dans un deuxième temps, le système entre dans la phase de résistance. Il semble alors que deux trajectoires soient possibles: soit les captures se maintiennent au même niveau et continuent à présenter de fortes variations, soit les captures baissent légèrement et présentent des fluctuations plus faibles. Dans ce deuxième cas la durée de vie du système est plus longue.

Au fur et à mesure de l'intensification d'exploitation, le système se simplifie, les poissons sont de plus en plus petits, et il ne reste finalement plus que des poissons nés dans l'année. L'état du système ne dépend plus que de la quantité de poissons qui vont atteindre la reproduction suivante (il s'agit de poissons à date de reproduction fixe) pour donner une impulsion supplémentaire. Lorsque ce stade de l'exploitation est atteint le système entre dans une zone sensible au cours de laquelle il peut disparaître. Les simulations à fortes fluctuations présentent alors plus de risques de disparition.

Les systèmes mieux stabilisés qui atteignent le stade ultime de résistance (qui peut augmenter de 25% le temps de survie du système) montrent des captures corrélées aux conditions environnementales de l'année précédente. Cette observation vient appuyer l'hypothèse d'un état d'exploitation où les captures dépendent essentiellement du nombre de géniteurs.

En conclusion, il semble que le plateau puisse être divisé en plusieurs parties identifiables par la réponse de l'écosystème aux impulsions de l'environnement. Il est reconnu que sous les effets de la pêche les populations de poissons rajeunissent, ce qui change l'ordre de la relation à l'environnement: les événements les plus récents prennent une part de plus en plus importante dans l'explication de la variabilité des captures. Nos simulations montrent un autre phénomène qui intervient plus tard dans le processus d'intensification d'exploitation: en fin de plateau cette évolution peut s'inverser car les captures deviennent plus dépendantes de la quantité de géniteurs qui survit que du bon développement des recrues. Auquel cas, les événements des années précédentes (en particulier l'année précédente), reprennent de l'importance dans l'explication de la variabilité des captures. Ces remarques sont importantes pour l'observation de l'écosystème. La progression le long du plateau est dans un premier temps montrée par l'accroissement de l'influence relative des années les plus récentes. Mais une inversion de ce phénomène peut à la fois signifier que la pression sur la ressource se relâche, ou a contrario qu'elle s'accroît!

L'expérience soulève des questions et pose des hypothèses pour une expérimentation de plus grande envergure dont les résultats permettraient d'envisager l'utilisation de la réponse à la variabilité environnementale comme un indicateur de l'état d'exploitation du système.

"The fisheries literature has recently been flooded with correlative studies purporting to show how recruitment rates are related to various environmental factors. Each study generally contains a nice rationalization of the mechanism for the correlation as well as the usual litany of warnings about the risk of spurious correlation and about how the results should be viewed only as starting point for further research" (Walters et Colie, 1989). Il semble bien que notre conclusion se prête à la critique de ces auteurs. Mais, à la différence des études halieutiques in situ, l'avantage d'un univers artificiel est de pouvoir observer tout les paramètres, de pouvoir relier les indicateurs globaux (captures, corrélations) à la description exhaustive de l'état biologique (abondances, taille, production, productivité, reproduction, etc ...) et des processus qui expliquent ces indicateurs.

7.3.5 Cohérence avec le réel.

La relation entre les captures et les conditions environnementales est considérée à deux reprises dans le livre de synthèse qui clôture le contrat de recherche DCN. Elle est utilisée d'une part pour évaluer l'impact des modifications des apports en eaux sur les captures des poissons et d'autre part pour commenter l'évolution du peuplement de poissons, espèces par espèces. Le volume des pertes en eau du Niger entre l'entrée et la sortie du Delta est considéré comme le meilleur indicateur des conditions hydrologiques. La figure 7.21 présente l'évolution conjointe de cet indicateur et de la production de pêche estimée.

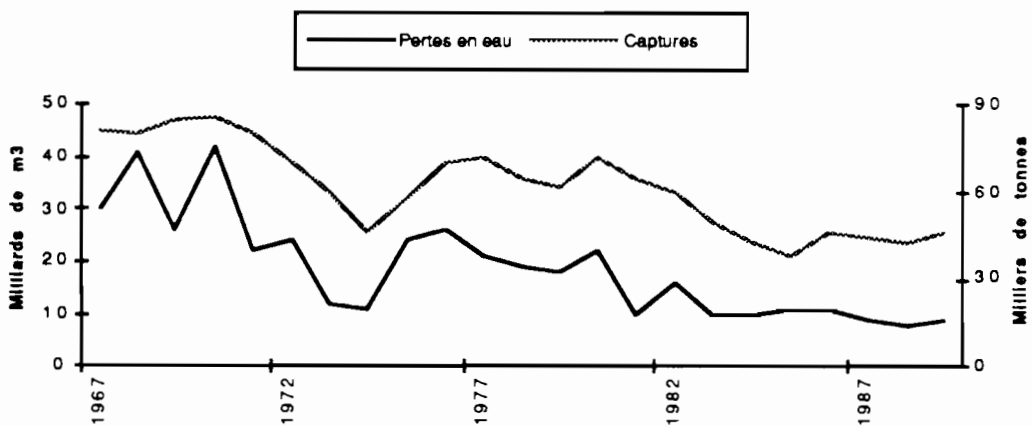


Figure 7.21: Courbes des captures annuelles et des pertes en eau à la crue dans le delta central (d'après Laë, 1992)

En reproduisant sur ces courbes l'analyse que nous avons proposée pour les simulations, trois périodes différentes apparaissent:

- ① les années 67-70, où la production ne semble pas très sensible aux pourtant fortes fluctuations des pertes en eau, ce qui pourrait être la conséquence de captures dont la distribution des âges est répartie sur plusieurs classes,
- ② les années 71-79 où la production semble surtout fonction des pertes en eau de l'année précédente, ce qui pourrait être un indicateur de captures essentiellement composées de poissons 1+ (nés au cours de l'avant-dernière saison de reproduction),

③ les années 80-88 où la production est corrélée aux pertes en eau de l'année en cours, ce qui va de pair avec une composition des captures comprenant 69% de juvéniles 0+ (nés durant la dernière saison de reproduction).

Cette analyse confirme le point de vue émis après la première expérience. Au regard de l'évolution de la relation de la production et des conditions environnementales, le delta, jusqu'en 1988, était en progression d'intensification d'effort.

Par ailleurs Quensière, Benech et Dansoko (1993) discutent l'évolution du peuplement de poissons, espèces par espèces. En les supposant confirmables et confirmées, les conclusions de nos simulations peuvent apporter un éclairage différent à certaines remarques. Les auteurs remarquent par exemple, pour deux des trois espèces qui se sont sensiblement raréfiées (*Schilbe* et *Heterotis niloticus*) que: "*L'abondance de l'espèce est bien corrélée à la crue précédente*". Il peut s'agir comme l'envisagent les auteurs d'une corrélation liée à une préférence du marché pour les grands individus, ou alors, comme le montrent nos simulations, d'une espèce qui devient de plus en plus rare et dont les captures sont donc corrélées aux nombre de reproducteurs de l'année précédente, plutôt qu'aux conditions de développement des recrues.

7.4 INTENSIFICATION D'EXPLOITATION DE PECHE ET FRAGMENTATION DE L'ESPACE.

La forme du "fishing-up process" a ceci d'inquiétant qu'elle se termine par une chute brutale des captures et une mort de la pêcherie. Devant l'inéluctable intensification de l'effort de pêche, le rôle de l'écologue-médecin est d'évaluer la capacité de résistance de son écosystème-patient, et si possible de la doper. C'est dans ce but que nous présentons une troisième série d'expériences, qui porte sur le rôle de la fragmentation de l'espace.

7.4.1 Hypothèses biologiques et halieutiques.

Le delta se caractérise par une multiplicité de milieux souvent temporaires exploités par des populations de pêcheurs qui se répartissent de façon hétérogène dans l'espace. Une fragmentation de l'espace, qui crée des zones plus ou moins protégées où les poissons peuvent trouver des refuges relatifs, peut-elle influencer sur l'évolution des captures?

7.4.2 Configuration du simulateur.

Les conditions expérimentales sont les suivantes (fig. 7.22). Nous avons fragmenté l'espace des simulations précédentes (qui était composé de deux milieux) en deux parties inégales:

- un milieu fleuve et un milieu plaine qui représentent chacun 75% ($K = 2500000$, $\alpha = 750000$) de l'offre de nourriture des simulations précédentes,
- un milieu fleuve et un milieu plaine qui représentent chacun 25% ($K = 8333333$, $\alpha = 250000$) de l'offre de nourriture des simulations précédentes.

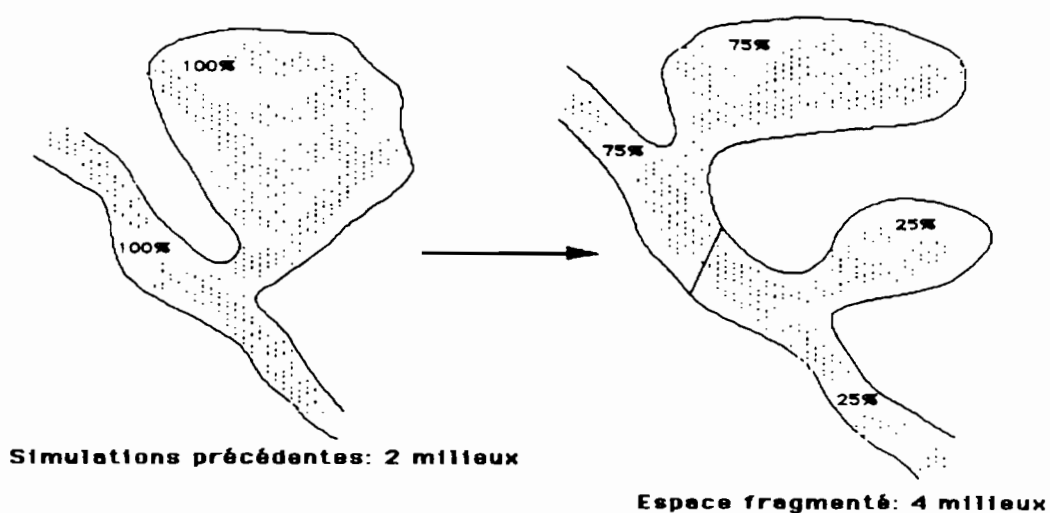


Figure 7.22: Schéma de fragmentation de l'espace.

Les connexions entre ces milieux sont présentées en figure 7.22. Nous effectuons cinq simulations en imposant l'effort sur les quatre milieux et cinq autres simulations en

n'imposant l'effort que sur le grand milieu fleuve-plaine. L'effort est augmenté arithmétiquement par pas de 6.

7.4.3. Résultats.

Les résultats sont présentés sur les figures 7.23 et 7.24. Les systèmes où les pêches portent sur les quatre milieux montrent une évolution des captures caractéristique de celles que nous avons décrites lors des simulations précédentes. A la suite d'une longue résistance la pêcherie disparaît définitivement (fig. 7.24). Par contre, lorsqu'il existe une portion de l'espace protégée, le système résiste à l'intensification de la pêche, connaît plus rapidement une baisse des captures mais ne disparaît jamais (fig. 7.23). De plus il conserve sa richesse spécifique.

7.4.4 Interprétation écologique.

L'étude de l'espace et de sa fragmentation, et plus précisément l'influence de cette fragmentation sur les interactions entre populations, constitue un thème majeur de l'écologie théorique (Kareiva, 1987; Hassel et al., 1992; May et Southwood, 1992). C'est aussi le cas pour l'écologie fluviale appliquée au delta (Quensière, 1991).

Les résultats de nos simulations rejoignent les résultats obtenus par d'autres modèles qui prennent en compte une quantité de biomasse inaccessible à la pêcherie (Laloë, 1989).

Cette expérience montre comment le caractère fragmenté de l'écosystème, avec des zones protégées, lui confère une meilleure résistance au stress d'intensification de pêche. Ainsi ces résultats appuient le discours des biologistes sur la bonne résistance du milieu deltaïque. En considérant la grande hétérogénéité interne du Delta, ainsi que les connexions avec les systèmes amont et aval, on peut admettre que la configuration du delta est une garantie de forte résistance, de nature à empêcher ou à retarder une catastrophe de surexploitation.

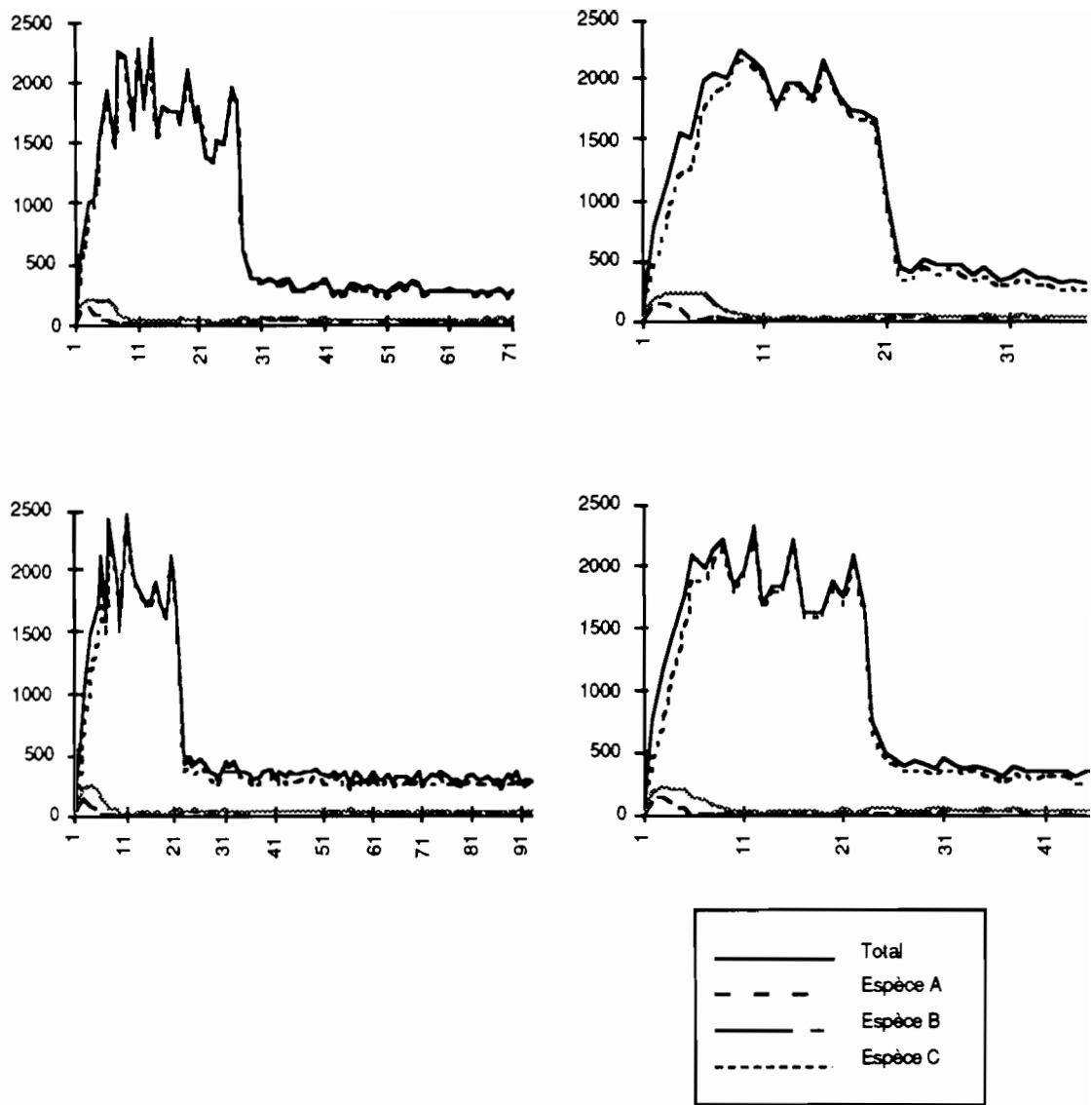
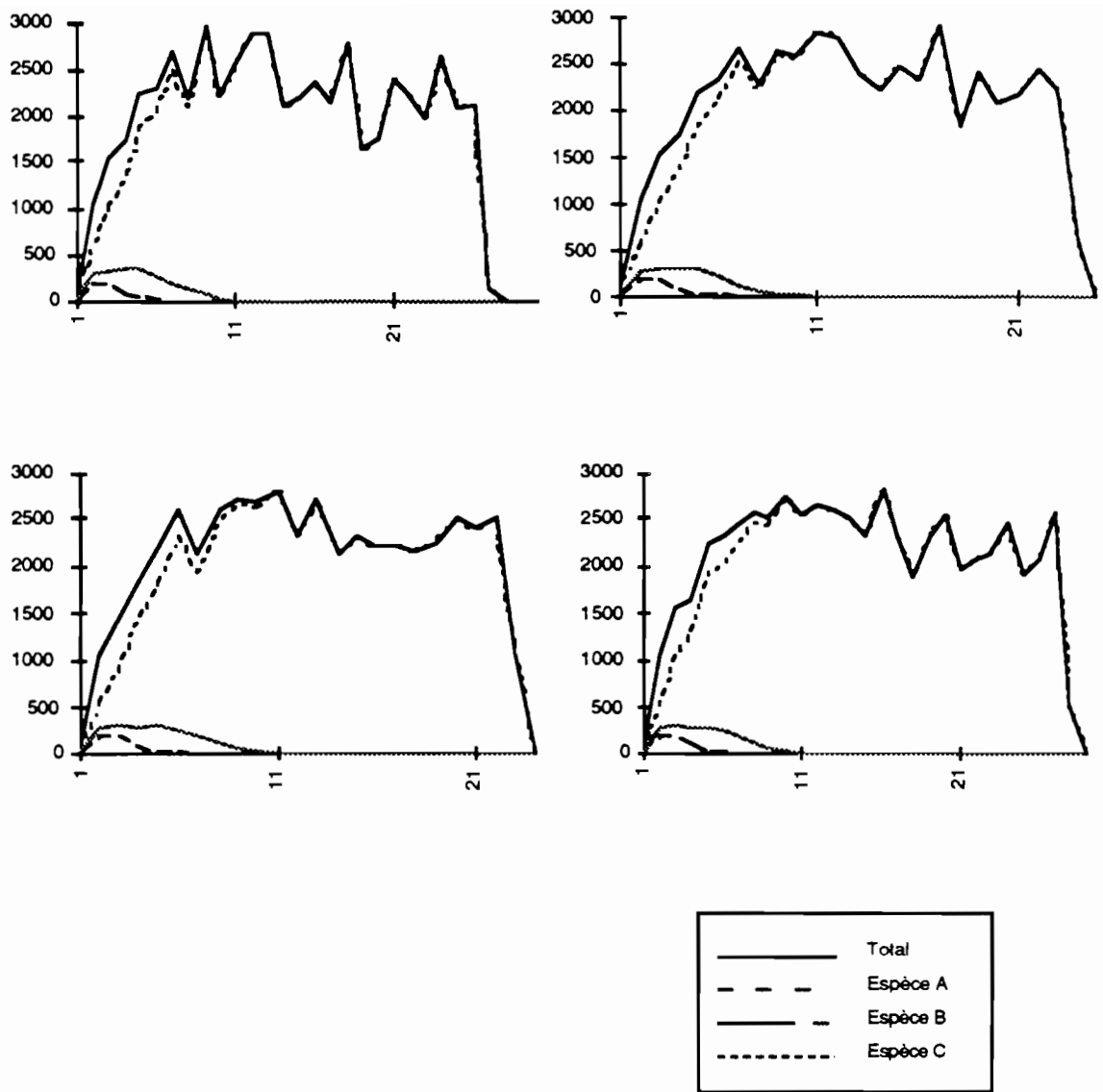


Figure 7.23: Intensification d'effort sur un espace fragmenté (2 milleux pêchés)



**Figure 7.24: Intensification d'effort sur un milieu fragmenté
(4 milieux pêchés)**

Il reste cependant que, même avec des espaces protégés, la pêcherie présente une chute brutale des captures, que l'on peut assimiler à un saut vers un autre attracteur. Il est vraisemblable que diverses configurations de l'espace exploité doivent présenter des trajectoires dynamiques différentes, avec des chutes des captures plus ou moins douces. Par ailleurs, le transfert des poissons de la réserve vers les milieux pêchés dépend des stratégies de migrations des poissons et des liens entre les deux sous-systèmes (réseaux à forte connectivité ou à faible connectivité).

Une autre expérience dans le prolongement de celle-ci consisterait à rechercher par simulations les fragmentations les plus efficaces (de multiples petits espaces très connectés ou de grands espaces peu connectés) pour maintenir le plus longtemps le niveau premier du plateau et atténuer la chute des captures. Il existe des recherches (Wilcox et Murphy, 1985; Schafer et Samson, 1985) qui concernent le problème de l'influence des réserves de poissons et de leur fragmentation sur la biologie des populations (single large or several small, SLOSS) mais une recherche bibliographique rapide ne nous a pas permis d'en trouver sur la fragmentation de l'espace et la pêche.

Cette expérience montre l'importance de la réflexion conjointe sur la fragmentation de l'hydrosystème et sur les stratégies de migration des poissons.

7.4.5 Cohérence avec le réel.

Dans les simulations où certains fragments d'espace sont préservés, la diversité du peuplement est conservée, même pour des efforts de pêche très importants. Cette remarque répond à la question qui demeure en suspens depuis la première expérience. Nous avons noté que tous les résultats convergeaient pour argumenter le fait que l'écosystème deltaïque connaît une intensification d'exploitation qui le fait progresser le long du plateau, sauf en ce qui concerne l'évolution du peuplement. L'expérience d'intensification avec un espace fragmenté montre que cette configuration permet de maintenir la diversité spécifique, alors même que l'intensification est très avancée.

Le soutien au delta peut passer par des mesures qui visent à favoriser la résistance de l'écosystème au moyen d'une fragmentation de l'espace adéquate. C'est une méthode envisagée pour soulager l'écosystème soumis à un fishing-up process. *"Probably the only economic method which might arrest the fishing-up process at a position more desirable than attained by market forces is to periodically prohibit fishing from certain strategic area (pulse-fishing)"* (Bailey et Petriere, 1989). Rien de très neuf dans cette conclusion: la fragmentation de l'espace par la différenciation des accès constitue la méthode la plus connue de protection de la nature (réserves, parcs, etc...). Cette conclusion qui intéresse directement l'aménageur, si elle semble régler les inquiétudes écologiques, renvoie aux conditions d'accès à l'espace par les populations de pêcheurs concernés.

7.5 AUGMENTATION DU NOMBRE DE PECHEURS.

Nous avons jusqu'à présent considéré l'intensification de la pêche à travers l'augmentation d'un vecteur effort, qui se traduit par une augmentation de la mortalité par pêche. Les expériences consistaient à observer le rapport de la capture en fonction de l'effort. Ces simulations correspondaient au point de vue de l'halieutique classique, qui s'attache à caractériser les réponses d'un écosystème à une pression de pêche à travers l'observation des stocks de poissons.

Depuis quelques années, et comme le montrent les récentes rencontres organisées par la communauté scientifique concernée (Durand et al, 1988; Gascuel et al., 1993; Laloë et al., 1993), l'halieutique a cessé de se focaliser sur la dynamique des stocks de poissons pour ouvrir son regard aux processus qui conduisent les pêcheurs à exploiter ces stocks. En parallèle à cette démarche, et puisque de nouveaux outils le permettent, la modélisation passe de la représentation d'un vecteur effort de pêche à la représentation du pêcheur et de ses processus de décision. Notre écosystème artificiel est composé de poissons et de pêcheurs. L'action de ces derniers est déterminée par des mécanismes individuels ou collectifs que l'on peut simuler pour en observer les conséquences sur la ressource.

Tel qu'il a été élaboré, le simulateur peut faire l'objet de nombreuses expériences. Pour illustrer ces potentialités, nous avons testé différents scénarios de simulation (Bousquet et al., 1992) qui comparent:

- des pêcheurs totalement rationnels sans aucune communication avec l'extérieur,
- des pêcheurs totalement rationnels qui présentent différentes attitudes vis-à-vis du risque induit par la variabilité intra-saisonnière des captures (risquée, moyenne, prudente),
- des pêcheurs contraints par des règles sociales de partage de l'espace,
- des pêcheurs qui ont des réseaux de communication de taille variable,
- des pêcheurs qui se rassemblent en groupes au sein desquels ils adoptent des attitudes de type leader, mimétique ou répulsive. Ces expériences ne constituent qu'un échantillon des possibles.

Dans le cadre de ce chapitre nous proposons trois expériences qui concernent une augmentation du nombre de pêcheurs et qui se différencient par les conditions d'accès à l'espace. Les raisons de ce choix de simulation sont à trouver à la fois dans un contexte relationnel et un contexte scientifique.

7.5.1 Contexte

7.5.1.1 Contexte relationnel.

Constituée de plusieurs anthropologues et économistes, l'équipe de recherche en sciences sociales a étudié finement les systèmes de production et d'activité dans plusieurs régions du delta. Donnée dans toute sa richesse et sa complexité, la connaissance sur l'organisation sociale est difficile à représenter. Un gros travail a été accompli au début de la modélisation par les chercheurs de l'équipe pour écrire les premières règles, les premiers scénarios. L'influence de ce travail fut primordiale puisque c'est à partir de ce document que furent modélisés les pêcheurs. Si la culture écologique est fortement imprégnée de modélisation, en socio-économie, par contre, les développements d'outils qui peuvent représenter des interactions sont récents. La perception du rôle de la modélisation n'est pas assez claire pour

que les chercheurs se l'approprient, comme les écologistes l'ont fait. Dans ce contexte un résultat éventuel de notre travail est d'avoir un peu dissipé ces nuages. Pour toutes ces raisons, les simulations que nous présentons dans ce chapitre et les discussions qu'elles provoquent s'appuient sur une synthèse et des choix personnels, à partir des productions écrites des chercheurs de l'équipe mais aussi à partir de réflexions plus générales sur l'usage de ressources renouvelables.

7.5.1.2 Contexte scientifique.

Au fur et à mesure des importantes transformations qu'a subi le delta depuis quelques années, la façon de penser l'activité de pêche, l'idéologie (Fay, 1991), a évolué. En conséquence la perception de l'accès des pêcheurs à la ressource a changé. A l'organisation traditionnelle de la pêche, basée sur un rapport aux divinités, a succédé une période de rupture liée à des changements des droits d'accès. Cela se termine de nos jours par une période où de nouveaux aménagements veulent être pensés.

En posant ainsi le problème, on rejoint les problématiques des recherches sur l'usage des ressources renouvelables ou des propriétés communes (Berkes et al., 1989a; Berkes, 1989; Ostrom, 1990; Rey, 1992). La pensée scientifique qui anime cette communauté est illustrée par une controverse: *"En 1968, G. Hardin publiait dans Science un article au titre devenu célèbre: "The tragedy of the Commons". La thèse en était qu'en l'absence de propriété de la ressource, l'accès libre à celle-ci conduisait à la surexploitation de la ressource et à l'inefficience économique. Reprise par de nombreux auteurs, la "tragédie des communaux", devenue "paradigme", conduit à préconiser l'appropriation privée des ressources et la régulation de leur exploitation par les mécanismes du marché.(...) En 1989, F.Berkes et al. publiaient dans Nature un article dont le titre vaut à lui seul contestation des thèses de Hardin: "The benefits of the commons". La conclusion principale en était que la propriété privée comme la propriété collective ou publique sont des modes également efficaces, dont l'efficience est entièrement dépendante du contexte écologique, économique, social dans lesquels on les rencontre." (Weber, 1993)*

L'étude des modes d'appropriation, c'est à dire des droits d'usage, des modalités d'accès, de partage et de transfert sont au coeur de l'étude des pêches (Réveret, 1991; Cormier-Salem, 1993; Verdeaux, 1992) au même titre que la dynamique des populations de poissons. Une difficulté consiste à étudier les interactions entre les processus de prise de décision (reflets de ces modes d'appropriations) et la dynamique écologique. C'est dans ce contexte que nous présentons nos simulations.

7.5.2 Hypothèses communes à toutes les simulations.

L'espace est constitué de quatre milieux (même configuration que lors de l'expérience 7.1.4) et on impose une variabilité climatique dans les mêmes conditions que pour l'expérience 7.1.3.

Au commencement de chaque simulation il y a 10 pêcheurs. Chaque année, au cours de la 29^{ème} semaine, 3 nouveaux pêcheurs sont créés. Pour anticiper sur les résultats de sa pêche, le pêcheur fait la moyenne des pêches passées (attribut attitudeRisque). La taille du ménage est tirée dans une loi normale de moyenne 7 et d'écart-type 2. Le pêcheur reçoit un exemplaire de chaque engin (sauf E4, voir plus bas) et une somme d'argent. Cette somme est égale à 50000 unités pour les 10 premiers pêcheurs; par la suite les pêcheurs ont un crédit tiré aléatoirement dans la distribution des crédits des autres pêcheurs. A chaque pas de temps le pêcheur subit une dépense alimentaire proportionnelle à la taille de son ménage et il est crédité du produit de la vente du poisson qu'il a pêché.

L'objet Marché contient une liste de prix. Le poisson peut être vendu sous trois formes (frais, séché, fumé) auxquelles correspondent trois prix (respectivement 6000, 2000, 7000 unités/kg). Dans ces simulations le poisson est vendu à 50% en frais, 25% en séché et 25% en fumé. L'objet Marché contient aussi les prix de quatre engins différents (E1, E2, E3, E4). Nous avons choisi de représenter quatre engins qui se différencient par leur efficacité et leurs prix (fig. 7.25). L'efficacité est la relation entre la capture et une densité de poissons (Laurec et Le Guen, 1981).

- E1 est un engin qui a la même efficacité dans tous les milieux. Il est relativement peu cher (11000 unités). Il fait référence aux engins modernes individuels généralistes tel l'épervier.
- E2 est un engin qui présente une bonne efficacité dans le fleuve, mais faible dans la plaine. Il est plus cher que E1 (35000 unités). Il fait référence aux divers filets maillants qui barrent le fleuve.
- E3 est un engin qui présente une faible efficacité sur le fleuve mais une bonne efficacité dans la plaine; il est le moins cher des engins (5000 unités). Il fait référence aux engins efficaces dans les zones inondables, pour piéger, ramasser le poisson, barrer des marigots. Les nasses de toutes sortes se retrouvent dans cette catégorie.
- E4 est inutilisable dans les plaines, mais présente une très grande efficacité dans le fleuve; il est très cher (750 000 unités). C'est le représentant des engins de ramassage dans le fleuve tels la senne.

Les engins s'usent: après 350 pêches, un engin disparaît. Il peut arriver qu'un pêcheur soit trop pauvre pour racheter un autre engin. La première éventualité que nous ayons envisagée est de faire disparaître ce pêcheur de l'écosystème (Bousquet et al., 1993).

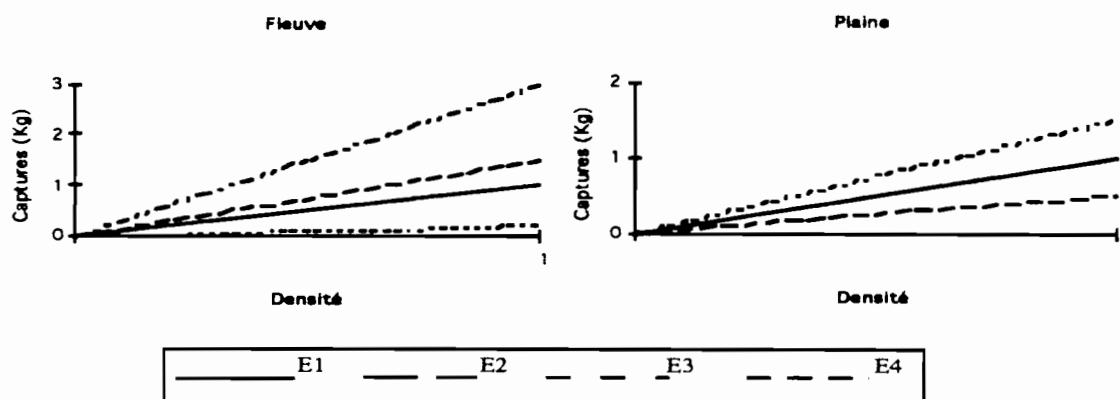


Figure 7.25: Efficacité des quatre engins

Les résultats (Bousquet et al., 1993) montrent que dans ce cas un équilibre est atteint entre les populations de pêcheurs et de poissons, avec une quantité stable de pêcheurs, un plateau infini pour les captures. Il s'agit en fait d'une représentation d'un système de type

"proie-prédateur" qui atteint le même attracteur pour différentes hypothèses sur l'accès à la ressource. La différence provient essentiellement de la comparaison des variabilités sociales (faibles) et écologiques (fortes).

Dans les expériences que nous présentons ici, et pour être cohérents avec les simulations précédentes, nous avons cherché à atteindre des situations de surexploitation extrême: si un pêcheur n'a plus les moyens de s'acheter un engin, on lui offre un épervier, et il reste donc présent dans la pêcherie.

La communication est totale: chaque pêcheur a accès aux résultats de tous les autres pêcheurs.

7.5.3 Hypothèses sur les processus de décision et l'accès à l'espace.

Nous avons provoqué trois types de simulations concernant une relation à l'espace particulière. Chaque type comprenant trois simulations.

Accès socialement réglé. Nous avons voulu simuler un système où la contrainte sociale est très forte. L'accès aux milieux est défini par l'identité sociale: en fonction de leur appartenance à un groupe social (qui peut représenter soit l'ethnie, soit le lignage), les pêcheurs peuvent accéder à une activité de pêche. Pour cela nous avons imposé des règles d'accès à l'espace, ou plutôt aux technotopes: "*la notion désigne le rapport décrit entre temporalité, spatialité et imaginaire technologique*" (Fay, 1989). Nous avons représenté cette contrainte lors de la phase de perception du processus de prise de décision: un interdit est posé sur les objets Technotopes non autorisés.

Nous avons séparé la population en deux groupes G1 et G2 représentés respectivement par 75% et 25% de la population. Les règles (le mot règle ne convient donc pas vraiment car il s'agit plutôt d'une représentation du pêcheur) sont les suivantes:

Pour le groupe G2, toutes les activités dans la plaine sont interdites. Dans le fleuve, toutes les activités sont autorisées, sauf les nasses en saison descendante.

Pour le groupe G1, toutes les activités dans la plaine sont autorisées. Dans le fleuve, les droits d'accès sont les suivants:

sais.\eng.	nasses	senne	épervier	maillant
bas	non	non	non	non
montant	oui	non	oui	oui
haut	oui	non	oui	oui
descendant	oui	non	non	non

Ces règles laissent des marges de liberté aux pêcheurs à l'intérieur desquelles ils choisissent de façon rationnelle, en prenant l'engin qui, d'après leur expérience, leur procurera le meilleur résultat.

Accès totalement libre et rationalité économique. Le second groupe de simulations présente le contexte opposé: l'accès est totalement libre. Le processus de prise de décision correspond à un modèle de rationalité économique en environnement variable: pour choisir, le pêcheur possède une distribution des résultats qu'il a obtenu dans le passé pour chaque activité et peut donc effectuer des comparaisons.

Le modèle de rationalité économique, le plus souvent appliqué au consommateur, est très critiqué, "*un minimum d'hypothèses ... un minimum de résultats*" (Attali, 1972). En conséquence certains auteurs parlent de rationalité limitée qui renvoie à l'idée d'une connaissance imparfaite (Le Moigne, 1993), d'autres émettent des doutes sur les réelles capacités stratégiques des acteurs sociaux (Sfez, 1993). Nous prenons ici ce modèle comme un cas d'école, un point de vue, de la même façon que pour l'accès régulé par des conditionnements sociaux. "*L'idéal type de l'Homo traditionnalus est tout aussi inadéquat que celui de l'Homo oeconomicus*" (Hugon, 1993).

Le cas de rationalité correspond par exemple aux attitudes qui ont pu apparaître avec la mise en place d'un permis de pêche national et avec l'apparition d'engins individuels multi-spécifiques multi-milieus. C'est la capacité d'investissement qui détermine l'accès

différencié à la ressource. On suppose qu'à tout moment, le pêcheur choisit parmi les seize activités possibles celle qui, pense t'il, dégagera le plus gros bénéfice.

Des réserves de pêche à places. Le troisième groupe de simulation reprend l'idée de fragmentation de l'espace et d'accès différencié. Un mode de gestion des ressources consiste à créer des réserves de pêche. S'il est difficile d'imaginer une réserve totalement protégée, on peut imaginer de fixer un certain nombre de "places". Nous avons fixé ce nombre à 5 pour les milieux fleuve³ et plaine⁴.

La prise de décision est rationnelle sans aucune contrainte sociale. A chaque pas de temps, si cinq pêcheurs ont rempli un milieu à places limitées, celui-ci est de fait interdit aux autres pêcheurs, qui doivent alors reporter leur effort sur les milieux fleuve¹ et plaine²

7.5.4 Résultats

Nous avons choisi d'observer plusieurs critères pour comparer ces simulations:

Les captures (fig. 7.26). La différence entre les trois configurations est nette. Les simulations en accès libre et en accès régulé par des contraintes sociales montrent un même maximum de captures, mais ce maximum dure plus longtemps dans le deuxième cas. Quant aux simulations à places, elles montrent des captures fortes, qui chutent avant de remonter à un haut niveau.

Les captures par pêcheur (fig. 7.27). Elles montrent les mêmes différences, qui sont cependant moins marquées. Ainsi, pour les simulations à places, les captures par pêcheur se stabilisent, mais à un niveau assez bas.

La composition spécifique des captures (fig. 7.28, 7.29, 7.30). Dans les simulations à accès réglé (fig. 7.29), la pêche est très majoritairement composée de l'espèce A. Les simulations à accès libre (fig. 7.28) 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 places (fig. 7.30), à la suite d'une très forte exploitation de l'espèce A, et d'une chute de cette espèce dans les

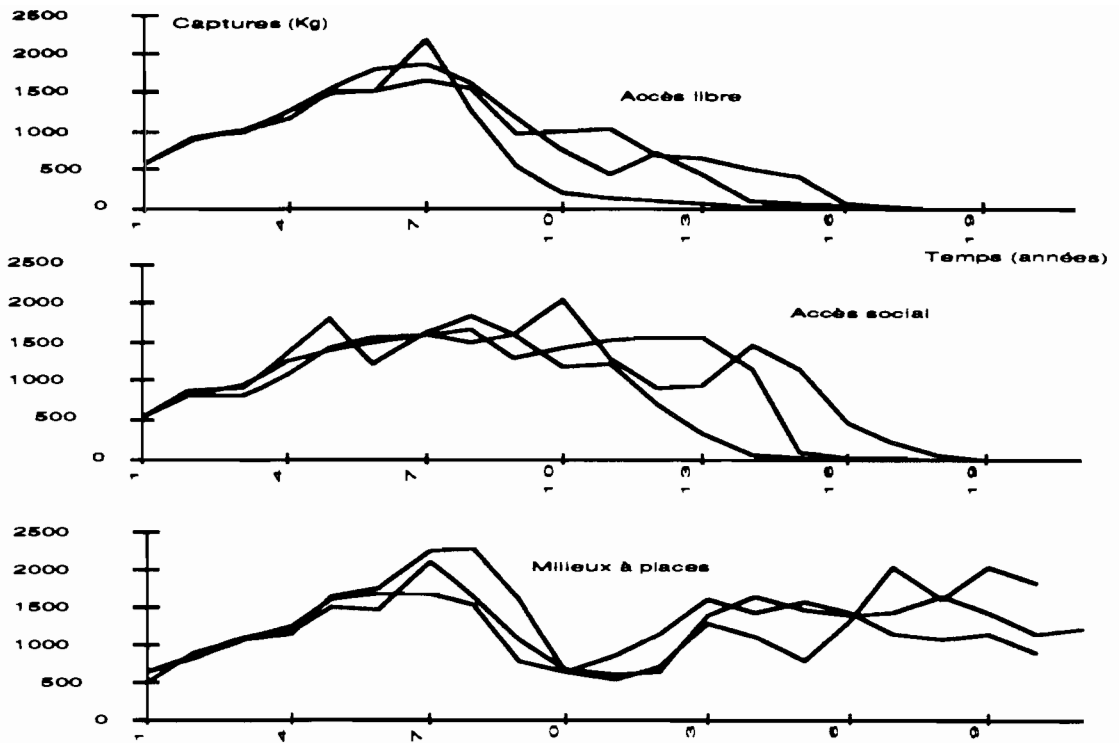


Figure 7.26: Évolution des captures en fonction des processus de décision.

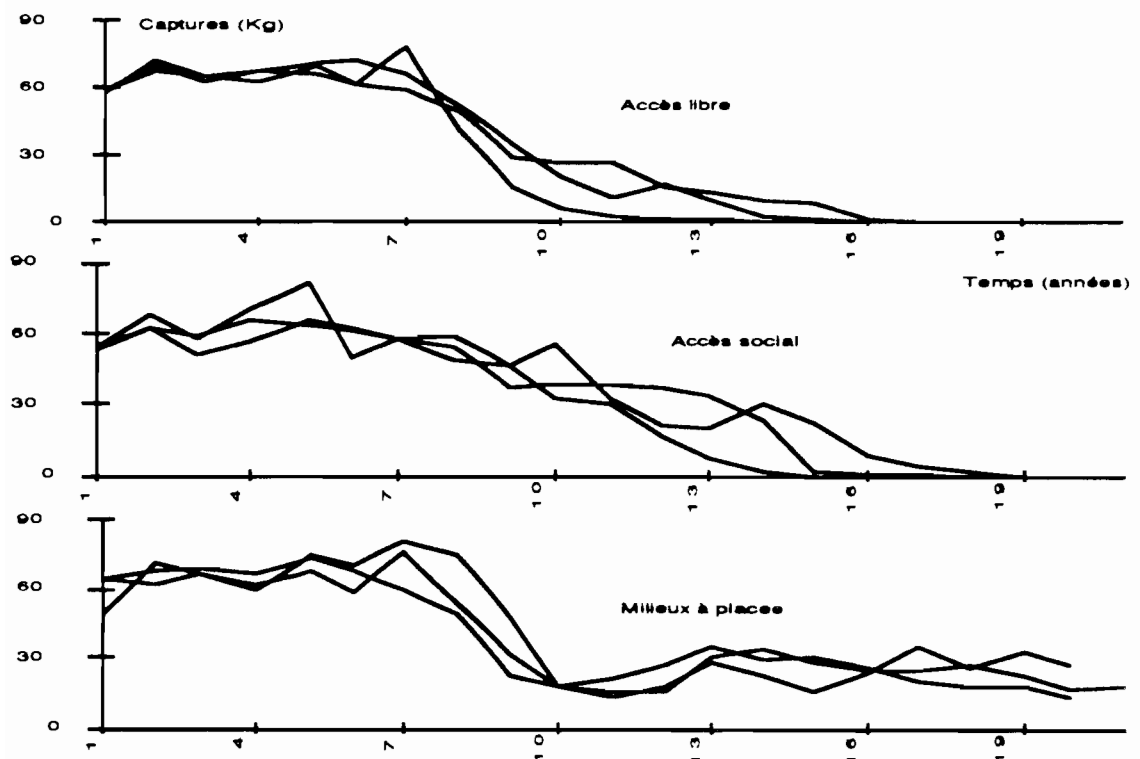


Figure 7.27: Évolution des captures par pêcheurs en fonction des processus de prise de décision.

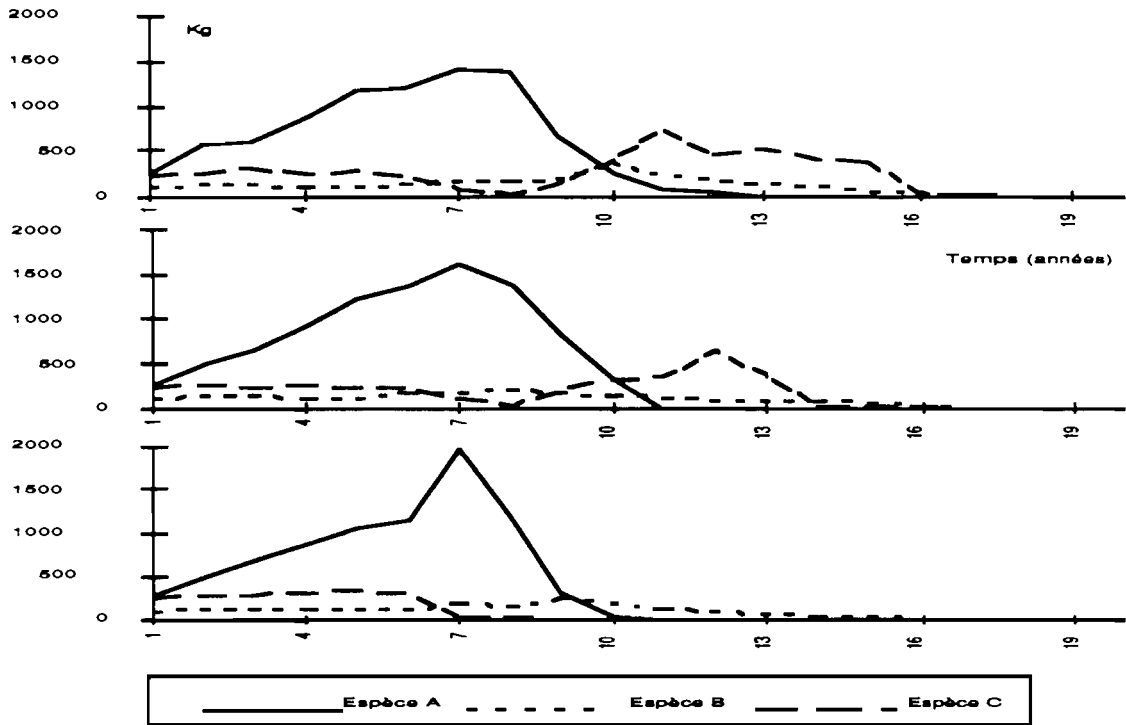


Figure 7.28: Évolution de la composition spécifique des captures

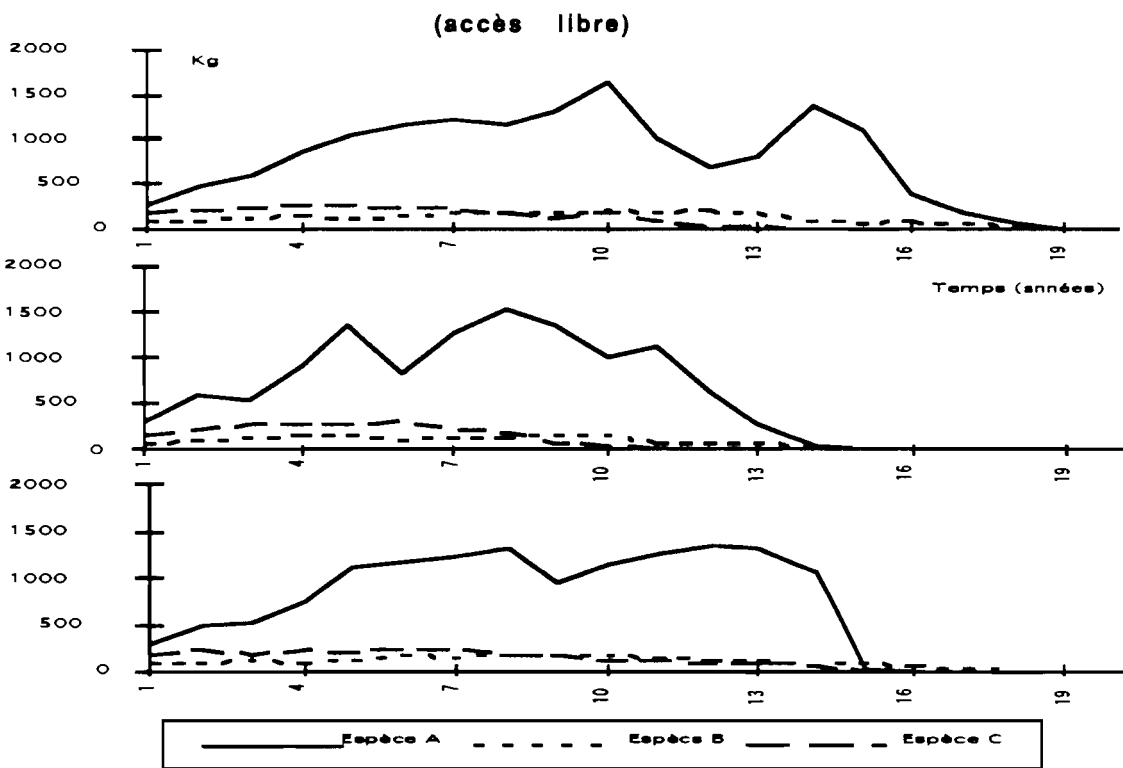


Figure 7.29: Évolution de la composition spécifique des captures (Accès socialement réglé)

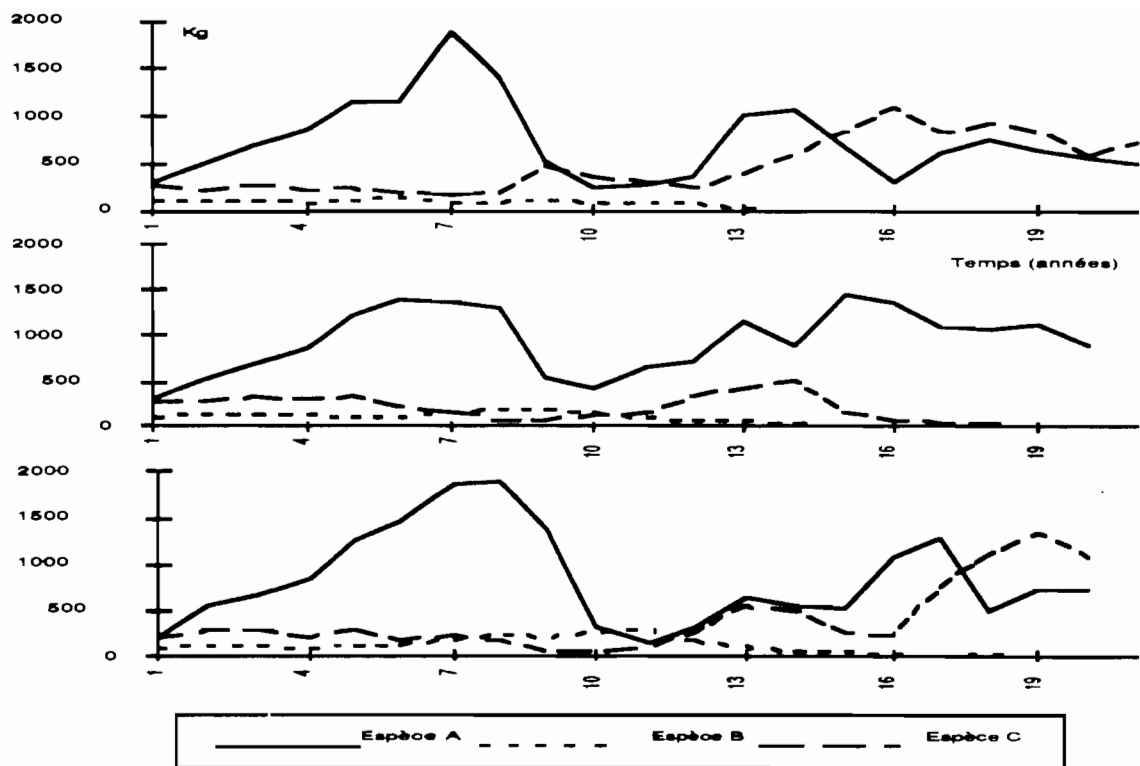


Figure 7.30: Évolution de la composition spécifique des captures
(Milleux à places)

captures, on assiste à une apparition de l'espèce C dans les captures. Cette espèce peut ensuite s'éteindre ou se maintenir à des taux très importants.

La distribution technique et spatiale des activités (fig. 7.31 à 7.36). Pour les trois configurations, la courbe des sorties par engins montre une très forte augmentation de l'utilisation de l'épervier. Cette observation correspond à un appauvrissement des pêcheurs qui se voient alors attribuer un épervier. Ce n'est donc pas le résultat d'un choix. Les filets maillants et les nasses présentent le même profil pour les trois configurations d'accès. La simulation à accès socialement réglé (fig. 7.33) se distingue des deux autres par l'utilisation des deux autres engins: au lieu d'une utilisation intense mais brève des sennes le nombre de sorties de sennes est plus faible au début mais se prolonge plus longtemps. On observe aussi que, même avant l'appauvrissement général, l'épervier est toujours l'engin le plus utilisé, alors que pour les autres simulations, il se situe bien en dessous des filets maillants et des nasses.

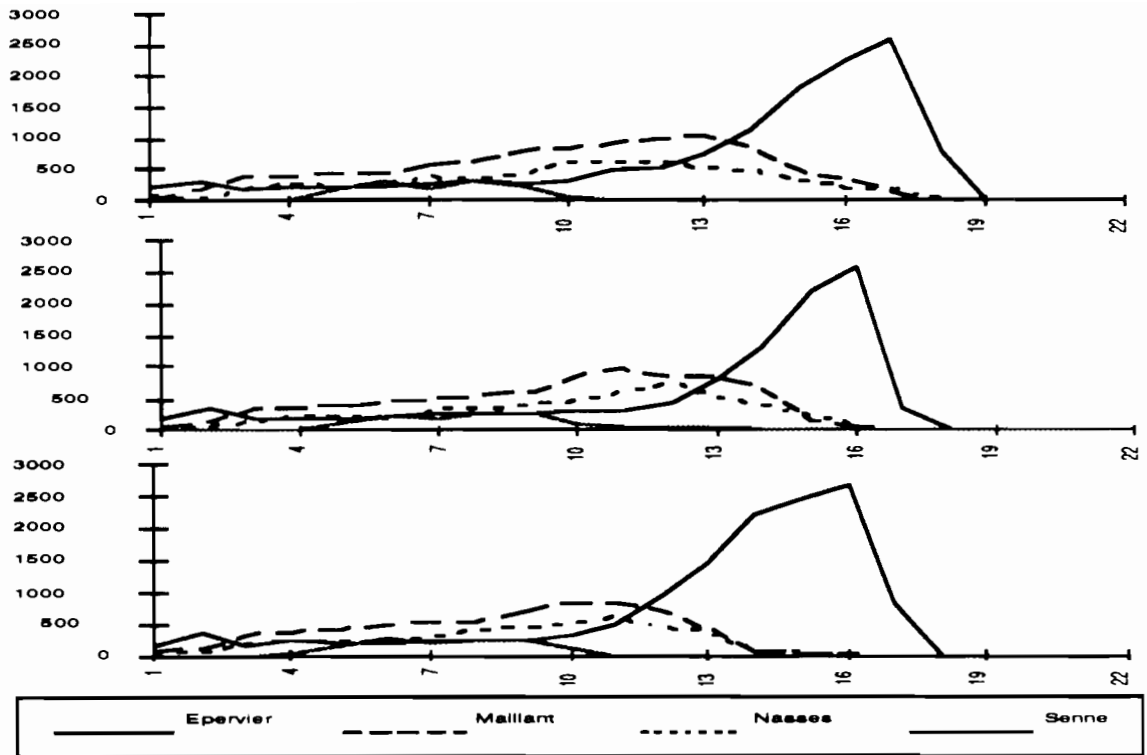


Figure 7.31: Nombre de sorties annuelles par engins pour les 3 simulations en accès libre

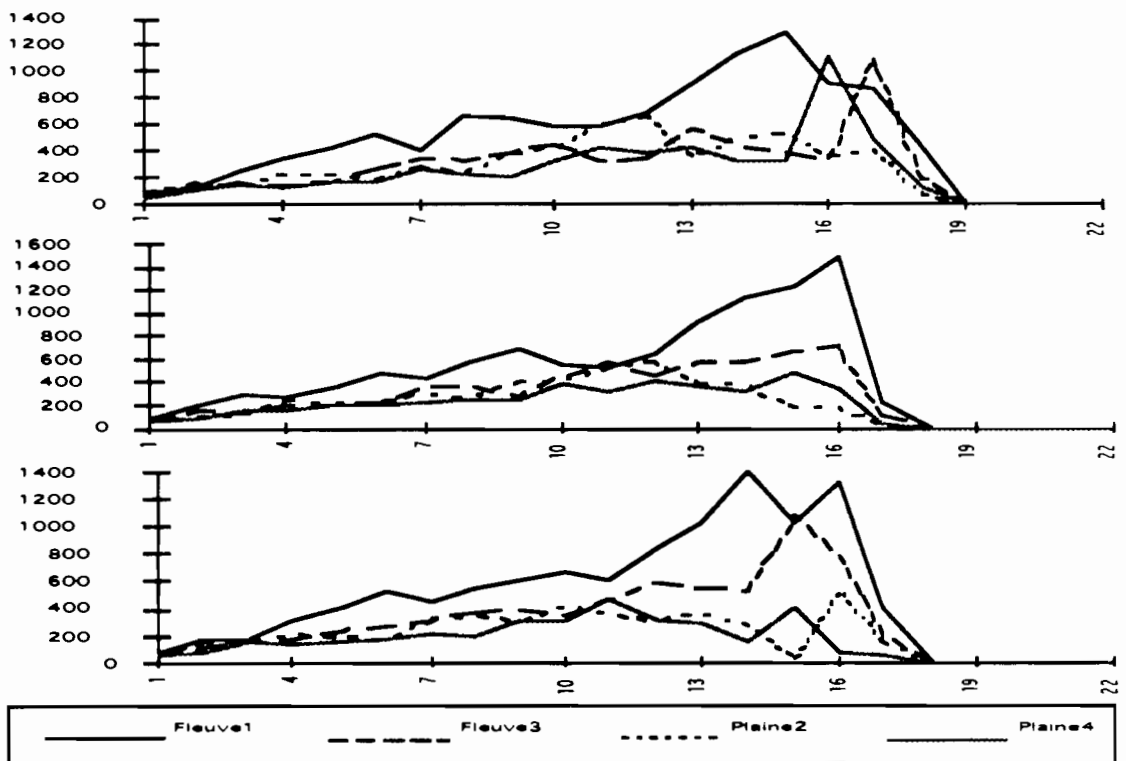


Figure 7.32: Nombre de sorties annuelles par milieu pour les simulations en accès libre.

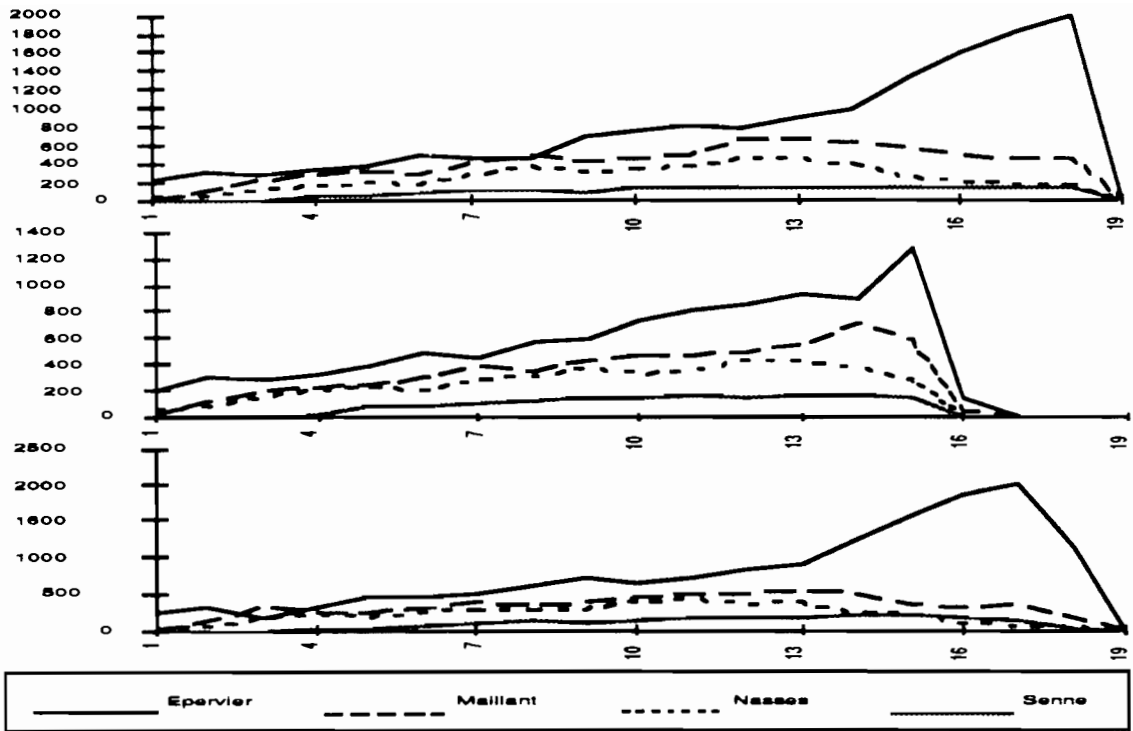


Figure 7.33: Nombre de sorties par engins pour les simulations à accès socialement réglé.

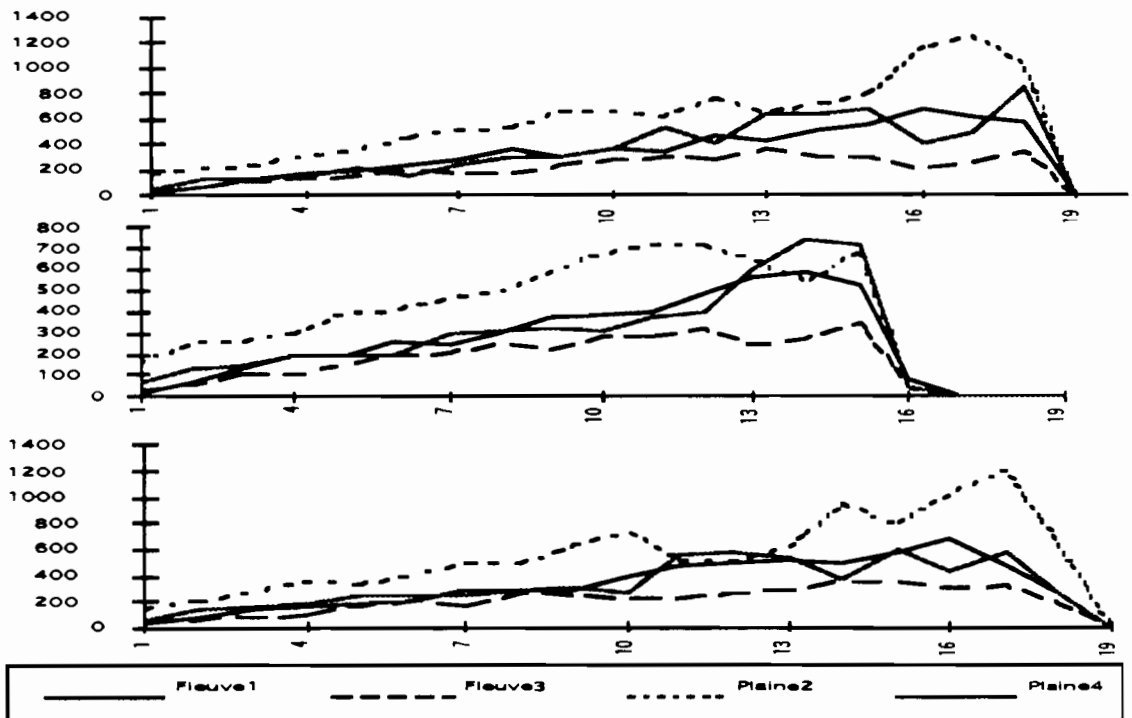


Figure 7.34: Nombre de sorties par milieu pour les simulations à accès socialement réglé.

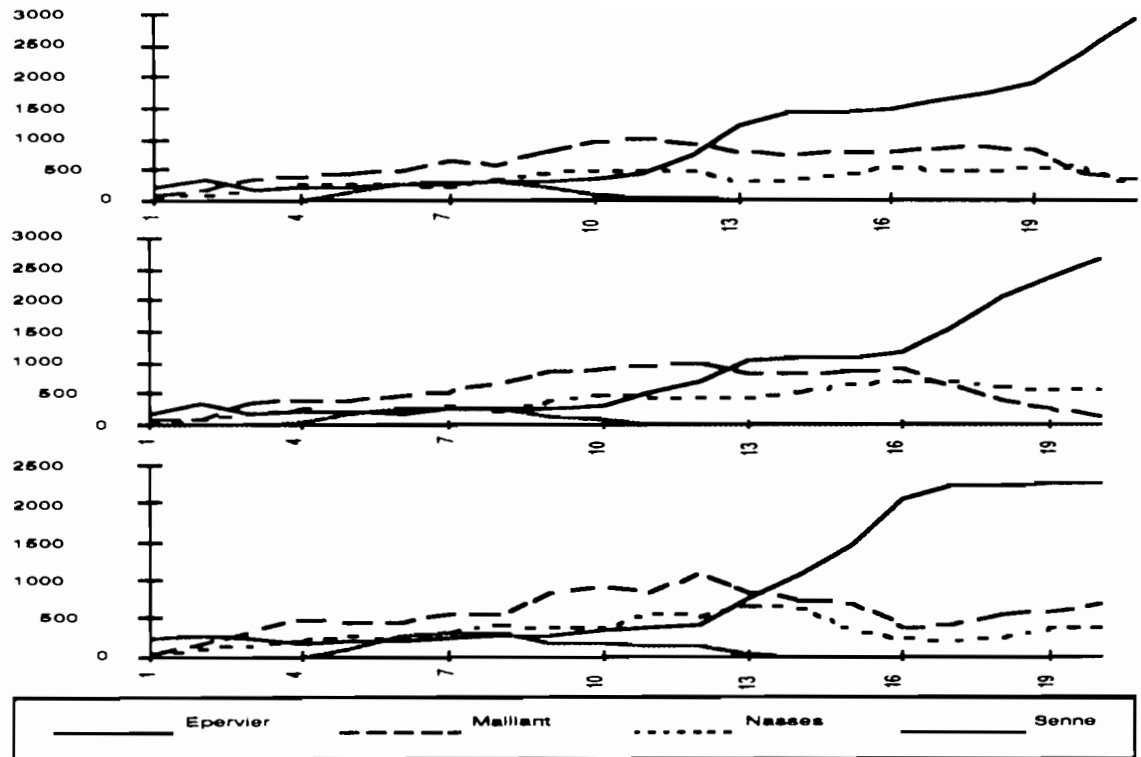


Figure 7.35: Nombre de sorties par engins pour des milleux à places.

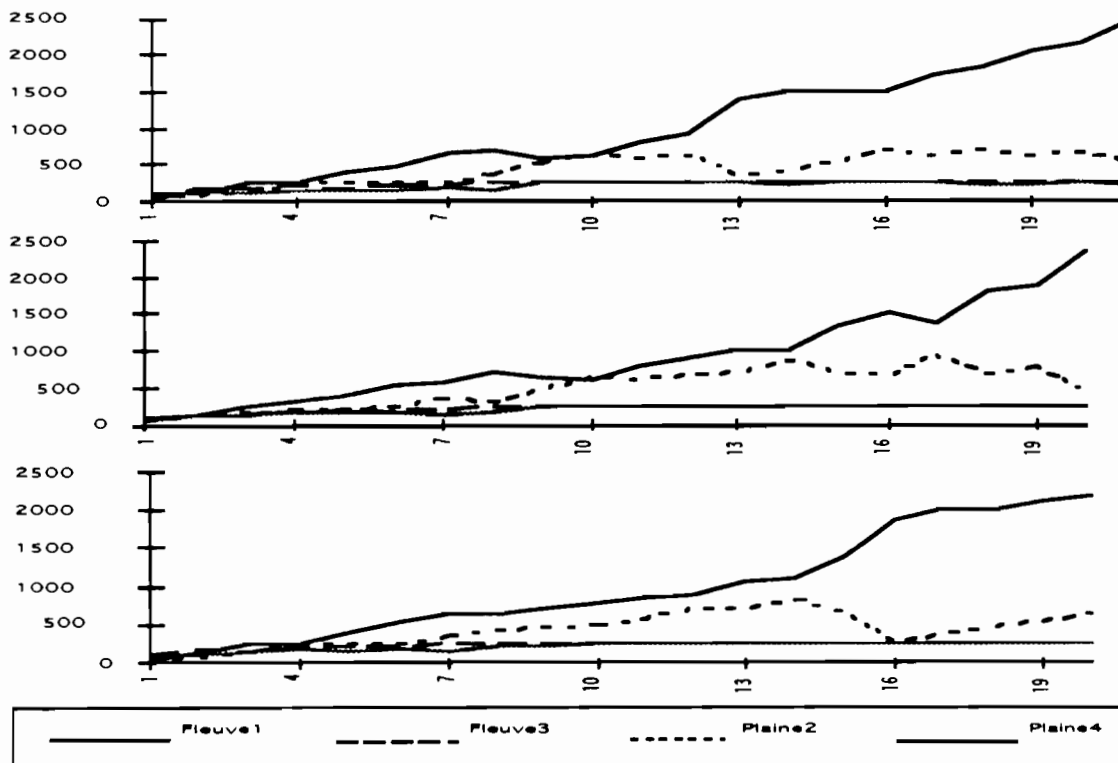


Figure 7.36: Nombre de sorties par milleux pour des milleux à places

La répartition dans les milieux est elle aussi différente suivant les simulations mais il est difficile de faire des remarques, car pour deux des configurations, l'accès à l'espace est en partie déterminé. On observe cependant que lorsque l'accès est libre, les pêcheurs s'orientent majoritairement sur le fleuve¹ mais que, en fin de pêcherie, apparaît une instabilité dans l'occupation de l'espace. Lorsque l'accès est socialement régulé, il est difficile de faire des commentaires. On vérifie pour la configuration à places que les milieux "réserve" sont toujours remplis et on remarque que lors de la surexploitation c'est vers la portion de fleuve que se reportent les pêcheurs.

Les bilans financiers des pêcheurs (fig. 7.37 à 7.39). Ces bilans sont très contrastés. Ils montrent une grande homogénéité dans la simulation à accès libre (fig. 7.37), seulement troublée par les grandes dépenses que constituent les achats de sennes. Lorsque l'accès est socialement réglé (fig. 7.38), les deux groupes G1 et G2 se séparent très nettement. Dans les systèmes à places (fig. 7.39), et étant donné l'accès aléatoire à ces réserves on observe une instabilité plus importante de la hiérarchie financière.

On constate, que le bénéfice dégagé par le groupe tout entier est plus fort, et dure plus longtemps pour les simulations à accès régulé (fig. 7.40).

7.5.4 Interprétation.

Pour mettre en correspondance les différents indicateurs qui permettent d'observer le système, il importe de reconstituer la chronologie des événements de chacune des trois simulations.

7.5.4.1 Accès libre.

Tel que nous l'avons représenté, le pêcheur cherche à tirer le maximum de profit de la pêche. Les connaissances sur les résultats des pêches précédentes étant totalement partagées entre les pêcheurs (la mémoire est collective), la différenciation des activités se fait uniquement par les moyens d'investissement. L'exploitation de pêche commence par se consacrer à l'espèce A (fig. 7.28). En effet celle-ci se reproduit à la crue et se concentre dans les milieux fleuve à l'étiage, ce qui la rend très disponible à la pêche.

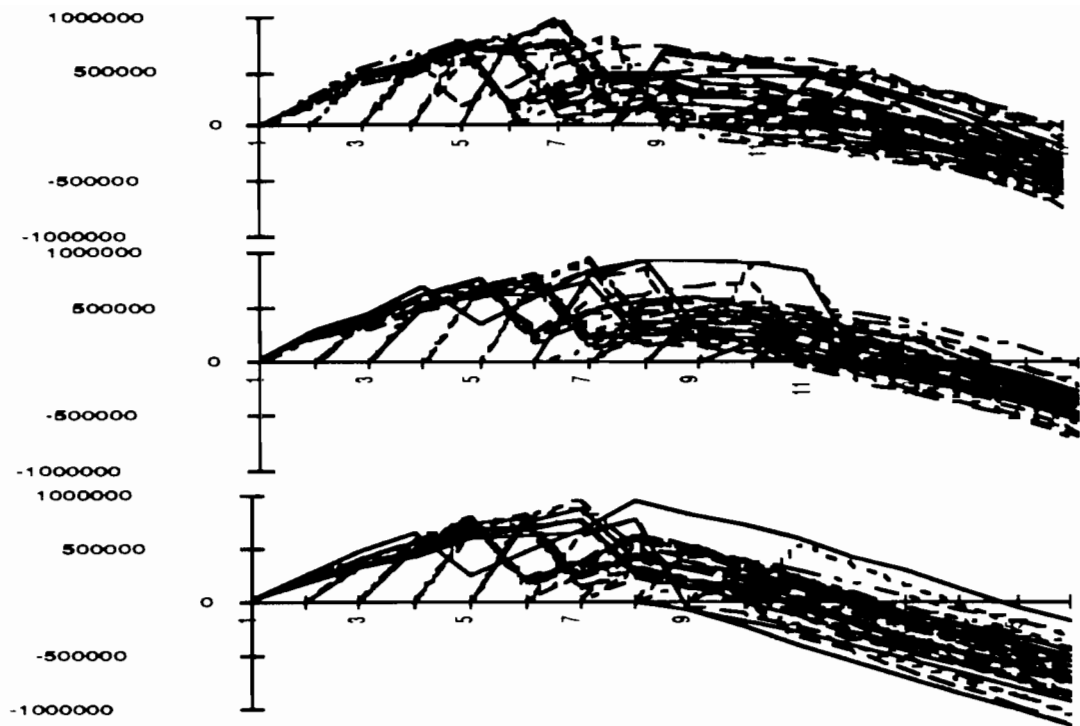


Figure 7.37: Évolution des finances des pêcheurs pour les simulations en accès libre

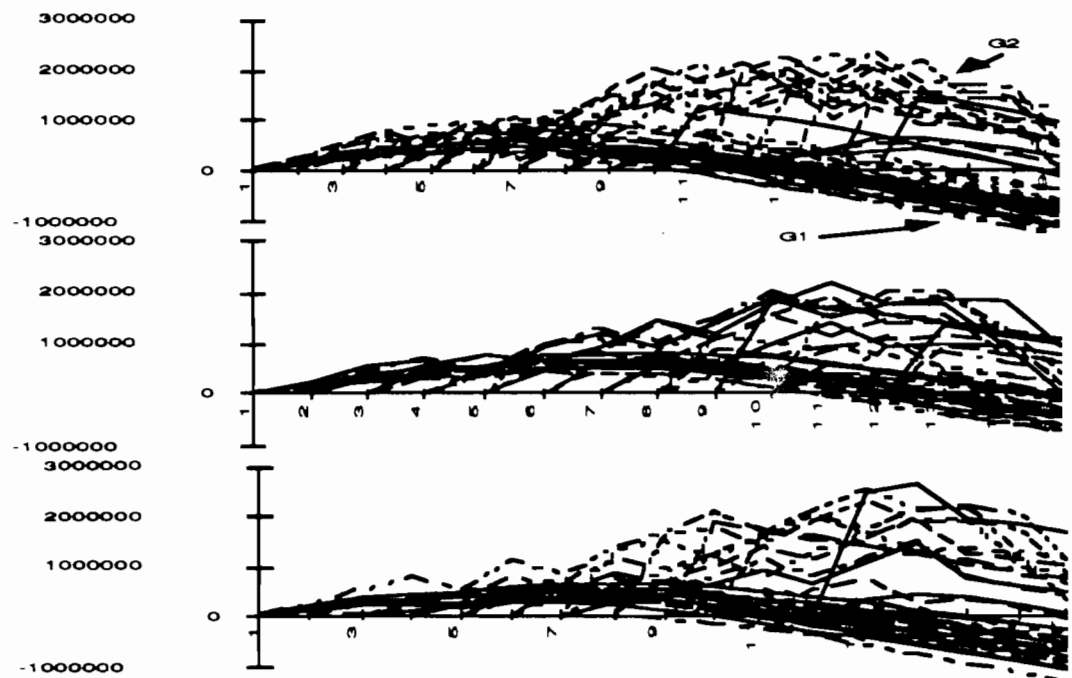


Figure 7.38: Évolution des finances des pêcheurs pour des simulations à accès socialement réglé.

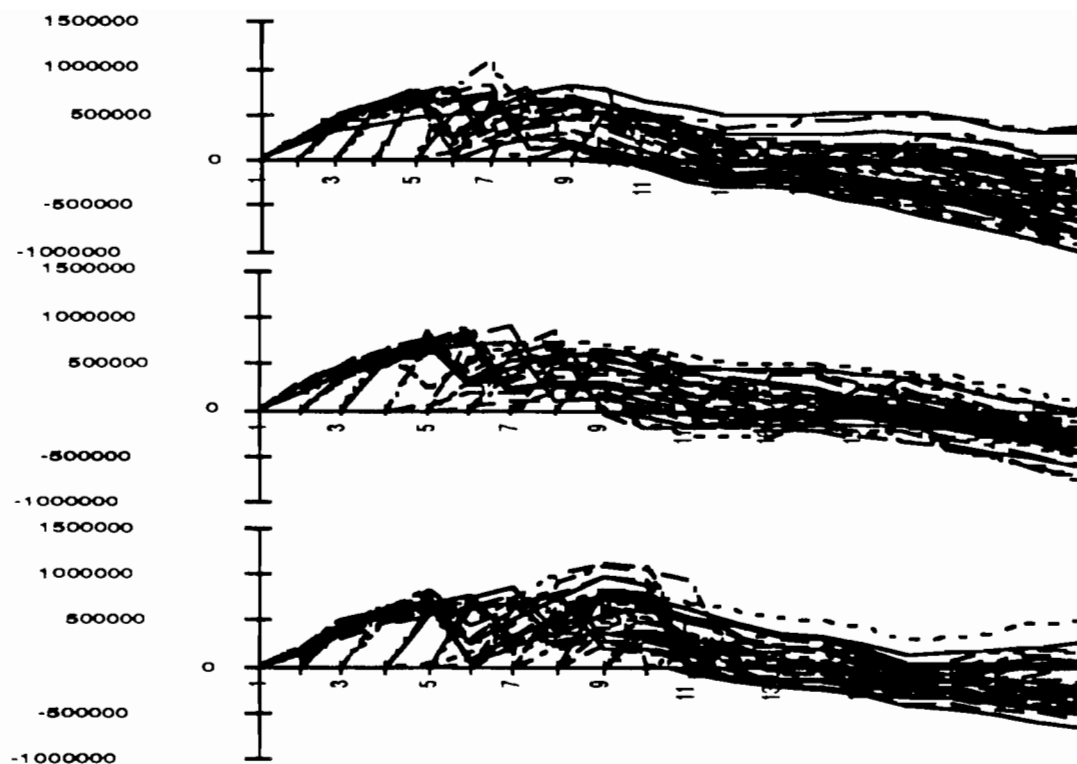


Figure 7.39: Évolution des finances des pêcheurs pour des milieux à places.

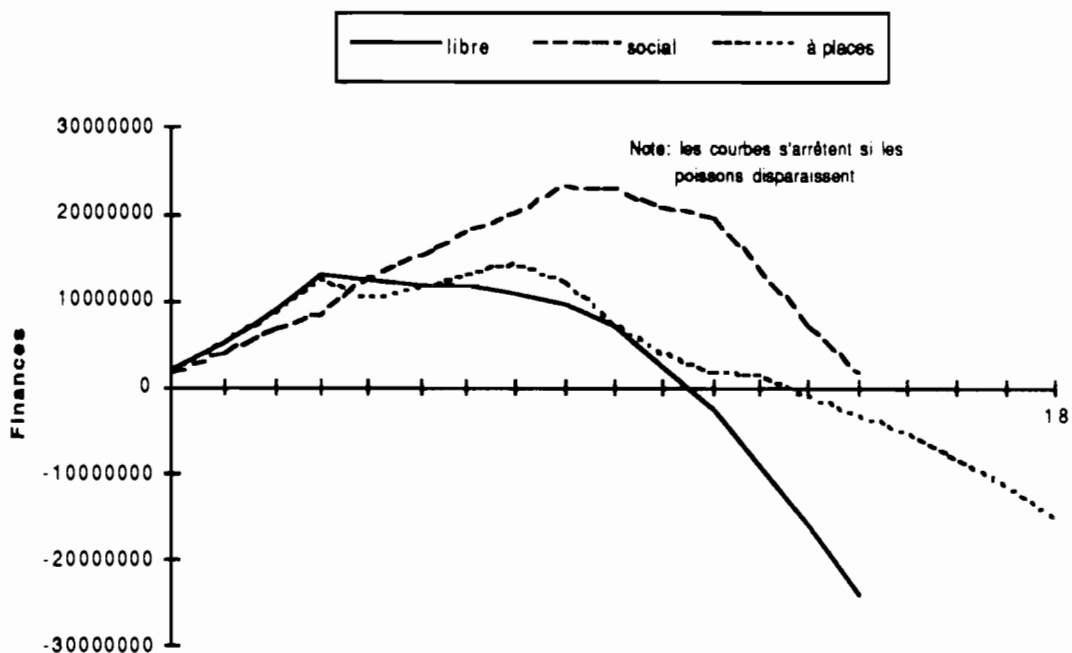


Figure 7.40: Moyennes annuelles des finances totales

Les captures augmentent donc rapidement et, peu nombreux, les pêcheurs s'enrichissent. Après quatre ans ils ont accès à des engins chers et très performants, les sennes (fig. 7.31 et 7.37). Cela leur permet d'augmenter encore les captures, mais ces engins "ramassent" tous les géniteurs de l'espèce A dans les portions de fleuve. En conséquence, avec la disparition de l'espèce A les captures chutent. Les espèces B et C, qui migrent en fonction de leur satisfaction alimentaire, se répartissent de façon assez homogène dans tous les milieux. En particulier, un certain nombre de poissons, ne redescend pas dans le fleuve à la décrue, et ces espèces "échappent" ainsi aux grandes pêches de ramassage à la senne de la 7^{ème} et 8^{ème} année dans le fleuve. En conséquence de ce maintien, et par l'effet de la disparition d'un compétiteur, lorsque l'espèce A disparaît des captures on peut observer une brusque apparition de l'espèce C dans les captures (fig. 7.28). Les pêcheurs abandonnent alors la senne, utilisent les nasses et filets maillants, avec une diversification des milieux exploités (9-13^{èmes} années) (fig. 7.31). Enfin, en raison de l'appauvrissement dû à la chute des prises par effort, la pêche à l'épervier dans la grande portion de fleuve devient prédominante. Dans un dernier soubresaut, les pêcheurs explorent tous les milieux puis la pêcherie disparaît.

7.5.4.2 Accès socialement contraint.

Les captures sont essentiellement constituées de l'espèce A et ce jusqu'à la fin de l'exploitation (fig. 7.29). Le maintien de cette espèce peut s'expliquer par l'interdiction faite au groupe G1 (75% de la population) de pêcher dans le fleuve à l'étiage: le "ramassage" des géniteurs est ainsi retardé. En conséquence de ces interdits, l'enrichissement des pêcheurs (fig. 7.38) est moindre lors des premières années mais il est suffisant pour qu'ils augmentent leur capital, possèdent et utilisent une panoplie d'engins variés (fig. 7.33). L'achat de sennes par des pêcheurs du groupe G2 va modifier le système. Peu nombreux et ayant accès à la production la plus lucrative, ils vont alors s'enrichir (fig. 7.38). Ces sennes vont faire fortement augmenter les captures de l'espèce A qui atteignent un maximum lors de la 5 ou 6^{ème} année. Cependant les pêcheurs du groupe G2 sont trop peu nombreux pour vaincre

rapidement les mécanismes de résistance; les captures restent fortes quelques années puis chutent complètement. Les pêcheurs du groupe G2 bénéficient de très bonnes pêches jusqu'au bout de l'intensification (fig. 7.38). Les pêcheurs du groupe G1 par contre voient leurs bénéfices diminuer à partir de la 7-8^{ème} année.

Le déploiement spatio-temporel des pêcheurs maintient donc la pêcherie de l'espèce A. En contre-partie, les pêcheurs du groupe G1 portent leur effort d'étiage sur les milieux plaines et exploitent donc l'espèce C. Celle-ci ne bénéficie donc d'aucun allègement de la pression de pêche et disparaît sans jamais avoir représenté une pêcherie quantitativement conséquente. L'espèce B, qui se reproduit elle aussi avec la crue, se maintient jusqu'à la fin.

Au total c'est avec cette configuration que se dégage le plus gros profit total et avec elle aussi que dure le plus longtemps l'augmentation des bénéfices (fig. 7.40).

7.5.3.3 Les simulations à places.

Dans un premier temps, l'évolution de la pêcherie ressemble à la simulation en accès libre. Les pêcheurs sont peu nombreux, s'enrichissent en exploitant surtout l'espèce A et finissent par acheter des sennes la 4^{ème} année (fig. 7.35). Après une excellente campagne la 7^{ème} année, et donc un fort ramassage, la chute des captures se produit (fig. 7.30). C'est alors que se produit une recolonisation grâce à la zone de réserve. Cet événement a des conséquences sur la composition spécifique des captures. L'espèce C prend une part importante dans les captures. Ceci est sans doute dû aux caractéristiques biologiques de l'espèce (reproduction opportuniste qui lui permet d'envahir plus vite un milieu peu peuplé), ainsi qu'au changement de régime d'exploitation qui se porte alors plus vers le fleuve que vers la plaine à partir de la 13^{ème} année (fig. 7.36).

La hiérarchie financière des pêcheurs est instable. Grâce aux fortes captures du début, ils sont tout d'abord très équipés, puis après de très bonnes campagnes de pêche à la senne certains font l'erreur de réinvestir dans cet engin. La chute de la pêcherie de l'espèce A les surprend alors. Après 10 ans un grand nombre de pêcheurs s'est appauvri mais quelques uns, qui ont pu garder une panoplie d'engins variés (on remarque un nombre important de pêches au

filet maillant et aux nasses fig. 7.35), peuvent encore accéder à la ressource et augmentent un peu leurs bénéfices. Il n'y a donc pas disparition de la pêche, mais les pêcheurs se retrouvent dans un état de pauvreté qui va s'aggraver doucement avec l'augmentation du nombre de pêcheurs.

7.5.5. Cohérence avec le réel.

Ces simulations sont réalisées sur des systèmes très simplifiés mais on peut, en s'appuyant sur ces univers artificiels, s'interroger sur les conditions d'apparition de ces phénomènes, et transposer certains sujets de discussion au monde étudié. La première discussion concerne l'effort de pêche à l'étiage, la deuxième a pour sujet l'évolution de la composition spécifique en fonction du processus de l'accès à l'espace des pêcheurs.

Effort de pêche à l'étiage. Les simulations à accès libre et les simulations à places présentent des pêcheurs dont le processus de décision rationnel les conduit à un investissement maximum dans les engins performants. Dans les deux cas on observe une chute des captures qui fait suite à une utilisation importante des sennes à l'étiage. Il en résulte une raréfaction des géniteurs qui entraîne la chute des captures de l'espèce A (la première exploitée). La différence entre ces deux cas de figure et la simulation où l'accès est socialement contraint réside dans le nombre de sennes qui ont accès au fleuve à l'étiage. Un nombre plus réduit de sennes permet à une population suffisante de géniteurs de survivre.

Ainsi, dans les univers artificiels, un système de pêche qui prévoit un freinage du "ramassage" des poissons à l'étiage, moment où la capturabilité est maximale, conduit à une relation plus pacifique avec l'écosystème. Dans le réel, d'après le système traditionnel, (voir encadré) les pêches qui prélevaient le poisson sur son passage étaient libres et les pêches liées à une rétention du poisson étaient collectivement réglées, et faisaient dans certains cas l'objet de sacrifices rituels. Sans juger de son efficacité, car du point de vue de l'effort, les pêches de ramassage existaient bel et bien, ce système rendait considération des points sensibles de la ressource. Remarquons que *"les Bozo ont donc assimilé spontanément (du point de vue du traitement symbolique) la senne, engin étranger ramassant, balayant tout le*

poisson présent à un barrage" (Fay, 1989). L'engin E4 que nous avons créé représente des engins qui, dans leurs relations à la ressource, faisaient (font?) l'objet du traitement symbolique le plus marqué.

Le savoir commun comme moyen de production

Toujours au carrefour des trois nécessités indissociables (production/articulation des productions/reproduction des stocks), la règle fondamentale était donc de laisser circuler le poisson dans le fleuve d'un groupement de pêcheurs à l'autre. Les pêches "totalement libres" sont des prélèvements dans le cadre de la circulation. Toutes les pêches qui sont des "chasses" dans le fleuve, au passage du poisson, offrent la caractéristique d'être organisées à partir de préséances lignagères et/ou villageoises (*gambo, tanga mu*). Mais les "maîtres" (des rives ou des fleuves) ne s'approprient aucune part du produit. Les pêches individuelles, relevant de la même logique, sont libres sauf pendant les mises en défens. La pêche au *kow*, à mi-chemin entre le ramassage et la chasse, mais qui concentre le poisson en l'attirant et non en le barrant, fait l'objet d'exclusivités lignagères. (...). Les pêches de barrage qui ramassent le poisson en l'empêchant (plus ou moins) de regagner le fleuve sont, elles, l'objet de droits exclusifs: sacrifices (plantage du piquet et immolation d'un animal), perception du *manga-ji*. (...). Enfin, les pêches (lit mineur et mares à l'étiage) qui consistent en un ramassage du poisson resté prisonnier dans l'aire de pêche (du fait du cycle naturel des eaux), sont le lieu d'une coopération intense de tous les riverains désireux d'y participer. Elles font l'objet d'un sacrifice, de la perception rituelle par le maître d'eau de "l'eau du piquet" mais pas d'un *manga-ji*. (...).

En d'autres termes, il y a sacrifice et perception du *manga-ji* (appropriation d'une part du produit) lorsqu'on prélève le poisson après l'avoir enfermé sur son aire de pêche. Il y a sacrifice mais sans prélèvement du produit lorsqu'on ramasse le poisson sur son aire du fait du cycle naturel et du fait que la pêche est libre pour toutes les communautés. Il y a exclusivité sans sacrifice ni prélèvement de produit lorsqu'on jouit d'un mode de prise lié à des emplacements privilégiés. Il n'y a ni sacrifice ni prélèvement du produit dans tous les cas où l'on détourne simplement une partie du poisson, lorsqu'il passe dans son aire de pêche.

C. Fay (1989).

L'évolution de la composition spécifique des captures est-elle indépendante du processus de prise de décision des pêcheurs?

Il est d'usage de discuter l'évolution du peuplement de poissons en fonction de l'évolution des conditions climatiques ou de l'augmentation de la mortalité par pêche. Sur les univers artificiels que nous avons élaborés, il apparaît que, à nombre de pêcheurs égal, les modes d'accès à la ressource ont une influence sur l'évolution du peuplement.

Ainsi le système à accès libre montre des successions nettes dans les captures. On retrouve le schéma théorique de la tragédie des communaux selon lequel la ressource en accès libre est épuisée par les pêcheurs. Cependant, les relations écologiques font que lorsqu'une espèce disparaît des captures, une autre prend sa place. On assiste donc à des tragédies successives qui font sauter le système d'une pêcherie à l'autre. Dans le réel, de tels types de succession ont été observés. En particulier sur la façade marine de l'Afrique de l'Ouest, les sparidés surexploités furent remplacés par des poulpes qui s'étaient développés sous l'effet de l'allègement de la prédation. D'autres exemples d'apparitions de pêcheries peuvent être cités sur la côte sénégalaise où la prépondérance des déterminants économiques dans le choix d'une activité est bien reconnue.

La simulation avec des zones réserves où une quantité de pêcheurs fixée peut accéder montre tout d'abord le même comportement caractéristique de la tragédie des communaux. Mais après la chute des captures on observe un phénomène de transfert des poissons en provenance des milieux protégés. En conséquence, la composition spécifique des captures est modifiée. Les phénomènes de réensemencement de milieux peuvent profiter à des espèces qui grâce à leurs stratégies de reproduction et de migration occupent l'espace plus rapidement. De tels phénomènes ont été observés sur le lac Tchad par Benech et Quensièrre, avec une très forte production et un changement de la composition spécifique des captures (Benech et Quensièrre, 1987).

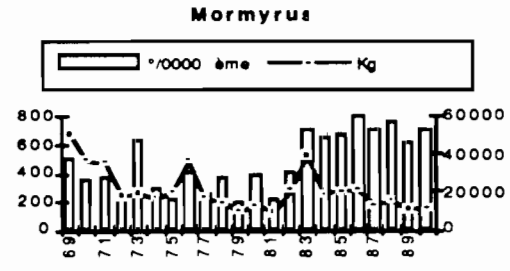
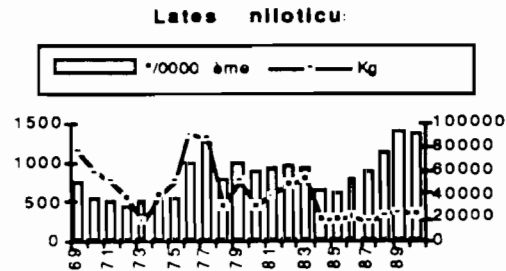
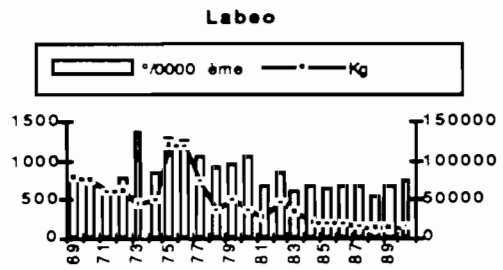
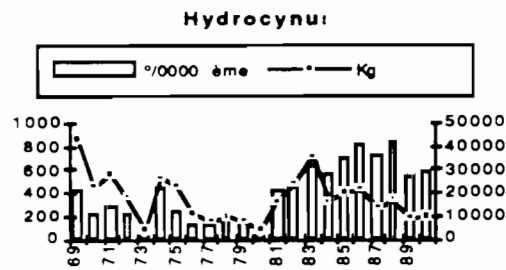
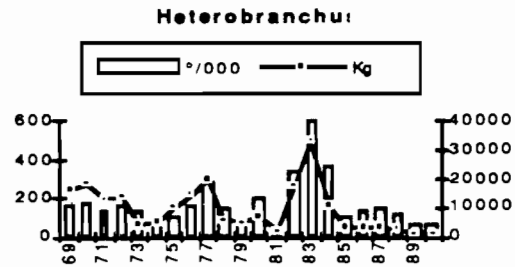
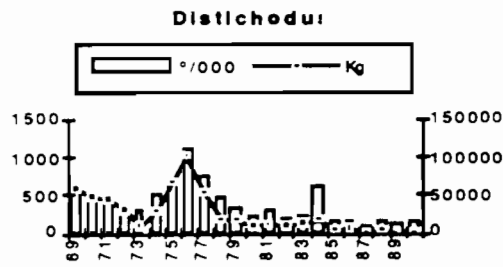
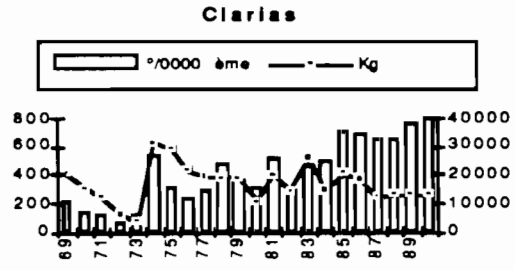
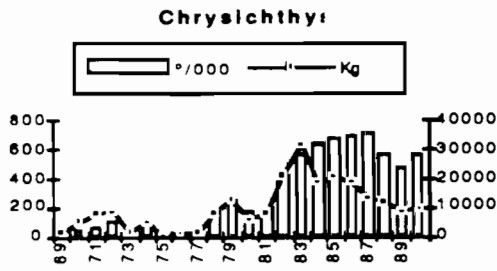
Enfin la simulation à contraintes sociales montre une exploitation qui favorise les poissons de l'espèce A, c'est à dire les poissons qui se reproduisent à la crue.

Histoire des changements. Dans l'esprit de cette discussion sur l'univers artificiel et en utilisant aussi les résultats des expériences précédentes, nous tentons une discussion sur l'évolution du delta en essayant d'examiner conjointement quelques aspects des évolutions sociales et écologiques présentées par les chercheurs de l'équipe DCN.

Entre les années 50 et 60 la région du delta présentait de vastes zones inondées grâce à de très bonnes crues. Cependant la région connaissait des étiages aussi sévères qu'actuellement puisque le barrage de Sélingué (construit en 1980) ne jouait pas son rôle de soutien d'étiage. Malgré ces conditions hydrologiques qui devaient théoriquement favoriser les ramassages de poisson, le système était alors considéré comme sous-exploité, avec par exemple la présence notoire de très grands et très vieux poissons. Les avis scientifiques (Daget 1949; Blanc, 1950) conseillaient alors une intensification de l'exploitation par pêche. Si la faible mortalité par pêche est clairement invoquée, on peut aussi y voir le résultat d'un accès à l'espace contrôlé, puisque les règles du système traditionnel étaient alors appliquées.

Pendant les années 60, les pêcheurs acquièrent des engins plus performants et diverses perturbations idéologiques modifient les conditions d'accès à l'eau. Les conditions hydrologiques étant excellentes, les troubles dans l'interaction homme-milieu ne se concrétisent pas (alors qu'ils se concrétisent déjà socialement). Les conditions de la crise halieutique se mettent en place.

Survient alors la sécheresse de 1973. La modification des conditions environnementales, associée à l'emploi des engins performants acquis lors des années précédentes et à la nécessité de pallier au déficit vivrier en céréales par une augmentation des gains monétaires halieutiques provoquent conjointement un stress important de l'écosystème. Ce stress se traduit par des adaptations biologiques: rajeunissement des stocks, glissement des stratégies spécifiques de survie. Par ailleurs, les courbes d'évolution d'abondance dans les captures des espèces de poisson montrent quelques changements nets (fig. 7.41). En 1973 la plupart des courbes de captures sont en baisses, baisse qui était souvent amorcée les années précédentes (*Mormyrus*, *Lates*, *Clarias*, *Hydrocynus*).



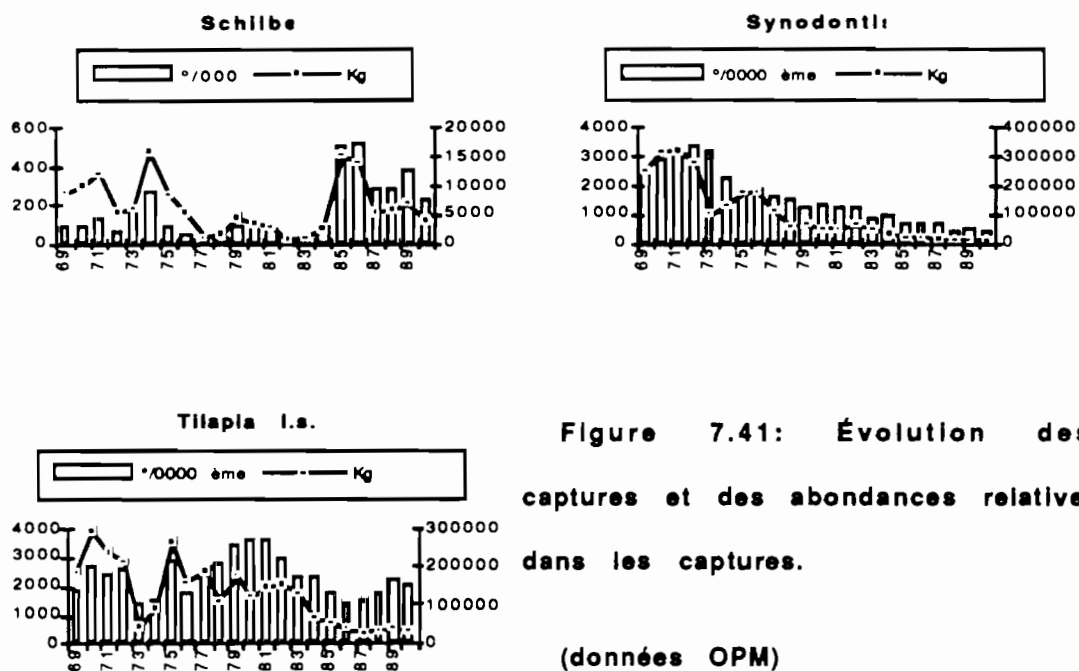


Figure 7.41: Évolution des captures et des abondances relatives dans les captures.

(données OPM)

Les années qui suivent (75-79) vont montrer des changements dans la composition spécifique de ces peuplements, alors que les conditions climatiques se sont bien améliorées. Certaines espèces vont prendre une part relative plus importante qu'avant la sécheresse. Cette évolution va durer pour certaines 3-4 ans (*Hetrobranchus*, *Distichodus*, *Labeo*), et pour d'autres plus longtemps (*Clarias*, *Lates*). Enfin, certaines espèces vont au contraire voir leur abondance relative diminuer fortement (*Synodontis*). Des raisons biologiques sont envisageables pour expliquer ce phénomène, comme par exemple la modification des zones de fraie. En transposant les résultats de nos simulations deux autres causes peuvent être invoquées:

- ① dans un régime à accès devenu plutôt libre, certaines pêches peu rentables sont abandonnées, pour se reporter sur d'autres espèces.
- ② les ramassages massifs de poissons de l'année 1973, ont provoqué un déficit qui va être comblé par des mécanismes de colonisation de poissons provenant de milieux peu exploités jusque là, comme les lacs par exemple. Quelques espèces se maintiennent 3-4

ans mais ne se stabilisent pas, d'autres au contraire occupent l'espace et se maintiennent.

Ces trois raisons peuvent bien sur se combiner.

En ce qui concerne les pêcheurs, les simulations montrent sur l'univers artificiel qu'avec la chute des captures par pêcheur, ceux-ci s'appauvrissent et délaissent les engins onéreux et performants pour préférer des engins généralistes (nasses, filet maillant) pour accéder au poisson dans les différents milieux. C'est une des deux évolutions que les chercheurs décrivent pour le delta, l'autre consistant à s'équiper au maximum.

Au début des années 80, une nouvelle dégradation des conditions hydrologiques se produit. Elle peut être analysée de la même façon que la première avec une forte augmentation de l'abondance relative d'espèces qui sera plutôt éphémère pour certaines (*Heterobranchus*, *Schilbe*) ou prolongée pour d'autres (*Hydrocinus*, *Chrysictys*, *Clarias*, *Mormyrus*). Parallèlement l'abondance relative de certaines espèces s'effondre (*Labeo*, *Tilapia*). A nouveau les deux causes (épuisement d'une espèce par ramassage et réorganisation du peuplement en relation avec d'autres fragments d'espace) peuvent être invoquées. Quant aux pêcheurs, après deux crises en 10 ans, c'est à présent le problème du maintien dans la pêcherie qui se pose. Ce qui est un don d'engins dans les univers artificiels correspond dans la réalité aux apports monétaires des migrations extra-deltaïques, aux changements dans la relation pêche-agriculture, etc... On peut observer sur les univers artificiels que cette situation n'est pas incompatible avec la bonne santé financière de certains pêcheurs qui ont accès à des technotopes particuliers (soit en raison de règles sociales, soit en raison du maintien des moyens d'accès à ces milieux par le biais d'une panoplie adaptée).

A l'issue de cette expérience et pour ce qui concerne la réflexion sur le présent et l'avenir du delta, nous avons souligné deux points qui concernent l'espace et le maintien des pêcheurs dans le système.

L'écosystème montre des signes de stress et d'intensification d'exploitation mais étant donné des mécanismes de résistance biologique et le caractère fragmenté de l'espace, une catastrophe écologique (atteinte durable au potentiel productif de la ressource) ne devrait pas

être redoutée. Tel est schématiquement le discours biologique illustré par la simulation sur la fragmentation de l'espace. On peut cependant se poser la question du potentiel de résistance qui subsiste. La ressource a montré en deux occasions qu'elle pouvait subir des intensifications d'exploitation, mais, pour ce qui concerne l'espace, on peut faire l'hypothèse que les réserves aient été atteintes par la réduction des surfaces inondées, par les modifications des règles d'accès. Sous l'effet d'un nouvel événement (routes, moteurs hors-bord) qui accentuerait encore la pression sur l'espace en augmentant l'accessibilité physique, la ressource pourra-t-elle encore résister?

Les simulations à places montrent que l'on peut maintenir une ressource et une population de pêcheurs dont les finances ne chutent pas trop brutalement. Cependant, ces dernières descendent. Les prises par pêcheur ayant atteint des valeurs faibles et en l'absence d'un régime hydrologique plus favorable, le maintien des pêcheurs ne peut donc passer que par une expansion de l'espace occupé dans le delta (ce qui nous ramène au problème précédent) ou par des apports extérieurs (crédits, migrations des jeunes, etc...).

Dans le contexte des simulations il semble donc que, parmi les points à observer au cours de l'évolution prochaine du delta, il faille porter attention à l'occupation de l'espace et peut être à la dynamique de milieux non exploités, ainsi qu'aux flux financiers extra-deltaïque. Les simulations n'étaient pas nécessaires pour découvrir ces points, mais elles les soulignent, elles donnent un appui pour argumenter et elles améliorent la lisibilité du discours.

7.6 CONCLUSION.

Quel peut-être l'apport des simulations multi-agents pour la synthèse des connaissances pluridisciplinaires?

C'est pour répondre à cette question que, après avoir construit un simulateur, nous avons provoqué ces quelques expériences. Au risque que certaines d'entre elles ne soient pas complètement achevées, nous avons fait le choix de la diversité, pour mieux appuyer notre réponse à la question posée.

Nous avons choisi les sujets de simulation dont les résultats illustrent et posent des questions sur quelques conclusions du programme DCN. Ces résultats nous ont permis de discuter:

- la résistance du système écologique à l'intensification de l'effort (effet plateau) et les changements écologiques qui l'accompagnent,
- la possibilité d'utiliser la relation à l'environnement comme indicateur de l'état d'exploitation,
- l'importance de la configuration spatiale de l'écosystème et de sa connectivité pour favoriser les mécanismes de résistance,
- la sensibilité du système aux pêches d'étiage et donc l'importance de comprendre les processus de prise de décision qui conditionnent cet accès à l'espace,
- l'intérêt écologique de maintenir des espaces peu exploités en protégeant ceux qui existent ou par le moyen de création de réserves,
- l'appauvrissement des pêcheurs malgré la fragmentation de l'espace. L'hétérogénéité de l'accès à l'espace peut favoriser les disparités.

Ainsi, les simulations ont permis de faire des liens entre des connaissances biologiques, des connaissances écologiques et des connaissances sur la prise de décision des pêcheurs. Pour discuter conjointement des connaissances d'origine sociales, écologiques et physiques, nous avons orienté notre recherche sur le problème de l'espace. Le jeu des simulations sur les stratégies des poissons et leur composante spatiale, sur la fragmentation physique de l'espace et sur les processus qui déterminent l'accès à l'espace des pêcheurs à l'espace nous semble constituer un moyen d'aller vers une recherche multidisciplinaire.

En aidant à rapprocher les corpus de connaissances, les simulations donnent un aperçu de la cohérence entre des points de vue apparemment éloignés, et, en posant des questions précises, les simulations peuvent apporter une aide à la définition des points qui doivent être observés pour suivre l'évolution du système.

8 DISCUSSION SUR LA METHODE DE MODELISATION PAR DES SYSTEMES MULTI-AGENTS ET SON APPORT A L'ETUDE DE L'INTERACTION HOMME-RESSOURCE.

La simulation permet-elle de tisser des liens entre les différents points de vue des différents scientifiques impliqués dans des recherches pluridisciplinaires sur l'environnement?

Dans le but de répondre à cette question nous avons précisé notre problématique (chap 3). Nous avons ensuite choisi la méthode des simulations multi-agents (chap 4), élaboré un simulateur (chap 5, 6) et présenté quelques expériences (chap 7). A l'issue de ce travail nous reprenons les problèmes posés, afin de discuter les choix effectués et les méthodes employées.

Tout d'abord il s'agissait de s'interroger sur la représentation de diverses connaissances disciplinaires: nous avons choisi des méthodes de représentation des connaissances qui permettent de modéliser à la fois les agents du monde réel et les différents points de vue avec lesquels ils sont observés.

Nous avons ensuite postulé que les simulations permettent de réfléchir au passage de niveaux micro sur lesquels les chercheurs identifient des mécanismes à un niveau macro sur lequel les chercheurs observent des phénomènes. Nous avons mené différentes expériences qui nous permettent de discuter ce postulat.

Puis nous avons émis une opinion sur la validation des simulations que nous avons qualifiée de conceptuelle et sur l'utilisation de la modélisation.

Enfin nous avons indiqué notre ambition de nous focaliser sur les individus et leurs prises de décision et d'étudier l'interaction entre la dynamique de la ressource et les décisions à travers l'accès à un espace commun.

Dans ce chapitre, à la lumière de notre expérience, nous reprenons ces différents problèmes pour les approfondir. Chacune des discussions apporte une part de réponse à la question de l'apport des simulations pour la compréhension d'une dynamique homme-

ressource. Ces points sont chronologiquement ordonnés et font appel à des méthodes et des outils définis. Il s'agit dans l'ordre de:

- représenter divers points de vue sur un même monde,
- organiser ces connaissances pour simuler les interactions,
- simuler pour relier différents niveaux de complexité,
- valider les résultats des simulations et les utiliser.

En fin de chapitre, nous proposons une 'ébauche d'une méthode pour simuler les interactions homme-ressource renouvelable qui prend en compte un espace-ressource et des processus de prise de décision.

8.1 REPRESENTER DES CONNAISSANCES PLURIDISCIPLINAIRES.

Les projets de recherche en modélisation appellent en général la participation de plusieurs chercheurs: les spécialistes du domaine, dits thématiciens, et les spécialistes des modèles qui sont informaticiens, statisticiens, automaticiens ou mathématiciens. Traditionnellement, il existe dans chaque discipline une batterie de modèles pour représenter les phénomènes étudiés. Les projets de modélisation consistent souvent à choisir un de ces modèles, parfois à le modifier, et à le calibrer avec des données issues d'expériences. La modélisation par des méthodes issues du domaine de l'Intelligence Artificielle, en particulier les systèmes multi-agents, introduit une relation un peu différente entre les chercheurs thématiciens et les modélisateurs. Avant de discuter les qualités des méthodes de représentation des connaissances, nous faisons quelques remarques à ce sujet.

8.1.1 La représentation des connaissances.

8.1.1.1 De la modélisation à la cognitive.

Les systèmes multi-agents sont une méthode particulière de modélisation, en ce sens qu'ils construisent et font fonctionner un univers artificiel, mais le mot modélisation est peu utilisé, voire mis de côté, par les utilisateurs de cette méthode et plus généralement dans la

communauté de l'Intelligence Artificielle. A ce concept de modélisation se sont substitué deux mots qui correspondent à deux phases particulières: la modélisation fait place aux phases de représentation des connaissances et de simulation. Ce glissement de langage n'est pas un artifice de communication pour mieux médiatiser une nouvelle discipline ou une nouvelle méthode. Il symbolise un réel changement dans la perception de la place de la modélisation. La communauté de chercheurs et ingénieurs en Intelligence Artificielle est issue d'une discipline qui s'est donné pour but premier de reproduire une intelligence humaine qui, en général, provient d'un élément particulier, l'expert. Cet expert est d'autant plus remarquable qu'il exerce sa fonction dans un domaine original et compliqué, qu'il a un savoir implicite, qu'il s'exprime confusément et qu'il est peu disponible. En résultat, on se félicitera de parvenir à un système artificiel qui raisonne presque aussi bien que lui, dans certains cas. En conséquence, le modélisateur est devenu en grande partie un spécialiste de la relation avec l'expert: il est cogniticien. Voilà donc les sciences cognitives à l'abri des soupçons: il ne s'agit pas d'un outil pour s'ériger en théoricien d'autres disciplines.

8.1.1.2 Représentation des connaissances et problématiques scientifiques.

Dans la plupart des cas, les systèmes à base de connaissances sont élaborés pour des domaines d'expertise (diagnostic médical, mécanique, etc ...). L'expert a un savoir faire, parfois mal formalisé, qu'il faut extraire puis préciser. Cette présentation augure mal de la relation avec le chercheur car le plus souvent ce dernier ne se considère pas comme un expert dont le but est de délivrer un savoir-faire. *"Il y a toute une idéologie de la réponse qui tend actuellement à prendre le pas sur ce qui devrait être un esprit de recherche. (...). Définir ce qu'il y a à trouver c'est justement là qu'est la recherche"* (Augé, 1993).

Par ailleurs la représentation des connaissances est souvent perçue seulement comme un moyen de communication des connaissances vers l'extérieur, et non pas comme un outil de questionnement, de précision de la problématique. Dans ce cas de figure, les réticences à la représentation des connaissances sont justifiables: tout autant que le questionnement et les méthodes de construction, les moyens de communication de la connaissance font partie des

prérogatives du chercheur. *"Le défi qui se pose aux chercheurs en sciences sociales ce n'est pas ou si peu de fabriquer des modèles. C'est d'abord de bien écrire"* (Couty, 1988).

8.1.1.3 Perceptions de la représentation des connaissances: écueils.

Nous argumentons ailleurs dans ce texte que l'acceptation d'une interdisciplinarité par un chercheur est subordonnée, entre autres, à une perception positive des recherches des autres. Cette représentation concerne les méthodes mais aussi les objectifs. La recherche en modélisation n'échappe pas à ce principe et nous indiquons ici deux écueils à éviter.

Détecteur de vérité. La représentation d'un univers artificiel peut provoquer des réticences chez le chercheur, outre sa méfiance éventuelle à la notion de comportement (chap 3). La modélisation mathématique présente des abstractions parfois éloignées de la réalité qu'elle est censée représenter: en conséquence, les résultats qu'elle présente sont sans ambiguïté attribués au modèle. Si les résultats de simulation ne correspondent pas aux phénomènes observés dans la réalité on s'interrogera sur la pertinence du modèle. Le cas semble un peu plus compliqué pour un univers multi-agents. En effet, un monde artificiel avec des milieux, des poissons, des hommes aisément identifiables en tant que tels présente de fait une allure réaliste, au moins dans sa structure. Si le modèle ne "fonctionne" pas, c'est à dire s'il donne des résultats différents de la réalité, la crainte peut être grande de voir remise en cause non pas le modèle mais la connaissance qui est fournie. Cette crainte peut provoquer deux effets opposés, soit un refus de participer à ce jeu dangereux, soit une complexification maximum de l'univers artificiel ce qui revient au même étant donné les contraintes de représentation des connaissances et les principes de simulation.

Instrument de politique pluridisciplinaire. Quel intérêt un chercheur a-t-il à participer à ce travail? La réponse à cette question est d'autant plus floue que les objectifs ne sont pas complètement cernés. Le premier travail consiste à créer des méthodes de représentation des connaissances les plus ouvertes possibles, dont une des finalités peut être d'intégrer le plus de connaissances possibles, le simulateur devenant ainsi le lieu de synthèse global de la connaissance, sorte d'agitateur pour rendre les diverses sciences solubles dans

un et un seul point de vue. Par ailleurs la modélisation ne doit pas être présentée comme un outil qui permettra d'enrichir et de valoriser le modélisateur ou l'équipe en général, en spoliant le chercheur de la valorisation des données et des connaissances durement acquises. Il est possible que ces écueils n'aient pas toujours été complètement évités.

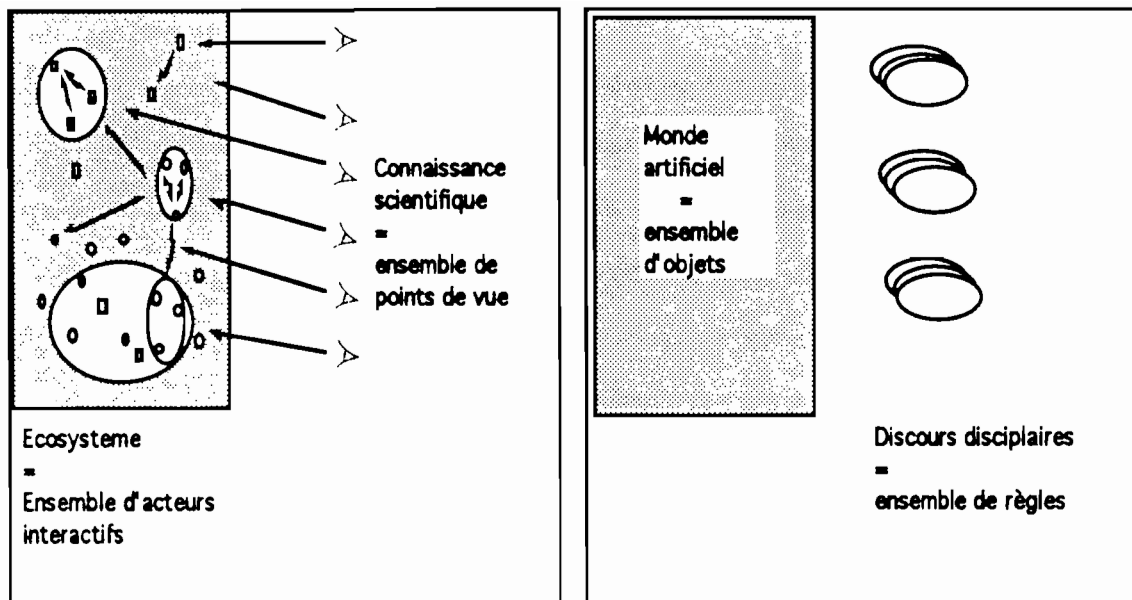
Pour finir, le cogniticien selon Hart (1988) doit savoir bien communiquer avec les gens, être intelligent, avoir du tact et de la diplomatie, être patient et savoir se mettre à la place de l'autre, être persistant, être logique, être capable de s'adapter et avoir un esprit inventif, avoir confiance en soi, avoir une connaissance du (ici des) domaine(s) et avoir des connaissances en programmation. Il existe une probabilité non négligeable pour que ces qualités ne soient pas toutes réunies.

8.1.2. Méthodes de représentation des connaissances.

Une des difficultés de la communication entre chercheurs de différentes disciplines vient du fait qu'ils ne se font pas la même représentation du monde étudié. Ils utilisent des concepts qui sont les moyens de l'expression de leurs points de vue disciplinaires. Les méthodes de représentation des connaissances doivent refléter la présence de ces filtres à travers lesquels est perçue puis décrite la réalité.

Le générateur de simulations qui a été élaboré comprend à la fois la représentation d'un monde artificiel composé de différents objets et agents ainsi que la représentation de connaissances sur ces objets à l'aide de règles (fig. 8.1).

Ces outils nous paraissent présenter de nombreux avantages. Remarquons que la plupart des systèmes de représentation des connaissances comprennent à la fois des objets et des règles. Nous discutons ces deux modes de représentation des connaissances. La méthode consiste à définir en premier lieu les objets et agents, puis à définir les règles qui les manipulent.



Le monde perçu

Représentation informatique

Figure 8.1: Analogue entre le monde perçu et la représentation informatique

8.1.2.1 Définir les objets (réification)

En adoptant une démarche ascendante, la méthode des systèmes multi-agents cherche à étudier des problèmes complexes à partir de la représentation d'agents et de leurs interactions.

Pour représenter les agents (entité qui a un comportement) et les objets (entités passives) dans un ordinateur, la technique de représentation par objets est bien adaptée. Le processus fondamental de ce mode de représentation s'appelle la réification: *"La réification est l'opération essentielle du paradigme objet par lequel quelque chose (chose physique, relation, événement, situation, idée, loi, etc.) est représentée informatiquement sous la forme d'un objet"* (Ferber, 1990). Au delà de l'informatique, réifier qui signifie "faire une chose de" est un processus important qui permet de poser des questions sur le monde observé et sur la façon avec laquelle il est décrit, c'est à dire avec le langage. *"La première interrogation sur le statut des objets en tant que visés par une connaissance concerne leur représentation dans un langage"* (Granger, 1990).

La réification peut être associée à un contexte, le point de vue d'un sujet dont l'objet dépend (Carre, 1989). Par exemple le pêcheur et l'éleveur n'ont pas la même vue de la mare. On distingue une réification conceptualiste qui associe une représentation aux sujets et une réification réaliste indépendante du sujet. Dans le premier type de réification on suppose que les points de vue appartiennent aux différents observateurs (il existe une mare vue par l'un et il existe une autre mare vue par l'autre), tandis que dans la seconde on suppose que c'est la chose elle-même qui contient ces différents aspects, lesquels sont parties de la chose (il existe une mare qui contient différentes caractéristiques). Cette distinction correspond au débat sur la représentation idéaliste ou réaliste (Ladrière, 1990).

En utilisant le mécanisme d'héritage il est possible d'effectuer une réification à la fois conceptualiste et réaliste (fig. 8.2) qui traduit l'expression de divers points de vue en créant plusieurs objets pour un même objet réel, mais aussi qui permet de désigner sous le même nom un objet qui hérite de tous les points de vue. De cette façon il y a bien un objet pour chaque point de vue, mais il y a une seule entité agissante.

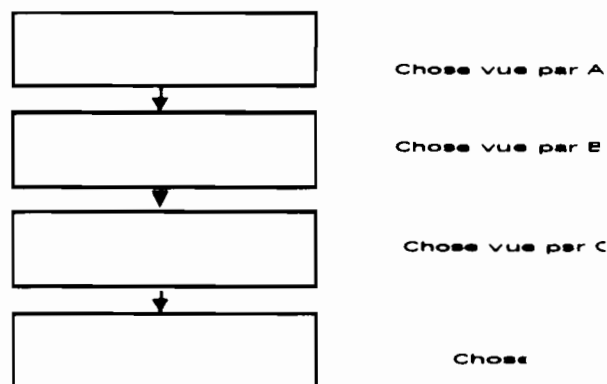


Figure 8.2: Expression de plusieurs points de vue par réification.

Remarque: nous présentons ici le graphe d'un héritage simple, il est possible d'envisager un héritage multiple pour lequel Chose hériterait directement de chacune des choses vues par A, B et C sans hiérarchie entre eux.

Si l'on prend par exemple une mare, l'anthropologue y voit un fragment d'espace attribué à un habitant, l'hydrologue pourra y voir une surface d'évaporation ou un volume d'eau, l'halieute y verra un stock de poissons, le spécialiste de l'élevage y verra un point d'eau pour abreuver les bêtes, etc... La représentation d'objets informatiques permet d'écrire ces différents points de vue. On élaborera un objet pour chacun et, par héritage, l'objet mare correspondra à la somme de tous ces points de vue.

"Confondons leur langage pour qu'ils ne s'entendent plus les uns les autres" (Genèse in Couty, 1993). La représentation du monde à l'aide des objets qui le composent n'a pas pour ambition la création d'un langage commun unifié (Delattre, 1982), réducteur de la diversité des sens. *"La réification, analogue à la nominalisation en linguistique, est l'opération fondamentale de construction des représentations structurées qui consiste à désigner et à nommer quelque chose afin de l'élever au rang d'objet de discours"* (Ferber, 1988). Créer un monde artificiel ce n'est pas seulement faire une projection des objets réels ou physiques dans un objet informatique vierge de toute interprétation, insignifiant. Le monde artificiel est relatif à une ou plusieurs constructions de la réalité. A cet égard la figure 8.1 peut être trompeuse, l'ensemble d'objets du monde artificiel n'est pas indépendant des points de vue.

Dans le contexte d'une recherche pluridisciplinaire il s'agit à notre avis d'un processus de représentation des connaissances performant pour promouvoir une meilleure compréhension entre les chercheurs des différentes disciplines. En définissant les agents (en créant les objets poissons, pêcheurs, etc...), en décrivant les attributs qui permettent de les caractériser, on explicite les points de vue. La réification des agents permet de percevoir comment chacun les élève au rang d'objet de discours. De façon idéale, après avoir assisté à cette élévation, à cette création de sens, chacun comprendra mieux le discours de l'autre. Cela permet d'apporter des connaissances sur les connaissances disciplinaires: on parle de métaconnaissances (Pitrat, 1990).

8.1.2.2 Définir les règles.

La représentation de connaissances par règles de production est dite déclarative, en ce sens que l'énoncé des connaissances ne préjuge pas de leur mise en oeuvre. Plus le langage

est déclaratif plus les connaissances sont aisément modifiables. De plus ces règles de production sont particulièrement lisibles, et il est possible d'en ajouter de grands nombres.

Au moment de la réification, chaque agent a été pensé en fonction de la place qu'il occupe dans l'ensemble des agents. En définissant un agent (en implémentant un objet) pêcheur soit à travers ses attributs nombre d'engins, taille de la pirogue soit à travers les attributs lignage, ethnie, lieu de naissance, on a préparé deux fonctions différentes de cet agent dans le monde artificiel. Dans un cas il est perçu comme un effort de pêche, dans l'autre comme le maillon d'une société. Un discours disciplinaire consiste en partie à définir la fonction des agents dans leur environnement, c'est à dire la place des agents les uns par rapport aux autres, leurs interrelations. Les règles de production sont adaptées pour représenter cette partie de la connaissance. Elles mettent en correspondance les objets de l'univers artificiel.

Soit un individu, soit un milieu

Si l'individu possède une senne

Alors prise importante et mortalité de poissons forte

Soit un individu, soit un village

Si lieu de naissance \neq village

Alors agriculture interdite

Il est pratique de regrouper les règles par lots de connaissances qui correspondent à autant de discours sur la réalité. Ainsi l'architecture du simulateur est analogue à la situation à modéliser (chap 6): à un écosystème anthropisé observé par différents chercheurs correspond un univers artificiel constitué de différents agents, observé et dynamisé par différents corps de règles. De cette analogie, ressort une plus grande lisibilité du travail accompli et une cohérence entre le discours scientifique et la représentation informatique.

8.1.2.3 Objet ou règle ?

Dans certains cas il est difficile de faire un choix entre les deux formalismes de représentation des connaissances. Le principe est de recréer une image des différents agents

du monde observé à l'aide d'objets et de représenter les mécanismes qui manipulent les interactions à l'aide de règles. La réalisation concrète d'un modèle suppose parfois de remettre en cause ce principe.

Parfois les chercheurs expliquent l'origine des comportements des agents par leurs relations entre eux ou avec des objets de leur environnement. En même temps, il apparaît que, quelles que soient ces interactions, les comportements des agents sont complètement déterminés. Dans ces cas-là, doit on représenter les différents agents et objets, écrire les règles qui provoquent les interactions, ou doit on se contenter d'imposer les comportements qui en résultent?

Par exemple dans le delta le système traditionnel qui régule l'accès à l'espace suppose un pacte noué avec les divinités; il existe des génies des eaux. Les relations de la société avec le génie organisent l'accès à l'eau à certaines périodes. En même temps on reconnaît l'existence d'un calendrier de pêche précis.

Une représentation cohérente avec nos principes voudrait que soit créé un objet génie, et des règles qui définissent les relations entre cet objet et les objets pêcheurs. En fait, on est tenté de représenter une simple règle fixant les dates où la pêche est autorisée: puisque les conséquences des relations entre les sociétés et les génies donnent un calendrier de pêche, autant représenter directement ce calendrier. Pour la simulation le résultat sera le même mais la représentation des connaissances est simplifiée et le simulateur est allégé.

Ce problème dépasse sans doute le simple problème de méthode. Il est des cas où l'on connaît à la fois la structure du monde, c'est à dire les entités et leurs interrelations, mais aussi le comportement émergent de ces interactions. Dans ce cas on peut considérer que les agents ont intégré en eux cette émergence. Les agents se savent éléments du tout, agissent suivant la partition que celui-ci leur assigne et, en conséquence, contribuent à l'existence et au maintien du tout (Gilbert, 1993).

Que doit-on alors représenter: les différents agents et les objets de leur environnement avec des règles d'interactions, ou bien des agents aux comportements déterminés? Nous n'avons pas de réponse à donner, mais nous pensons illustrer par cette question l'intérêt de la

représentation des connaissances pour poser des questions et préciser le point de vue du chercheur sur la réalité.

8.2 ORGANISER LES CONNAISSANCES POUR SIMULER

Il n'est pas envisageable de formaliser toutes les connaissances sans stratégie. Les connaissances doivent correspondre à des modèles du monde identifiés et doivent être transcrites dans des lots de règles en fonction d'un objectif. Par ailleurs, pour simuler, c'est à dire pour donner vie au monde artificiel, il est nécessaire de gérer le temps, de respecter l'ordonnement des divers processus.

En bref il faut définir un contrôle de la simulation, une stratégie de représentation et d'utilisation des connaissances. Ce choix est un modèle en lui-même: c'est à travers ce choix que s'exprime le point de vue du modélisateur. *"Le choix des modèles engage toute la responsabilité du chercheur et implique toute sa personnalité"* (Legay, 1992). Pour simuler, les connaissances sur le domaine ne suffisent pas: il faut exprimer des connaissances sur l'organisation des connaissances. Dans l'architecture de type blackboard que nous avons élaborée, ces connaissances qui servent à organiser sont exprimées au sein de la structure de contrôle.

8.2.1 Une structure de contrôle

Par analogie, en considérant l'univers artificiel comme une marionnette, chaque lot de connaissance spécialiste joue le rôle d'un fil qui actionne une articulation particulière. En fonction du scénario de simulation on définit des règles qui permettent d'organiser les lots de connaissances pour animer la marionnette.

Dans l'architecture que nous avons choisie ces règles d'organisation sont organisées dans la structure de contrôle (fig. 8.3).

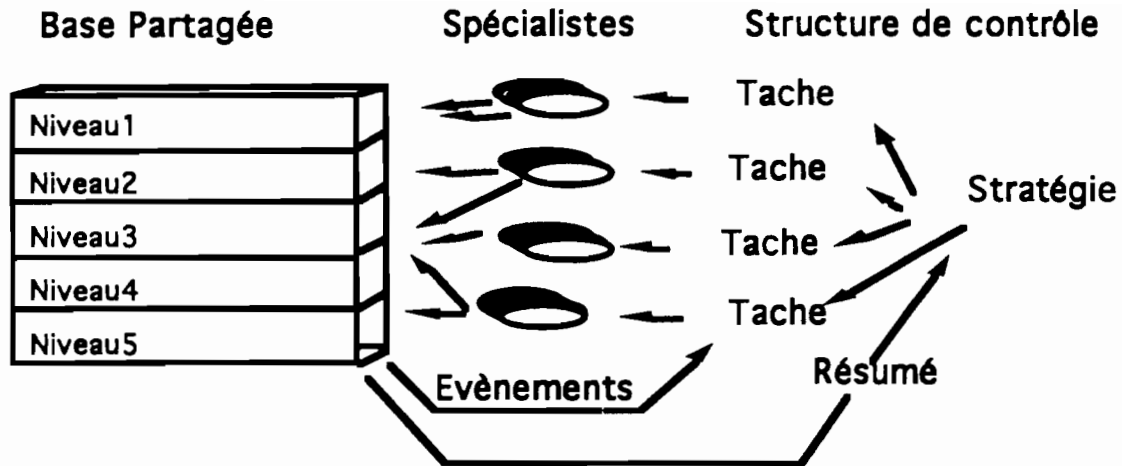


Figure. 8.3: Une structure de contrôle pour conduire la simulation

La structure de contrôle du simulateur, décrite au chapitre 5, est séparée en deux parties: la stratégie et les tâches. La stratégie connaît un résumé de l'état de l'univers artificiel c'est à dire de l'état de la simulation, et en fonction de ce dernier, active les différentes tâches. A leur tour ces tâches, en fonction des événements qui se sont passés dans le monde artificiel activent différents spécialistes qui lui sont assujettis. Il s'agit d'un contrôle hiérarchique.

Ecrire la structure de contrôle revient à définir et organiser différentes tâches qui ont le pouvoir d'activer des ensembles de spécialistes. C'est un point de vue sur l'organisation des connaissances que le modélisateur établit en créant cette structure.

8.2.2 Une méthode.

Dans sa thèse sur l'acquisition des connaissances au sein des univers multi-agents, et avec des outils semblables au nôtre, Ferraris (1992) propose une méthode de développement de systèmes multi-experts. Cette méthode est basée sur la notion de constructeurs. Cette méthode fait la différence entre des compétences, qui correspondent à des sources de connaissances identifiées mais qui n'ont pas été explicitées, et des sources de connaissances

qui contiennent des connaissances explicitées, formalisées. La méthode passe par l'utilisation successive (fig. 8.4):

- des constructeurs descendants qui considèrent une source de connaissance ayant en charge une compétence globale et divisent cette compétence en plusieurs sous-compétences. On définit ainsi des groupes de travail dans lequel une source principale gère des sources composantes. Au cours de cette phase aucune connaissance n'est formalisée: on identifie des domaines de compétence.
- des constructeurs ascendants, qui transforment les compétences en connaissances, puis opèrent sur l'ensemble de ces sources de connaissances pour décider comment la source de connaissance principale gèrera l'ensemble des sous composantes.

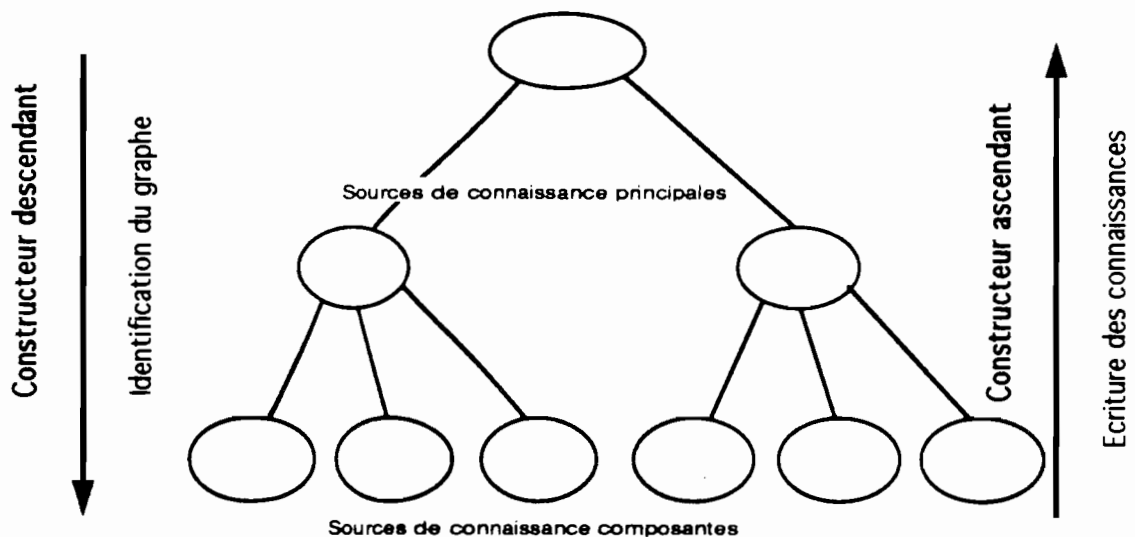


Figure 8.4: Une méthode d'organisation des sources de connaissance

Nous avons élaboré le simulateur avant de connaître cette méthode. Cependant, les heuristiques que nous avons utilisées correspondent assez bien à ce schéma. En partant de l'objectif de simuler la pêche, nous avons tout d'abord défini séquentiellement les compétences sur l'hydrologie, la dynamique des populations de poissons, et les processus de prise de décision des pêcheurs (constructeur descendant). Dans un deuxième temps nous

avons transcrit les connaissances, les règles et les modèles. Enfin, nous avons décidé comment les tâches et la stratégie gèrent l'ensemble du système (constructeur ascendant).

Cette méthode présente l'avantage de débiter par la définition des objectifs, c'est à dire la stratégie. En commençant par réfléchir aux sources de connaissances de niveau supérieur, qui correspondent pour nous à la structure de contrôle, et en descendant dans la hiérarchie des compétences, on cerne (Ferraris parle de focus) les connaissances nécessaires à la simulation. A l'opposé, en commençant par la formalisation des connaissances du domaine, on risque de se noyer dans de très grandes quantités de règles, dont une bonne part sont inutilisables car elles ne correspondent pas aux objectifs de la simulation.

8.3 SIMULER POUR RELIER DIFFERENTS NIVEAUX DE COMPLEXITÉ.

La dynamique de l'écosystème peut être perçue comme la résultante des interactions de nombreux éléments. Le problème est posé en termes de niveaux d'organisations:

- à quel niveau d'organisation doit on représenter les agents?
- à quel niveau d'organisation doit on regarder le système?

L'étude du transfert d'échelle est un thème de réflexion ancien dans la plupart des disciplines, mais avec l'avènement des recherches sur la complexité elle jouit d'un regain d'intérêt. En témoignent des productions scientifiques récentes dans plusieurs domaines (Caillé, 1991; Dupuy, 1993; Auger et al., 1993) et des ouvrages collectifs couvrant plusieurs domaines (Allen et Starr, 1983; Mullon, 1990). A l'issue et en synthèse du séminaire SEMINFOR4 consacré au transfert d'échelle, Mullon (1993) propose de distinguer:

- une approche géométrique qui traite des phénomènes physiques localisés. Ces phénomènes sont étudiés à une échelle donnée ou plusieurs échelles avec des appareillages déterminés, et l'on désire passer de données ponctuelles à des informations intégrées sur des zones ou bien comparer les résultats acquis à différentes échelles. Les espaces sont donnés. La géostatistique et les représentations fractales apparaissent comme les outils de passage d'une échelle à l'autre.

- une approche géographique qui cherche à prendre en compte les interactions entre objets qui forment un espace. Il s'agit de faire communiquer diverses constructions de l'espace. Il en est ainsi par exemple du découpage de l'espace en strates de l'analyse des liens entre un paysage et un sol, de la modélisation d'un espace réticulé.
- une approche écologique qui combine l'analyse d'un phénomène dynamique avec une approche géométrique et une approche géographique. Les problèmes d'émergence, de transfert d'échelle et de multidisciplinarité se posent: la modélisation (Auger, 1993) et les simulations apparaissent comme un outil adapté.

C'est bien entendu dans ce dernier cadre que notre travail trouve sa place.

Ainsi, le principe de la simulation est de discuter les liens entre le local et le global et dans un cadre multidisciplinaire cela nécessite de discuter, sur un même support, des transferts d'échelles qui concernent des hiérarchies différentes.

8.3.1 Construction d'un niveau micro.

Au premier abord la construction du niveau micro semble simple: la confrontation entre les dynamiques écologiques et sociales passe, à travers un espace fragmenté, par l'interaction entre d'un côté une ressource composée des individus poissons et d'un autre côté des individus pêcheurs .

Il n'est pas possible de représenter l'espace dans toute son hétérogénéité, la ressource dans toute sa diversité ni de représenter tous les individus de la société. Ces entités ne sont pas des unités atomiques toutes semblables. Elles sont déjà pensées par rapport au système. Les chercheurs étudient les atomes et dans le même temps s'interrogent sur des groupements, des classifications, des mécanismes qui permettent de réduire la diversité, dans le but d'envisager les éléments au sein d'un tout fonctionnant. Un groupe de chercheurs (Allen et Starr, 1984) qui proposent une théorie de la hiérarchie en écologie séparent les problèmes complexes en fonction du nombre d'entités prises en compte. Les interactions entre systèmes à très grands nombres sont traitées par une approche statistique tandis que les interactions des systèmes à petits nombres sont traitées par des équations

différentielles. Selon ces auteurs, l'écologie concerne des systèmes à nombre moyen pour lesquels les deux approches méthodologiques sont utilisées. On procède à la fois par classification des multiples éléments pour les rassembler dans des composants types, puis par modélisation des relations entre ceux-ci. C'est bien sur de tels systèmes que nous travaillons.

Dans le but de simuler une dynamique des peuplements de poissons, ont été créées des super-populations qui constituent des regroupements d'espèces similaires. Plus que des espèces de poissons nous avons créé des stratégies types, construites en synthétisant des connaissances biologiques. Du côté social, comme pour la dynamique écologique, il s'agit de représenter des pêcheurs "résumés". De la même façon ce ne sont pas des pêcheurs que nous représentons mais plutôt des supports de processus de prise de décision. Le pêcheur est modélisé à partir de formes, de connaissances qualitatives, de résumés et de synthèses, de distributions de données. Ces connaissances proviennent soit de modèles très généraux qui sont des "cas d'école" (rationalité économique), soit de l'analyse historique de la constitution de groupes sociaux. Enfin, nous ne représentons pas tous les milieux du delta. Ils ont fait l'objet d'une typologie: on reconnaît des mares, des lacs, des bras de fleuve, etc.... On peut proposer une représentation de l'écosystème à l'aide de milieux de différents types, en nombre et en taille variables, assemblés en réseaux plus ou moins complexes.

En résumé, au cours de la phase de représentation des connaissances ce ne sont pas des niveaux micros qui sont représentés mais des niveaux intermédiaires. Grâce à la modélisation multi-agents ce sont des individus artificiels qui sont représentés: ils ressemblent donc aux individus identifiés au niveau micro. Cependant les connaissances que l'on représente pour animer ces individus correspondent à des typologies, à des modèles. Le niveau micro correspond aux individus observés dans la réalité. La création d'un niveau intermédiaire correspond au questionnement sur l'individu dans le système (fig. 8.5).

8.3.2. Observation du niveau macro.

Lors du choix du sujet de simulation se décide la partie du système qui va être observée. Un niveau d'organisation est alors fixé. Dans le cas d'une interaction homme-ressource on

peut définir un niveau macro pour la hiérarchie écologique et un niveau macro pour la hiérarchie sociale. On observe ainsi des résultats qui concernent les prélèvements sur la

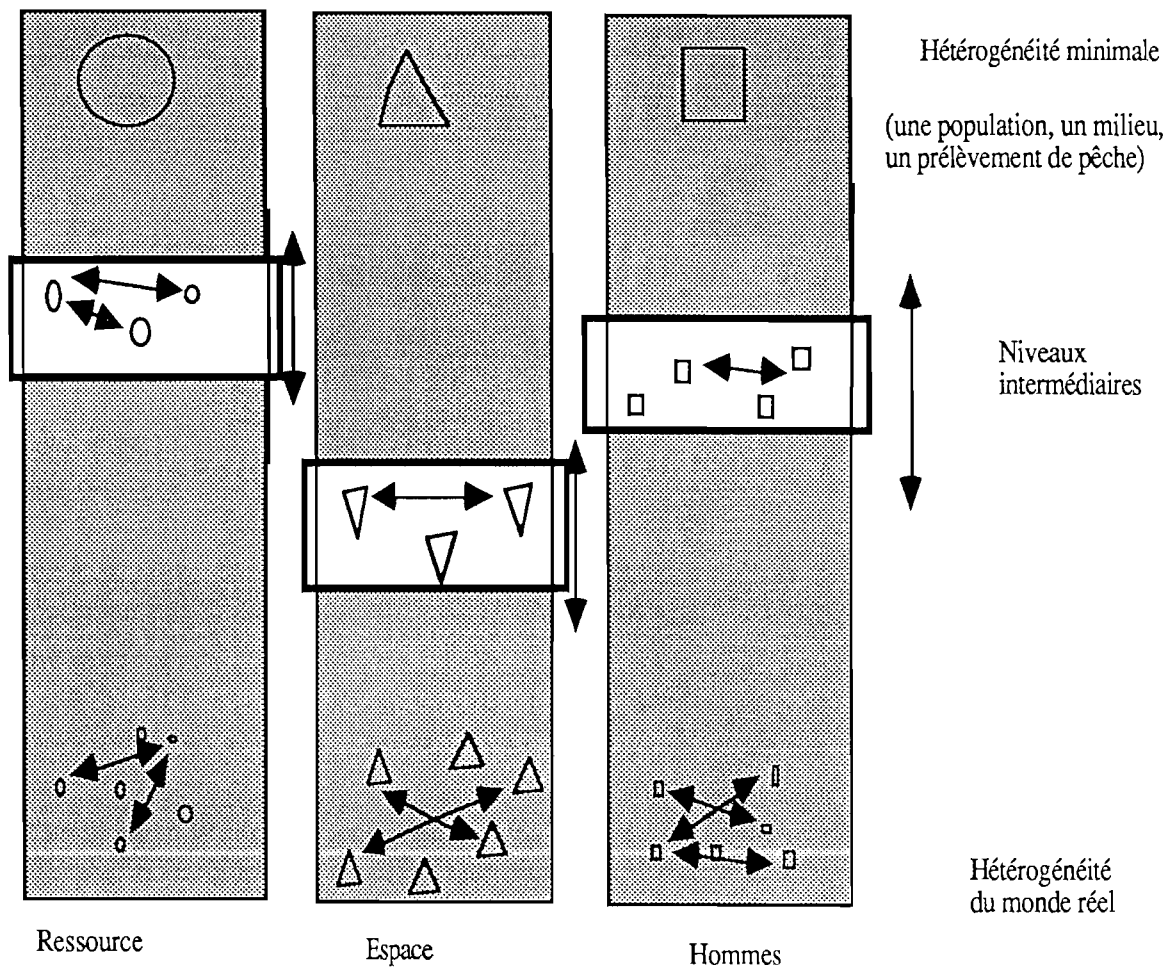


Figure 8.5: Simulation et transfert d'échelle

Nous considérons trois échelles différentes qui concernent la ressource, l'espace et la société. Pour étudier la cohérence des discours sur la pêche, on fait glisser une fenêtre le long des différentes échelles. On définit ainsi des niveaux intermédiaires. Plus ce niveau est haut placé, plus les connaissances dont l'agent est le support caractérisent des agrégats. Plus le niveau est bas, plus l'hétérogénéité des agents est grande et plus la connectivité est importante.

ressource, l'évolution de l'occupation de l'espace par la société, sur l'évolution de la composition spécifique du peuplement, etc...

Grâce à la simulation il est ainsi possible d'examiner en même temps la co-évolution d'indicateurs qui caractérisent la ressource et la société. Les simulations permettent d'enrichir les points de vue disciplinaires en discutant les liens entre dynamiques sociales et dynamiques écologiques. Elles donnent la possibilité de tester la cohérence entre différents discours sur la dynamique de l'environnement.

8.3.3 Discussion sur des niveaux intermédiaires.

L'observation du niveau global, issu de l'interaction de deux dynamiques, n'est qu'une étape. Le processus doit être considéré à la fois dans le sens ascendant et dans le sens descendant. Ainsi, les résultats sur le niveau macro sont commentés et argumentés en fonction des processus qui ont été modélisés aux niveaux intermédiaires. Les résultats au niveau macro, comparables à la réalité, permettent de se poser des questions sur les interactions aux niveaux intermédiaires dont il a émergé. C'est ainsi que l'allure de la courbe de captures, fruit de l'interaction entre poissons et pêcheurs est discutée en fonction d'observations sur les stratégies des espèces de poissons, du processus de prise de décision des pêcheurs et de la fragmentation de l'espace.

On peut ensuite modifier la définition de ces niveaux intermédiaires (en changeant la fragmentation de l'espace, en introduisant de nouvelles stratégies adaptatives, en simulant des pêcheurs plus ou moins contraints par la société) et recommencer les simulations. En faisant glisser ainsi les fenêtres le long des trois hiérarchies représentées sur la figure 8.5, il est possible de relier les discours partiels pour construire un discours unifié sur la relation homme-espace-ressource. Les niveaux hiérarchiques sont des constructions abstraites (Allen et Starr, 1984; Allen et al. 1987; O'Neill, 1987; Allen et Hoekstra, 1993). En effectuant des simulations on peut préciser l'agencement de ces différents points de vue. C'est par ces niveaux intermédiaires que nous avons abordé la relation entre organisation écologique et organisation sociale. En modifiant la fragmentation de l'espace, en modifiant le degré

d'autonomie et d'interaction entre les pêcheurs, nous avons exploré diverses configurations du système. Stratégies adaptatives des poissons et processus de prise de décision: deux niveaux intermédiaires qui peuvent rapprocher les disciplines autour du problème commun d'accès à un espace hétérogène.

"Et reconstruire la relation entre niveau inférieur et supérieur ne se fait pas par la production d'un modèle qui assure le bouclage entre les niveaux, mais plus concrètement par l'apparition d'un autre monde d'accès, c'est à dire d'un niveau médian auquel on accorde une importance encore insoupçonnée". (Gaill, 1987). Dans le cas de notre étude l'importance des niveaux médians (intermédiaires) est bien identifiée, mais comme l'indique cet auteur la réflexion du passage entre les niveaux micro et macro se fait par la construction du niveau intermédiaire (médian).

8.4 VALIDER ET UTILISER LES RÉSULTATS.

L'univers artificiel offre-t-il une fidèle représentation de la réalité?

Quelle utilisation peut-on en faire?

Au cours de ce chapitre nous abordons successivement ces deux questions.

8.4.1. L'artificiel et le réel.

8.4.1.1. Perception du réel et univers artificiels.

Notre travail se place dans un cadre de pensée selon lequel le sens de la recherche consiste à fournir 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 de l'emploi d'un certain nombre "d'outils de pensée" (théories et modèles) et d'autre part l'emploi de ces outils renvoie à un vécu particulier du chercheur dans le réel qu'il veut décrire. Sans rentrer dans des considérations philosophiques sur le constructivisme et le positivisme qui sont l'objet d'un débat important, nous considérons que le réel est perçu par les chercheurs qui observent des phénomènes en fonction d'un modèle

abstrait, d'un référentiel disciplinaire. " *Les sciences ne visent qu'à connaître des objets, en construisant des modèles abstraits de l'expérience, modèles que l'on peut bien confondre avec les objets eux-mêmes (...) En ce sens c'est bien le réel que représente et atteint la science; mais seulement dans le réel ce que l'expérience nous donne comme communicable, par le moyen de systèmes symboliques, progressivement construits par le génie humain*" (Granger, 1992).

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'origines différentes*". Chercher ces cohérences passe par la confrontation des modèles, 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 qui sont "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 disciplines se construisent, et dans un deuxième temps les opérations sur ces objets sont mises en parallèle avec d'autres opérations sur d'autres objets.

8.4.1.2. Comparer le réel et l'artificiel.

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.

Notre simulateur intègre de nombreux acteurs agents caractérisés par différents attributs qui peuvent être assimilés aux paramètres des modélisations mathématiques. Il serait possible de calibrer ces paramètres, de régler ces attributs de façon à obtenir des résultats très proches de la réalité. Par exemple, pour simuler l'évolution des captures de pêche, il serait aisé de calibrer les paramètres réglant les efficacités des engins de pêche, de créer des règles vraisemblables pour réguler l'effort de pêche, de fixer une mortalité naturelle par espèce, de façon à obtenir des courbes de capture très proche de la réalité. En transportant le modèle d'applications en applications, de cas en cas, on précise la valeur des paramètres, on affine la pertinence des règles.

L'approche que nous avons choisie est plus théorique. Le principe du système multi-agents SIM-DELTA est, par le jeu des interactions entre agents, d'étudier les transferts entre différents niveaux d'organisation, c'est à dire entre différentes constructions.

La réalité à laquelle sont comparés les résultats des simulations a le même niveau d'abstraction que la réalité qui a servi à le construire. C'est en s'appuyant sur des théories, des formes, des indices, des modèles qualitatifs, des typologies, des distributions censées 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. 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 de différents modèles.

Prenons l'exemple de 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 sont validées, non pas par des observations sur le DCN, mais par un modèle conceptuel fourni par un écologiste spécialiste des hydrosystèmes tropicaux (Welcomme). Modélisé et simulé à l'échelle des populations de poissons, on retrouve une réponse à l'échelle de l'écosystème qui est comparée à un modèle conceptuel. La simulation, est validée par ces transferts entre deux niveaux d'organisation, en ce sens que l'on trouve une cohérence et que l'on établit un lien entre un modèle abstrait de la dynamique de population de poissons, et un modèle abstrait de la réponse d'un écosystème à un stress. D'autre part, ce modèle est aussi validé par l'écho qu'il reçoit des chercheurs de l'équipe DCN. Bien que la courbe des captures totales ne soit pas celle observée dans le delta car à cette augmentation de l'effort s'ajoute dans la réalité une diminution de la surface inondée, 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 qu'une intensification de la pêche.

8.4.2. Utilisation.

"Les rapports entre le modèle et la réalité simulée permettent de définir les trois grands domaines d'application de la simulation: la construction de théories, la décision, et la formation." (Gremy, 1990). L'utilité du simulateur que nous avons élaboré peut être discutée en fonction de ces trois points.

8.4.2.1 Le simulateur comme outil de construction théorique.

Dans le contexte des recherches multidisciplinaires la construction de théories résulte d'une confrontation de théories existantes. Bâti à partir de différents corpus de connaissances disciplinaires, le simulateur produit des simulations dont les résultats ont pour vocation d'être orientés vers les chercheurs. Chacun peut alors illustrer son discours à partir d'une même dynamique simulée. La simulation est donc utilisable pour tout d'abord

enrichir les corpus théoriques de chacun en le reliant à d'autres constructions et d'autre part pour 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 réagissent 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 alors 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 questions 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. *"L'exploration de ces modèles par le raisonnement, le va-et vient entre la pensée formelle et les résultats d'expérience que cette pensée même suggère enrichissent l'objet de science"* (Granger, 1990)

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. En conséquence, la lisibilité et la place de ces points de vue, par rapport à l'ensemble seront améliorés par la simulation. C'est uniquement pour des lots de connaissance construits que les simulations peuvent s'avérer profitables. En extrapolant il ne peut y avoir enrichissement scientifique interdisciplinaire que s'il y a discipline scientifique, c'est à dire s'il y a une construction de la réalité.

8.4.2.2 Le simulateur comme outil de décision.

"Lorsque la théorie est bien établie et que l'on réalise artificiellement des situations qui ne se sont pas encore présentées, la simulation est un outil de prévision, et peut aider au choix d'une stratégie" (Gremy, 1990).

Deux approches modélisatrices sont possibles.

La première, empirique, consiste à aborder le fonctionnement du système de façon globale, en considérant uniquement la relation entre les entrées et les sorties du modèle sans rentrer dans sa mécanique interne. C'est une approche holiste. En comparant des écosystèmes qui diffèrent par leur localisation géographique ou par leur âge, on peut obtenir une connaissance sur les relations causes-effets. La prévision sur les états futurs d'un écosystème s'appuie sur l'expérience acquise par le modèle, formalisé ou non, au cours des diverses comparaisons.

La deuxième dite mécaniste (analytique, explicative, réductionniste) consiste à essayer de comprendre les mécanismes du système. En réassemblant les mécanismes, on tente alors de retrouver le fonctionnement du système. Les simulations multi-agents s'intéressent à l'interaction d'agents pour observer les organisations possibles. Elles correspondent donc à une recréation de la complexité qui fait suite à différentes approches mécanistes. Ainsi, sur cette base, le simulateur ne peut être considéré comme un outil de prévision, mais il participe à la discussion prospective.

Par exemple, les simulations peuvent illustrer les discours suivants:

- dans l'avenir, étant donné les mécanismes de résistance écologique, la ressource n'est pas en danger et maintiendra sa production, à condition que l'hétérogénéité de la pression de pêche sur un espace fragmenté soit maintenue.
- l'augmentation de l'effort de pêche à l'étiage, par simple pression démographique, ou du fait de l'accès à des engins performants, produirait des changements de composition écologique; et si l'écosystème ne peut plus répondre, ses mécanismes de résistance étant détruits, une chute des captures doit être envisagée, à conditions hydrologiques égales.

Par ailleurs, les simulations ne doivent pas être perçues comme un "prêt à penser", comme une synthèse achevée de la connaissance. Elles sont organisées à l'intérieur de la recherche pluridisciplinaire pour alimenter la construction de connaissances. Ce qui résulte du travail de l'équipe de recherche, c'est un (des) discours scientifique(s), et ce sont ces discours qui doivent être livrés auprès des aménageurs ou pêcheurs. Le simulateur tel que

nous l'avons élaboré produit des simulations qui peuvent servir à appuyer le discours des chercheurs en augmentant les capacités d'argumentation et en rendant plus lisibles des liens entre connaissances.

8.4.2.3 La formation.

Cet objectif de formation correspond à des modèles éprouvés avec des situations simulées bien connues: il s'agit en général de simulateurs (de vols, de tirs). Ce n'est pas l'objectif de notre programme. Les résultats des simulations sont des informations destinées soit aux chercheurs soit aux décideurs pour améliorer les constructions: le simulateur ne peut être considéré comme une construction achevée.

8.5 UNE MODÉLISATION MULTI-AGENTS DE LA DYNAMIQUE ET DE L'USAGE DES RESSOURCES RENOUVELABLES.

Après avoir présenté notre recherche comme un parcours singulier au sein de différents réseaux, orienté par des rencontres dans des lieux et des moments particuliers, il n'est pas envisageable de transformer notre réalisation en méthodologie d'étude. Cependant, il est possible de dégager de cette réalisation une construction un peu générale, qui pourra peut être servir de référence 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 posées et articulées les questions et leurs processus de résolution qui ont un intérêt, 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 méthodes dont la solidité pourra être éprouvée par d'autres cas d'étude sur la modélisation de la dynamique et l'usage de ressources renouvelables.

L'idée générale est la suivante: le simulateur multi-agents permet de représenter les processus de prise de décision des acteurs pour, en résultat, simuler le fonctionnement d'un espace. La modélisation passe par deux phases de modélisation distinctes:

- la création d'un univers artificiel composé d'un espace et des différents agents qui interagiront dans cet espace,
- la représentation de la dynamique de la ressource et des processus de prise de décision.

8.5.1 Création d'un univers artificiel.

8.5.1.1. Un espace.

A l'origine, l'espace est considéré comme *"une surface de support"* (Lacour, 1986): il s'agit de représenter la scène où 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 milieux, 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 acteurs. Pour figurer les variations environnementales, il est possible de représenter une variabilité au cours du temps de cette potentialité d'accueil. Des objets autres que les milieux peuvent être introduits pour représenter l'environnement physique (par exemple le niveau de l'eau, la température,)

Traditionnellement les modèles multidisciplinaires sont construits autour d'une ou de 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 objets et accueille leurs interactions. L'ensemble des milieux constitue donc un véritable objet d'interface entre dynamiques sociales et écologiques.

8.5.1.2 Des agents

Dans le cadre de la dynamique et l'usage des ressources renouvelables, on identifie aisément d'un côté des agents qui représentent la ressource et de l'autre des agents qui représentent la société. Notons que la ressource renouvelable n'est pas forcément une population animale ou végétale: l'eau, le sol font partie des ressources renouvelables à travers les usages qu'en fait la société comme l'irrigation et la jachère par exemple.

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. On peut aussi définir des réseaux entre les agents: ainsi on pourra par exemple définir un carnet d'adresse pour chaque agent qui lui permettra de communiquer avec d'autres agents. Dans le cas de la pêche il y a deux types d'agents, les poissons et les pêcheurs. Les poissons, la ressource, vont se déplacer dans l'espace qui va de ce fait s'enrichir d'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 acteurs l'espace est passé d'un espace-support, à un ensemble d'agents qui interagissent dans différents lieux.

8.5.2 Représentation des processus d'interaction.

Après avoir créé l'univers artificiel il est nécessaire de décrire les processus qui vont l'animer. On dispose en général de modèles pour représenter la dynamique de la ressource naturelle: ces modèles (croissance, mortalité, reproduction, écoulement des fluides, etc...) peuvent être classés dans des lots de connaissances particuliers.

Pour les agents humains, le moteur de l'organisation de l'espace est le processus de décision, afin de choisir une action dans un lieu. Il est possible de dégager l'esquisse d'un processus de prise de décision en le décomposant en quatre phases: (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. Nous proposons de séparer les connaissances suivant la phase à laquelle elles correspondent.

8.5.2.1 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 comme l'agent pense ses rapports au milieu naturel (Friedberg, 1992).

Pour représenter (au sens représentation informatique 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 mémorisées nous simulons le monde extérieur, anticipons les événements futurs et établissons des stratégies de comportement*". (Bienenstock, 1991). On trouve d'autres concepts proches comme celui de modèle mental (Johnson-Laird, 1993) ou d'image mentale (Cavazza, 1993). 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 attribuer des coûts, des recettes prévisionnelles, des durées pour la représentation économique. Si cette construction mentale est ici tournée vers l'espace, il est 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 ou voit les autres. Par exemple, un agent peut se représenter un autre agent comme le leader 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'objet. C'est ainsi que des modélisations d'individus qui se communiquent et comparent leurs cartes mentales commencent à voir le jour (Treuil, 1993; 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'agent se fait une représentation de son environnement physique. 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 une représentation collective de cet espace. A travers cette construction de groupe sont réglées les conditions de l'accès à l'espace.

8.5.2.2 Perception d'information.

Les agents perçoivent leur environnement de deux façons différentes: soit directement s'ils sont modélisés de façon réactive (stimulus-réponse), soit au travers des filtres qu'ils ont élaborés: les objets mentaux correspondant aux activités. Dans ce dernier cas, au départ les objets mentaux sont vierges de toute information sur le système. La phase de perception

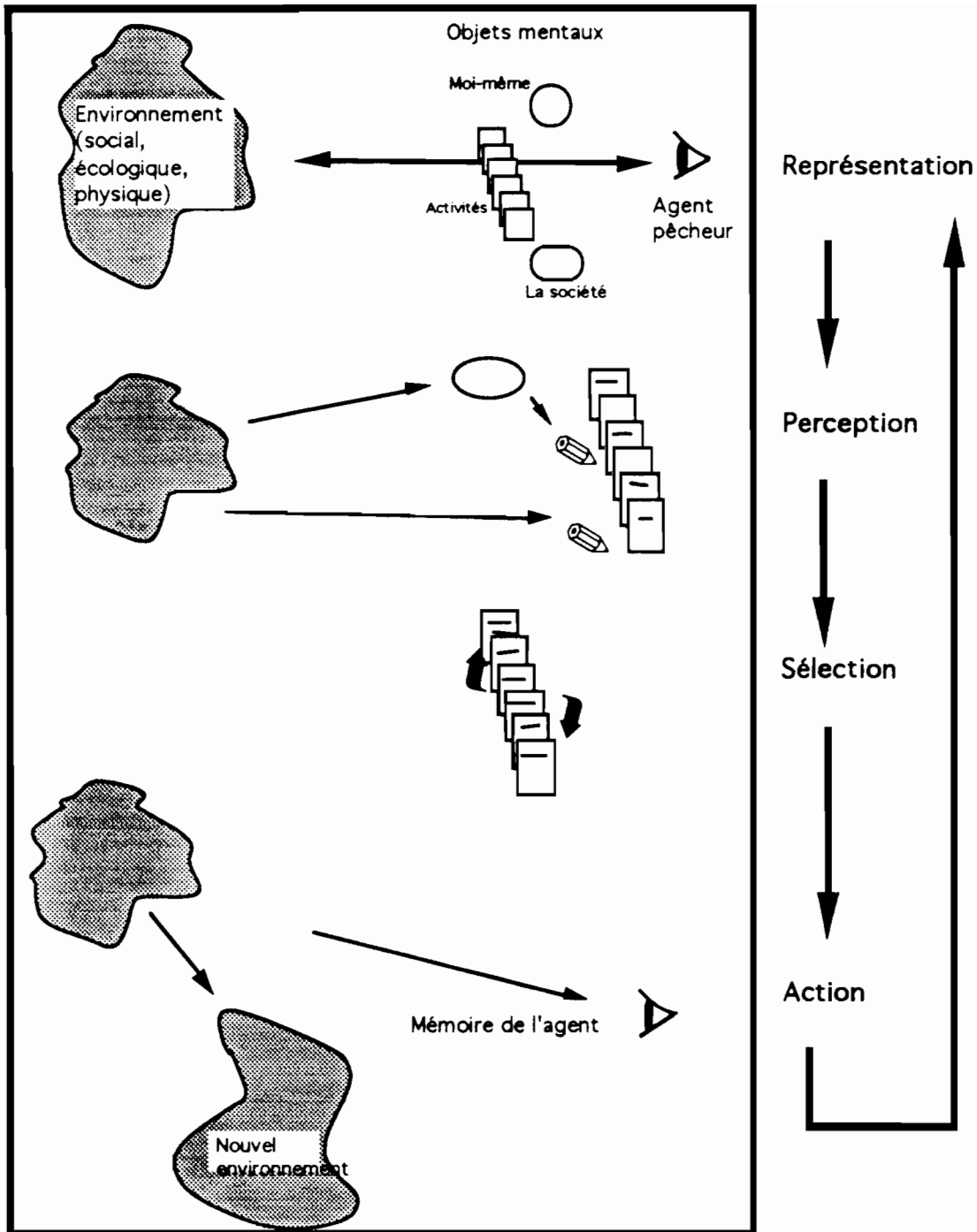


Figure 8.6: Schéma du processus de décision

Lors de la phase de perception, un objet mental est créé pour chaque activité potentielle.

Lors de la phase de perception, chacun des objets mentaux est documenté en fonction de sa 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.

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. 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; Si le milieu freine ma croissance, alors je migre vers un milieu adjacent),
- 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. Au cours de la phase de perception il est aussi possible de simuler des interactions. Par exemple deux agents peuvent s'échanger des informations sur leurs objets mentaux respectifs.

8.5.2.3 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 figures se présentent. Soit l'agent est essentiellement réactif et la question ne se pose pas (Si je suis un poisson "chronoréglé" et que l'eau monte, Alors je migre; Si je suis bozo et que les Conditions Hydrologiques sont basses, Alors je pêche dans la mare avec un épervier; Si je suis un pêcheur mimétique Alors j'imité mon leader) car la phase de sélection est alors confondue avec la phase de perception. Soit l'acteur 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 (minimax, vote, etc ...).

8.5.2.4 Action.

Après avoir choisi une activité ou un déplacement les acteurs se déplacent sur un lieu où ils agissent. Ainsi par exemple des poissons qui après avoir "choisi" un endroit grossissent, se reproduisent et 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 acteurs: ainsi, en résultat de la compétition l'acteur peut être satisfait ou insatisfait. Sans aller jusqu'à interpréter l'information, l'acteur 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. C'est une perpétuelle acquisition d'informations donc une décision continue.

8.6 CONCLUSION.

De la construction du simulateur et de son utilisation ont été tiré plusieurs enseignements. Les avantages et inconvénients des systèmes multi-agents pour la modélisation multidisciplinaire ont été brièvement examinés ici; ils le seront plus complètement dans la thèse de C.Cambier. Il s'agissait, du moins en France, d'une des premières réalisations importantes de modélisation multi-agents en sciences de l'environnement, incluant à la fois des dynamiques sociales et écologiques dans des espaces variés. Un certain nombre d'indications ont pu être tirées qui viennent enrichir les discussions à l'intérieur du domaine des multi-agents. Mélanger à la fois des représentations d'agents plutôt réactifs et d'agents plutôt cognitifs, utiliser les agents soit comme des acteurs de l'univers artificiel soit comme des observateurs de cet univers: tout cela permet d'apporter des éléments aux débats qui concernent l'autonomie et le contrôle, le réactif et le cognitif.

La première partie (chap 8.1) concerne la représentation des connaissances. Nous avons présenté des outils de représentation des connaissances. La représentation objet permet de passer de l'objet perçu par le chercheur à l'objet de pensée (de discours). La représentation par règles permet de manipuler ces objets de pensées en définissant leurs interrelations, la fonction que chacun occupe par rapport aux autres.

Dans la deuxième partie (chap 8.2), nous avons postulé que l'organisation des lots de connaissance est en elle même un modèle. Ce modèle s'exprime par la création d'une structure de contrôle. Nous présentons une méthode pour aider à organiser les multiples connaissances.

Dans la troisième partie (chap. 8.3), nous avons défini le principe des simulations comme une recherche sur les transferts entre niveaux d'organisation. Si l'hétérogénéité du monde observé correspond à un niveau micro, on peut considérer que les connaissances des chercheurs qui agrègent une partie de cette hétérogénéité sont définies sur des niveaux intermédiaires. Le jeu des simulations est de faire des hypothèses sur les niveaux d'agrégation concernant les représentations de la ressource, de l'espace et des hommes, pour trouver les concordances de niveaux intermédiaires qui permettent de retrouver le fonctionnement macroscopique.

Dans la quatrième partie (chap 8.4), nous avons postulé que la validation des simulations est une validation conceptuelle en ce sens qu'elle passe par l'étude de la cohérence entre différentes constructions de la réalité. De la sorte, l'utilité du simulateur réside dans sa capacité à faire communiquer et à enrichir les différents modèles. Par ailleurs, vis à vis de l'aménageur, les simulations peuvent être considérées comme un appui pour argumenter sur le fonctionnement du système, et une aide pour rendre lisible les liens interdisciplinaires.

Dans la dernière partie (chap 8.5), et au terme de notre expérience, nous proposons une modélisation de l'interaction homme-ressource, en insistant sur les processus de prise de décision, sur la double existence d'un monde réel et d'un monde construit et sur l'accès à l'espace.

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 seule 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 cette 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).

9 CONCLUSION GÉNÉRALE

Au début de cette thèse nous avons choisi d'étudier l'apport de la modélisation pour tisser des liens entre différents points de vues disciplinaires sur une même réalité complexe. Dans ce but, et pour préciser un peu le sujet, nous avons posé trois questions:

- Comment représenter la complexité du monde observé et comment représenter les différents points de vue sur le monde observé?
- Quels peuvent être les apports méthodologiques des modélisations informatiques proposées par le domaine de l'Intelligence Artificielle pour répondre à ces questions?
- Quelles indications les simulations peuvent-elles apporter sur le fonctionnement du delta central du Niger, et plus généralement, comment peuvent être utilisées les simulations dans le domaine des interactions homme-ressource?

Au cours de cette thèse, nous avons fait des choix méthodologiques, élaboré et développé des outils et effectué des expériences de simulation. En discussion, nous avons tenté de généraliser quelques enseignements tirés de ce travail. Chaque chapitre de la thèse comporte une conclusion qui résume les points abordés.

Sous bien des aspects notre travail revêt un caractère exploratoire. A cet égard, la rédaction de cette thèse ne fait que marquer une étape au terme de laquelle de nombreux points ont été simplement abordés et mériteraient d'être approfondis. Pour conclure et apporter des éléments de réponse aux questions posées, nous reprenons les principales idées et remarques issues de notre expérience et nous indiquons quelques directions de recherche qui se dégagent.

L'étude d'un objet complexe et les points de vue scientifiques.

Un objet complexe peut être considéré comme un ensemble de niveaux d'organisation au sein desquels interagissent différentes entités. En général un chercheur étudie un système sur un, parfois deux niveaux d'organisations donnés: par exemple l'économie à l'échelle du ménage, du lignage, du village, de la région ou bien l'écoulement de l'eau à l'échelle de la

motte, de la parcelle, du bassin versant. La difficulté de l'étude du transfert d'échelle est d'autant plus grande que participent plusieurs corps disciplinaires différents. C'est en particulier le cas des études sur l'environnement où l'on compte des spécialistes des sciences physiques, biologiques et sociales: l'image des poupées russes devient caduque et fait place à la notion de hiérarchies enchevêtrées dynamiques (Ploman, 1986). Pour aider à la synthèse des connaissances nous avons fait le choix d'une démarche ascendante: à un niveau d'organisation donné, on représente les différentes entités (groupes de poissons, pêcheurs, fragments d'espace), leurs comportements et leurs processus de prise de décision. Ces entités interagissent entre elles et l'on fait des observations sur le niveau d'organisation supérieur, l'écosystème (anthropisé).

Dans un écosystème, les entités observées (le niveau de base) sont trop nombreuses et trop diverses pour être toutes prises en compte. Chaque milieu, chaque poisson, chaque pêcheur est unique. En général, les chercheurs s'emploient à réduire cette diversité avec les méthodes qui sont propres à leurs disciplines. La définition du comportement des entités passe alors par des connaissances plus générales: on parle de poissons de telle stratégie adaptative, de milieux de types plaine inondable ou mare, de pêcheurs appartenant à tel groupe social et provenant de telle région. On obtient ainsi des typologies qui correspondent à des niveaux abstraits que nous avons qualifié d'intermédiaires. Le problème consiste alors à définir l'hétérogénéité que l'on doit conserver pour bien représenter le système (le niveau global): combien doit-on représenter de groupes fonctionnels de poissons? combien de types de milieux? quel est le degré d'autonomie et de contrôle social qui s'exerce dans le processus de prise de décision? De plus, ces questions ne doivent pas être prises isolément: il faut réfléchir à l'hétérogénéité ou la diversité de chacun de ces niveaux intermédiaires en tenant compte des autres niveaux. Nous pensons que là réside l'intérêt des simulations qui adoptent une approche ascendante. Il s'agit de pouvoir tester des hypothèses d'hétérogénéité des niveaux intermédiaires pour en observer les conséquences sur le fonctionnement du niveau global.

Les systèmes multi-agents.

Les systèmes multi-agents (SMA) sont une méthode de modélisation issue du domaine de l'Intelligence Artificielle, et plus précisément de l'Intelligence Artificielle Distribuée. Ils sont utilisés pour modéliser des phénomènes complexes en représentant les agents du monde observé et leurs interactions. Chaque agent est représenté comme une entité informatique dotée d'une autonomie, capable d'agir localement en réponse à des stimuli ou à des communications avec d'autres agents. Pour modéliser la pêche nous avons considéré l'existence de plusieurs agents, des poissons et des pêcheurs qui évoluent dans un espace fragmenté en plusieurs milieux. L'ensemble de ces agents constitue un écosystème artificiel dans lequel les communications s'effectuent soit directement, soit par l'intermédiaire de l'environnement. Il nous semble que les systèmes multi-agents sont performants pour étudier les transferts d'échelle: on ne peut pas envisager de simuler toutes les molécules d'un gaz, mais il est possible de représenter, sur les niveaux intermédiaires que nous avons présenté, de nombreuses entités différentes en interaction. La diffusion des machines parallèles dans les années à venir devrait favoriser ce type d'approche en multipliant considérablement le nombre d'objets. Il sera alors possible de mieux étudier les effets de l'hétérogénéité au niveau local sur le fonctionnement au niveau global.

De plus nous avons voulu représenter les différents points de vue: ce n'est pas l'écosystème que nous devons modéliser mais l'écosystème décrit selon différents points de vue. Pour cela nous avons élaboré une architecture de type blackboard, qui consiste à faire partager une base commune à différents spécialistes: ce type d'architecture est généralement utilisé pour des problèmes de représentation d'expertises multiples. Dans notre cas, l'écosystème artificiel constitue la base commune partagée par les différents points de vue (fig. 8.1). Pour formaliser la connaissance nous avons utilisé deux techniques différentes. Les agents de l'écosystème artificiel sont représentés à l'aide d'objets (on parle de réification) et les connaissances des spécialistes à l'aide de règles. Ce double formalisme offre des possibilités importantes de représentation des différents points de vue sur la réalité. La création d'un objet précise le regard que l'on pose sur lui, et les règles permettent de manipuler cet objet. On rejoint ainsi les principes de construction des "knowledge based

simulation systems" qui séparent les entités du monde de la base de modèles (Zeigler, 1987). Un des avantages est de pouvoir écrire de très nombreuses règles, les modifier, les retirer sans perturber tout le simulateur. Par ailleurs, d'autres procédés de modélisation peuvent être intégrés: il est possible de faire appel à des modèles mathématiques pour représenter un processus particulier d'un agent, par exemple la croissance des poissons.

L'outil que nous avons élaboré permet d'une part de représenter différents points de vue sur la réalité et d'autre part de conduire des simulations dans une approche ascendante. On peut penser que la structure élaborée, au moins dans ses principes, pourra servir de base à d'autres modélisations d'écosystèmes observés par plusieurs points de vues différents.

Les simulations sur la pêche dans le Delta Central du Niger.

Le générateur de simulations est un outil très ouvert: il est possible de mener des expériences sur différents sujets. Afin de participer à la synthèse des connaissances de l'équipe DCN, nous avons choisi de mener des expériences autour du problème de l'intensification d'exploitation. On regroupe dans le terme intensification d'exploitation la diminution de surface inondées, l'accroissement démographique, la diffusion d'engins performants, les effets des changements de réglementation. Autant de contraintes qui, étant donnée la baisse des quantités de poissons commercialisés, concourent à donner l'image d'un écosystème stressé. Nous avons choisi de mener des expériences qui précisent la réponse du système au stress.

En représentant une augmentation arithmétique d'un vecteur effort de pêche, on souligne une forme réponse caractéristique: les captures augmentent puis se stabilisent à un niveau "plateau" qui s'achève par la mort de la pêcherie. Le niveau des captures ne constituent donc pas un indicateur de l'intensification d'exploitation. Il faut rechercher ces indicateurs dans les changements de structure du peuplement (remplacement d'espèces, changement de tailles). Il apparaît que des modifications de variabilité des captures peuvent correspondre à des modifications de la structure et de la dynamique du système. Les moments où apparaissent les

plages de fortes variabilité dépendent du degré de protection de la ressource par rapport à la pêche.

Après avoir cherché dans les relations pêche-climat un indicateur du degré d'exploitation du système, nous avons proposé diverses expériences en modifiant l'hétérogénéité du milieu et en représentant des pêcheurs capables de décider de leurs activités. Nous avons testé différentes hypothèses sur la part relative d'autonomie et de contrôle dans l'accès à l'espace des pêcheurs. Les résultats que nous avons obtenus soulèvent bien des questions. De nombreuses expérimentations devraient être tentées pour approfondir les sujets abordés. D'ores et déjà, ces expériences permettent d'illustrer et parfois de préciser le discours des chercheurs: la ressource est résistante au stress d'intensification, la fragmentation de l'espace et l'hétérogénéité de l'accès jouent un rôle important dans ce mécanisme de résistance, le période de l'étiage est un point sensible du système, la préservation de la ressource passe en grande partie par l'organisation de l'accès à l'espace, les différences d'accès à l'espace peuvent aider à préserver la ressource et dans le même temps -suivant ces règles- contribuer à creuser des écarts économiques, seul le scénario d'amélioration hydrologique montre une amélioration sensible de la production halieutique.

Ainsi, dans ces expériences, nous avons cherché à mettre en correspondance des connaissances et hypothèses en jouant sur l'hétérogénéité de l'espace, sur les mécanismes d'occupation de l'espace des poissons et sur les déterminants individuels et collectifs de l'accès à l'espace des pêcheurs. Ces expériences ne constituent qu'une ébauche mais il nous semble que ce type d'exploration autour de problèmes spatiaux est un cadre pertinent pour réfléchir en même temps sur des connaissances physiques, sociales et écologiques.

Validation, utilisation.

La modélisation que nous proposons débute par une importante phase de représentation de connaissances provenant de différentes disciplines. Puis, la simulation permet de faire fonctionner ensemble différents modèles: la validation passe par l'étude de la cohérence entre différents corps de connaissances. Plus précisément, on étudie la cohérence entre d'une part

les connaissances sur différents mécanismes au niveau micro et d'autre part les connaissances sur les phénomènes observés au niveau macro. Ensuite, en testant différentes hypothèses sur l'univers artificiel, on cherche à construire des connaissances spécifiques à l'interaction homme-milieu-ressource. Ces nouvelles connaissances sont de nouveaux modèles: ils doivent être confortés ou réfutés par l'expérimentation (Casti, 1988), c'est à dire l'observation du réel sous ces nouveaux points de vue. Les simulations peuvent aider à définir les points importants qu'il faut prendre en compte et à préciser un nouveau discours scientifique. Ensuite pourront être prises des décisions ou mis en place des systèmes d'observatoire restreints des mécanismes importants. Tel est le cas sur le fleuve Niger où se monte un observatoire des pêches. Une perspective importante est d'étudier comment les simulations peuvent aider à mettre en place des protocoles d'observation. C'est donc bien dans un contexte multidisciplinaire que doivent s'exprimer les résultats des simulations. La modélisation ne doit pas être conçue comme un entonnoir qui réduirait la diversité des sens mais comme un outil de communication pour enrichir les différents modèles et tisser des liens.

Modéliser des représentations.

A priori, les problèmes d'environnement concernent les relations entre d'une part un ensemble d'individus et d'autre part l'ensemble des milieux nécessaires à leur survie. La modélisation de l'action des individus passe soit par la formalisation de comportements déterminés, soit par celle du processus de prise de décision. Dans ce deuxième cas s'ouvre un autre monde: le monde des représentations. Pour modéliser le processus de prise de décision il faut prendre en compte les différentes représentations que les agents se font de leur environnement: chacun se fait une représentation des milieux, de la société, du temps, de soi-même, etc..... Ces représentations constituent les filtres à travers lesquels les agents perçoivent la réalité: c'est donc en fonction de ces filtres qu'ils interagissent avec les autres agents. Nous avons proposé deux méthodes pour modéliser ces représentations.

La première de ces méthodes reporte ces représentations sur le monde réel. Afin de représenter un objet du monde réel, on peut construire autant d'objets qu'il y a de représentations et, grâce au mécanisme d'héritage des langages objets, assembler ces objets en une seule entité. Ainsi, le "monde artificiel réel" est constitué de la somme des points de vue; différents agents peuvent décider et agir en fonction de leurs représentations partielles d'un même objet.

La deuxième méthode consiste à créer pour chaque agent un univers mental composé de plusieurs objets mentaux. Ainsi il y a d'un côté un "monde artificiel réel" composé de milieux, d'une ou plusieurs ressources et d'un autre côté un monde mental plus ou moins simple dans la tête de chaque agent. Certains de ces objets mentaux sont individuels, d'autres peuvent être partagés par plusieurs agents; ils peuvent être modifiés, transmis, remplacés par d'autres.

Loin d'être incompatibles, ces deux formalismes peuvent être proposés ensemble. Il faut élargir la palette des méthodes pour la modélisation des représentations. A cet égard et en perspective, il paraît important d'évaluer et d'intégrer les résultats des recherches en sciences cognitives qui concernent la perception et les modèles mentaux.

La modélisation et la simulation d'un problème d'environnement, et plus précisément d'un problème de relation homme ressource naturelle renouvelable, peut ainsi s'intéresser à l'évolution conjointe de trois dynamiques interdépendantes qui sont la dynamique des ressources naturelles, la dynamique des représentations et les actions des agents. Dans ce cadre les aménageurs et les chercheurs peuvent être considérés comme des agents: à quand la prise en compte de l'agent modélisateur?

En guise de conclusion

Aujourd'hui les méthodes et techniques de simulation permettent de représenter des univers très complexes et les ordinateurs offrent la possibilité de simulations très rapides. Quéau (1993) souligne les vertus des mondes virtuels mais discute aussi les vertiges qu'ils peuvent provoquer. La simulation à l'aide d'un système multi-agents provoque effectivement des impressions contradictoires.

D'un côté, c'est le pouvoir de représenter de très nombreux mécanismes, c'est l'impression de contribuer à comprendre comment des phénomènes au niveau macroscopique peuvent émerger des mécanismes au niveau microscopique, et c'est le sentiment grisant de s'interroger sur les liens entre différentes constructions scientifiques. D'un autre côté, c'est l'impression d'un territoire peu balisé dans lequel on effectue un parcours sans méthode précise d'exploration. En raison de la jeunesse de ces méthodes de simulation, nous en sommes à un stade d'expérimentation sur plusieurs domaines d'application. A la suite de différentes expériences une méthodologie de simulation se dégagera qui tentera de préciser comment construire un système multi-agents à partir de connaissances sur le réel, comment présenter les résultats, comment comparer ces résultats aux observations du réel et comment la "vie artificielle" modifie notre regard sur la "vie réelle"?

Sans avoir réglé ces problèmes, nous espérons que notre thèse apporte des éléments qui pourront être utilisés pour progresser dans l'utilisation des systèmes multi-agents. Par ailleurs, par l'intermédiaire de ce travail, nous avons provoqué la rencontre de chercheurs du domaine des multi-agents et du domaine de l'environnement. Nous espérons avoir souligné la complémentarité des domaines de recherches qui laisse entrevoir de nombreuses et enrichissantes collaborations.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (Allen et McGlade, 1989) Allen P.M, McGlade J.M. Dynamics of discovery and exploitation: the case of the Scotian Shelf Groundfish fisheries, *C. Fish. Aquat. Sci.*, Vol 43 1989.
- (Allen et Starr, 1982) Allen T.F.H et Starr T.B. *Hierarchy: perspectives for ecological complexity*. The University of Chicago Press 1982.
- (Allen et al., 1987) Allen T.F.H, O'Neill R.V., Hoekstra T.W. Interlevel relations in ecological research and management: some working principles from hierarchy theory. *Journal of Applied System Analysis*, Vol. 14 1987.
- (Allen et Hoekstra, 1992) Allen T.F.H et Hoekstra T.W. *Toward a unified ecology*. Columbia University Press 1992.
- (Atlan, 1979) Atlan H. *Entre le cristal et la fumée, Essai sur l'organisation du vivant*. Ed. du Seuil 1979.
- (Atlan, 1991) Atlan H. L'intuition du complexe et ses théorisations. Actes du Colloque de Cerisy, *Les théories de la complexité autour de l'oeuvre d'Henri Atlan*, Ed. Seuil 1991.
- (Attali, 1972) Attali B. *L'anti-économique* 1972.
- (Attonaty et al., 1990) Attonaty J.M., Chatelin M.H., Poussin J.C. L'évolution des méthodes et langages de simulation. Brossier J., Vissac B., Le Moigne J.L. (eds.) *Modélisation systémique et système agricole*. Editions INRA 1990.
- (Augé, 1993) Augé M. Propos recueillis par J.M. Colombani. *Les grands entretiens du Monde*. Numéro spécial de Dossier et Documents du Monde, Juin 1993.
- (Augé, 1993) Augé M. Une anthropologie résolument surmoderne (entretien avec Yves Goudineau). *Cahiers des Sciences Humaines*, Hors Série, Trente ans, 1993.
- (Auger, 1993) Auger P. Quelques outils mathématiques pour l'analyse hiérarchique. P.Auger, J.Baudry et F.Fournier (eds.) *Hiérarchies et échelles en écologie*, Naturalia publications 1993.
- (Auger et al., 1993) Auger P., Baudry J., Fournier F. *Hiérarchies et échelles en écologie*, Naturalia publications 1993.

- (Austin, 1962) Austin J.L. *How to do things with words*. Oxford University Press 1962..
- (Bajdik et Schneider, 1991) Bajdik C.D. and Schneider D.C Models of fish yield from lakes: does the random component matter? *Can.J.Fish.Aquat.Sci.*, Vol. 48 1991.
- (Bailey, 1988) Bailey P.B. Accounting for effort when comparing tropical fisheries in lakes, river floodpains and lagoons. *Limnol. Oceanogr.* 33 1988.
- (Bailey et Petrere, 1989) Bailey P.B. et Petrere J.M. Amazon fisheries: assesment methods, current status and managment options. D.P. Dodge (ed) Proceedings of the International Large River Symposium. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 106 1989.
- (Bailly et al., 1989) Bailly B., Challine J.F., Ferri H.-C., Gloess P.Y., Marchesin B. *Les langages orientés-objets*, Cepadues-Editions 1989.
- (Baranov, 1918) Baranov F.I. On the question of the biological basis of fisheries, *Nau. Issled. Ikht. Inst. Izves.* 1 1918.
- (Barrué-Pastor, 1992) Barrué-Pastor M. L'interdisciplinarité en pratiques. Ed. M.Jollivet, *Sciences de la nature Sciences de la société*, CNRS Editions 1992.
- (Beddington et May, 1977) Beddington J.R. et May R. Harvesting natural populations in a randomly fluctuating environment. *Science* Vol. 197 1977.
- (Benech et Quensièrre, 1987) Benech V. et Quensièrre J. *Dynamique des peuplements ichtyologiques de la région du lac Tchad (1966-78) -Influence de la sécheresse sahélienne-*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université des Sciences et Techniques de Lille 1987.
- (Benech et al., 1993) Benech V., Penaz M., Le Hong Chuong P. *Les migrations latérales des poissons dans le Delta Central du Niger*. Rapport multigr. ORSTOM Bamako 1993.
- (Berkes et al., 1989) Berkes F., Feeny D., McKay B.J., Acheson J.M. The benefits of the commons. *Nature* 340 1989.
- (Berkes, 1989) Berkes F. *Common property resources, Ecology and community-based sustainable development*. Belhaven Press 1989.
- (Beverton et Holt, 1957) Beverton R.J.H, Holt S.J. *On the dynamic of exploited fish populations*. Fish. Invest. Minist. Agric., Fish. Food (G.B) Ser. 2, 19 1957.
- (Biennenstock, 1991) Biennenstock E. Une approche topologique de l'objet mental. Actes du Colloque de Cerisy, *Les théories de la complexité autour de l'oeuvre d'Henri Atlan*, Ed. Seuil 1991.

- (Blanc et al., 1955) Blanc M., Daget J., Aubenton F.D'. L'exploitation des eaux douces dans le bassin du Moyen Niger. *Bull. IFAN*, XVII (4), ser.A 1955.
- (Bond et Gasser, 1988) Bond A.H. et Gasser L. *Readings in Distributed Artificial Intelligence*. Morgan et Kaufman 1988.
- (Boudon, 1990) Boudon R. *L'individualisme méthodologique*. Encyclopédia Universalis 1990.
- (Boudon, 1993) Boudon R. Rencontre avec Raymond Boudon. Propos recueillis par J.J. Dortier et J. Lecomte, *Sciences Humaines*, 29 1993.
- (Bousquet et al., 1992) Bousquet F., Cambier C., Morand P., Quensière J., Mullon C. Simulating fishermen society. Actes du congrès *Simulating Societies*, Guildford 1992. (à paraître).
- (Bousquet et al., 1993) Bousquet F., Cambier C., Mullon C, Morand P., Quensière J., Pavé A. Simulating the interaction between a society and a resource. *Journal of Biological Systems*, Vol 1, n°2 1993.
- (Boutot, 1993) Boutot A. *L'invention des formes*. Editions Odile Jacob 1993.
- (Bouché, 1990) Bouché M. *Ecologie opérationnelle assistée par ordinateur*. Ed. Masson 1990.
- (Brooks, 1992) Brooks R. Artificial life and real robots. F.Varela et P. Bourguine (eds). *Toward a practice of autonomous systems*, Proceedings of the first European conference on Artificial Life, M.I.T. Press 1992.
- (Brossier et al., 1990) Brossier J., Vissac B., Le Moigne J.L. 1990. *Modélisation systémique et système agricole*. Editions INRA.
- (Caillé, 1992) Caillé A. Sujets individuels et sujet collectif. In *Philosophie et anthropologie*, Editions du Centre Pompidou 1992.
- (Caillé, 1993) Caillé A. Coup de sonde: un regard neuf sur les sciences sociales (J.P.Dupuy), *Revue Esprit*, Juin 1993.
- (Cambler et al., 1991) Cambier C., Bousquet F., Dansoko D. Un univers multi-agents pour la modélisation du système de la pêche du Delta Central du Niger. Actes du premier congrès d'informatique en Afrique. INRIA-Université de Yaoundé 1991.
- (Cammarata et al., 1988) Cammarata S., McArthur D., Steeb R. Strategies of cooperation in Distributed problem solving. A.Bond et L. Gasser (eds) *Readings in Distributed Artificial Intelligence*. Morgan et Kaufman 1988.

(Carré, 1989) Carré B. *Méthodologie orientée objet pour la représentation des connaissances, cocepts de points de vue, de représentation multiple et évolutive d'objet*. Thèse de Doctorat présentée à l'Université de Lille Flandres Artois 1989.

(Castl, 1989) Casti J.L. *Alternate realities, mathematical models of nature and man*. Wiley Intersciences 1989.

(Cavazza, 1983) Cavazza M. *Modèles mentaux et sciences cognitives*. M.F. Ehrlich, Tardieu H., Cavazza M. (eds), *Les modèles mentaux, approches cognitives des représentations*, Masson 1993.

(Caverivière, 1991) Caverivière A. *Les effets de l'exploitation sur les différentes composantes des peuplements*. Note pour la réunion Peuplements des 20 et 21 Juin 1991, ORSTOM, Paris.

(CEE, 1987) CEE. *Assesment of technical interactions in mixed fisheries*, CEE Internal Information on Fisheries, 15, 1987.

(Charles, 1989) Charles A.T. *Bio-Socio-Economic fishery models: labour dynamics and multi-objective managment*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46 1989.

(Charles-Dominique, 1991) Charles-Dominique E. *Haliéutique et pêches artisanales: anciennes méthodes, nouvelles problématiques? La recherche face à la pêche artisanale*, Symp. Int. ORSTOM-IFREMER, J.R.Durand, J.Lemoalle et J.Weber (Eds.) 1991 .

(Chalb et al., 1990) Chaib A., Hossaert M., Jarry M., Valero D.M.M *Construction d'un modèle et communication dans une équipe pluridisciplinaire à propos d'une étude sur le mode de reproduction d'une légumineuse spontanée, Lathyrus Sylvestris*. M.Brissaud, M.Forsé, A.Zighed (eds). *La modélisation confluent des sciences*, Editions du CNRS1990.

(Changeux, 1983) Changeux J.P. *L'homme neuronal*, Fayard 1983.

(Charruau et Biseau, 1989) Charruau A. et Biseau A. *Etude d'une gestion optimale des langoustines et des poissons démersaux en mer Celtique*. Rapport CEE/IFREMER, Tome 3 1989..

(Chéneau-Loquay et Matassaro, 1991) Chéneau Loquay A., Matarasso P. *Une représentation globale et systémique des zones rurales du tiers monde*, *Les Cahiers de la Recherche Développement* n°29 1991.

(Cheruy, 1988) Cheruy A. *Méthodologie de la simulation*. ed. A.Pavé, *Les Cahiers d'Edora*, Rapport de recherche INRIA N°866 1988.

(Chouret et Pépin, 1988) Chouret A. et Pépin Y. *Le point sur la sécheresse au Mali à la mi-Juin 1988: données hydropluviométriques sur quelques stations de longue durée*, rapport multigr. ORSTOM Bamako 1988.

(Clark, 1989) Clark C.W. Bioeconomics. Ed. J. Roughgarden, R.M. May, S.A. Levin, *Perspectives in Ecological Theory*, Princeton University Press 1989.

(Colln, 1989) Colin J.P. 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 1989.

(Cormier-Salem, 1993) Cormier-Salem M.C. A l'interface des approches "dynamique de la ressource" et "dynamique des exploitations halieutiques": les espaces halieutiques. Laloë F., Rey H., Durand J.L.. *Questions sur la dynamique de l'exploitation halieutique*. Montpellier (à paraître).

(Coulson, 1987) Coulson R.N., Folse L.J., Loh D.K. Artificial Intelligence and Natural Resource Management, *Science*, Vol. 237 1987.

(Coulter, 1981) Coulter G.W. Biomass, production and potential yield of the lake Tanganyika pelagic fish community. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 110 1981.

(Couty, 1989) Couty P. Similitudes, simulacres et absence. SEMINFOR 2, *La modélisation: aspects pratiques et méthodologie*, Editions de l'ORSTOM 1989.

(Couty, 1993) Couty P. Autrement dit. Remarques sur la recherche en milieu multilingue. *Cahier des Sciences Humaines*, vol. 27, n°3-4 1993.

(Crozier et Friedberg, 1977) Crozier M. et Friedberg E. *L'acteur et le système*. Editions du Seuil 1977.

(Cury et Roy, 1987) Cury P. et Roy C. Upwelling et pêche des espèces pélagiques côtières de Côte d'Ivoire: une approche globale. *Oceanologica acta*, Vol. 10, n°3 1987.

(Cury, 1989) Cury P. *Approches modélisatrices des relations à court, moyen et long termes entre la dynamique des stocks de poissons pélagiques côtiers et les fluctuations climatiques*. Thèse de Doctorat, Université Paris 7 1989.

(Cury et Roy, 1991) Cury P. et Roy C. *Pêcheries Ouest-africaines, Variabilité, instabilité et changement*, ORSTOM Editions 1991.

(Daget, 1949) Daget J. La pêche dans le Delta Central du Niger, *Journal de la société des Africanistes*, XIX (1), pp: 1-79 1949.

- (De Kleer et Brown, 1984) De Kleer J. et Brown J.S. A qualitative physics based on confluences. *Artificial Intelligence*, 24 1984.
- (Delattre, 1982) Delattre P. Théorie des systèmes et épistémologie, Edité par P.Delattre *Système, Structure, Fonction, Evolution*, 2eme édition, Ed. Maloine, Paris 1982.
- (De Rosnay, 1975) De Rosnay J. *Le microscope, vers une vision globale*, Ed. Seuil, Paris1975.
- (Die et Watson, 1992) Die D.J and Watson R.A. Dissipation of spatial closure benefits as a result of non-compliance, *Mathematics and Computers in Simulation*, 33 1992.
- (Diu et al., 1989) Diu B., Guthmann C., Lederer D., Roulet B. *Physique statistique*. Hermann 1989.
- (Drogoul, 1992) Drogoul A. *L'éthomodélisation*. Institut Blaise Pascal, Jussieu, Rapport n°92/20 1992.
- (Dupuy, 1992) Dupuy J.P. *Introduction aux sciences sociales, Logique des phénomènes collectifs*. Ellipses 1992.
- (Durand, 1978) Durand J.R. *Biologie et dynamique des populations d'Alestes Baremoze (Pisces, Characidae) du bassin Tchadien*, ORSTOM Editions 1978.
- (Durand et al. 1988) Durand J.R., Lemoalle J., Weber J. *La recherche face à la pêche artisanale*, Symp. Int. ORSTOM-IFREMER, Editions ORSTOM 1988.
- (Duru et al., 1990) Duru M., Gibon A., Osty P.L. De l'étude des pratiques à l'aide à la décision: l'exemple du système fourrager. Brossier J., Vissac B., Le Moigne J.L. (eds). *Modélisation systémique et système agraire*. Editions INRA 1990.
- (Fay, 1989) Fay C. 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) 1989.
- (Fay, 1990) Fay C. *Complement à l'intervention sur "la pêche au Mali: histoire, groupes et identité" (document de travail à l'usage des étudiants du DEA interdisciplinaire d'Etudes Africaines)*. Multigr. 19p. 1990.
- (Fay, 1991) Fay C. *Organisation sociale et culturelle de la production de pêche: morphologie et grandes mutations*. Rapport multigr. ORSTOM Bamako 1991.
- (Ferber et Ghallab, 1988) Ferber J. et Ghallab M. Problématiques des univers multi-agents intelligents. In *Actes des journées nationales PRC-GRECO Intelligence Artificielle* 1988.

- (Ferber, 1983) Ferber J. *MERING: un langage d'acteurs pour la représentation et la manipulation de connaissances*. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Paris 6 1983.
- (Ferber, 1988) Ferber J. *Objets et agents: une étude des structures de représentations et communications en Intelligence Artificielle*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris 6 1988.
- (Ferber, 1990) Ferber J. *Conception et programmation par objets*. Hermes 1990.
- (Ferraris, 1992) Ferraris C. *Acquisition des connaissances et raisonnement dans un univers multi-agent: application à la prise de décision en génie civil urbain*. Thèse de l'Université Nancy 1 1992.
- (Fishwick, 1989a) Fishwick P.A. Process Abstraction in Simulation Modelling, Artificial Intelligence, Simulation and Modeling: a Critical Survey, ed. L.E.Widman, K.A.Loparo, N.R.Nielsen, *Artificial Intelligence, Simulation & Modeling*, Wiley Interscience 1989.
- (Fishwick, 1989b) Fishwick P.A. A study of terminology and issues in qualitative simulation. *Simulation*, January 1989.
- (Fontana, 1989) Fontana A. *Quelle halieutique pour l'ORSTOM? Etats et enjeux d'une recherche pour le développement en coopération*, multigr. 44p 1989.
- (Forbus, 1983) Forbus K. Qualitative reasoning about space and motion. D.Gentner and A.Stavens (eds), *Mental models*, Erlbaum, Hillsdale, NJ 1983.
- (Forbus, 1984) Forbus K. Qualitative process theory. *Artificial Intelligence*, 24 1984.
- (Fréon, 1988) Fréon P. *Réponses et adaptations des stocks de cupléides d'Afrique de l'Ouest à la variabilité du milieu et de l'exploitation, analyse et réflexion à partir de l'exemple du Sénégal*. Collection Etudes et thèses, Editions de l'ORSTOM 1988.
- (Fréon, 1989) Fréon P. Introduction d'une variable climatique dans les modèles globaux de production. P. Cury et P. Roy (eds.) *Pêcheries Ouest-africaines, Variabilité, instabilité et changement*, ORSTOM Editions 1989.
- (Friedberg, 1992) Friedberg C. 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 éditions 1992.
- (Frontier, 1991a) Frontier S. *Ecosystèmes*. Masson 1991.

- (Frontier, 1991b)** Frontier S. Les outils mathématiques nouveaux du transfert d'échelle, géométrie fractales, relateurs arithmétiques, théorie des catastrophes, dynamique chaotique, analyse non standard. C.Mullon (éd.) *SEMINFOR 4 Le transfert d'échelle*, ORSTOM Editions 1991.
- (Gaill, 1987)** Gaill F. Organisme. Sous la direction d'I.Stengers. *D'une science à l'autre, des concepts nomades*. Editions du Seuil 1987.
- (Galang et Bhuiyan, 1993)** Galang A.L, Bhuiyan S.I. Optimizing economic returns frm rainfed ricelands with limited water in farm reservoirs, *Systems simulation at IRRRI* 1993.
- (Gallais, 1984)** Gallais J. *Hommes du Sahel*, Flammarion collection géographes, 1984.
- (Gascuel, 1993)** Gascuel O. 1993. Forum Halieumetrics. Rennes (à paraître)
- (Gates, 1989)** Gates J.M. Les modèles bioéconomiques. Sous la direction de J.P. Troadec. *L'homme et les ressources halieutiques. Essai sur l'usage d'une ressource renouvelable*. Editions IFREMER 1989.
- (Georgopoulos et al., 1986)** Georgopoulos A.P., Schwartz A.B., Kettner R.E. Neuronal population coding of movement direction, *Science* n°233 1986.
- (Gervet, 1987)** Gervet J. Comportement. Sous la direction d'I.Stengers. *D'une science à l'autre, des concepts nomades*. Editions du Seuil 1987.
- (Gilbert, 1993)** Gilbert N.. Emergence in social simulation. Actes du congrès Simulating Societies 2, Sienne 1993 (à paraître).
- (Gilly, 1989)** Gilly B. Les modèles bio-économiques en halieutique: démarches et limites. *Cah. Sci. Hum* 25 (1-2) 1989.
- (Godard, 1992)** Godard O. La relation interdisciplinaire: problèmes et stratégies. M. Jollivet (Ed.), *Sciences de la nature, Sciences de la société. Les passeurs de frontières*, CNRS éditions 1992.
- (Godard et Legay, 1992)** Godard O. et Legay J.M. Modélisation et simulation: une approche de la prédictivité. M. Jollivet (Ed.), *Sciences de la nature, Sciences de la société. Les passeurs de frontières*, CNRS éditions 1992.
- (Goldsman, 1992)** Goldsman D. Simulation output analysis, *Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference*, éd. J.J.Swain, D.Goldsman, R.C.Crain and J.R. Wilson 1992.
- (Gordon, 1954)** Gordon. The economic theory of common property resources: the fishery. *J. Pol. Econ.* 62 (2) 1954.

- (Grafton, 1992) Grafton R.Q. Rent Capture in an Individual Transferable Quota Fishery. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 49 1992.
- (Graham, 1935) Graham M. Modern theory of exploiting a fishery and application to North Sea trawling. *J. Cons. perm int Explor Mer*, 10 (2) 1935.
- (Granger, 1990) Granger G.G. Objet. *Encyclopédia Universalis* 1990.
- (Granger, 1992) Granger G.G. *La vérification*. Editions Odile Jacob 1992.
- (Granger, 1990) Granger K.J. Process modelling and geographic information systems: breathing life into spatial analysis, *Mathematics and Computers in Simulation*, North-Holland 1990.
- (Grant, 1986) Grant W.E. *Systems analysis and Simulation in Wildlife and Fisheries Sciences*, Wiley Intersciences 1986.
- (Green et al., 1990) Green D.G., Reichelt R.E., van der Laan J., MacDonald B.W. A generic approach to landscape modelling, *Mathematics and Computers in Simulation*, North-Holland 1990.
- (Gremy, 1990) Gremy J.P. Simulation. *Encyclopédia Universalis* 1990.
- (Hampaté Bâ, 1991) Hampaté Bâ A. *Amkullel, l'enfant peul*, Editions Actes Sud 1991.
- (Hart, 1988) Hart A. *Acquisition du savoir pour les systèmes experts*. Masson 1988.
- (Hassel et al., 1991) Hassel M.P., Comins H.N., May. R.M. Spatial structure and chaos in insect population dynamics. *Nature*, Vol. 353 1991.
- (Haton et al., 1991) Haton J.P., Bouzid N., Charpillat F., Haton M.-C., Laasri B., Laasri H., Marquis P., Mondot T., Napoli A. *Le raisonnement en Intelligence Artificielle*. InterEditions 1991.
- (Hewitt, 1977) Hewitt C. Viewing control structures as patterns of message passing. *Artificial Intelligence* 8 1977.
- (Hilborn et Walters, 1987) Hilborn R. and Walters C.J. A general model for simulation of stock and fleet dynamics in spatially heterogenous fisheries, *Can.J.Fish.Aquat.Sci.*, Vol. 44 1987.
- (Hilborn, 1985) Hilborn R. Fleet dynamics and Individual variation: why some people catch more fish than others, *Can.J.Fish.Aquat.Sci.*, Vol. 42 1985.
- (Hilden et Kaitala, 1991) Hilden M. et Kaitala V. Comprehensive sensitivity analysis of a bioeconomic stock-recruitment model. *Ecological modelling* 54 1991.

- (Huang et al., 1989) Huang Y.-M., Rozenblit J. Hu J. The role of knowledge management in hierarchical model development. E. MacNair, Musselman K., Heidelberger P. (eds). *Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference* 1989.
- (Hugon et al., 1993) Hugon P. L'"Homo africanus" est-il irrationnel? (entretien avec les Cahiers). *Cahier des Sciences Humaines*, Hors Série, Trente ans 1993.
- (Huston et al., 1988) Huston M., DeAngelis D., Post W. New Computer Models Unify Ecological Theory, *Bioscience* Vol. 38 N°10 1988.
- (Hutchins et Hazlehurst, 1993) Hutchins E. et Hazlehurst B. How to invent a lexicon: the development of shared symbols in interaction. Actes du colloque *Simulating Societies 2* 1993. (à paraître).
- (Jacob, 1970) Jacob F. *La logique du vivant*. Ed. Gallimard 1970.
- (Jensen, 1991) Jensen A.L. Simulation of fish population responses to exploitation. *Ecological modelling* 55 1991.
- (Jollivet et Pavé, 1992) Jollivet M. et Pavé A. L'environnement: questions et perspectives pour la recherche. *Lettre du programme environnement* N°6, CNRS 1992.
- (Johnson-Laird, 1993) Johnson-Laird P.N. La théorie des modèles mentaux. M.F. Ehrlich, Tardieu H., Cavazza M. (eds), *Les modèles mentaux, approches cognitives des représentations*, Masson 1993.
- (Junk et al., 1989) Junk W.J., Bayley B.P., Sparks R.E. The flood pulse concept in river-floodplain concept. D.P. Dodge (ed) *Proceedings of the International Large River Symposium*. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 106 1989.
- (Kaminsky et al., 1989) Kaminsky J., Cosic C., Strohm G., Kepner J., Bycura J. Knowledge-based modeling and simulation components. E. MacNair, Musselman K., Heidelberger P. (eds). *Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference* 1989.
- (Kareiva, 1987) Kareiva P. Habitat fragmentation and the stability of predator-prey interactions. *Nature* Vol. 326 1987.
- (Kareiva, 1990) Kareiva P. Population dynamics in spatially complex environments: theory and data. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 330 1990.
- (Kassibo, 1991) Kassibo B. L'organisation sociale de la pêche dans le Delta Central du Niger: genèse et évolution des systèmes de production halieutique, Actes de l'atelier IER-ORSTOM, Bamako 1991.

(Kerr et Ryder, 1989) Kerr S.R. and Ryder R.A. Current approaches to multispecies analyses of marine fisheries, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 46 1989.

(Koestler, 1968) Koestler A. *Le cheval dans la locomotive* Calman-Levy 1968.

(Kope, 1992) Kope G.K. Optimal harvest rates for mixed stocks of natural and hatchery fish. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 49 1992.

(Krebs et Kacelnik, 1991) Krebs J.R. et Kacelnik A. Decision-making. J.R. Krebs et N.B. Davies (eds) *Behavioural ecology*, Third edition, Blackwell Scientific Publications 1991.

(Kulpers, 1984) Kuipers B. Commonsense reasoning about causality: deriving behaviour from structure. *Artificial Intelligence* 24 1984.

(Kulpers, 1989) Kuipers B. Qualitative reasoning with causal models in diagnosis of complex systems. ed. L.E.Widman, K.A.Loparo, N.R.Nielsen, *Artificial Intelligence, Simulation & Modeling*, Wiley Interscience 1989.

(Kuo, 1970) Kuo Z.Y. The need of coordinated efforts in development studies. Aronson, Tobach, Rosenblatt (eds). *Development and evolution of behaviour (Essays in memory of T.C Schneirla)*, San Francisco, Freeman 1970.

(Laasri et Maître, 1989) Laasri H. et Maître B. *Coopération dans un univers multi-agents basée sur le modèle du blackboard: études et réalisations*, Thèse de l'Université Nancy 1 1989.

(Lacour, 1986) Lacour C. L'arbre et la forêt; la science régionale vue par un économiste. F.Auriac et R.Brunet (eds) *Espaces, jeux et enjeux*. Fayard 1986.

(Ladrière, 1990) Ladrière J. Représentation et connaissance. *Encyclopédia Universalis* 1990.

(Laë, 1992) Laë R. Influence de l'hydrologie sur l'évolution des pêcheries du delta central du Niger de 1966 à 1989. *Aquatic Living Resources* 1992.

(Laloë et Samba, 1989) Laloë F., Samba A. *La pêche artisanale au Sénégal: ressource et stratégie de pêche*, Editions ORSTOM, Coll. Etudes et thèses 1989.

(Laloë, 1989) Laloë F. Un modèle global avec quantité de biomasse inaccessible dépendant de la surface de pêche. Application aux données de la pêche d'albacores (*Thunnus albacores*) de l'Atlantique Est. *Aquatic Living Resources*, 2 1989.

(Laloë et Samba, 1991) Laloë F., Samba A. A simulation model of artisanal fisheries of Senegal. *ICES mar. Sci. Symp.*, 193 1991.

- (Laloë et al., 1993) Laloë F., Rey H., Durand J.L. *Questions sur la dynamique de l'exploitation halieutique*. Montpellier 1993.(à paraître).
- (Lanfersieck et Squires, 1992) Lanfersieck J. et Squires D. Planning models for individual transferable quota programs. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49 1992.
- (Lardon et al., 1990) Lardon S., Deffontaines J.P., Baudry J., Benoit M. L'espace est aussi ailleurs. Brossier J., Vissac B., Le Moigne J.L. (eds.) *Modélisation systémique et système agraire*. Editions INRA 1990.
- (Larkin, 1977) Larkin P.A. An epitaph for the concept of Maximum Sustained Yield, *Transactions of the American fisheries society*, Vol 106 n°1 1977.
- (Laurec et Le Guen, 1981) Laurec A., Le Guen J.C. *Dynamique des populations marines exploitées*. CNEXO. Rapports scientifiques et techniques 1981.
- (Laurent et Vescovi, 1992) Laurent J.P. et Vescovi M.R. *La représentation des connaissances et le raisonnement sur les systèmes physiques -physique qualitative-*. Cépaduès éditions 1992.
- (Lauzanne, 1988) Lauzanne L. Les habitudes alimentaires des poissons d'eau douce africains. C. Lévêque, M.N. Bruton, G.W. Ssentongo (eds), *Biologie et écologie des poissons d'eau douce africains*, Editions de l'ORSTOM 1988.
- (Le Fur, 1991) Le Fur J. *Projet MOPA (Modélisation de la pêche artisanale au Sénégal). Etude pluridisciplinaire du système pêche artisanale au Sénégal: l'intelligence artificielle comme nouvel outil de compréhension et d'aide à la décision pour la gestion de la pêche artisanale*. Rapport multigr. 26 p 1991.
- (Le Fur, 1993a) Le Fur J. Praticabilité de l'approche système pour la modélisation d'un système d'exploitation halieutique. *Actes de Forum Halieumetrics*, Rennes 1993.
- (Legay, 1986) Legay J.M. Méthodes et modèles dans l'étude des systèmes complexes. *Les Cahiers de la Recherche Développement* n°11 1986.
- (Legay, 1990) Legay J.M. De la complexité des objets à la méthode des modèles. M.Brissaud, M.Forsé, A.Zighed (eds). *La modélisation confluent des sciences*, Editions du CNRS 1990.
- (Le Moigne, 1984) Le Moigne J.L. *La théorie du Système Général, théorie de la modélisation*, PUF, Paris 1984.
- (Le Moigne, 1989) Le Moigne J.L. *La modélisation des systèmes complexes*, Afcet-Systèmes, Dunod 1989.

- (**Le Moigne, 1993**) Le Moigne J.L. L'apport de H.Simon aux sciences de la décision. *Sciences Humaines*, Hors Série N°2 L'énigme de la décision 1993.
- (**Lenat, 1988**) Lenat D.B. BEINGs: knowledge as interacting experts. A.Bond et L. Gasser (eds) *Readings in Distributed Artificial Intelligence*. Morgan et Kaufman 1988.
- (**Lévêque, 1991**) Lévêque C. Problématiques des écosystèmes aquatiques. C.Mullon (ed.) *SEMIFOR 4 Le transfert d'échelle*, ORSTOM Editions 1991.
- (**Lieberman, 1981**) Lieberman H. *A preview of Act-1*. A.I. memo n°625, M.I.T 1981.
- (**Lleonart et Salat, 1989**) Lleonart J. et Salat J. A dynamic approach to catch-effort data analysis using a new concept: the inertia of stock. *Can. J. Fish. Mar. Sci.* Vol 46 1989.
- (**Loehle, 1987**) Loehle C. Applying artificial intelligence techniques to ecological modeling. *Ecological Modelling*, 38 1987.
- (**MacKey et Bayes, 1990**) Mackey B.G., Bayes T. A modelling framework for the spatial extension of ecological relations in vegetations studies, *Mathematics and Computers in Simulation*, North-Holland 1990.
- (**Malvestuto et Meredith, 1989**) Malvestuto S.P. et Meredith E.K. Assesment of the Niger river fishery in Niger (1983-85) with implications for managment. D.P. Dodge (ed) Proceedings of the International Large River Symposium. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 106 1989.
- (**Masini et al., 1989**) Masini G., Napoli A., Colnet D., Leonard D., Tombre K. *Les langages à objets*, InterEditions 989.
- (**May et al., 1979**) May R.M., Beddington J.R., Clark C.W., Holt S.J., Laws R.M. Managment of multispecies fisheries, *Science* , Volume 205, N°4403 1979.
- (**May et Southwood, 1990**) May R.M. et Southwood T.R.E. Introduction. B. Shorrocks, I.R. Swingland (eds) *Living in a patchy environment*. Oxford Science Publications 1990.
- (**Mérona et al., 1988**) Mérona (de) B. , Hecht T., Moreau J. Croissance des poissons d'eau douce africains.C. Lévêque, M.N. Bruton, G.W. Ssentongo (eds), *Biologie et écologie des poissons d'eau douce africains*, Editions de l'ORSTOM 1988.
- (**Mesnil, 1989**) Mesnil B. De la production d'une cohorte vers celle d'une pêcherie. Sous la direction de J.P. Troadec. *L'homme et les ressources halieutiques. Essai sur l'usage d'une ressource renouvelable*. Editions IFREMER 1989.

- (Meyer, 1979) Meyer J.A. Techniques d'étude des stratégies adaptatives: approches mathématiques et informatiques, Présentés par R.Barbault, P.Blandin, J.A. Meyer, *Recherches d'écologie théorique, les stratégies adaptatives*, Maloine 1979.
- (Meyer et al., 1979) Meyer J.A., des Clers S. et Chahuneau F. La simulation numérique des systèmes complexes: objets et techniques, Actes du Colloque *Elaboration et Justification des modèles*, Présentés par P.Delattre et M.Thellier, Collection Recherches Interdisciplinaires, Maloine 1979.
- (Meyer, 1983) Meyer J.A. Analyse des systèmes et simulations numériques appliquées aux problèmes de l'environnement, *Courrier du CNRS* n°52, Images de l'environnement 1983.
- (Minsky, 1988) Minsky M. *La société de l'esprit*. Inter Editions 1988.
- (Mithen, 1992) Mithen S. Simulating Prehistoric Hunter-Gatherer Societies, Proceedings of Simulating Societies Symposium 1992., ed. N. Gilbert (à paraître)
- (Monnypenny, 1992) Monnypenny R. Modelling of dynamic management for decision support, *Mathematics and Computers in Simulation*, North-Holland 1992.
- (Morand, 1988) Morand P. *Méthodologie de traitement, Enquête statistique auprès des pêcheurs premiers résultats*, INRZFH et ORSTOM (eds) 1988.
- (Morand et al., 1993) Morand P., Bousquet F., Cambier C. Un modèle d'écologie des pêches. *Forum halieumétrics*, Rennes 1993(à paraître).
- (Morin, 1977) Morin E. *La Méthode, la Nature de la Nature*, Ed. du Seuil (coll.Point), Paris 1977.
- (Moscovici et Doise, 1992) Moscovici S. et Doise W. *Dissensions consensus, une théorie générale des décisions collectives*, PUF 1992.
- (Mullon, 1989) Mullon C. Rhétorique de la modélisation. *SEMINFOR 2, La modélisation: aspects pratiques et méthodologie*, Editions de l'ORSTOM 1989.
- (Mullon, 1991) Mullon C. *Séminfor 4, Le transfert d'échelle*. Editions de l'ORSTOM 1991.
- (Mullon, 1993) Mullon C. *Compte rendu du comité directeur du laboratoire d'informatique appliquée*. Multigr. ORSTOM Bondy 1993.
- (Murray et Sheppard, 1988) Murray K.J. et Sheppard S.V. Knowledge-based simulation model specification. *Simulation* March 1988.

(Nelson, 1992) Nelson B.L. Designing efficient simulation experiments, *Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference*, ed. J.J.Swain, D.Goldsman, R.C.Crain and J.R. Wilson 1992.

(Norton et al., 1990) Norton T.W., Williams J.E Wildlife management in Australia: new developments and opportunities using computer-based generic models, *Mathematics and Computers in Simulation*, North-Holland 1990.

(O'Neill, 1989) O'Neill R.V. Perspectives in hierarchy and scales. J.Roughgarden, R.May, S.Levin (eds) *Perspectives in ecological theory*, Princeton University Press 1989.

(Ören, 1986) Ören T. Artificial intelligence and simulation. E. Kerckhoffs, G. Vansteenkiste, B.Zeigler (eds) *AI applied to Simulation, Proceedings of the European Conference at the UNiversity of Ghent*, Simulation Series, Vol. 18 n° 1 1986.

(Ören, 1987) Ören T. Artificial intelligence and simulation: from cognitive simulation toward cognizant simulation. *Simulation* April 1987.

(Ostrom, 1990) Ostrom E. *Governing the commons, the evolution of Institutions for collective action*. Cambridge Univeristy Press 1990.

(Parma et Deriso, 1990) Parma A.M. and Deriso R.B. Experimental harvesting of cyclic stocks in the face of alternative recruitment hypotheses, *Can.J.Fish.Aquat.Sci.*, Vol. 47 1990.

(Pavé et Rechenman, 1986) Pavé A. et Rechenmann F. Computer aided modelling in biology: an artificial intelligence approach. E. Kerckhoffs, G. Vansteenkiste, B.Zeigler (eds) *AI applied to Simulation, Proceedings of the European Conference at the UNiversity of Ghent*, Simulation Series, Vol. 18 n° 1 1986.

(Pavé, 1988) Pavé A. *Les Cahiers d'Edora*, Rapport de recherche INRIA N°866 1988.

(Pavé et al., 1989) Pavé A., Gautier N., Bernstein C. Object centered representation and problems related to living systems in nature: systematics, biogeography and population dynamics. A.Pavé, G.Vansteenkiste (eds.) *Artificial intelligence in numerical and symbolic simulation* 1989.

(Pavé et Rieu, 1993) Pavé A. et Rieu M. Ecosystèmes intertropicaux, fonctionnement et usages: questions, perspectives et conclusions. *Lettre du programme environnement* N°10, CNRS 1993.

(Pella et Tomlinson, 1969) Pella J.J, Tomlinson P.K. A generalized stock production model. *Bull. IATTC*. 13 1969.

(PIREN-Seine, 1992) PIREN-Seine Rapport de synthèse 1989-1992, *Vol I: Le fonctionnement de l'écosystème: analyse des processus et modélisation*, CNRS 1992.

- (Pimm et Gilpin, 1989) Pimm S.E., Gilpin M.E. Theoretical Issues in Conservation Biology, *Perspectives in Ecological Theory*, Ed. J.Roughgarden, R.M. May, S.A.Levin, Princeton University Press 1989.
- (Pitrat, 1990) Pitrat J. *Métaconnaissances, futur de l'intelligence artificielle*. Hermès 1990.
- (Ploman, 1986) Ploman E. Introduction. Actes du colloque de Montpellier, IDATE-UNU, *Sciences et pratiques de la complexité*, La Documentation Française 1986.
- (Possingham et al., 1992) Possingham H.P., Davies I., Noble I.R., Norton T.W. A metapopulation simulation model for assessing the likelihood of plant and animal extinctions, *Mathematics and Computers in Simulation*, North-Holland 1992.
- (Puccia et Levins, 1985) Puccia C.J. et Levins R. *Qualitative modeling of complex systems: an introduction to loop analysis and time averaging*. Harvard University Press 1985.
- (Quéau, 1986) Quéau P. *Eloge de la simulation, de la vie des langages à la synthèse des images*. Champ Vallon INA 1986.
- (Quéau, 1993) Quéau P. *Le virtuel, vertu et vertiges*. Champ Vallon INA 1993.
- (Quensière, 1988) Quensière J. *Enquête statistique auprès des pêcheurs premiers résultats*, INRZFH et ORSTOM (eds) 1988.
- (Quensière, 1990) Quensière J. Synopsis bio-écologique des poissons du Niger. Actes de l'atelier IER-ORSTOM, Bamako 1990.
- (Quensière, 1991) Quensière J. L'étude de la pêche dans le Delta Central du Niger: une approche pluri-disciplinaire, Symp. Int. ORSTOM-IFREMER, J.R.Durand, J.Lemoalle et J.Weber (Eds.) *La recherche face à la pêche artisanale*, ORSTOM Editions, 1991.
- (Quensière et al., 1993) Quensière J., Benech V., Dansoko D.F. Evolution de la composition des peuplements de poissons du delta central. à paraître dans le livre de synthèse IER-ORSTOM 1993.
- (Rajagopalan, 1986) Rajagopalan R. Qualitative modeling and simulation: a survey. E. Kerckhoffs, G. Vansteenkiste, B.Zeigler (eds) *AI applied to Simulation, Proceedings of the European Conference at the UNiversity of Ghent*, Simulation Series, Vol. 18 n° 1 1986.
- (Rapport et al., 1985) Rapport D.J., Regier H.A., Hutchinson T.C. Ecosystem behaviour under stress. *The American Naturalist*, Vol. 125, n°5 1985.
- (Reddy, 1987) Reddy R. Epistemology of knowledge based simulation. *Simulation* April 1987.

(Rechenamn et Uvletta, 1989) Rechenmann F. et Uvletta P. Shirka: an object-centered knowledge based management system. A.Pavé, G.Vansteenkiste (eds.) *Artificial intelligence in numerical and symbolic simulation* 1989.

(Régler et Loftus, 1972) Régier H.A., Loftus K.H. Effects of fisheries exploitation on salmonid communities in oligotrophic lakes. *J. Fish. Res. Bd. Canada* 29 1972.

(Réveret, 1991) Réveret J.P. *La pratique des pêches, comment gérer une ressource renouvelable*. Collection "Environnement" L'Harmattan 1991.

(Rey, 1992) Rey H. Systèmes de gestion. *Actes du séminaire ressources et pêche cotière en méditerranée septentrionale*, Ancone 1992.

(Rice et al., 1993) Rice J.A., Miller T.J., Rose K., Crowder L.B., Marschall E.A., Trebitz A.S., DeAngelis D.L. Growth-rate variation and larval survival: inferences from an individual-based size-dependent predation model. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 50 1993.

(Ricker, 1945) Ricker W.E. A method of estimating minimum size mimits for obtaining maximum yield. *Copeia* (2) 1945

(Rothenberg, 1989) Rothenberg J. The Nature of Modeling. ed. L.E.Widman, K.A.Loparo, N.R.Nielsen, *Artificial Intelligence, Simulation & Modeling*, Wiley Interscience 1989.

(Rozenblite et Jankowski, 1991) Rozenblit J.W. et Jankowski P.L. An integrated framework for knowledge-based modeling and simulation of natural systems. *Simulation* September 1991.

(Sabatier et al., 1991) Sabatier J.L., Ruf T., Le Goulven P. Dynamique des systèmes agraires irrigués anciens: représentations synchroniques et diachroniques. L'exemple d'Urcuqui en Equateur. *Les Cahiers de la Recherche Développement* n°29 1991.

(Sakthivel et Agarwal, 1992) Sakthivel S. et Agarwal R. Knowledge-based model construction for simulating information systems. *Simulation* October 1992.

(Sargent, 1992) Sargent R.G. Validation and verification of simulation models, ed. J.J.Swain, D.Goldsman, R.C.Crain and J.R. Wilson *Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference*, 1992.

(Scaffer et Samson, 1985) Schaffer M.L. et Samson F.B. Population size and extinction: a note on determining critical population sizes. *American Naturalist*, Vol. 125 1985.

(Schoener, 1986) Schoener T.W. Mechanistic approaches to community ecology: a new reductionism? *American Zoologist* 26 1986.

- (Searle, 1969) Searle J.R. *Speech acts*. Cambridge University Press 1969.
- (Selye, 1973) Selye H. The evolution of stress concept. *Am. Sci.* 61 1973.
- (Sfez, 1993) Sfez L. Critique d'une idéologie. *Sciences Humaines*, Hors Série N°2 L'énigme de la décision 1993.
- (Shannon, 1992) Shannon R. Introduction to simulation, ed. J.J.Swain, D.Goldsman, R.C.Crain and J.R. Wilson *Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference*, 1992.
- (Simon, 1991) Simon H.A. *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel*, Dunod 1991.
- (Smith, 1980) Smith R.G. The contract net protocol: high level communication and control in distributed problem solver. *IEEE Transactions on Computers* 1980.
- (Souplet, 1993) Souplet A. Le modèle bioéconomique mer du Nord du CSTP. *Actes de Forum Halieumetrics*, Rennes 1993.
- (Sperber, 1992) Sperber D. Les sciences cognitives, les sciences sociales et le matérialisme. D.Andler (ed.) *Introduction aux sciences cognitives*, Gallimard 1992.
- (Stengers, 1987) Stengers I. *D'une science à l'autre, des concepts nomades*. Editions du Seuil 1987.
- (Tabary, 1991) Tabary J.C. Cognition, systémique et connaissance. E.Andreewsky et coll. *Systémique et cognition*. Dunod 1991.
- (Treuil, 1993) Treuil J.P. Emergence of representation of territory and kinship structures: a multi-agent approach. Actes du colloque *Simulating Societies 2* 1993.(à paraître).
- (Tverski et Kahneman, 1981) Tverski A. et Kahneman D. The framing of decisions and the psychology of choice. *Science*, Vol. 211, January 1981.
- (Uvietta, 1989) Uvietta P. Modélisation et simulation du système climat-vigne-viticulteur, *Revue Internationale de systémique* 1989.
- (Verdeaux, 1992) Verdeaux F. Sociétés de pêcheurs et environnemennt. Savoirs et appropriation halieutique du milieu. Département SUD, *Institutions et pratiques de développement -Itinéraires-*. Editions ORSTOM 1992.
- (Villa, 1992) Villa F. New computers architectures as tools for ecological thoughts. *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 7, N°6 1992.

(Walters et Collie, 1989) Walters C.J. et Collie J.S. Is research on environmental factors useful to fisheries management? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1989.

(Weber et al, 1990) Weber J., Betsch J.M, Cury P. *A l'interface hommes-nature: les ressources renouvelables*, Colloque recherche et Environnement, CNRS Programme Environnement 1990.

(Weber, 1990) Weber J. *Groupe de travail l'halieutique à l'ORSTOM rapport provisoire*, multigr. 13 p. 1990.

(Weber, 1993) Weber J. Unité de recherche Gestion des ressources naturelles, environnement (GREEN). Multigr. CIRAD

(Weber, 1993) Weber Common property conference. *Nature, Sciences et sociétés*, Vol. 1, n°1 1993.

(Welcomme et Hagborg, 1977) Welcomme R.L. and Hagborg D. Towards a model of floodplains fish population and its fishery, *Env. Biol. Fish.*, Vol. 2, N°1 1977.

(Welcomme, 1979) Welcomme R.L. *Fisheries ecology of floodplain rivers*. Longman, London 1979.

(Welcomme, 1989) Welcomme R.L. Review of the present state of knowledge of fish stocks and fisheries of African rivers. D.P. Dodge (ed) Proceedings of the International Large River Symposium. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 106 1989.

(Widman et Loparo, 1989) Widman L.E. et Loparo K.A. Artificial Intelligence, Simulation and Modeling: a Critical Survey, ed. L.E.Widman, K.A.Loparo, N.R.Nielsen, *Artificial Intelligence, Simulation & Modeling*, Wiley Interscience 1989.

(Wilcox et Murphy, 1985) Wilcox B.A. et Murphy D.D. Conservation strategy: the effects of fragmentation on extinction. *American Naturalist*, Vol. 125 1985.

(Wilcox et al., 1987) Yonezawa A., Shibayama E., Takada T., Honda Y. Modelling and programming in an object-oriented concurrent language ABCL/1. A. Yonezawa et M.Tokoro (eds), *Object-oriented concurrent programming*, M.I.T. Press 1987.

(Yoshimoto et Clarke, 1993) Yoshimoto S.S. and Clarke R.P. Comparing dynamic versions of the Schaefer and Fox Production models and their application to lobster fisheries, *Can.J.Fish.Aquat.Sci.*, Vol. 50 1993.

(Zeigler, 1976) Zeigler B.P. *Theory of Modelling and Simulation*, Wiley, New York 1976.

(Zeigler, 1984) Zeigler B.P. *Multifaceted Modelling and Discrete Event Simulation*. Academic, New York 1984.

(Zeigler, 1987) Zeigler B.P. Knowledge representation from newton to Minsky and beyond. *Applied Artificial Intelligence*, 1 1987.

(Zeigler, 1990) Zeigler B.P. *Object-oriented simulation with hierarchical, modular models, intelligent agents and endomorphic systems*. Academic Press 1990.

INDEX DES FIGURES

1- Introduction.

Figure 1.1: Le delta central du Niger	3
---------------------------------------	-------	---

2- Modélisation et simulation.

Figure 2.1: Modélisation et simulation (d'après Zeigler, 1976)	.....	9
Figure 2.2: Evolution des captures et des captures par unité d'effort en fonction de l'effort (d'après Laurec et Le Guen, 1981)	.....	16
Figure 2.3: Représentation schématique de la dissipation du surplus	.....	18
Figure 2.4: Un système à base de connaissance (d'après Reddy, 1987)	.....	23

3- Représenter et simuler les interactions pour une intégration pluridisciplinaire.

4- Les systèmes multi-agents.

Figure 4.1: Schéma d'un agent et des types de connaissances qu'il comporte	.....	42
Figure 4.2: Communication par transmission de messages	.....	43
Figure 4.3: Communication par partage d'informations	.....	44

5- Un générateur de simulations.

Figure 5.1: Schéma du monde observé	.....	48
Figure 5.2: Le concept d'objet (d'après Masini et al. 1989)	.....	50
Figure 5.3: Schéma d'un objet	.....	52
Figure 5.4: Classe et instances	.....	52
Figure 5.5: Activation d'un objet	.....	53
Figure 5.6: Mécanisme d'héritage	.....	53
Figure 5.7: Architecture du générateur de simulations environnementales	.....	54

6- Le simulateur SIMDELTA.

Figure 6.1: Interface de SIM-DELTA (Copie d'écran)	59
Figure 6.2: Interface de saisie et modification de l'objet Hydro	61
Figure 6.3: Interface de création d'un objet Biotope	63
Figure 6.4: Interface de saisie d'une espèce de poisson	69
Figure 6.5: Espace réel et perception d'un ensemble de technotopes	74
Figure 6.6: Interface de création statistique d'une population de pêcheurs	78
Figure 6.7: Schéma du réseau de communication pour simuler la dynamique écologique.....	80

7- Des simulations sur la pêche.

Figure 7.1: Cycle annuel de l'offre de nourriture pour les objets de type fleuve et de type plaine	88
Figure 7.2: Existence d'un cycle stable pour les trois espèces.	92
Figure 7.3: Quelques croissances individuelles issues des simulations	93
Figure 7.4: Structures de poids des trois espèces lors de la 28ème semaine de l'année	93
Figure 7.5: Cycles annuels de la biomasse pêchable.....	94
Figure 7.6: Cycle de biomasse et de production somatique pour les deux milieux	94
Figure 7.7: Captures et captures par effort pour 5 expériences d'intensification d'effort	99
Figure 7.8: Évolution de quelques grandeurs écologiques pour 5 expériences d'intensification d'effort	100
Figure 7.9: Évolution des compositions spécifiques des captures pour 5 expériences d'intensification d'effort	101
Figure 7.10: Évolution de la taille des captures en fonction de l'effort pour 5 expériences d'intensification d'effort	102
Figure 7.11: Évolution des captures en fonction de diverses hypothèses halieutiques ou biologiques	103
Figure 7.12: Évolution des captures et captures par effort pour 5 expériences d'intensification d'effort	104
Figure 7.13: Évolution de quelques grandeurs écologiques	105
Figure 7.14: Cycle annuel de la biomasse total pour différents degrés d'exploitation de la ressource	106

Figure 7.15: Modèle conceptuel du "fishing-up process". (d'après Malvestuto et Meredith, 1989)	108
Figure 7.16: Représentation de quelques événements et périodes	114
Figure 7.17: Évolution des captures en fonction des conditions environnementales de l'année en cours	115
Figure 7.18: Évolution des captures en fonction des conditions environnementales de l'année en cours	116
Figure 7.19: Évolution des captures sur le plateau en fonction des conditions environnementales de l'année précédente	119
Figure 7.20: Évolution des captures en fonction des conditions environnementales de l'année précédente	120
Figure 7.21: Courbes des captures annuelles et des pertes en eau à la crue dans le delta central (d'après Laë, 1992)	123
Figure 7.22: Schéma de fragmentation de l'espace	125
Figure 7.23: Intensification d'effort sur un espace fragmenté	127
Figure 7.24: Intensification d'effort sur un milieu fragmenté	128
Figure 7.25: Efficacité des quatre engins	134
Figure 7.26: Évolution des captures en fonction des processus de décision	138
Figure 7.27: Évolution des captures par pêcheurs en fonction des processus de prise de décision	138
Figure 7.28: Évolution de la composition spécifique des captures	139
Figure 7.29: Évolution de la composition spécifique des captures (Accès socialement réglé)	139
Figure 7.30: Évolution de la composition spécifique des captures	140
Figure 7.31: Nombre de sorties annuelles par engins pour les 3 simulations en accès libre	141
Figure 7.32: Nombre de sorties annuelles par milieux pour les simulations en accès libre	141
Figure 7.33: Nombre de sorties par engins pour les simulations à accès socialement réglé	142
Figure 7.34: Nombre de sorties par milieux pour les simulations à accès socialement réglé	142
Figure 7.35: Nombre de sorties par engins pour des milieux à places	143
Figure 7.36: Nombre de sorties par milieux pour des milieux à places	143
Figure 7.37: Évolution des finances des pêcheurs pour les simulations en accès libre.....	145

Figure 7.38: Évolution des finances des pêcheurs pour des simulations à accès socialement réglé	.....	145
Figure 7.39: Évolution des finances des pêcheurs pour des milieux à places.	.....	146
Figure 7.40: Moyennes annuelles des finances totales	.....	146
Figure 7.41: Évolution des captures et des abondances relatives dans les captures.....		154

8- Discussion sur la méthode de modélisation par des systèmes multi-agents et son apport a l'étude de l'interaction homme-ressource.

Figure 8.1: Analogie entre le monde perçu et la représentation informatique	.....	163
Figure 8.2: Expression de plusieurs points de vue par réification	.....	164
Figure. 8.3: Une structure de contrôle pour conduire la simulation	.....	169
Figure 8.4: Une méthode d'organisation des sources de connaissance	.....	170
Figure 8.5: Simulation et transfert d'échelle	.....	174
Figure 8.6: Schéma du processus de décision	.....	187