

THÈSE

présentée à l'

UNIVERSITÉ PIERRE & MARIE CURIE - PARIS VI

pour obtenir le titre de

DOCTEUR

spécialité

SCIENCES DE LA VIE ET SANTÉ

par

CHRISTOPHE BÉNÉ

DYNAMIQUE ET ADAPTATION

D'UN SYSTÈME-PÊCHE

FACE AUX PERTURBATIONS DE SON ENVIRONNEMENT

ANALYSES ET MODÉLISATIONS DYNAMIQUES

DU COUPLAGE

ÉCOLOGIE - ÉCONOMIE

Le cas de la pêche crevettière guyanaise

Soutenue le : 26 mai 1997 devant le jury composé de :

Jacques WEBER

Président

Claude LOBRY

Directeur de Thèse

Philippe CURY

Rapporteurs

Olivier GODARD

Philippe MOGUEDET

Examineurs

Paul NIVAL

Alain PAVÉ

**DYNAMIQUE ET ADAPTATION
D'UN SYSTÈME-PÊCHE
FACE AUX PERTURBATIONS DE SON ENVIRONNEMENT**

**ANALYSES ET MODÉLISATIONS DYNAMIQUES
DU COUPLAGE
ÉCOLOGIE - ÉCONOMIE**

Le cas de la pêche crevettière guyanaise

Christophe Béné 1997

À mon Père

*Les rares savants qui ont choisi d'être nomades sont essentiels
au bien-être intellectuel des disciplines établies.*

B. Mandelbrot

*The motto of the Royal Society is 'nullius in verba' because, in
science, words alone are empty.*

R.H. Peters.

Abstract: The general topic of this Thesis is the study of fishery systems. More precisely, our objective is to analyze the dynamics of a fishery and to identify the way its actors (the fishermen, the companies) react to the perturbations imposed by their biological, economic and social environments. For this purpose, the fishery is considered as a coupling between the resource's and the market's dynamics. In the present case, we rely on the French Guyana shrimp fishery to carry out these investigations. This fishery is a very simple system in which only one species (*Penaeus subtilis*) is exploited by one type of boat (trawlers) and where the total production is exported toward one unique market (the French market). This simple context allows the adoption of a global and interdisciplinary approach in agreement with our objective. In this study we develop several dynamic models including ecological and economic concepts. The first one is a model which portrays the interaction between the resource and the fleet. It is used in order to identify the origin of the seasonal oscillations which characterise both the resource abundance and the spatial distribution of the fleet's fishing effort. This question is then reconsidered through a multiple time-series analysis including two space-time scales and a non-linear algorithm. Then a contract theory analysis is conducted to examine the role played by the remuneration system in controlling the crew's labour and the skippers' fishing strategy. Econometric tests based on the co-integration theory are then used to estimate the world market's impact on the fishery and especially to analyze the dynamic links which are thought to exist between the French Guyana shrimp price and the cultured shrimp's prices. A Viability Analysis is then carried out to show how the fishery's economic viability can be maintained by the regulation of the storage volumes, even when the exploitation costs exceed the commercial value of the landings for a finite part of the season. A last model is built to analyze the companies' investment dynamics. This model suggests that the Government's subsidies have distorted the normal investment dynamics and have led to the overcapacity of the fishery. Some basic management suggestions are added at the end of each of these analyses.

Résumé : Le cadre général de cette thèse est l'étude des systèmes halieutiques. Notre objectif principal est d'analyser la dynamique d'une pêcherie et de chercher à identifier comment ses acteurs (pêcheurs, armateurs) s'adaptent aux différentes perturbations biologiques, économiques et sociales imposées par leur environnement. Pour cela, la pêcherie est considérée comme un couplage entre la dynamique de la ressource exploitée et celle du marché sur lequel la production est exportée. Nous nous appuyons pour mener cette analyse sur l'exemple de la pêcherie crevette guyanaise. Ses caractéristiques halieutiques très simples (pêcherie mono-espèce, mono-engin, exportant la totalité de sa production vers un seul marché) en font un cas d'étude particulièrement adapté à l'approche globale et interdisciplinaire avec laquelle nous souhaitons aborder le problème. Au cours de cette étude, plusieurs modèles dynamiques sont développés à l'interface entre l'écologie et l'économie. Le premier est un modèle décrivant l'interaction entre la ressource et la flottille, proposé dans le but de déterminer la nature des oscillations saisonnières qui animent à la fois la ressource et la flottille. Cette question est ensuite reconsidérée au travers d'une analyse de séries temporelles menée selon deux échelles de temps et d'espace et avec une approche non-linéaire. Parallèlement, une étude tirée de la théorie des contrats révèle comment le système de rémunération est utilisé par les armements pour contrôler les stratégies de pêche des capitaines. Des tests économétriques basés sur la théorie de la co-intégration sont ensuite utilisés pour analyser l'impact des marchés mondiaux sur la pêcherie. Ils soulignent en particulier l'existence de liens dynamiques entre le prix des crevettes d'aquaculture et celui de la crevette guyanaise. Une analyse de viabilité est ensuite proposée dans le but d'analyser comment la régulation des volumes de stockage permet d'assurer la viabilité économique de la pêcherie, ceci même lorsque les coûts d'exploitation sont supérieurs à la valeur marchande des débarquements. Enfin, un dernier modèle est proposé pour décrire la dynamique d'investissement de la pêcherie. Son analyse tend à montrer que les aides allouées par le gouvernement au cours des derniers plans de développement ont faussé la dynamique normale d'investissement en stimulant artificiellement l'achat de nouveaux navires, menant ainsi la flottille à une surcapacité globale de production. Un certain nombre de commentaires et de suggestions concernant la gestion de la pêcherie accompagne chacune de ces études.

Liste des abréviations

ACE	Alternative Conditional Expectations model (p.35)
ARIMA	Auto-Regressive Integrated Moving Average model (p.33)
BT	Black Tiger : <i>Penaeus monodon</i>
CCI	Chambre de Commerce et d'Industrie
CEE	Commission Économique Européenne
CEMARE	Centre for the Economics and Management of Aquatic Resources
CEREMADE	Centre de Recherche de Mathématiques de la Décision
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CIREN	Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
CMA	Capacité Maximale d'Absorption (p.160)
CORDET	Commission de Coordination de la Recherche dans les DOM-TOM
CPUE	Capture Par Unité d'Effort (p.51)
DNSCE	Direction Nationale des Statistiques du Commerce Extérieur
DOM	Département d'Outre-Mer
ECM	Error Correcting Model (p.126)
EW	Ecuador White : <i>Penaeus vannamei</i>
FAO	Food and Agriculture Organisation
FEDER	Fonds Européens de Développement Régional
FIOM	Fond d'Intervention et d'Organisation des Marchés
GF	Crevette de Guyane française : <i>Penaeus subtilis</i>
GDR	Groupe de Recherche
IC	Instantaneous Control model (p.56)
IEDOM	Institut d'Émission des Départements d'Outre-Mer
IFP	Institut Français du Pétrole
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
INSEE	Institut National de la Statistiques et des Études Économiques
ISTPM	Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes
L-V	Lotka-Volterra model (p.6)
MAERHA	Mathématiques Appliquées à l'Évaluation des Ressources Halieutiques et Aquicoles
MES	Multiple Equations System (p.123)
MEY	Maximum Economic Yield (p.180)
MSY	Maximum Sustainable Yield (p.179)
ORSTOM	Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération
PFEG	Pacific Fisheries Environmental Group
POSEIDOM	Programme d'Options Spécifiques à l'Eloignement et à l'Insularité des DOM
RRS	Relation Recrutement-Stock (p.205)
RSR	Relation Stock-Recrutement (p.78)
SHC	Sample and Hold Control model (p.57)
SP	Surplus de Production (p.101)
SPC	Surplus de Production Cumulés (p.130)
SW	Modèle de Smith-Wilen (p.152)
TAC	Total Allowed Catch : quota
U.E.	Union Européenne
VAR	Vector Auto-Regressive (p.125)
WECAFC	Western Central Atlantic Fishery Commission
WMO	World Meteorological Organisation
ZEE	Zone Économique Exclusive

REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à exprimer ma plus profonde gratitude à l'égard du Pr. Claude Lobry du CIMPA et du Dr. Philippe Moguedet de l'IFREMER pour avoir accepté de m'accompagner dans cette entreprise. Ils ont, chacun à leur manière, su me témoigner une confiance continuelle tout au long de mes travaux. Par leurs conseils, lors des différentes étapes de recherche et de rédaction, ils ont contribué pour une grande part dans ce travail. Qu'ils sachent combien je leur en suis reconnaissant.

Je tiens également à exprimer mes plus sincères remerciements aux membres du jury : Jacques Weber, Directeur de l'U.R. GREEN du CIRAD, pour m'avoir suivi et encouragé depuis mes premiers pas dans le domaine des Ressources Renouvelables et pour me faire l'honneur d'être le Président de ce jury ; les Rapporteurs : les Dr. Philippe Cury de l'ORSTOM et Olivier Godard du CIREN-CNRS pour leur lecture attentive du manuscrit et les enrichissements qu'ils y ont apporté ; et enfin le Pr. Paul Nival de l'Université Paris VI et le Pr. Alain Pavé, Directeur du Programme "Environnement" du CNRS, pour m'honorer de leur présence dans ce jury.

Ma reconnaissance va ensuite au Dr. Luc Doyen du CEREMADE et à Muriel Cadren de l'IFP avec qui j'ai eu un très grand plaisir à travailler. Ils ont su m'initier avec patience et passion à leur discipline respective. Qu'ils en soient encore remerciés. J'espère que cette collaboration va pouvoir continuer.

Un grand merci ensuite aux Drs. Claude Roy de l'ORSTOM, Roy Mendelssohn du PFEG, Jean-Luc Gouzé de l'INRIA, et Frédéric Lantz de l'IFP pour m'avoir fait bénéficier, chacun à des moments différents de mes recherches, de leurs compétences et de leur expérience ; merci aussi au Pr. Jean-Pierre Aubin du CEREMADE, pour ses chaleureux encouragements.

Je souhaite également remercier les responsables du Centre IFREMER de Nantes et du Laboratoire d'Océanologie Biologique et d'Écologie du Plancton Marin de Villefranche (URA 2077) de m'avoir offert la possibilité de poursuivre mes recherches dans leur établissement. J'en profite pour exprimer tout le plaisir que j'ai eu à connaître et à côtoyer les chercheurs et les membres de ces laboratoires sans oublier ceux de l'équipe de la station IFREMER de Cayenne.

Je remercie ensuite Annick Radenac de la bibliothèque IFREMER de Nantes, qui a su allier rapidité et amabilité pour satisfaire mes demandes continues de références, le Dr. Antoine Sciandra de l'URA 2077 pour sa disponibilité et sa serviabilité, et enfin Olivier et Carole pour les randonnées revivifiantes des week-ends en montagne et surtout pour leur extraordinaire gentillesse.

Enfin, je souhaite terminer par une pensée pour les membres de la CRAVAT de Cayenne et la famille des thésards et stagiaires de Villefranche, ceux qui ont su transformer tout au long de ces mois où je les ai côtoyés leur énergie individuelle en un élan commun de joie de vivre. Merci à eux.

Cette thèse est une thèse IFREMER financée par deux contrats d'étude¹ ainsi que par le GDR 1107 "Modèles dynamiques et Contrôle des Ressources Renouvelables".

¹ Le Contrat CORDET-Guyane n°93D001 effectué pour le Ministère des Départements et Territoires d'Outre-Mer et le Contrat FEDER-Guyane n°900309004 financé par l'U.E. et le Fond Inter-Régional Caraïbes. Ces contrats furent ponctués par la rédaction de deux rapports : Rapport CORDET : Béné C. et P. Moguedet (1996) ; Rapport FEDER : Moguedet P., C. Béné et D. Nérini (1995).

Cette thèse n'aurait pas vu le jour si Jean-Louis Durand, à l'époque responsable du Laboratoire de Mathématiques Appliquées à l'Évaluation des Ressources Halieutiques et Aquicoles (MAERHA) de l'IFREMER ne s'était pas engagé avec enthousiasme dans le projet de collaboration avec le GDR 1107 "Modèles Dynamiques et Contrôle des Ressources Renouvelables" animé par Claude Lobry. Cette thèse doit être vue comme le fruit de cette coopération et j'espère qu'elle en sera digne. Il ne fait par ailleurs aucun doute que si Jean-Louis avait encore été là aujourd'hui, je lui aurais demandé de me faire l'honneur de participer au jury de cette thèse.

~ oOo ~

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS

1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

3

La crevette la plus chère du monde	3
« $F = q \cdot E$ » ou la loi de la passivité	4
La reconnaissance de la capacité d'adaptation des pêcheurs	6
Étudier l'adaptabilité des pêcheurs ? Oui, et alors ?	7
Le rôle des sciences halieutiques	8
Relation entre capacité d'adaptation et gestion des pêcheries	8
La pêche guyanaise : un système halieutique simple	12
L'organisation du manuscrit...	13
...Son contenu	13
L'approche Proie-Prédateur dans l'analyse du couplage Ressource-Flottille	14
La dynamique d'investissement à travers du concept Proie-Prédateur	14
Les limites de l'analogie Proie-Prédateur	15
Le concept central de la thèse : les systèmes-pêche	16

CHAPITRE 1.

19

DYNAMIQUE DE LA RESSOURCE - INTERACTION AVEC LE SYSTÈME-PÊCHE

INTRODUCTION AU CHAPITRE 1	19
SECTION 1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : ENSEIGNEMENTS ET INTERROGATIONS	23

1.1. Rappel du cycle de <i>Penaeus subtilis</i>	23
1.2. Les travaux précédents : divergences et incertitudes	25
1.2.1. Le rôle de l'environnement	25
1.2.2. Incertitudes sur le cycle biologique des Penaeides	26
1.2.3. Le recrutement de <i>P. subtilis</i> : uni, bi, ou plurimodale ?	27
1.3. Interrogations	27
SECTION 2. LE DETERMINISME DU RECRUTEMENT	
CHEZ <i>PENAEUS SUBTILIS</i>	29
2.1. Motivations de l'étude	29
2.2. Savoir prendre en compte la structure temporelle des populations	29
2.3. Une nature non-linéaire	31
2.4. La combinaison des facteurs globaux et locaux	33
2.5. Le choix des échelles temporelles	34
2.6. Les résultats	35
2.7. Interprétation	35
2.7.1. Écologie appliquée : le déterminisme du recrutement	35
2.7.2. Une interprétation plus théorique : celle de la théorie de la Hiérarchie	39
2.7.3. Interprétation halieutique : l'impact de la dynamique de flottille	42
2.7.4. En guise de conclusion	44
SECTION 3. RECHERCHES SUR LA NATURE DES OSCILLATIONS	
ANIMANT LA PÊCHERIE	45
3.1. Quand le chaos chasse le lynx	45
3.2. Oscillations auto-entretenues ou oscillations forcées ?	47
3.3. Identification qualitative de la dynamique de la pêche	48
3.4. Le système dynamique	52
3.5. Comportement du système sous l'hypothèse d'un recrutement constant	56
3.6. Comportement du système sous l'hypothèse d'un recrutement saisonnier	61
3.6.1. Généralités sur les problèmes liés à l'étude des systèmes forcés	62
3.6.2. Analyse du système IC	64
3.6.3. La preuve de l'impact anthropique ?	65
3.6.4. Analyse du système SHC	68
3.6.5. La pression anthropique, effet stabilisant ou déstabilisant ?	70
3.7. Synthèse des résultats et enseignements	72
CONCLUSION AU CHAPITRE 1	75

DYNAMIQUE DES MARCHÉS - IMPACTS SUR LE SYSTÈME-PÊCHE

INTRODUCTION AU CHAPITRE 2	83
SECTION 1. LES PERTURBATIONS ÉCONOMIQUES IMPOSÉES AU SYSTÈME GUYANAIS	86
1.1. Le processus de francisation : rétablir une situation politiquement inacceptable.	86
1.1.1. Cayenne, comptoir U.S. en Amérique du Sud	86
1.1.2. Les faits, et derrière les faits, les raisons	87
1.2. Une conséquence imprévue de la francisation	90
1.2.1. La saisonnalité du marché français	91
1.2.2. La demande préférentielle en petites catégories	91
1.3. Les marchés mondiaux : naissance et expansion de la crevette d'aquaculture	93
1.3.1. L'emprise croissante des espèces d'élevage sur les prix mondiaux	96
1.3.2. La fin d'une époque	97
1.3.3. Schéma récapitulatif	100
SECTION 2. ADAPTATION DU SYSTÈME AUX CONTRAINTES DE SON NOUVEAU MARCHÉ	101
2.1. Le déphasage entre ressource et marché	101
2.1.1. Le marché américain comme contrôle de la fluidité des exportations	101
2.1.2. Hypothèses sur les raisons d'un stockage au niveau local	106
2.1.3. Rôle des stockages dans la viabilité économique des pêcheries : une approche théorique	107
2.2. La seconde adaptation du système : la réduction de la taille moyenne des crevettes capturées	111
2.2.1. Le système de rémunération : un outil de contrôle pour les armements	113
Quand pêcheurs et armateurs ne rament pas tous dans le même sens	113
Analyse du système de rémunération des hommes d'équipage	115
Analyse du système de rémunération des capitaines	118
SECTION 3. IMPACT DES MARCHÉS MONDIAUX SUR LE SYSTÈME-PÊCHE GUYANAIS	123
3.1. Études des liens dynamiques entre la crevette guyanaise et la crevette de Thaïlande	123
3.1.1. Aspect théorique des liens dynamiques entre prix de produits substitués	123

3.1.1. Le regard critique de l'économétrie sur certains outils	125
Les MES relégués à un rôle didactique	125
Les limites de la méthode de Box - Jenkins	126
3.1.1. Application de la théorie de la co-intégration : résultats	128
3.1.2. Interprétations	131
3.2. Les premiers symptômes de surproduction	131
3.2.1. Mise en évidence des problèmes de commercialisation	131
3.2.2. Quand arrivent les premiers conflits...	133
3.2.3. Conjecture sur les raisons du choix commercial des armements	136
3.2.4. La réponse des armements au problème de surproduction	138
CONCLUSION AU CHAPITRE 2	142

CHAPITRE 3. 151

DYNAMIQUE D'INVESTISSEMENT- PROCESSUS ENDOGÈNE ET DISTORSION

INTRODUCTION AU CHAPITRE 3	151
SECTION 1. LA DYNAMIQUE NORMALE D'INVESTISSEMENT	
DANS LES PÊCHERIES	157
1.1. Les enseignements des études empiriques	157
1.1.1. Le rôle du profit comme moteur à l'investissement	157
1.1.2. Non-malléabilité et comportement d'adhérence	159
1.1.3. Une solution à la non-malléabilité du capital : la stratégie de substitution	159
1.2. L'apport des modèles théoriques dynamiques	160
1.2.1. Le rôle du co-investissement dans la dynamique d'investissement	160
1.2.2. L'impact de la dépréciation du capital et le biais de l'échelle d'observation	164
1.2.3. Le couplage {co-investissement / non-malléabilité}	164
1.3. Une dynamique d'investissement en crémaillère	167
1.4. Une généralisation dangereuse ?	168
SECTION 2. DYNAMIQUE D'UNE PÊCHERIE LIMITÉE PAR	
SON MARCHÉ	171
2.1. Interrogations	171
2.2. Le marché, facteur de régulation	171
2.2.1. Notion de capacité maximale d'absorption des marchés	172
2.2.2. Formalisation du flux d'exportation sous l'hypothèse	
d'une capacité limite d'absorption	172

2.3. Le modèle dynamique	174
2.3.1. Analyse du comportement des trajectoires	174
2.3.2. Changement de variable et interprétation	175
2.3.3. Limites et perspectives du modèle	177
SECTION 3. LE RÔLE DE LA FRANCISATION DANS LA SURCAPACITÉ DE LA FLOTTILLE	180
3.1. Remise en cause des hypothèses du modèle	180
3.2. Recherche sur les causes de distorsion de la dynamique d'investissement	183
3.3. Deux natures de surinvestissement pour une seule et même pêcherie	187
3.4. Pourquoi tant d'aides ?!	189
CONCLUSION DU CHAPITRE 3	194

CONCLUSION GÉNÉRALE	205

Adaptabilité des acteurs du système-pêche guyanais : synthèse des résultats	205
La situation spécifique des pêcheries crevettières dans les sciences halieutiques	206
Les limites de l'étude	209
Les travaux sur le déterminisme du recrutement	209
Usage de la modélisation dynamique dans l'étude de l'interaction ressource-flottille	210
L'apport de la co-intégration	213
À propos des perturbations du marché	214
L'hypothèse d'une capacité maximale d'absorption des marchés	214
Les sciences halieutiques au carrefour des disciplines	216

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	221

ANNEXES	237

**Cette thèse est le récit d'une histoire,
l'histoire de la pêche crevette guyanaise,
racontée avec une vision et un vocabulaire inter-disciplinaires.**

AVANT-PROPOS

J' ai pu bénéficier au cours de cette thèse des infrastructures de trois laboratoires d'accueil différents. Mes recherches ont en effet commencé en Guyane sous la direction du Dr. P. Moguedet au Laboratoire des Ressources Halieutiques de la Délégation IFREMER, puis je les ai poursuivies à mon retour en Métropole au laboratoire MAEHRA du Centre IFREMER de Nantes, et enfin terminées sous la direction du Pr. C. Lobry à la Station Zoologique de l'Université de Paris VI à Villefranche sur Mer.

Ma période "d'expatriation" m'a permis de prendre connaissance des très nombreux travaux (rapports internes, comptes-rendus d'activité, etc.) produits par les équipes successives de la Délégation IFREMER et du Centre ORSTOM de Cayenne ayant travaillé en collaboration sur cette pêcherie. Ces rapports forment la base des connaissances "halieutiques" à partir desquelles j'ai entamé mes recherches. Cette période guyanaise me permit par ailleurs de constituer une base de données complémentaires sur l'environnement économique de la pêcherie auprès des organismes locaux (CCI de Guyane, Affaires Maritimes de Cayenne, IEDOM, INSEE), mais aussi nationaux (DNSCE, FIOM) et internationaux (FAO).

Mais avant toute chose, ce séjour en Guyane a été mis à profit pour acquérir une connaissance "empirique" de la pêcherie, en rentrant directement en contact avec les principaux acteurs (responsables des armements, pêcheurs, administrateurs des Affaires Maritimes) et avec les observateurs privilégiés (administrateurs de l'IEDOM, techniciens et chercheurs du Laboratoire IFREMER et du Centre ORSTOM de Cayenne). J'ai essayé de retranscrire cette information empirique en rapportant le plus souvent possible directement les paroles de ces personnes.

Après ces précisions sur le cadre dans lequel j'ai effectué mes recherches, deux mots sur le contenu de ces dernières et surtout sur la manière avec laquelle le manuscrit qui les regroupe a été organisé.

Au cours de ma thèse, je n'ai pas développé à proprement parler de nouvelles techniques, je les ai "extraites" d'autres champs disciplinaires et je les ai appliquées aux problèmes spécifiques rencontrés dans l'étude de la pêcherie crevette guyanaise. Par rapport à cette composition multi-disciplinaire, il m'a semblé que le point important n'était pas de tenter d'expli-

quer ces différentes techniques (qui sont décrites de façon rigoureuse dans les articles de références cités en bibliographie) mais plutôt de considérer les raisons pour lesquelles j'ai été amené à les utiliser. Un effort particulier a, par conséquent, été produit dans le sens d'une justification méthodologique des techniques utilisées (ce qui confère à certains passages un aspect d'analyse d'histoire des sciences qui n'était pas recherché initialement).

Cependant, même dans cette tâche de justification méthodologique, on peut développer plusieurs niveaux de discours. J'ai pris le parti d'adopter le niveau "minimum", c'est-à-dire celui qui permet au lecteur de suivre n'importe quelle partie de ce manuscrit, même si celle-ci n'est pas en relation directe avec sa spécialité. L'exercice rédactionnel que représente cette "simplification interdisciplinaire" n'a cependant pas été aisé car la limite est mince entre simplification rigoureuse et verbiage pseudo-scientifique. Lorsqu'un point particulier nécessitait quelques détails supplémentaires, un "encadré" a été proposé parallèlement au texte. Même s'ils sont quelquefois plus détaillés, ces encadrés sont eux aussi rédigés avec un vocabulaire que j'espère accessible à tous. Les lecteurs souhaitant avoir des précisions ou des explications plus techniques sont invités à consulter, soit les travaux qui sont proposés en annexes, soit les articles de références qui sont cités dans le texte.

Parallèlement, la présence de très nombreuses notes de bas de page correspond à une volonté personnelle de proposer une possibilité de lecture "rapide" au lecteur "pressé". Cependant, à l'exception de celles qui sont utilisées pour des rappels ou des références bibliographiques supplémentaires, ces notes contiennent une information qui est bien souvent importante, si ce n'est indispensable, à la bonne compréhension du reste du manuscrit.

Enfin, les dernières lignes de chacun des différents chapitres rassemblent quelques "commentaires" plus pragmatiques concernant la gestion de la pêche crevette guyanaise. Bien qu'en relation directe avec les chapitres auxquels ils sont rattachés, ses commentaires ne doivent pas être vus comme le résultat de véritables recherches mais plutôt comme des réflexions supplétives sur la gestion de cette pêche. Ces dernières lignes répondent par conséquent un peu moins à la teneur académique que se doit de satisfaire une thèse d'université. Mais ce qui caractérise les sciences halieutiques n'est-il pas le fait qu'elles doivent justement répondre à la fois à des problèmes de recherche pure et à des demandes concrètes de gestion pour les ressources marines exploitables ?

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Fisheries management must move away from simply considering fish populations and turn to models which include the behaviour of fishermen as an intrinsic part of their structure.

P. Allen and J.M. McGlade

INTRODUCTION GÉNÉRALE

F*aut pas se leurrer, faut pas se voiler la face, tous le monde est sur un siège éjectable.*
C'est par ces paroles que le responsable de production d'un des armements crevettiers avait conclu notre entrevue. C'était à Cayenne, en janvier 1993. Moins de 10 mois plus tard, l'armement pour qui il travaillait déposait son bilan, victime de la "crise crevette" qui frappait l'ensemble de la pêche guyanaise depuis le début des années 90.

La crevette la plus chère du monde

Étrange destin que celui de cette pêche qui, quelques années auparavant, pouvait encore se vanter d'être le moteur économique de la Guyane, en assurant à elle seule plus de 40% des recettes d'exportations annuelles de ce Département d'Outre-Mer. Il est vrai que jusqu'en 1989, le port du Larivot¹, avec son quai encore en bois et sa production annuelle de seulement 4000 tonnes, n'en était pas moins le 5^e port de pêche français en valeur débarquée. La très forte valeur commerciale des crevettes tropicales que cette pêche exportait depuis le début des années 60 vers les deux plus grands marchés mondiaux, le marché américains et le marché japonais, explique cette étonnante réalité. Il n'était d'ailleurs pas rare, au détour d'une conversation avec un armateur, de s'entendre conter cette période "Américaine" où la pêche « *exploitait la crevette la plus chère du Monde* ».

Malheureusement, les temps ont changé et cette époque semble définitivement révolue. La pêche connaît aujourd'hui des difficultés économiques importantes, liées essentiellement à la surcapacité de sa flotte et à des problèmes de commercialisation (Béné et Moguedet 1996). Ces difficultés se traduisirent dès la fin de 1990 par un endettement de plus de 195 millions de Francs pour l'ensemble de la filière (IEDOM 1993). Cet endettement entraîna entre 1991 et 1993 le dépôt de bilan de deux armements et la liquidation judiciaire d'un troisième. À eux trois, ces armements représentaient près de 40% de l'activité de la pêche.

¹ Le port du Larivot, à 10 km au Nord de Cayenne, est le port où sont installés les armements crevettiers. C'est là que se fait la totalité des débarquements.

L'apparition de cette crise économique relativement soudaine amène à un certain nombre de questions. Quel a donc été l'historique exact de cette pêcherie, qui passa ainsi en l'espace de dix ans d'une situation de réussite totale -représentant un véritable moteur interne de développement pour la Guyane-, à la situation actuelle, celle d'un secteur en pleine crise économique, se débattant entre mouvements sociaux et dépôts de bilan ? De même, de quelle manière cette pêcherie a-t-elle été gérée pendant la période précédant la crise. Quels ont été, en particulier, les modèles sur lesquels cette gestion a été planifiée ?

Mais les réponses à ces premières questions ont déjà fait l'objet d'un article (Dintheer et al. 1991) rédigé avec d'autant plus de précision que ce sont justement les scientifiques qui avaient participé à l'élaboration des plans de gestion de la pêcherie qui publièrent cet article. On y apprend ainsi que pas moins de six modèles furent appliqués à la pêcherie en l'espace de dix ans (1979-1988) : il s'agit des modèles proposés successivement par Venaille (1979), Stevenson (1981), Garcia *et al.* (1984), Le Cabellec (1984), Lebrun et Lemoine (1985), et enfin Dintheer et Le Gall (1988).

« $F = q \cdot E$ » ou la loi de la passivité

Exception faite de celui de Dintheer et LeGall (1988), tous ces modèles appartiennent à la première des deux grandes classes de modèles classiques en halieutique : les "modèles globaux" (Schaefer 1954, Pella and Tomlinson 1969)². Sans rentrer à ce stade dans le détail de leur formalisme³, retenons simplement que pour décrire la dynamique des stocks exploités, ces modèles se basent sur la loi de la croissance d'une population en milieu limité (loi logistique de Verhulst 1838 - Pearl 1930), à laquelle on soustrait l'impact de l'exploitation anthropique. Une autre des caractéristiques communes à tous ces modèles est qu'ils tendent à la maximisation d'un critère (les captures, les rentes, ou les revenus, etc.). En dehors de la discussion possible sur le bien-fondé de ce principe de maximisation dans le domaine des pêcheries (Roedel 1975, Keeney and Raiffa 1976, Brewer 1979, Gulland 1984, Healey 1984, Charles 1992, Weber et Bailly 1993) ou plus généralement pour les systèmes d'exploitation des ressources renouvelables, de nombreux halieutes, biologistes ou économistes, mirent en avant dès le début des années 70 les dangers d'une application

² Le modèle de Dintheer et LeGall (1988) appartient, quant à lui, à la seconde grande classe de modèles en halieutique : les modèles structuraux du type Beverton and Holt (1957).

³ Nous reviendrons plus longuement sur ces modèles dans l'encadré 3.2 du Chap.3.

systematique de ces modèles. Ces chercheurs soulignèrent en particulier que l'usage de ces modèles tels qu'ils avaient été adoptés sous-tendait deux hypothèses relativement discutables : (i) les pêcheries se gèrent à l'équilibre, et (ii) l'activité de la pêche peut se réduire à un simple taux de mortalité $F = q \cdot E$ constant, avec E : l'effort de la flottille et q : une constante (McFadden 1969, Radovich 1975, Larkin 1977, Sissenwise 1978).

La première hypothèse trouve ses origines dans l'affirmation déjà ancienne de l'existence d'un équilibre de la nature -ce que les auteurs anglo-saxons appellent "*the Balance of Nature*". Nous ne nous attarderons pas sur le concept de stabilité qui est associé à cette vision des choses (Whittaker 1974, May 1974, Orians 1975, Gigon 1983) ni sur l'abondante littérature qu'elle a générée en écologie, notamment par rapport à la possible relation existant entre stabilité et complexité des écosystèmes⁴ (certains affirmant que plus un écosystème est simple -dans le sens : peu de relation trophiques- plus il est stable, d'autres affirmant exactement le contraire). Notons simplement que cette hypothèse de *Balance of Nature* mérite attention puisque le rappel de son impact sur les sciences permet par exemple de comprendre pourquoi l'homme, par la nature des relations qu'il entretient avec les ressources naturelles, était généralement considéré comme un facteur de perturbation par rapport à ces équilibres naturels : « *If a species were in ecological equilibrium before the commencement of commercial fishing, man's intrusion would have the same effect as any other predator; and that can only mean that the species population would reach a new equilibrium at a lower level of abundance, the divergence of the new equilibrium from the old depending on the degree of man's predatory effort and effectiveness.* » (Gordon 1954: 128)⁵.

La conception de la gestion des systèmes d'exploitation découlant de cette vision était logique et directe : la gestion de ces systèmes se devait d'aider à rétablir l'équilibre perturbé par l'action prédatrice de l'Homme. C'est pourquoi « *Almost all fisheries models used for the analysis of data and evaluation of management options were built on the assumption of historical equilibrium and/or equilibrium as a desirable goal of management* » (Hilborn et

⁴ Par exemple dans la seule revue *Nature*, Gardner and Asbhy (1970), May (1972), Roberts (1974) Pimm (1974), Gilpin (1975), May (1976), Lawton and Pimm (1978) sont quelques uns des principaux articles qui ont été publiés sur ce thème entre 1970 et 1980.

⁵ Ce passage est en fait tiré d'un commentaire de Gordon (1954) où il dénonce cette vision des choses. Il ne correspond pas à son point de vue.

Walters 1992: 65, souligné ajouté). L'analyse de l'évolution de cette vision et du rôle des modèles de gestion au sein des sciences halieutiques est à cet égard porteuse de bien des informations sur l'historique de cette science et sur les paradigmes successifs qui en marquèrent le développement.

Nous concentrerons cependant la totalité de notre attention sur la seconde hypothèse de ces modèles classiques, celle induite par le formalisme $F = q \cdot E$ selon lequel « *the whole behaviour of the fishermen is subsumed and reduced to an "applied fishing mortality"* » (Allen and McGlade 1986: 1189). De manière à mieux comprendre la portée de cette hypothèse et pour offrir une sorte de fil conducteur au reste de cette introduction, raisonnons en terme de relation "Proie-Prédateur" (P-P). Par rapport au formalisme le plus simple représentant la relation P-P, i.e. le modèle de Lokta-Volterra (L-V) dans sa forme initiale (Lokta 1923, Volterra 1926) :

$$(L-V) \begin{cases} \dot{x} = ax - bxy \\ \dot{y} = cxy - dy \end{cases} \quad \text{avec } a, b, c, d \text{ positifs}$$

où x représente l'abondance de la proie et y l'abondance du prédateur, le fait de considérer l'impact des pêcheurs au travers d'une simple mortalité F constante⁶ revient à réduire le système (L-V) à la première de ses deux équations (celle décrivant l'évolution de la proie), et donc à complètement négliger le prédateur, son évolution (sa réponse numérique "*numerical response*") et son comportement (sa réponse fonctionnelle "*functional responses*"⁷).

La reconnaissance de la capacité d'adaptation des pêcheurs

Les choses ont cependant évolué au cours des deux dernières décennies. Sous l'impulsion de certains scientifiques comme Ray Hilborn, Carl Walters ou Peter Allen, de nouveaux champs de réflexions ont émergé, s'appliquant à étudier les comportements des pêcheurs au travers de concepts comme ceux de "*fleet dynamics*", "*fishermen' behaviour*" ou "*fishing strategies*". Ces réflexions et les études théoriques et empiriques qui les accompagnent (Bockstael and Opaluch 1983, Millington 1984, Hilborn 1985, Allen and McGlade 1987,

⁶ L'hypothèse $F = q \cdot E = \text{constante}$ équivaut ici à $b \cdot y = \text{constante}$ d'où $\dot{y} = 0$.

⁷ Réponses "numérique" et "fonctionnelle" dans le sens classique défini par Holling (Holling 1959, 1965, Griffiths and Holling 1969).

etc.) sont le résultat du rejet effectif de la conception statique avec laquelle les modèles classiques -bien qu'initialement développés dans des versions dynamiques⁸- avaient été utilisés jusque dans les années 70. En reprenant le cadre de notre analogie P-P, l'apparition de ces nouvelles études sur le comportement des pêcheurs⁹ ou sur la dynamique des flottilles représente l'intégration non seulement de la réponse numérique du prédateur, mais surtout de sa réponse fonctionnelle. L'idée de base défendue par Hilborn et les autres était en effet l'affirmation du fait que les pêcheurs sont actifs et qu'ils s'adaptent à leur environnement. Or, cet environnement est caractérisé par une très forte fluctuabilité¹⁰. Il est le jeu d'interactions, de tensions, de bouleversements de diverses natures qui se répercutent au niveau des pêcheries sous la forme de perturbations plus ou moins importantes. Les pêcheries sont donc tout sauf des systèmes figés. Mieux encore, affirmons que l'historique d'une pêcherie peut être vue comme une succession continue d'ajustements face aux perturbations imposées par son environnement. Par rapport à cette vision, il semble intéressant, voire nécessaire, de s'interroger sur la manière avec laquelle les pêcheurs réagissent et répondent aux différentes perturbations auxquelles ils sont confrontés. Au travers de l'exemple de ces pêcheurs c'est d'ailleurs plus globalement l'aptitude des hommes à apprendre et à agir sur leur environnement qui est réaffirmée. Allen and McGlade (1986: 1187) ne remarquent-ils pas que « *fishing represents a fascinating "case study" of the more general and wider issues of adaptiveness, creativity, and learning* ».

L'idée directrice qui anima l'ensemble de nos travaux découle de ce constat. Il s'agit de rechercher et d'analyser la capacité à s'adapter que les acteurs des systèmes anthropiques développent face à la fluctuabilité de leur environnement. Cette capacité à s'adapter (i.e. leur "adaptabilité") sera étudiée ici dans le domaine spécifique des pêcheries.

Étudier l'adaptabilité des pêcheurs ? Oui, et alors ?

Arrivés à ce stade, la première question que l'on doit se poser est : **Qu'est-on en droit d'attendre de l'analyse de cette adaptabilité ?** En effet, être capable de mener à terme une

⁸ Cf. Encadré 3.2. p.191 et note 19 p.161.

⁹ Les anthropologues se sont d'ailleurs eux aussi intéressés à ces questions de "*fishing strategies*" et de "*fisherman behaviour*". Voir par exemple l'article de Cove (1973).

¹⁰ Ce néologisme dérivé du terme anglais *fluctuability* sera utilisé ici pour faire la distinction avec le terme variabilité. La variabilité désignera des changements dont la dynamique reste prévisible alors que le terme fluctuabilité sera utilisé pour caractériser des phénomènes dont la dynamique est non prévisible (chaotique). En un sens, la fluctuabilité est à la variabilité ce que l'incertitude est au risque.

étude, fut-t-elle détaillée, sur un sujet donné, n'en assure pas la pertinence scientifique. Le point initial va donc être de démontrer le bien-fondé de cette analyse.

Le rôle des sciences halieutiques

De toute évidence, une analyse ne peut être évaluée que par rapport aux objectifs généraux du domaine scientifique dans lequel elle est menée. Or, ici il s'agit des sciences halieutiques. Alain Maucorps¹¹ nous rappelle à cet égard que : « *L'élaboration d'avis scientifiques pour étayer la gestion des ressources et des pêcheries reste une tâche majeure de la recherche halieutique* » (1994: 10). Par rapport à cette tâche majeure que doivent remplir les sciences halieutiques, philosopher sur l'adaptabilité des pêcheurs face à la fluctuabilité de leur environnement peut, à première vue, sembler une problématique quelque peu théorique, voire académique, relativement éloignée de la tâche concrète d'élaboration d'avis scientifiques. À première vue seulement, et l'objectif de la partie qui suit va justement être de démontrer pourquoi on peut affirmer qu'il existe une étroite relation entre l'étude des capacités d'adaptation des acteurs d'une pêcherie et la production d'avis scientifiques ayant trait à la gestion de cette pêcherie.

Relation entre capacité d'adaptation et gestion des pêcheries

Par rapport à la notion d'adaptation, commençons par souligner qu'en identifiant cette dernière comme objet central de nos recherches, nous nous situons à un point bien précis du problème, celui où nous reconnaissons que les perturbations qui agissent sur un système sont à l'origine de réponses de la part des acteurs de ce système. Dans le cas des pêcheries, nous admettons donc que la variabilité et la fluctuabilité de l'environnement déclenchent des comportements adaptatifs de la part des pêcheurs. Nous rejetons par conséquent implicitement les deux hypothèses de bases des modèles halieutiques classiques : (i) l'équilibre de la nature et (ii) la passivité des pêcheurs. Ce rejet est important car il entraîne *de facto* la remise en cause des conceptions de base de la gestion des ressources renouvelables marines, telles qu'elles furent développées à partir de ces modèles (cf. p.5). Nous venons en effet de voir avec Hilborn et Walters que, dans le cadre de ces modèles, l'objectif de gestion était de rétablir et de maintenir un équilibre « *all the fisheries models*

¹¹ Président du Comité International pour L'Exploration de la Mer (CIEM) et Directeur des Ressources Vivantes à l'IFREMER.

(...) were built on the assumption of (...) equilibrium as a desirable goal of management ». Cette conception est désormais caduque puisque ces modèles ne prennent pas en compte le comportement adaptatif des pêcheurs. On voit donc que la reconnaissance de la capacité d'adaptation des pêcheurs est intrinsèquement liée au problème de la gestion des systèmes halieutiques puisqu'elle rejette les principes de base sur lesquels s'appuyait jusqu'alors la gestion de ces systèmes.

Mais cette remise en question des conceptions classiques de gestion n'est pas l'objet de cette thèse. D'autres avant nous les ont d'ailleurs déjà critiquées : « *Instead of trying to manage "equilibria" which are product of our own particular mythology, we must try to manage unstable, and unpredictable resource.* » (Allen 1991: 378). Il ne s'agit pas ici de refaire le jugement de modèles ou de concepts qui ont eu le mérite d'exister et de représenter à cet égard les premières tentatives de gestion des ressources renouvelables marines¹². Ce qui nous intéresse ici, c'est l'idée que l'étude du comportement des acteurs d'un système et en particulier l'identification et l'analyse des stratégies de pêche (des pêcheurs) et des stratégies commerciales (des armateurs) permet d'inférer des informations intéressantes sur le fonctionnement de ce système et donc sur la manière de le gérer.

En effet, lorsqu'un système réagit à une perturbation, sa réponse se traduit généralement par une modification de certaines de ses variables (ou de ses paramètres) par rapport à leurs valeurs avant perturbation. Ce phénomène a depuis longtemps été remarqué au niveau des systèmes naturels : « *A population responds to any environmental change by a series of physiological, behavioral, ecological, and genetic changes (...)* » (Holling 1973: 18). De la même manière, pour les systèmes anthropiques comme les pêcheries, leurs acteurs, lorsqu'ils sont confrontés à une perturbation, vont réagir et développer des mécanismes de régulation. Ces mécanismes vont se traduire par des modifications d'une partie des variables du système pendant que d'autres seront maintenues inchangées par rapport à leur état antérieur. Nous découvrirons ainsi par exemple au cours du Chap.3 que, face à un problème de surproduction, les armements guyanais vont choisir de laisser une partie de leurs navires à quai mais, qu'en revanche, ils ne vont pas modifier la longueur des marées des navires

¹² Pavé (1994: 368) nous rappelle d'ailleurs que pour ce qui est du concept d'équilibre : « *l'idéal-type de l'équilibre (stable !) fut, [lui aussi] pratiquement, très utile et très fécond dans le domaine scientifique, non seulement dans ses applications (en statique, en thermodynamique et en chimie des systèmes à l'équilibre,...) mais aussi et plus récemment dans les discussions qu'il a soulevé et dans la mise en cause progressive comme représentant un état idéal et atteignable de nombreux systèmes naturels* ».

rester actifs. Les variables qui sont ainsi modifiées et qui jouent le rôle de "régulateurs internes" peuvent donc appartenir à des niveaux différents de la structure du système.

Mieux encore, par rapport à ce mécanisme, il est possible d'imaginer l'existence d'une certaine "hiérarchisation" de ces facteurs de régulation. Certains d'entre eux vont ainsi être modifiés très rapidement (i.e. dès que la perturbation est ressentie au niveau du système) alors que d'autres ne seront modifiés que dans un deuxième temps, si la régulation par les premiers facteurs n'a pas été effective¹³. Or le fait de savoir que les pêcheurs, par leurs réponses, vont modifier volontairement ou involontairement tel(s) ou tel(s) facteur(s) et au contraire maintenir inchangé(s) tel(s) ou tel(s) autre(s) donne des informations, non seulement sur la représentation que ces acteurs se font du problème et de la manière optimale (à leurs yeux) avec laquelle ce dernier doit être résolu, mais aussi sur la manière dont on peut les aider à s'adapter à ces perturbations. Il est clair par exemple que si, face à des fluctuations importantes du niveau d'abondance de la ressource, les acteurs d'une pêcherie développent des stratégies de pêches dans le but évident d'amortir ces fluctuations au niveau des débarquements, un des objectifs prioritaires du système de gestion sera de développer des mesures n'entravant pas le développement de cette stratégie de pêche.

Le raisonnement peut d'ailleurs être poussé plus loin. Au-delà des mécanismes d'auto-contrôle (i.e. régulation interne), ce sont aussi les mécanismes de régulation externes qui sont concernés : avoir pour objectif l'étude de la manière avec laquelle les pêcheurs réagissent à différentes perturbations, c'est aussi proposer des éléments de réponse sur les réactions de ces pêcheurs face aux décisions de gestion qui leur sont proposées (ou imposées...). Car l'introduction d'un facteur de régulation externe comme l'application d'un quota annuel ou d'une limitation de la puissance des moteurs n'est finalement rien d'autre que l'introduction d'une perturbation supplémentaire par rapport à la dynamique initiale du système. L'ensemble de la communauté des halieutes reconnaît d'ailleurs par rapport à cette question qu'une des raisons des échecs actuels en matière de gestion est le fait que les

¹³ L'observation de cette hiérarchisation des variables dans leur rôle de régulation est relativement proche des notions de « contrôle en cascade » et « d'inertie » proposées par Aubin (1991) dans le cadre des analyses de viabilité (cf. Encadré 2.4 du Chap.2). La place nous manque ici pour présenter de façon précise ces deux notions. Disons simplement que la notion de contrôles en cascade correspond plus ou moins à l'idée exprimée à l'instant, à savoir le fait que certaines variables de contrôle d'un système (ce qu'Aubin appelle des régulateurs) vont être mises à contribution avant d'autres. Le principe d'inertie, quant à lui, postule que les régulateurs ne sont modifiés que lorsque la viabilité du système est menacée, c'est-à-dire, lorsque l'on est sur le point de sortir du domaine de viabilité du système (cf. Encadré 2.4 pour plus de détails).

réactions des pêcheurs aux décisions de gestion ne sont pas toujours celles qui sont espérées ou attendues. Ce constat découle du fait que **très peu** de travaux sur le comportement des pêcheurs a jusqu'à présent été proposé.

Les comportements adaptatifs générés par l'impact d'une perturbation peuvent également se traduire au niveau des systèmes par des changements dont les manifestations vont aller au-delà de la simple modification quantitative de certaines variables. C'est le cas lorsque la réponse du système se manifeste par des changements dans sa structure : *« A system operates beyond the mechanical paradigm, because its response to external interventions can involve changes in structure and of the "identity" of the population in the system »* (Allen 1991: 381). On peut ainsi aisément envisager qu'une flottille, initialement structurée selon une organisation "artisanale" où chaque patron-pêcheur possède son propre bateau, évolue à la suite d'un événement précis (décision politique, innovation technique, modifications des marchés, etc.) vers une structure "industrielle" où tous les bateaux ne sont plus alors détenus que par un ou deux armements pour lesquels travaillent désormais les anciens artisans. Cette réponse du système est bien un **comportement** adaptatif généré par une perturbation externe, mais il s'est traduit par une évolution de la structure complète du système et non pas simplement par une variation au niveau d'une -ou même de plusieurs- des variables.

En d'autres termes, la **réponse** d'un système aux perturbations de son environnement peut se faire selon un "éventail" très large de mécanismes plus ou moins complexes et variés. Dans le **domaines** des systèmes halieutiques, ces mécanismes adaptatifs **n'ont** pratiquement pas été étudiés (Hilborn 1985, Durand et al. 1991, Allen 1991, Hilborn and Walters 1992). Nous sommes par rapport à cette problématique au tout début d'un long travail. Pourtant comme nous venons de le souligner, **s'intéresser** à l'adaptabilité des systèmes anthropiques permet d'espérer améliorer la compréhension globale que l'on a de la dynamique de ces systèmes. **Cela offre en particulier** la possibilité d'en souligner les spécificités et les faiblesses, et ainsi d'identifier des outils de gestion susceptibles d'en améliorer le fonctionnement. Il apparaît donc que, bien qu'animées par une question aux allures et aux consonances quelque peu théoriques, les analyses qui seront présentées au cours des pages suivantes doivent déboucher sur des éléments permettant de s'acquitter de la tâche définie comme l'objectif majeur des sciences halieutiques : la production d'avis scientifiques en matière de gestion. Ce que nous nous proposons donc de faire au niveau de cette thèse, c'est de nous engager le

long de cette nouvelle voie, en entamant la première étape qui en constitue le parcours : étudier la capacité à s'adapter des pêcheurs.

La pêche guyanaise : un système halieutique simple

La complexité habituellement rencontrée dans les pêcheries multi-spécifiques, multi-engins et souvent multi-marchés peut sembler un obstacle à ce genre d'étude dans la mesure où l'on s'impose de réfléchir sur l'ensemble des perturbations, quelles qu'en soient la nature et l'origine, qui peuvent influencer le comportement des acteurs du système. Ainsi ce sont aussi bien les perturbations biologiques (au travers des fluctuations de la ressource), qu'économiques (au travers des variations des marchés) que sociales (par l'évolution des relations entre les différentes communautés impliquées : les pêcheurs et les armateurs¹⁴) que l'on va être amené à analyser. L'approche devra donc être "globale", dans le sens : faisant appel à plusieurs champs disciplinaires. Cette analyse se devra par ailleurs d'être dynamique car tenter de mieux comprendre comment une pêche évolue et s'adapte à des chocs implique nécessairement l'adoption d'un cadre d'analyses dynamiques. Cette double dimension méthodologique (globale et dynamique) impose quelques restrictions en terme de choix du système à étudier. On ne peut en effet raisonnablement espérer aborder une telle problématique que si le système à partir duquel l'étude est menée n'est pas trop complexe. Le choix de la pêche crevette de Guyane est par conséquent important à souligner. La "particularité halieutique" de cette pêche est en effet d'être remarquablement simple : une seule espèce est exploitée (*Penaeus subtilis*), par une flottille aux caractéristiques techniques très homogènes (même puissance, navires de même longueur, même nombre de marins embarqués par navire, etc.). De plus, la flottille n'utilise qu'un seul engin de pêche¹⁵, et ses exportations se font désormais en direction d'un seul marché (le marché français), dont la demande et la dynamique sont elles aussi relativement homogènes et facilement identifiables.

Ces conditions rendent le contexte de l'étude particulièrement favorables, tant du point de vue de l'analyse descriptive du système que du point de vue de sa modélisation. En particulier, par rapport à la phase descriptive, la simplicité du système va permettre de proposer un projet de recherche élargi au-delà d'une simple étude du système et ainsi d'intégrer dans les

¹⁴ Une troisième communauté, absente dans le cas présent, fait généralement aussi partie intégrante du système : les mareyeurs.

¹⁵ Tous les navires sont des chalutiers.

travaux, et selon notre souhait initial, l'analyse des différentes sources de perturbations (biologiques, économiques, sociales). Parallèlement, du point de vue de la modélisation, cette simplicité présente aussi d'énormes avantages. En effet l'usage qu'il sera fait de la modélisation tout au long de cette étude sera uniquement basé sur l'apport didactique que cet outil peut offrir, dans le cas présent par rapport à l'analyse des processus impliqués dans le fonctionnement et l'adaptabilité du système. En particulier il n'y aura aucune tentative de modélisation appliquée (avec calibration). Or, il est exact que lorsque l'on abandonne l'objectif d'une modélisation avec calibration, les modèles perdent généralement en spécificité, ils deviennent plus simplifiés, voire plus caricaturaux, et paraissent s'éloigner de la réalité qu'ils sont censés représenter. On comprend dès lors tout l'intérêt d'avoir choisi de travailler sur le système guyanais. Dans ce cas, le système offre de lui-même un degré de simplicité "naturelle" tout à fait appropriée au type de modélisation envisagé. On peut alors espérer que la perte de pertinence dont souffrent généralement les modèles, à la suite de la simplification imposée par leur formalisation mathématique, ne sera pas trop importante ici.

L'organisation du manuscrit ...

Le manuscrit est organisé par "entité dynamique". Son développement est scindé en trois chapitres (auxquels viendra s'ajouter une conclusion). Les deux premiers chapitres concerneront les dynamiques des deux "entités" exogènes classiques agissant sur la pêcherie : la ressource (Chap.1) et les marchés (Chap.2). Le Chap.3 traitera quant à lui de la dynamique interne d'expansion de la pêcherie au travers de l'étude de son processus d'investissement. Dans chacun de ces trois chapitres, la dynamique et la variabilité de l'entité considérée (la ressource, les marchés, l'investissement) seront analysées. Les perturbations qui apparaissent associées à chacune de ces entités seront ensuite identifiées et leurs impacts sur le fonctionnement de la pêcherie seront décrits. Le Chap.2 abordera également l'étude des relations qui existent entre les différents acteurs du système, au travers de l'analyse du système de rémunération.

... son contenu

Plus dans le détail, quels vont être les différents problèmes abordés au cours des différents chapitres ? Pour répondre à cette question, on se propose de reprendre comme fil conducteur le formalisme Proie-Prédateur (P-P) déjà utilisé dans cette Introduction.

L'approche Proie-Prédateur dans l'analyse du couplage Ressource-Flottille

Dans le Chap.1, on prendra part au très vieux débat scientifique Nicholson - Uvarov¹⁶. On tentera en effet de déterminer la nature des oscillations saisonnières qui sont observées au niveau de la ressource et de la flottille. En termes d'analogie P-P, cela signifie que nous chercherons à savoir si ces oscillations sont dues à l'interrelation entre la ressource et les pêcheurs ou bien si elles sont le résultat de l'impact d'un facteur climatique saisonnier sur le cycle de la ressource. On s'appuiera pour tenter de répondre à cette question sur deux études distinctes. La première est basée sur une analyse statistique de l'impact de différents facteurs climatiques sur l'abondance du stock (Béné and Moguedet Annexe 3). Nous ferons alors appel aux techniques d'analyse de séries temporelles. Cette étude fera l'objet de la section 2 du Chap.1. La seconde analyse est une modélisation mathématique à partir d'un système dynamique (Béné and Lobry Annexe 5). Considérant le couplage entre la ressource et la flottille et un processus décisionnel gouvernant la répartition de l'effort de pêche, nous étudierons l'évolution du système lorsque celui est placé, soit dans un environnement constant (système non-forcé), soit dans un environnement saisonnier (système forcé). Cette analyse fera l'objet de la section 3 du Chap.1.

La dynamique d'investissement à travers du concept Proie-Prédateur

Faire appel à l'analogie P-P pour décrire les relations liant les pêcheurs à la ressource est intéressant à plus d'un titre. Nous avons vu que cela permettait d'illustrer les limites des modèles classiques dans la manière avec laquelle ils formalisent cette interaction (cf. § "F = q·E..."). Il faut savoir que cette analogie a aussi constitué la base des modèles dynamiques classiques proposés dans la littérature pour analyser le processus d'investissement dans les pêcheries (Schaefer 1954, Smith 1968). Du point de vue formalisme, en effet, l'investissement d'une flottille peut être assimilé au "processus de croissance" d'un prédateur, la dépréciation du capital au terme de "mortalité naturelle" de ce même prédateur et la

¹⁶ Nicholson (1933, 1954), Nicholson and Bailey (1935) mettaient en avant le rôle primordial des relations biotiques et considéraient le milieu extérieur comme sans influence. Uvarov (1931) ou Bodenhimer (1930, 1938) niaient au contraire le rôle des relations biotiques et privilégiaient l'importance des facteurs abiotiques, principalement climatiques. Dans le domaine de l'halieutique ce débat eut également lieu sous la forme du différend qui opposa Thompson (Thompson et al. 1931, Thompson 1950) à Burkenroad (1948, 1951, 1953) à propos du stock de flétan du Pacifique. Thompson affirmait que le déclin du stock qui avait eu lieu dans les années 1920 était dû à la pression de la pêche alors que Burkenroad au contraire pensait que c'était le résultat des fluctuations naturelles des juvéniles sous l'impact des variations climatiques.

relation de co-investissement entre la ressource et la flottille¹⁷ à la relation trophique liant le prédateur et sa proie. On débutera donc le Chap.3 consacré à l'investissement en faisant de nouveau référence au modèle P-P. Ce formalisme sera cependant abandonné dès la seconde section de ce Chap.3 au profit d'un modèle dynamique plus en accord avec la représentation que l'on se sera fait du processus d'investissement caractéristique à ce type de pêche. Les trajectoires de ce modèle seront ensuite comparées dans la section 3 aux données empiriques de la pêche et on proposera un certain nombre de conclusions à partir de ces résultats. Ces conclusions nous permettront en particulier d'avancer une explication à la crise qui ébranla la pêche au début des années 90.

Les limites de l'analogie Proie-Prédateur

Au vu des précédentes remarques on pourrait penser que l'analogie P-P représente une base de départ solide pour l'analyse de la dynamique d'une pêche. Millington (1984) n'hésita d'ailleurs pas à donner à sa thèse le titre suivant : « *The fishermen as a predator: numerical response of British Columbia gillnet fishermen to Salmon abundance* ». Il apparaît pourtant que cette analogie souffre de nombreuses limites. L'une d'entre elles est le fait que cette approche, sous le formalisme classique proposé par Lotka et Volterra (L-V), ne permet pas de décrire un certain nombre de comportements observés chez les pêcheurs¹⁸, par exemple leur comportement "d'adhérence" : dans un système L-V classique, la chute de l'abondance de la proie est toujours suivie de celle du prédateur. Or dans la réalité, ce n'est pas toujours le cas : les pêcheurs ne "disparaissent" pas systématiquement avec la ressource. Au contraire, il s'avère qu'ils peuvent rester dans une pêche même lorsque l'abondance de la ressource chute à des niveaux très bas. C'est ce comportement (le fait de rester, de "s'accrocher" à l'activité de pêche), que l'on dénomme du terme imagé "d'adhérence" ("*stickiness behaviour*")¹⁹. On mettra par exemple en évidence une illustration de ce comportement (dans sa version "économique"²⁰) au cours du Chap.2 lorsque l'on montrera par l'intermédiaire d'une Analyse de Viabilité (Béné and Doyen Annexe 4) que la régulation

¹⁷ Ce terme de "co-investissement" sera défini en détail dans l'introduction du chap.3.

¹⁸ Voir aussi à ce propos la section "*Dynamics of Harvesting Effort*" de l'ouvrage de Walters (1986 p.113 et suiv.).

¹⁹ Plus particulièrement dans ce cas, il s'agit de la 'version biologique' du comportement d'adhérence, celle créée par une chute de l'abondance de la ressource. On peut également imaginer une version 'économique' où cette fois ce n'est plus l'abondance de la ressource qui fait défaut mais la rentabilité économique de l'exploitation (coûts trop élevés, mévente de la production, etc.).

²⁰ Cf. note précédente.

des volumes de stockage permet aux armements, sous certaines conditions, de rester dans la pêche, même si pendant une période de la saison les coûts d'exploitation sont supérieurs à la valeur marchande des captures débarquées. Le formalisme L-V ne peut pas intégrer cette réalité.

La critique la plus sérieuse, néanmoins, que l'on puisse énoncer à l'égard du concept de Proie-Prédateur dans le cadre de l'étude des pêcheries provient du fait que, sous ce formalisme, l'évolution de la flottille est uniquement liée à celle de la ressource (et inversement). Il est clair pourtant que le devenir d'une flottille dépend aussi des contraintes et des perturbations issues de la dynamique du marché. C'est ainsi que l'on montrera, toujours au cours du Chap.2, que les chocs ayant lieu sur les marchés mondiaux de la crevette vont se répercuter au niveau de la pêche guyanaise par l'intermédiaire de la dynamique des prix de certaines espèces "indicateurs" (Cadren et al. Annexe 2). On montrera également, au cours de l'analyse du système de rémunération, comment les armements peuvent faire évoluer les stratégies de pêche des capitaines de manière à ce que la composition en taille des captures que ces derniers débarquent soit en accord avec les préférences du marché (Béné 1997). On voit au travers de ce dernier résultat que les contraintes du marché vont donc agir non pas simplement sur la relation marché-flottille mais jusque sur les processus définissant la relation ressource-flottille. Ce constat sera confirmé lors de l'étude des différents processus qui déterminent la répartition spatio-temporelle de l'effort de pêche (Béné 1996 Annexe 1). Il sera montré en effet au cours de cette analyse que les mouvements de la flottille, à l'échelle saisonnière mais aussi inter-annuelle, peuvent être expliqués en combinant les contraintes imposées par les fluctuations de la ressource à celles des marchés. Il est clair qu'une approche P-P, aussi complexe en soit le formalisme, ne peut pas intégrer la richesse de telles relations entre ressource, pêcheurs, armements et marchés.

Le concept central de la thèse : les systèmes-pêche

L'idée qui sera d'ailleurs défendue à partir du Chap.2, et qui apparaîtra comme le concept central de cette thèse, est qu'une pêche est en fait localisée à l'interface entre la ressource qu'elle exploite et les marchés sur lesquels elle exporte sa production. Sa dynamique résulte par conséquent du couplage entre la dynamique de cette ressource et celle des marchés -d'où le titre de cette thèse. Précisons cependant que cette dernière phrase ne signifie pas

pour autant que la dynamique d'une pêcherie ne résulte *que* du couplage de ces deux dynamiques ; on verra d'ailleurs qu'il existe des dynamiques endogènes qui sont centrales dans le fonctionnement d'une pêcherie comme, par exemple, celle créée par les relations sociales entre pêcheurs et armateurs. De même, on n'exclue pas l'existence et l'impact d'autres dynamiques endo ou exogènes telles que l'innovation technique ou le transfert d'information entre pêcheurs d'un même armement. Cette phrase signifie simplement que dans cette étude nous tenterons de considérer *simultanément* les impacts de la ressource et du marché sur la flottille. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle nous utilisons le terme couplage.

Une autre manière de se représenter cette réalité est de désigner l'interaction entre pêcheurs et ressource par le terme « système d'exploitation » et celle entre pêcheurs et marchés par le terme « système de production ». En suivant ces définitions, une pêcherie apparaît alors en même temps comme un système d'exploitation et un système de production²¹. Dans la suite de cette thèse on dénommera par le terme « Système-pêche » la combinaison { système d'exploitation + système de production }.

~oOo~

²¹ Il existe de nombreuses autres définitions pour ces termes et il semble que leur typologie porte sur des notions bien différentes et beaucoup plus techniques que celles que nous utilisons ici. Ainsi Badouin (IREE Montpellier, comm. pers., sept.94) propose la distinction suivante : « *l'un [le système de production] s'intéresse au mode de fonctionnement des unités de production, l'autre [le système d'exploitation] au dosage entre les diverses ressources productives. Pour prendre un exemple simple, deux exploitations peuvent utiliser un système de production identique mais fonctionner sur des modes différents selon que l'une pratique le faire-valoir direct et l'autre le fermage* ». De nombreux travaux ont déjà été proposés sur ce sujet (voir par exemple Badouin 1987 pour les systèmes agricoles, Anon. (1994) ou Catanzano and Mesnil (1995) pour les systèmes halieutiques). Notre objectif n'est pas ici de rentrer dans cette classification mais juste de souligner que le fonctionnement d'une pêcherie englobe à la fois une activité d'extraction d'une ressource renouvelable (i.e. de pêche à proprement parler) -ce que l'on a dénommé par le terme de "système d'exploitation"-, et une activité économique qui est de vendre le fruit de cette pêche -ce que l'on a nommé du terme de "système de production".

CHAPITRE 1.

DYNAMIQUE DE LA RESSOURCE INTERACTION AVEC LE SYSTÈME-PÊCHE

La seule observation du réel ne suffit pas à élaborer des connaissances.

R. Tomassone.

INTRODUCTION AU CHAPITRE 1

Le pêcheur va là où le poisson est. La trivialité du propos fait sourire. Il semble pourtant que cette réalité n'a pas toujours été prise en compte. Ainsi, comme nous l'avons noté dans l'Introduction Générale et comme le rappellent encore Allen and McGlade (1986: 1189) l'analyse des modèles classiques « *reveals a basic reluctance of managers to treat "fishermen" as an active, responsive part of the whole system.* » Pourtant, l'observation de la dynamique de n'importe quelle flottille le confirmera, la ressource est le premier facteur dont les variations affectent le comportement des pêcheurs. Liao (1979) ou Hilborn and Ledbetter (1979) observent par exemple que la répartition spatiale de l'effort de pêche des flottilles dépend de manière critique de celle des espèces qu'elles exploitent. Les travaux de Millington (1984) soulignent de même que les variations temporelles de l'effort de pêche sont elles aussi déterminées par celles de la ressource. Par conséquent, avoir comme objectif d'analyser la dynamique d'une pêcherie, ou en d'autres termes, le comportement des pêcheurs et leur capacité d'adaptation implique d'étudier en premier lieu la variabilité spatio-temporelle de la ressource. L'objectif de ce chapitre sera donc d'étudier la fluctuabilité de la ressource exploitée par la pêcherie crevettière guyanaise et de tenter d'en expliquer les principales caractéristiques.

Par rapport à cet objectif, une étape préliminaire sera d'intégrer les connaissances biologiques que les travaux précédents ont permis de mettre en évidence. L'espèce exploitée par la flottille guyanaise est la crevette tropicale *Penaeus subtilis*. Notre premier travail consistera donc à effectuer une synthèse bibliographique des études proposées sur cette espèce mais aussi sur les autres Penaeides présentes dans les diverses mers du globe. Cette synthèse bibliographique sera l'objet de la section 1 de ce chapitre.

De la lecture de ces études, il apparaîtra rapidement que le recrutement et la survie à l'intérieure des nourriceries¹ sont les deux éléments déterminant du cycle biologique chez les Penaeides. C'est certainement la raison pour laquelle la plus grande partie des travaux repor-

¹ Dans le cas des Penaeides les nourriceries (que nous dénommerons par la suite « nurseries » en accord avec la littérature classique) sont les endroits où les post-larves grossissent et passent au stade des juvéniles ; le « recrutement » est la quantité de juvéniles qui quitte la nurserie et rejoint le stock des adultes, devenant après cette migration vers la haute mer exploitable par la flottille de pêche.

tés dans la littérature s'est concentrée sur ces deux processus. L'objectif de toutes ces études était en particulier de tenter d'identifier les facteurs environnementaux qui agissent sur la survie et la sortie des post-larves au niveau des nurseries.

Malheureusement, mais peut-être est-ce là l'intérêt des synthèses bibliographiques, cette revue mettra également en évidence un certain nombre de contradictions entre plusieurs de ces travaux. Elle soulignera également une absence notable de connaissances sur des parties entières du cycle de *P. subtilis*. Ces divergences et ces lacunes doivent être interprétées comme l'illustration des difficultés auxquelles les scientifiques se trouvent confrontés dès lors qu'ils tentent d'identifier après précision les différentes étapes du cycle biologique des espèces marines. Cependant, en dehors des problèmes d'observation et d'acquisition de données particulièrement fréquents pour ces espèces marines, les difficultés rencontrées peuvent aussi être interprétées comme le symptôme de problèmes méthodologiques liés, entre autres, au choix des techniques et des variables utilisées. Ces problèmes méthodologiques peuvent être classés en quatre points.

□ Travailler sur le déterminisme du recrutement implique de manipuler des séries de données dont la structure temporelle (c'est-à-dire le fait que les données à l'instant présent dépendent en partie des valeurs aux instants précédents) soulève un certain nombre de problèmes du point de vue statistique. Dans la plupart des cas cela interdit l'usage des régressions classiques². Or, l'étude bibliographique montre que la majorité des travaux menés jusqu'à présent sur le recrutement des Penaeides l'a été en se basant sur des régressions multivariées classiques.

□ La nature est par essence non-linéaire et les facteurs déterminant le recrutement des Penaeides n'échappent pas à la règle. Très peu de travaux prennent cependant en compte cette non-linéarité, et les quelques exceptions introduisent des relations dont la forme est prédéfinie (relation exponentielle, logarithmique, etc.). Des algorithmes ont pourtant été développés depuis une dizaine d'années par rapport à ce problème. Ils permettent d'analyser la non-linéarité des relations sans en imposer la forme *a priori*. Bien que déjà largement adoptés dans d'autres domaines de recherche, ces outils sont encore très peu utilisés en écologie,

² Ce que l'on désigne ici par régressions classiques, ce sont les modèles du type : $y = \alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n$ (avec x_j : variable explicative, $j = 1, \dots, n$) qui, bien qu'ils puissent quelques fois inclure des retards, ne prennent pas systématiquement en compte la structure temporelle des données, à la différence des techniques d'analyse de séries temporelles qui, elles, ont été développées spécifiquement dans ce but.

avec cependant quelques exceptions notables, comme celles des études sur le recrutement des petits pélagiques.

□ Si le choix des outils apparaît primordial, la remarque s'applique également aux variables étudiées. L'analyse bibliographique des travaux précédents souligne cependant que seules les variables locales agissant sur l'environnement direct des post-larves sont généralement prises en compte dans les analyses (le débit des fleuves irriguant la zone de nurserie, la pluviométrie de la région, la salinité des eaux etc.). À l'heure où la communauté scientifique prend conscience des changements globaux intervenant à l'échelle planétaire et tente d'estimer l'impact que ces modifications peuvent avoir sur l'évolution des écosystèmes, il semble important de déterminer si une des origines possibles aux difficultés à identifier les facteurs déterminants du recrutement ne provient pas de la non-prise en compte de ces facteurs globaux dans les analyses.

□ Le quatrième point concerne le problème des échelles de temps. La plupart des analyses utilisent des données mensuelles ou annuelles (quelques autres des données trimestrielles) sans que les raisons de ce choix soient toujours clairement explicitées. Pour la majorité de ces travaux il semblerait d'ailleurs que ce soit la fréquence avec laquelle les données ont été enregistrées qui dicte l'échelle à laquelle les analyses statistiques sont ensuite effectuées. Cependant, de la même manière que pour l'approche spatiale on se demandait s'il n'était pas nécessaire d'intégrer plusieurs échelles géographiques (locale et globale), il paraît ici intéressant d'envisager que les processus impliqués dans le recrutement agissent simultanément à plusieurs échelles temporelles.

Les quatre points présentés ci-dessus nous ont servi de repères pour proposer une étude sur le déterminisme du recrutement de *P. subtilis* regroupant à différentes étapes de sa méthode les apports qui semblaient pouvoir pallier les déficiences identifiées. La présentation de ces apports méthodologiques et leur justification constituent la majeure partie de la section 2 de ce chapitre. Les résultats de l'étude sont ensuite présentés, toujours au niveau de cette section 2. L'étude en elle-même se trouve par contre en annexe (cf. Béné and Moguedet Annexe 3).

Une autre approche possible face un phénomène faisant intervenir de nombreux processus comme c'est le cas du recrutement des espèces marines est la modélisation dynamique. Cet outil d'analyse permet en effet, par le biais de modèles théoriques, de tester un certain nom-

bre d'hypothèses sur les systèmes empiriques en question. Or, dans le cas présent, l'observation des données empiriques indique que la ressource est animée d'oscillations saisonnières. Simultanément, l'analyse de l'effort de pêche souligne l'existence de mouvements saisonniers de la flottille à l'intérieure de la zone de pêche. Une question vient alors à l'esprit : les oscillations caractérisant la ressource sont-elles la cause ou la conséquence des mouvements saisonniers qui animent la flottille ? La réponse à cette interrogation est importante car elle peut offrir des éléments d'information sur la dynamique du recrutement. Nous sommes en effet devant deux scénarii possibles. (i) Si les mouvements de la flottille ne permettent pas d'expliquer les fluctuations saisonnières de la ressource, cela implique que la cause de ces oscillations se trouve ailleurs, certainement dans l'impact de l'environnement sur les premiers stades du cycle, ceux-là même qui constitueront ensuite le recrutement. Cela signifierait donc que l'on aurait alors affaire à un recrutement saisonnier. (ii) L'interprétation de l'hypothèse alternative n'est malheureusement pas aussi claire. Si les oscillations observées au niveau de la ressource sont le fruit de l'interaction entre cette ressource et la flottille, cela n'exclue pas la possibilité d'un impact de l'environnement sur les stades constituant le recrutement. Dans le cas de cette seconde hypothèse, il sera par conséquent plus difficile de savoir si ce recrutement est ou non saisonnier.

Pour tenter de répondre à ces questions, un modèle dynamique a été construit. Ses principales caractéristiques, ainsi que son schéma conceptuel, sont présentés dans la section 3 de ce chapitre. Les résultats des analyses sont eux aussi donnés dans cette même section 3. Le détail du modèle est par contre explicité en annexe (cf. Béné and Lobry Annexe 5).

~ oOo ~

SECTION 1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : ENSEIGNEMENTS ET INTERROGATIONS

1.1. Rappel du cycle de *Penaeus subtilis*

Pour l'ensemble des espèces ou sous-espèces de la famille des Penaeidae, le cycle biologique est relativement court, aux environs de 18 mois (Dall et al. 1990). Ce cycle est constitué par quatre stades caractéristiques : les larves, les post-larves, les juvéniles et les adultes (cf. Fig.1.1). Habituellement, la ponte a lieu en mer, à une profondeur variable selon les espèces. Les larves planctoniques sont ensuite transportées vers la côte par les courants. La fin de ce stade, après trois à quatre semaines, correspond à l'installation des post-larves dans les nurseries. C'est la préférence pour un substrat particulier qui semble déterminer le lieu des nurseries (Staples et al. 1984).

Pour ce qui est de *Penaeus subtilis*³ en Guyane, les études antérieures s'accordent pour affirmer que les nurseries se trouvent localisées dans des zones dessalées, à l'embouchure des fleuves, mais aussi dans les marais et la mangrove constituant la plus grande partie des côtes guyanaises (Rossignol 1972, Garcia et al. 1984, Lhomme 1992)⁴. La période passée dans ces nurseries est variable. Il semble qu'elle dure environ 2 à 3 mois. Une fois cette période écoulée, les individus, devenus des juvéniles, migrent de nouveau vers le milieu marin. Ils s'établissent initialement dans les zones côtières, en eaux peu profondes. C'est ensuite au fur et à mesure de leur maturation et de leur grossissement que ces individus migrent vers des eaux plus au large.

³ Encore appelée "*brown shrimp*", ce qui est une source possible de confusion dans la mesure où ce nom commun est aussi utilisé pour désigner l'espèce *Penaeus aztecus* exploitée par la flottille crevettière américaine du nord du Golfe du Mexique. Voir par exemple Rossignol (1972) qui parle de *P. aztecus subtilis*. L'explication anecdotique à l'emploi d'un même nom pour deux espèces séparées géographiquement de plus de 2500 km est à rechercher dans l'histoire de la pêche guyanaise. Comme nous le découvrirons au cours du second chapitre ce sont en effet ces crevettes américaines venues du Golfe du Mexique qui développèrent la pêche guyanaise au début des années 60.

⁴ Vendeville (1992) propose une variante intéressante de ce cycle classique où il suggère, à la différence de ses prédécesseurs ou contemporains, que *P. subtilis* fait partie de ces espèces de Penaeidae dont les nurseries ne sont pas localisées dans les embouchures des fleuves ou les mangroves mais plutôt dans les eaux peu profondes des zones côtières. Les individus observés lors des échantillonnages dans les embouchures et les marais seraient alors les individus amenés par la marée. Cette hypothèse d'intrusion estuarienne de post-larves reste cependant à vérifier.

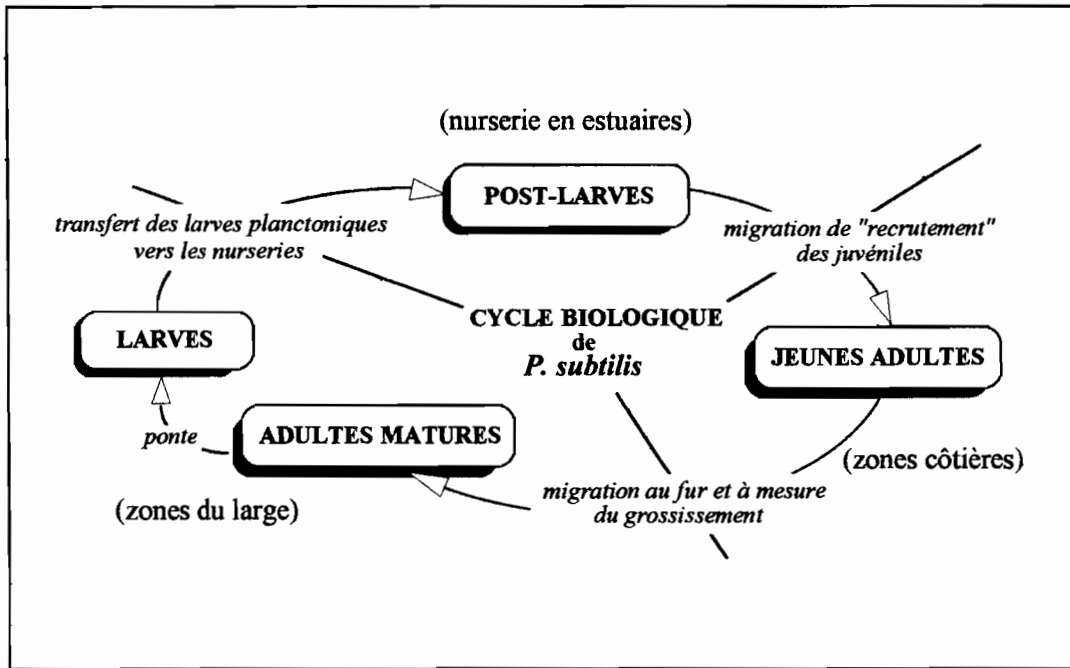


Fig.1.1. Les quatre stades caractéristiques du cycle biologique de *Penaeus subtilis* et les différentes migrations qui relient entre eux ces stades.

Ce survol rapide du cycle biologique est suffisant pour nous permettre de souligner trois points essentiels de la dynamique du stock :

- La partie du cycle relative à la période passée en nurserie se déroule en zone dessalée (marais, mangrove), signifiant que les stades correspondants (les post-larves) se trouvent alors sous l'influence de facteurs climatiques terrestres dont la variabilité (et en particulier la saisonnalité) tranche nettement avec la stabilité caractérisant le milieu marin à ces latitudes.
- En tenant compte du temps nécessaire à la migration des larves et à celui passé dans les nurseries, la brièveté du cycle signifie que la partie exploitable du stock s'étale sur à peine plus d'un an. La conséquence directe est que les pêcheries crevettières exploitent généralement une seule classe d'âge qu'elles suivent toute au long d'une saison de pêche⁵.
- Bien qu'il ne soit pas exclu que les adultes puissent se rapprocher de la côte, notamment lors de leur période de ponte (Dall et al. 1990) le fait qu'ils se déplacent progressivement vers les eaux plus profondes au cours de leur maturation entraîne l'existence d'un « gradient » de taille en fonction de la profondeur. Ce gradient qui a été observé pour *P.*

⁵ Cette caractéristique n'est pas spécifique à *P. subtilis*. Plusieurs auteurs travaillant sur d'autres *Penaeidae* ont déjà intégré cette particularité dans leurs études. Voir par exemple Clark and Kirkwood (1979).

subtilis par Venaille (1979) se traduit notamment par le fait que les petits individus sont préférentiellement trouvés à la côte alors que les individus matures sont essentiellement capturés au large (Dintheer et Rosé 1989). Cette caractéristique est d'ailleurs bien connue et exploitée par les professionnels.

1.2. Les travaux précédents : divergences et incertitudes

1.2.1. Le rôle de l'environnement

Bien que les *Penaeides* aient été très largement étudiées durant les vingt dernières années, il s'avère qu'un certain nombre d'incertitudes concernant la dynamique de ces stocks persiste encore aujourd'hui. Conséquence ou origine de ces incertitudes, le discours des biologistes ayant travaillé sur ces espèces est entaché de divergences mais aussi de contradictions qui ne facilitent pas toujours l'interprétation des faits observés.

Ainsi, bien que les principaux stades du cycle des *Penaeides* semblent désormais identifiés, le problème du recrutement chez ce type d'espèce reste entier. Pourtant, comme la majorité des espèces marines dont l'exploitation a donné lieu au développement d'un secteur économique organisé en industrie, les crevettes tropicales ont fait l'objet d'un nombre élevé d'études tendant à identifier le ou les facteur(s) gouvernant le recrutement de ces stocks. Malheureusement, s'il est un consensus qui rallie les scientifiques à propos des espèces marines, c'est bien celui affirmant que le déterminisme du recrutement est un des problèmes les plus difficiles qui leur aient été offerts d'essayer de résoudre (Cushing 1973, Sissenwise et al. 1988, Walters and Collie 1988, Walters 1989, Tyler 1992). Les crevettes tropicales n'échappent pas à la règle. Dans les études tentant d'expliquer les variations du niveau d'abondance de la ressource ou de celui des volumes de captures, des éléments comme la turbidité (Garcia 1978), la température (Barrett and Gillespie 1973, Penn 1976, Hettler 1992), la pluviométrie (Gunter and Hildebrand 1954, Ruello 1973) le débit des fleuves (Browder 1985, Gracia 1989), la salinité (Barrett and Gillespie 1975), sont quelques uns des facteurs environnementaux les plus fréquemment cités. Garcia suggère même d'intégrer l'indice de Wolf (reflétant l'activité solaire) (Garcia and LeReste 1981, Garcia et al. 1984).

Les contradictions qui caractérisent les conclusions de ces différents travaux sont nombreuses. Pour *P. aztecus*, par exemple, Hildebrand and Gunter (1952) trouvent une relation positive entre la pluviométrie et les volumes de captures, alors que pour le même stock, le

GMSFC (Gulf of Mexico Shrimp fishery Council) affirme l'existence d'une relation négative avec le débit du Mississippi (1981). On aurait cependant pu penser que la pluviométrie et le débit des fleuves ont des impacts étroitement corrélés... Toujours à propos du débit des fleuves, mais pour *P. setiferus*, une autre crevette du Golfe du Mexique, Gunter and Edwards (1969) puis Gracia (1989) concluent à un impact positif de ce facteur sur le stock, alors qu'entre temps Barrett et Gillespie avaient au contraire observé un impact négatif (Barrett and Gillespie 1973, 1975). Le stock guyanais de *P. subtilis* a lui aussi fait dans le passé l'objet de nombreuses investigations et n'est pas exempt de résultats singuliers. Garcia et al. (1985: 285) par exemple concluent à une relation entre le niveau de recrutement annuel et la pluviométrie, telle que, selon leurs propres termes, cette relation apparaisse « *nearly constant and independent [over the period 1968-71], good and positive between 1972 and 1976 and strangely enough good but negative from 1974 to 1982* ».

1.2.2. Incertitudes sur le cycle biologique des Penaeides

Étroitement associé à ces tâtonnements se trouve le fait que la dynamique qui relie entre eux les stades du cycle des Penaeides n'est pas encore parfaitement déterminée. En particulier les scientifiques ne s'accordent toujours pas sur le profil annuel de ponte pour les crevettes tropicales et équatoriales⁶. Nous citerons ici Dall et al.⁷ (1990: 289) pour illustrer l'ambiguïté qui règne sur cet aspect de la dynamique du cycle. Concernant les espèces des eaux équatoriales, ils écrivent « *Close to the equator, most penaeids appears to spawn throughout much of the year, although it may not be uniform in all months.* » Un peu plus loin cependant on peut lire (1990: 290) : « *Two main spawning periods in each year have been observed in a number of tropical Penaeus and Metapenaeus species, including several populations close to the equator.* » (souligné ajouté). Alors ponte continue ou ponte bimodale ? En fait il y a controverse sur le temps de génération des populations en question et sur la manière dont la bimodalité, si elle existe, est transmise des premiers stades au stock d'adultes. Par rapport à cette éventuelle bimodalité de la ponte, deux hypothèses

⁶ Pour ce qui est des crevettes des régions tempérées, l'influence de la température sur la dynamique de reproduction est clairement identifiée et l'hypothèse d'une ponte unimodale accompagnée d'une période pour le recrutement est généralement la conclusion qui est retenue.

⁷ Le choix de s'appuyer à de très nombreuses reprises au cours de cette partie « biologie » sur les travaux de Dall, Hill, Rothlisberg et Staples n'est pas un hasard. Ces auteurs sont parmi ceux qui ont le plus publié sur les Penaeides et leur ouvrage en commun "The Biology of the Penaeidea" de 489 pages exclusivement consacrées à la biologie des Penaeides est le travail le plus récent et le plus complet qu'il nous ait été proposé de lire depuis les travaux de Garcia et LeReste (1981).

s'affrontent. Hall (1962) propose une dynamique annuelle de la population avec un temps de maturation d'environ un an, où la cohorte (ou génération) 'de printemps' alterne avec celle 'd'automne' et véhicule ainsi, au travers de la maturation tardive, la bimodalité de la ponte au stock des adultes. Rothlisberg et al. (1985) au contraire défendent l'hypothèse d'une maturation courte de six mois et proposent une dynamique animée par deux générations reliées entre elles par des contributions égales de la ponte de printemps et de celle d'automne⁸.

1.2.3. Le recrutement de *P. subtilis* : uni, bi, ou plurimodal ?

En Guyane, les chercheurs de l'IFREMER et de l'ORSTOM ayant travaillé sur le problème du recrutement affirment observer un profil saisonnier, mais n'arrivent pas, en revanche, à se mettre d'accord sur le nombre de pics caractérisant ce profil. Garcia et al. (1985: 244) observent un seul pic : « *The average annual cycle [du recrutement] (...) indicates a main recruitment period from March to June* ». Dintheer et Rosé concluent, eux aussi, à un seul pic de recrutement mais d'après leurs observations, ce dernier n'aurait pas lieu entre mars et juin comme l'observe Garcia mais plus tard dans l'année : « *le troisième trimestre apparaît comme la principale saison de recrutement et se traduit par une grande abondance dans les captures* ». (Dintheer et Rosé 1989: 4). Lhomme (1992: 174) suggère quant à lui « *Trois pics d'abondance, centrés respectivement sur avril-mai, septembre-octobre et janvier* ». Enfin, le rapport du Third Workshop on the Biological and Economic Modelling of the Shrimp Resource of the Guyana-Brazil Shelf, propose, quant à lui, une saisonnalité marquée par quatre pics : « *Recruitment occurs four time a year. Cohorts appear in January, May, July and October* » (WECAFC, 1991).

1.3. Interrogations

Au-delà des désaccords apparents entre ces différents travaux, c'est la difficulté du problème que représente l'étude de ces espèces marines et l'ampleur des efforts que nécessiterait la recherche d'une meilleure connaissance de leurs cycles qu'il faut souligner. D'ailleurs

⁸ La situation n'est guère plus claire concernant les crevettes tropicales. Bien qu'il y ait accord sur l'hypothèse d'un profil bimodal de la ponte sous les tropiques, là encore la contribution des deux générations au renouvellement de la population n'est pas claire. Garcia (1985, 1988) propose même une troisième alternative aux deux précédentes hypothèses (voir Dall et al. 1990 pour une synthèse).

comme se plaisent à le préciser Dall et al. eux-mêmes dans l'introduction de leur synthèse sur ce problème (1990: 288) « *Given the wide variability in life-history types and the range of habitats occupied by different life-history stages, it is not surprising that penaeid prawns exhibit rather complex seasonal life-history patterns* ».

En conclusion et en guise de transition pour la section à venir, retenons de cette synthèse bibliographique qu'un certain nombre de questions essentielles concernant le stock de *P. subtilis* restent encore à l'heure actuelle sans réponse. En particulier, il est bien difficile de savoir si le recrutement de cette espèce se fait de manière continue, comme semblent le montrer la majorité des espèces équatoriales, ou de façon saisonnière, comme le suggèrent certains auteurs ayant travaillé sur ce stock⁹. Ces incertitudes nous ont conduits à nous poser deux questions :

(i) Est-il réellement trop ambitieux de vouloir chercher à déterminer les mécanismes sous-jacents au recrutement de *P. subtilis*, c'est-à-dire, de trouver une relation entre le niveau d'abondance des jeunes crevettes tout juste arrivées dans la pêcherie et un certain nombre de facteurs environnementaux, voire même avec l'abondance du stock des géniteurs quelques mois auparavant ?

(ii) À défaut de pouvoir l'expliquer, est-ce au moins possible d'identifier le profil de ce recrutement ? En d'autres termes, est-ce que les connaissances actuelles acquises au cours des différents programmes précédents mais aussi au travers du dépouillement des données commerciales peuvent nous permettre de déterminer le profil annuel de sortie des nurseries ?

Ces deux questions sont celles auxquelles nous allons tenter de répondre au cours des deux sections qui suivent.

~ o0o ~

⁹ Ces auteurs reconnaissent d'ailleurs pour la plupart que devant le peu d'information disponible, les conclusions auxquelles ils aboutissent sont plus souvent le reflet de leurs connaissances acquises sur d'autres espèces que les résultats des travaux menés sur le stock Guyanais.

SECTION 2. LE DETERMINISME DU RECRUTEMENT
CHEZ *PENAEUS SUBTILIS*

2.1. Motivations de l'étude

Le fait qu'aucun consensus ne semble s'être dessiné sur le ou les facteurs environnementaux jouant un rôle prépondérant dans le déterminisme du recrutement chez les Penaeides souligne la complexité du problème. Mais cela soulève en même temps la question de la pertinence des techniques utilisées jusqu'à présent pour tenter de répondre à cette question. L'analyse des travaux effectués précédemment sur ce problème met en évidence quatre limitations majeures dans la manière avec laquelle cette question a été abordée jusqu'à présent. Ces limitations sont :

- ☐ La non-prise en compte systématique de la structure temporelle des données étudiées.
- ☐ La non-prise en compte de la non-linéarité des processus induits et explicatifs.
- ☐ L'utilisation d'une seule échelle spatiale, celle incluant les facteurs locaux en relation directe avec le processus étudié.
- ☐ L'utilisation d'une seule échelle temporelle, qui ne s'avère pas toujours adaptée au pas de temps caractéristique du phénomène étudié.

On se propose de revenir en détail sur ces quatre points et de préciser les techniques ou les méthodes que nous avons adoptées pour tenter de pallier chacune de ces limitations.

2.2. Savoir prendre en compte la structure temporelle des populations

La lecture des articles traitant du recrutement des Penaeides met rapidement en évidence le fait que la méthodologie de base sur laquelle s'appuie la majorité de ces travaux est toujours la même. C'est celle qui associe l'usage des régressions multi-variables¹⁰ à la recherche des corrélations entre indices d'abondance d'une population et variables environnementales. Le tout est ensuite analysé aux retards correspondant à des intervalles de temps

¹⁰ dans le sens précisé dans la note 2 p.20.

'biologiquement pressentis' ¹¹. La justification de ces retards ('lags') basée sur l'observation empirique -et théoriquement recevable- de l'existence de réponses retardées des systèmes biologiques aux facteurs exogènes -ici environnementaux-, imposa très rapidement la notion restrictive et statique de causalité antérieure unique (dans le sens : fixée).

Mais tenter d'exprimer les évolutions induites d'un système -biologique de surcroît- par une simple procédure de retards, simplement parce que cette approche correspond à un schéma mécanique logique et mentalement imaginable, est dangereuse. Cette conception, telle qu'elle est intégrée dans les régressions multi-variables, doit être abandonnée au profit d'une approche dynamique intégrant les évolutions et les réponses sous forme de processus causaux liés à la structure temporelle des séries.

En effet, en écologie, une des principales caractéristiques, d'ailleurs partagée avec l'économie, est que la majorité des variables sur lesquelles les scientifiques sont amenés à travailler possèdent une structure temporelle; elles sont dynamiques : l'état d'une variable à un instant donné X_t (par exemple l'abondance d'une population) est fonction de cet état à l'instant précédent X_{t-1} . Cette caractéristique est principalement due au fait que l'on a affaire à des populations d'individus qui évoluent sous l'action de processus biologiques agissant essentiellement au niveau individuel. En d'autres termes, les états successifs d'une même variable ne sont pas indépendants les uns des autres, ils sont autocorrélés. C'est cette autocorrélation que l'on retrouve exprimée dans la structure temporelle de la variable $X_t = f(X_{t-i}, i=1,2,...)$. Par conséquent, le principal reproche que l'on puisse faire aux précédentes études est que, en se basant sur l'utilisation des régressions, elles n'ont pas suffisamment porté d'attention sur la composante temporelle des séries et sur la spécification de la structure dynamique en découlant ¹².

Au-delà de cette limitation conceptuelle, l'existence d'autocorrélations au sein des séries entraîne de nombreuses conséquences en terme d'inférence statistique. Cet aspect de la

¹¹ Voir par exemple les travaux de Hildebrand and Gunter 1952, Hunt *et al.* 1980, Hettler and Chester 1982, Suther and Christmas 1983, Staples *et al.* 1984, Browder 1985, Penn and Caputti 1986, Gracia 1989, Hettler 1992, Hannah 1993, etc.

¹² Maddala (1992) souligne que cette erreur n'est pas spécifique aux écologistes. Il rappelle que pendant longtemps, il y eut très peu de relations entre économétriciens et spécialistes des séries temporelles. Les économétriciens concentraient leurs efforts essentiellement sur la théorie économique et sur les relations instantanées entre variables. Les retards étaient introduits, mais uniquement en fonction des schémas pré-établis par cette théorie économique et non de façon systématique comme cela est fait en analyse de séries temporelles.

question nécessite cependant rapidement d'adopter un langage et une argumentation relativement techniques. Citons par conséquent simplement et verbalement deux inconvénients directs. La non-prise en compte de la composante autoregressive¹³ peut entraîner des erreurs dans la spécification des modèles. En particulier, l'augmentation artificielle du coefficient de corrélation due à la présence d'autocorrélation (des séries avec elles-mêmes) et/ou de corrélations croisées (des séries entre elles) (Durbin 1970, Harvey 1984, Tyler 1992, Hannah 1993), ou l'usage abusif de certaines techniques de lissage ("*smoothing procedures*") pour éliminer le bruit (Kope and Botsford 1990), augmentent le risque de corrélations illicites. On est alors amené à conclure à l'existence de corrélations entre des variables qui en réalité n'existent pas¹⁴.

Ces deux types de limitations (conceptuelle et technique), qui affectent les régressions multiples¹⁵ dès lors qu'on utilise sur des séries possédant une structure temporelle, amènent à se tourner vers les analyses de séries temporelles, plus adéquates pour ce genre d'étude. L'objectif majeur de ces outils est en effet l'identification, l'analyse et la prise en compte de la dynamique, c'est-à-dire de la structure temporelle, des variables étudiées. Nous avons par conséquent adopté ces analyses de séries temporelles pour notre étude sur le recrutement de *P. subtilis*. Nous nous sommes appuyés plus particulièrement sur des analyses multi-variées utilisant les modèles ARIMA (modèles autorégressifs intégrés à moyennes mobiles). Plusieurs méthodes d'estimation de ces modèles ARIMA étant possibles, nous avons adopté la méthode la plus classique, celle de Tiao and Box (1981) développée en application directe aux travaux théoriques de Box and Jenkins (1979).

2.3. Une nature non-linéaire

Mais l'adoption de ces modèles ARIMA en lieu et place des régressions multi-variables ne représente pas une réactualisation méthodologique suffisante. Que ce soient les régressions multi-variables il y a encore peu de temps, ou les analyses de séries temporelles aujourd'hui,

¹³ On parle indifféremment de composante autoregressive ou d'autocorrélation d'une série.

¹⁴ Mendelsohn (1991) par exemple propose le cas extrême où deux séries parfaitement indépendantes mais caractérisées toutes deux par des évolutions de type sinusoïdales vont, si elles sont associées, présenter une composante sinusoïdale commune au niveau de leurs corrélations croisées, ce qui peut aboutir à l'identification erronée d'une corrélation entre les deux séries.

¹⁵ Quelques techniques ont été proposées pour essayer de compenser ce genre de problème (voir par exemple Bayley and Hammersley 1946, Garrett and Toulany 1981, Drinkwater and Myers 1987). Ces techniques ne sont cependant que des solutions *ad hoc*.

toutes ces techniques sont basées sur des algorithmes d'estimation linéaires¹⁶. L'usage des techniques linéaires dans les statistiques inférentielles s'explique par l'emprise qu'ont eu les équations linéaires sur l'ensemble des disciplines jusque dans les années 60¹⁷. Il n'y a cependant aucune raison biologique (ou même théorique) pour que les choses soient ainsi agencées et la remise en question de ce concept de linéarité n'est plus réversible (Efron and Tibshirani 1991). De nombreux scientifiques de disciplines très variées ont d'ailleurs déjà intégré cette non-linéarité dans leurs recherches, et la littérature est de ce fait de plus en plus envahie par des articles se réclamant des techniques d'analyses 'non-linéaires'. Cette évolution normale correspond à l'observation empirique selon laquelle les réponses des systèmes biologiques sont rarement de nature strictement linéaire.

Les travaux concernant l'impact environnemental sur l'abondance des stocks de *Penaeides* sont en accord avec cette observation. Garcia et LeReste (1981), Garcia et al. (1985), Staples et al. (1984), Browder (1985), Gracia (1989) Dall et al. (1990) avaient déjà noté l'apparente non-linéarité qui caractérise les relations entre les stocks de crevettes et les variables environnementales. Il est intéressant de noter que dès lors que l'on accepte cette non-linéarité, bon nombre des résultats qui apparaissaient jusque là contradictoires deviennent interprétables en terme de relations non-linéaires. Cette situation n'est pas sans rappeler celle qu'a connue la recherche halieutique il y a quelques années à propos des petits pélagiques. Aucune étude ne semblait faire l'unanimité sur le signe à associer entre l'indice d'upwelling et l'abondance du recrutement chez les *Clupeides*, et le débat resta ouvert jusqu'à ce qu'il soit finalement montré que cette relation était probablement une relation en 'cloche' ("*dome-shaped*"), positive pour les faibles valeurs de l'indice et négative pour les

¹⁶ Néanmoins, des méthodes d'estimation et d'identification de modèles auto-régressifs non-linéaires sont actuellement développées et appliquées dans le domaine des séries temporelles (cf. certains travaux très récents présentés aux séminaires du GREQAM de Marseille). Une autre approche possible est celle des réseaux de neurones.

¹⁷ Dans son ouvrage « Dieu joue-t-il aux dés? », le mathématicien Ian Stewart nous offre plusieurs commentaires colorés sur cette 'période linéaire'. Nous nous permettons de citer le passage suivant : *L'habitude linéaire s'est si bien enracinée que vers les années 40 et les années 50, de nombreux scientifiques et ingénieurs ne connaissaient pratiquement rien d'autre. « Dieu n'aurait pas eu la mauvaise grâce, disait un ingénieur célèbre, de mettre la nature en équation non linéaire. » Une fois de plus, la divinité portait le chapeau pour l'aveuglement de l'humanité. Cet ingénieur voulait dire qu'il ne savait pas comment résoudre les équations non linéaires, mais il n'était pas assez honnête pour l'admettre. La linéarité est un piège. Le comportement d'équations linéaires (...) est loin d'être typique. Mais si vous décidez que seules les équations linéaires méritent réflexion, une autocensure s'installe. Vos manuels se remplissent des victoires de l'analyse linéaire; ses échecs sont si profondément enterrés que leurs tombes ne portent pas d'inscription et que l'on ne les remarque même pas. Comme le XVIII^e siècle qui a cru dans un monde réglé comme une horloge, la moitié du XX^e siècle a cru dans un monde linéaire.* (Stewart 1992: 126).

fortes valeurs. L'explication se trouvait donc dans l'existence d'une « fenêtre optimale » mise en évidence par l'intermédiaire de ces techniques non-linéaires (Cury et Roy 1989). L'usage de ces techniques n'a donc rien d'un phénomène de mode et leurs applications en écologie vont se généraliser, même si les logiciels développés pour associer le concept de non-linéarité aux analyses statistiques multi-variables sont encore à manipuler avec prudence (Cury et al. 1995). Nous avons, en ce qui nous concerne, opté pour l'algorithme ACE développé par Breiman and Friedman (1985) (cf. Encadré 1.1).

Encadré 1.1. Les techniques non-linéaires.

Parmi les logiciels de régressions "non-linéaires", citons ceux de Breiman and Friedman : Alternative Conditional Expectations (ACE) (Breiman and Friedman 1985), de Tibshirani : Additivity and Variance Stabilisation (AVAS) (Tibshirani 1988) ou de Hastie et Tibshirani : General Additive Interactive Modelling (GAIM) (Hastie and Tibshirani 1990). Sans rentrer dans les détails techniques, la philosophie de ces logiciels est la suivante : alors que dans les analyses non-linéaires classiques, la forme de la transformation imposée aux variables est définie *a priori* (par exemple par une fonction logarithmique), dans ce type d'approche, la transformation n'est pas définie initialement. À chaque jeu de variables correspond une combinaison de transformations « optimales » définie par rapport à un critère donné. Une des différences entre tous ces logiciels concerne justement le choix du paramètre qui sert de critère pour l'identification de la transformation optimale. Par exemple, ACE, l'algorithme que nous avons utilisé pour nos analyses, recherche les transformations qui maximisent le coefficient de corrélation entre la variable dépendante et les variables explicatives. Notons qu'Hastie and Tibshirani (1990) ont montré que le choix de ce critère est sous-optimal en terme de variance pour les séries transformées.

2.4. La combinaison des facteurs globaux et locaux

Dans la totalité des travaux menés sur les Penaeides, les facteurs environnementaux qui sont introduits et testés sont des facteurs locaux, dans le sens géographique du terme. Le raisonnement sous-jacent à cette approche est évident et justifiable. Cependant, à l'heure où la communauté scientifique mondiale s'interroge sur les changements globaux à l'échelle planétaire, que ce soit d'un point de vue général (WMO 1986, Smith 1990, Knox 1993, Rozanski et al. 1992) ou en rapport avec la pêche (Bakun 1990, Glantz 1990, Francis 1990), il nous

est apparu intéressant d'essayer de savoir si des facteurs agissant au niveau de ces changements globaux n'auraient pas d'impacts directs et visibles sur les populations marines locales. Fromentin et Planck (1996) ont pu par exemple montrer que la dérive Nord-Atlantique semblait jouer un rôle important sur les écosystèmes aquatiques de l'Atlantique Nord et en particulier sur l'évolution à long terme du phytoplancton. Dans sa motivation, notre approche est comparable à ces travaux. C'est ainsi que pour cette étude du recrutement de *P. subtilis*, nous avons cherché à savoir si l'Amazone, que l'on peut considérer comme un indicateur de la pluviométrie au niveau du continent Sud-Américain, pouvait avoir un impact sur le stock local de *Penaeides* de Guyane Française¹⁸. Les questions qui découlent de cette interrogation préliminaire sont nombreuses. Dans l'éventualité où l'Amazone apparaisse avoir un impact significatif sur la dynamique du stock, on peut se demander de quelle manière cet impact "global" se combine avec les facteurs environnementaux locaux tels que le débit des fleuves guyanais ou la pluviométrie locale ? En particulier, est-ce que ces différents facteurs agissent à des échelles temporelles identiques ou au contraire à des échelles temporelles distinctes ?

2.5. Le choix des échelles temporelles

Ce qui est applicable aux échelles spatiales l'est également aux échelles temporelles. Aucune étude parmi celles qui se sont intéressées au problème du recrutement des *Penaeides* n'a, à notre connaissance, tenté d'intégrer simultanément plusieurs échelles temporelles. Les échelles auxquelles ces analyses sont effectuées ne sont généralement que le reflet du pas de temps utilisé pour l'enregistrement des données environnementales intégrées à l'analyse. Rares sont les études qui adoptent une échelle d'analyse fonction de la dynamique des animaux étudiés. Pourtant il paraît évident que l'échelle fonctionnelle d'un anchois n'est pas la même que celle d'un céphalopode. Comme le rappellent Burel et al. (1992: 94) « *il n'y a pas de niveau spatio-temporel universel et défini a priori, on ne peut les reconnaître qu'a posteriori, en fonction du processus écologique étudié* ». Adoptant ce principe dans le cas des *Penaeides*, il apparaît qu'une des échelles qui se devait d'être adoptée est celle de la saisonnalité, puisque à la fois le stock et les différents facteurs climatiques constituant son envi-

¹⁸ Avec un volume annuel estimé à $5.20 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (Oltman 1967 in Prost 1990), l'Amazone représente environ 20% de la décharge annuelle d'eau douce dans les océans. On estime que l'influence des eaux amazoniennes est perceptible jusqu'au Venezuela (Muller-Karger et al. 1988).

ronnement sont caractérisés par une saisonnalité marquée. Une partie de nos analyses a, par conséquent, été effectuée à l'échelle bi-annuelle¹⁹, ce qui, au vu du cycle biologique de *P. subtilis*, peut être considéré comme l'échelle fonctionnelle de moyen-terme du stock²⁰. En revanche il était vraisemblable que cette échelle bi-annuelle était trop large pour capturer la dynamique de croissance de chaque cohorte. Une échelle temporelle plus courte, de l'ordre du mois ou de la quinzaine, devait par conséquent être aussi prise en compte dans l'analyse, de manière à suivre cette dynamique de cohorte. La seconde échelle à laquelle les analyses furent menées fut donc l'échelle mensuelle (correspondant à ce que l'on peut considérer comme l'échelle fonctionnelle de court-terme du stock²¹).

2.6. Les résultats

La Fig.1.2 regroupe les différentes étapes de l'analyse du recrutement de *P. subtilis* telle qu'elle a été effectuée. Le Tab.1.1 récapitule les modèles linéaires et non-linéaires qui ont été estimés aux échelles mensuelles et bi-annuelles et les Fig.1.3 et 1.4 illustrent les transformations optimales des variables²² associées aux deux modèles non-linéaires. Les résultats détaillés de cette analyse sont donnés dans Béné and Moguedet (cf. Annexe 3).

2.7. Interprétation

2.7.1. Écologie appliquée : le déterminisme du recrutement

Les conclusions de ce travail peuvent être interprétées de trois manières différentes. Par rapport à l'objectif initial, c'est-à-dire l'identification des facteurs intervenant sur le recrutement, on peut mettre en avant les remarques suivantes : sur la dynamique de court-terme, en dehors des liens d'autocorrélation de la série dépendante à 1 et 12 mois (Fig.1.3.a et 1.3.b), seul le débit des fleuves locaux apparaît avoir un impact significatif sur l'indice de

¹⁹ Les séries bi-annuelles ont été obtenues à partir de séries initiales mensuelles par une procédure de moyennisation centrée sur les mois de mars et de septembre, ce qui correspond à la discrétisation produisant les plus grands écarts entre les valeurs successives dans les séries. Ces mois correspondent en effet aux mois centraux de la saison sèche (juillet-décembre) et de la saison des pluies (janvier-juin). Ce choix permet de réduire les problèmes d'autocorrélation dans les séries bi-annuelles.

²⁰ On rappelle que les individus vivent environ 18 mois.

²¹ On considère que la dynamique de "long-terme" d'un stock concerne les processus adaptatifs qui traduisent les réponses observables à l'échelle inter-générationnelle -et ceci, même si ces réponses 'retardées' peuvent être stimulées par des éléments agissant à l'échelle du court ou du moyen terme.

²² Les variables ont de plus été log-transformées ou différenciées selon l'analyse concernée (une série x_t est différenciée lorsqu'elle est transformée en $z_t = x_t - x_{t-1}$).

recrutement (**Fig.1.3.c**). Plus précisément cet impact est négatif, avec un retard $L = 6$ mois, ce qui correspond à l'époque où les larves sont transportées vers les nurseries. Les liens d'autocorrélation de la variable dépendante à $L = 1$ et $L = 12$ sont typiques d'une variable animée par une dynamique saisonnière. Le fort coefficient de corrélation obtenu pour ce modèle mensuel (75% pour le modèle linéaire et 81% pour le modèle non-linéaire) est en partie due à cette saisonnalité. Sur le moyen-terme en revanche (**Fig.1.4**), c'est le débit de l'Amazone qui apparaît avoir un impact prédominant²³. Cet impact, positif pour la plus grande partie des valeurs (cf. **Fig.1.4.b**), est associé à un retard $L = 1$, ce qui équivaut pour l'échelle bi-annuelle à un retard de six mois par rapport à l'arrivée des recrues dans la pêcherie. Ce retard correspond donc là encore à la période où les larves rentrent dans les nurseries. Le fait que l'impact soit positif souligne la possibilité d'une arrivée de larves par le Sud de la zone, en provenance de la région brésilienne. Lorsque le débit de l'Amazone devient trop important, en revanche, (**Fig.1.4.b**, partie droite de la courbe) la relation s'inverse. Un débit trop fort de l'Amazone pendant la saison des pluies aurait donc un impact négatif sur le recrutement 6 mois plus tard, via l'impact qu'il a sur les larves au moment de leur entrée dans les nurseries.

La variable (Adl) représente l'abondance du stock des adultes. Le retard avec lequel cette variable apparaît dans l'analyse est $L = 2$. Cela correspond à l'état du stock un an avant la période considérée, ce qui est cohérent par rapport au cycle de l'espèce. Cependant, son introduction au niveau du modèle n'améliore que très peu le pouvoir explicatif de ce dernier (2%) et seulement lors de l'étape d'estimation non-linéaire (cf. **Tab.1.1**). Sa significativité n'est d'ailleurs due qu'à la présence de deux valeurs extrêmes vers le bas et de deux valeurs extrêmes vers le haut (cf. **Fig.1.4.c**). Les valeurs médianes n'ont pas de réel impact sur la variable dépendante²⁴. Ceci indique que cette variable n'a qu'un faible apport dans l'explication de la variance totale de l'indice de recrutement. Ce résultat suggère que la relation stock-recrutement est pratiquement inexistante et que son influence n'est effective que pour les valeurs extrêmes, soit très faibles, soit très élevées.

²³ En faisant pour l'instant abstraction de la variable Sond sur laquelle nous reviendrons en détail (cf. § 2.7.3. de ce chapitre).

²⁴ Ceci est visible graphiquement par le fait que la quasi-totalité des valeurs s'étale sur une fourchette très faible de l'axe des Y (entre -0.1 et +0.3).

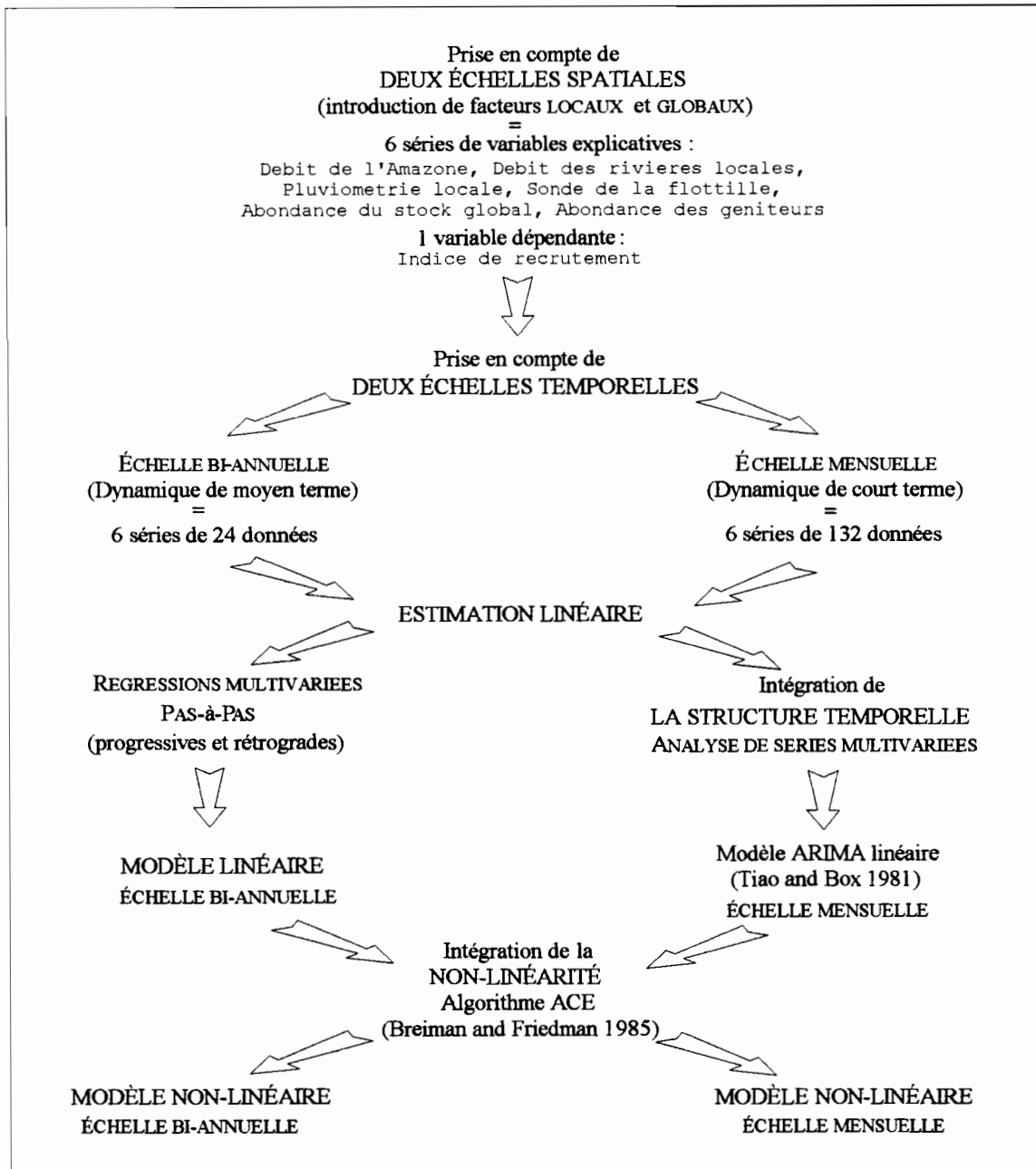


Fig.1.2. Les différentes étapes constituant l'analyse du déterminisme du recrutement de *P. subtilis*. (1) Introduction, en plus des facteurs locaux habituels (débit des fleuves, pluviométrie, etc.) d'une variable indicatrice des changements globaux (le débit de l'Amazone). (2) Introduction de deux échelles distinctes de temps. (3) Estimations linéaires : la structure temporelle des données à l'échelle mensuelle est prise en compte par les modèles ARIMA. Pour l'échelle bi-annuelle, la longueur des séries ne permet pas d'utiliser ces techniques mais le choix de la procédure de discrétisation mars/septembre (cf. note 19) permet d'éliminer les problèmes d'autocorrélation et ainsi de faire usage de régressions multi-variables rétrogrades ("backward") et progressives ("forward"). (4) Intégration de la non-linéarité : les deux modèles linéaires sont ré-estimés en utilisant un algorithme non-linéaire "Alternative Conditional Expectation" développée par Breiman and Friedman (1985). (5) Les résultats sont ensuite contrôlés graphiquement par la visualisation des transformations optimales (cf. Fig.1.3 et 1.4).

* La structure des modèles obtenus par ces techniques pouvant se révéler instables lorsque les variables sont inter-corrélées (Belsey et al. 1980, Koslow et al. 1987), seules les variables qui apparaissent significatives simultanément dans les deux types de régressions (rétrograde et progressive) ont été maintenues dans le modèle linéaire final (cf. Béné and Moguedet Annexe 3 pour les détails).

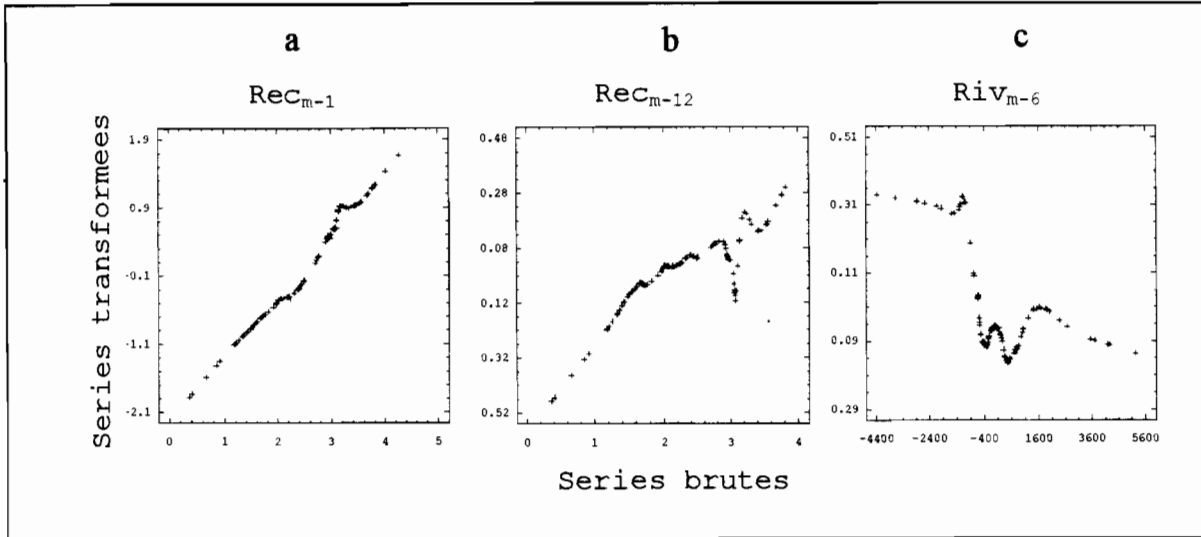


Fig.1.3. Analyse non-linéaire à l'échelle mensuelle ($R^2 = 81.7\%$). Les figures a,b,c représentent les transformations optimales des trois variables explicatives telle qu'elles ont été estimées grâce à l'algorithme ACE (Rec = indice de recrutement ; Riv = débit cumulé des fleuves locaux). La procédure classique pour visualiser ces transformations optimales est de tracer les séries transformées en fonctions des séries brutes. L'échelle des grandeurs le long de l'axe des Y donne une idée de la significativité des variables explicatives. Dans le cas présent on observe que l'indice de recrutement est fortement autocorrélé (positivement) à un retard $L = 1$, autocorrélé (toujours positivement mais à un niveau moindre) à un retard $L = 12$, et corrélé (négativement) au débit des fleuves locaux (Riv) à un retard $L = 6$. Pour cette dernière corrélation avec la variable (Riv), ce sont essentiellement les valeurs extrêmes qui ont un impact sur Rec_m.

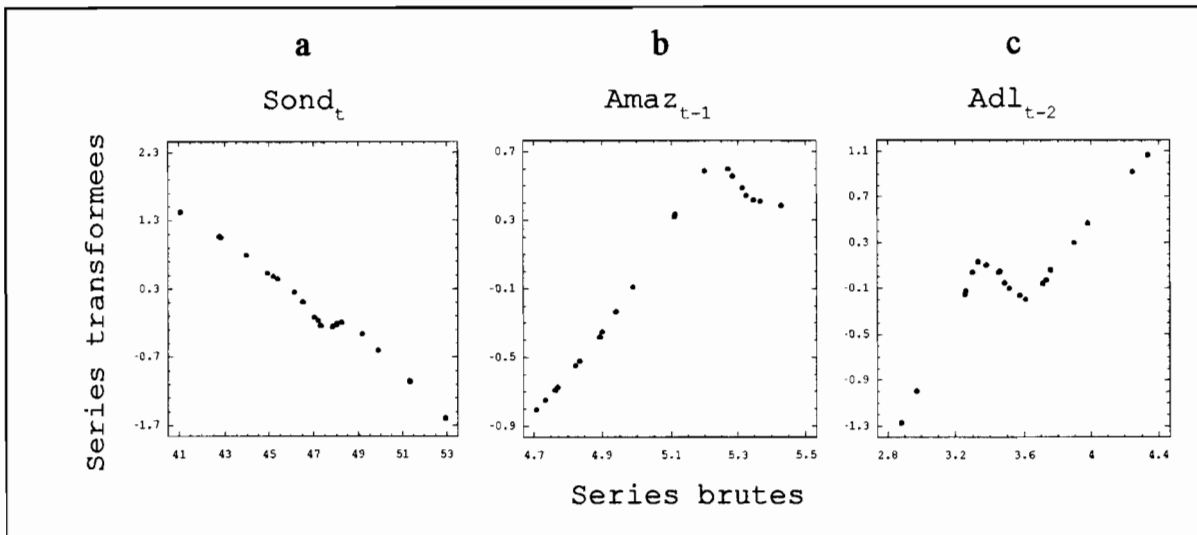


Fig.1.4. Analyse non-linéaire du modèle à l'échelle bi-annuelle ($R^2 = 73.8\%$). Les figures a,b,c représentent les transformations optimales des trois variables explicatives du modèle estimées par ACE (Sond = sonde de la flottille ; Amaz = débit de l'Amazone ; Adl = abondance du stock adulte). Dans le cas présent on observe que la sonde de la flottille (Sond_t) a un impact négatif et pratiquement linéaire sur l'ensemble des valeurs[□]. Le débit de l'Amazone (Amaz_{t-1}) a un impact positif sur la plus grande partie de ses valeurs et négatif sur les valeurs maximales (cf. texte pour commentaires). Pour ce qui est du niveau d'abondance du stock (Adl_{t-2}) la figure c indique que ce dernier a un faible pouvoir explicatif (petite amplitude des valeurs sur l'axe Y) ce qui est confirmé par la faible amélioration (2%) que son introduction entraîne dans le modèle.

[□] La linéarité de l'impact de la sonde de la flottille (Sond) se retrouve également dans le fait que c'est la seule variable qui apparaisse significative au niveau de l'étape d'estimation linéaire (cf. Tab.1.1).

Tab.1.1. Modèles mensuel et bi-annuel avant et après ré-estimation non-linéaire. Seuls sont indiquées les relations entre la variable dépendante et les variables explicatives[#] ; Rec = indice de recrutement (variable dépendante) ; Riv = débit cumulé des fleuves locaux ; Sond = sonde de la flottille ; Amaz = débit de l'Amazonie ; Adl = abondance du stock adulte. $\varphi(\text{Rec})$ = transformation optimale de la variable dépendante. $\phi_i(V)$ = transformation optimale de la variable explicative V, $i = 1, 2, 3$. L'écart-type est indiqué entre parenthèses.

Dynamique de court-terme (mensuelle) intervalle (m,m+1) = 1 mois		
Modele	Estimation des parametres + (ecart-type)	Coef.Corr.
lineaire	$\text{Rec}_m = 0.78 \text{ Rec}_{m-1} + 0.23 \text{ Rec}_{m-12} - 0.62\text{E-}04 \text{ Riv}_{m-6}$ (0.49E-01) (0.53E-01) (0.28E-04)	75.5%
non-lineaire	$\varphi(\text{Rec}_m) = \phi_1(\text{Rec}_{m-1}) + \phi_2(\text{Rec}_{m-12}) + \phi_3(\text{Riv}_{m-6})$	81.7%
Dynamique de moyen-terme (bi-annuelle) intervalle (t,t+1) = 6 mois		
Modele	Estimation des parametres + (ecart type)	Coef.Corr.
lineaire	$\text{Rec}_t = -3.22 \text{ Sond}_t + 166.18$ (0.766) (35.55)	40.9%
non-lineaire	$\varphi(\text{Rec}_t) = \phi_1(\text{Sond}_t) + \phi_2(\text{Amaz}_{t-1}) + \phi_3(\text{Adl}_{t-2})$	73.8%

: La véritable forme VARIMA (Vector Autoregressive Integrated Moving Average) incluant les relations d'autocorrélation entre variables explicatives est indiquée dans l'article de référence (Tab.6 dans Béné and Moguedet Annexe 3).

En conclusion à cette première interprétation, notons que tous ces résultats, qu'ils concernent le signe ou les retards associés aux impacts des différentes variables explicatives (fleuves locaux, Amazonie ou encore stock des adultes) n'apparaissent pas complètement dénués d'une certaine cohérence biologique et/ou écologique.

2.7.2. Une interprétation plus théorique : celle de la théorie de la Hiérarchie

On peut également re-interpréter ces résultats en terme de « cohérence d'échelles spatio-temporelles » dans le cadre plus théorique de la théorie de la Hiérarchie. C'est d'ailleurs cette interprétation qui est développée au niveau de l'article de référence (Béné and Moguedet Annexe 3) en relation avec le thème général de l'ouvrage auquel il est associé²⁵. La raison pour laquelle on est amené à parler d'une cohérence des échelles spatio-temporelles pour ces résultats provient du fait que le facteur local (le débit des fleuves guyanais) apparaît significatif à l'échelle temporelle inférieure de la dynamique du système (inférieur étant défini dans le sens : de court-terme), alors qu'au contraire le facteur global (l'Amazonie) intervient à l'échelle temporelle supérieure (celle du moyen-terme) (cf. Fig.1.5). On retrouve

²⁵ Global versus Local Changes in Upwellings Systems. M.-H. Durand, R. Mendelssohn, P. Cury, C. Roy, and D. Pauly (eds.), Édition ORSTOM, Paris, à paraître en 1997.

donc avec cette étude ce que la Théorie de la Hiérarchie présente comme une des "lois" en écologie ; la dépendance d'échelle, c'est-à-dire, le fait que les échelles spatiales et temporelles sont reliées par une relation effective (cf. Encadré 1.2 pour quelques détails sur cette notion de cohérence d'échelles spatio-temporelles et sur la Théorie de la Hiérarchie dont elle est issue).

Encadré 1.2. La théorie de la Hiérarchie et le concept de dépendance d'échelle.

La théorie de la Hiérarchie (Allen and Starr 1982, O'Neill et al. 1986, May 1989, Holling 1995) est une théorie qui concerne les problèmes d'échelles spatio-temporelles multiples et les relations qui existent entre les dynamiques des écosystèmes à différentes échelles. Un des concepts fondamentaux de cette théorie est d'ailleurs celui de la « dépendance d'échelle » ("*scale dependence*") (Wiens 1989, Burel et al. 1992, Müller 1992). Selon ce concept, les échelles spatiales et temporelles sont reliées entre elles par des relations où les facteurs de long terme agissent à des échelles spatiales plus larges que les facteurs de court terme, ces derniers apparaissant aux échelles géographiques locales. Si le concept correspond à une réalité empirique²⁶, on serait cependant tenté de substituer le terme utilisé pour le décrire, à savoir « dépendance d'échelle » par le terme « cohérence d'échelle », ceci pour deux raisons essentielles : la première, parce que ce concept se rapproche de la conception intuitive que l'on a de la manière avec laquelle les mécanismes agissent au sein des écosystèmes, voire même plus globalement, au sein des systèmes en général : le fait que les facteurs caractérisés par des dynamiques temporelles 'longues' tendent à être associés à des échelles spatiales 'larges', alors qu'au contraire des phénomènes à la dynamique 'rapide' seront plutôt associés à des échelles spatiales plus 'réduites' (d'où l'idée d'une certaine cohérence) ; la seconde parce que le terme "dépendance" implique une notion de causalité et de relation formelle entre espace et temps, relation qui, si elle est très largement observée -et est de ce fait indiscutable-, n'a en revanche, pour l'instant, aucun fondement théorique. Plus modestement le terme "cohérence" rappelle l'aspect 'intuition' mais n'implique aucune relation déterminée entre les deux d'échelles.

²⁶ Ce concept épouse en effet pour de nombreux cas les observations empiriques. Il a d'ailleurs fait à plusieurs reprises l'objet de tentatives de synthèse pour ce qui est des systèmes marins. La plus connue est certainement celle du diagramme de "Stommel" repris par bon nombre d'études (Mullin 1986, Dickey 1990, McGowan 1990) (cf. Fig.1.6).

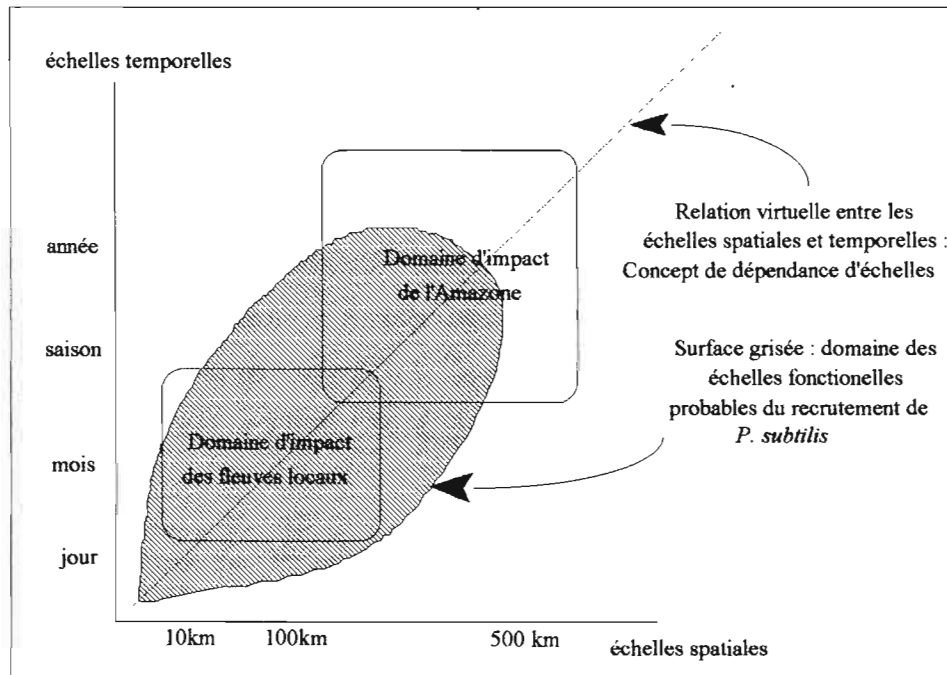


Fig.1.5. Concept de cohérence d'échelle (ou encore de "dépendance d'échelles" dans les termes suggérés par la Théorie de la Hiérarchie) dans le cas de la dynamique du recrutement de *P. subtilis* de Guyane. L'Amazonie, considéré comme un indicateur de changements globaux apparaît avoir un impact à une échelle temporelle plus large que le facteur local significatif (le débit des fleuves guyanais). Ceci crée une relation virtuelle entre les échelles spatiale et temporelle, en accord avec le concept de dépendance d'échelle. On peut comparer ces résultats à ceux du Diagramme de Stommel (Fig.1.6).

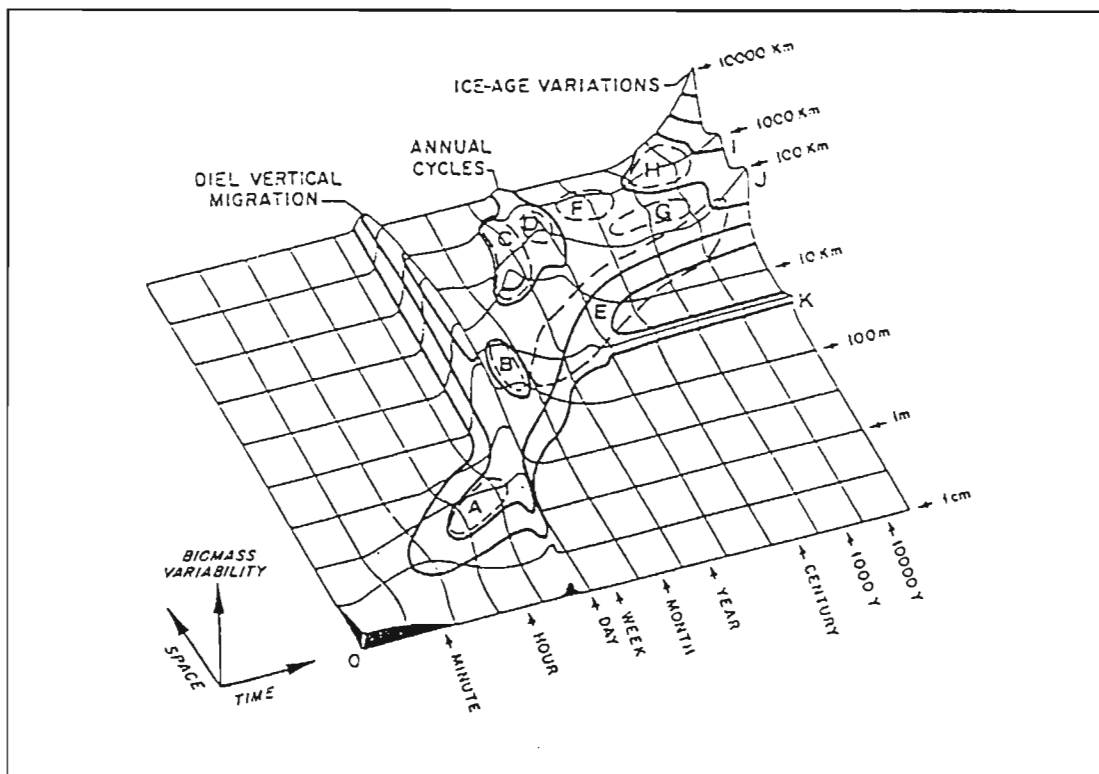


Fig.1.6 Le fameux diagramme de Stommel représentant un modèle conceptuel des échelles spatio-temporelles où se manifeste la variabilité de la biomasse zooplanctonique, ainsi que les facteurs associés à ces échelles (d'après Haury et al. 1978).

2.7.3. Interprétation halieutique : l'impact de la dynamique de flottille

La troisième interprétation possible des résultats est à relier au domaine de l'halieutique. Elle est due à la présence de la variable *Sond* (la Sonde de la flottille) dans le modèle bi-annuel (cf. **Tab.1.1** et **Fig.1.4.a** pour mémoire). Cette variable est un indice de la répartition spatiale de l'effort de pêche à l'intérieur de la zone d'activité. Elle reflète en particulier de façon relativement fidèle la distance des navires par rapport à la côte lors de leurs déplacements pendant les campagnes de pêche²⁷. Le fait de retrouver cet indice parmi les facteurs expliquant la variabilité du recrutement de *P. subtilis* a une portée importante en terme d'évaluation des stocks.

Pour comprendre les raisons de cette affirmation, il faut revenir sur une des approximations les plus communément admises dans les sciences halieutiques. Il est connu qu'en l'absence de mesures *directes* du recrutement (c'est-à-dire en l'absence d'estimations obtenues par des campagnes scientifiques au protocole d'échantillonnage standardisé), l'indice *indirect* 'de substitution' habituellement utilisé est la série des captures par unité d'effort (CPUE) de la plus petite catégorie exploitée. C'est ce qu'utilisèrent par exemple Browder (1985) ou Gracia (1989, 1991) pour l'étude de deux espèces de crevettes du Golfe du Mexique. C'est aussi ce sur quoi s'appuyèrent Garcia ou Dintheer lors de leurs analyses respectives du recrutement de *P. subtilis* (Garcia et al. 1984, 1985, Dintheer 1986). C'est ce que nous avons nous-mêmes utilisé dans notre étude, pour les mêmes raisons que tous ces auteurs : l'absence d'estimations directes²⁸.

Cependant, les résultats du **Tab.1.1** font ressortir que la variable *Sond* explique à elle seule plus de 40% de la variance du recrutement à l'échelle bi-annuelle²⁹. L'existence de cette corrélation entre la répartition spatiale de l'activité de pêche et l'indice de recrutement

²⁷ La morphologie de la partie centrale du plateau guyano-brésilien est telle que les strates de profondeurs sont dans cette zone parallèles à la côte. Sur l'ensemble de la ZEE guyanaise, il existe une relation réelle entre la profondeur et la distance à la côte.

²⁸ L'adoption de cette approximation ne se limite pas à l'estimation de l'indice de recrutement; son usage a été généralisé depuis longtemps en halieutique pour les estimations de l'abondance globale des stocks. Dans ce cas, c'est la série des CPUE globales qui est utilisée comme indicateur de l'abondance du stock. Cette équivalence fut d'ailleurs l'une des premières hypothèses des modèles classiques en halieutiques. Schaefer l'utilisa dans son modèle en 1954. C'est ce que Clark réfère comme « l'hypothèse des CPUE » (1990: 222) et Walters comme « l'hypothèse d'action de masse » (1986: 108). Derrière ces expressions emphatiques se trouve en fait la formule : $C = qEX$ avec C : les captures ; q : le coefficient de capturabilité ; E : l'effort de pêche ; X : la ressource.

²⁹ Cette variable est d'ailleurs la seule dont l'impact apparaît significatif au niveau de l'estimation linéaire de moyen terme.

obtenu à partir des données commerciales issues de cette activité signifie que les variations apparentes enregistrées au niveau de l'indice de recrutement sont en fait en grande partie le reflet direct des modifications dans la répartition spatiale de la flottille.

Ces résultats vont alors avoir une forte incidence en terme d'évaluation de stock (le "*stock assessment*" en terme halieutique anglais) dans le sens défini par Hilborn and Walters. Ces auteurs rappellent en effet que : « *An important role of the stock assessment is to help identify whether catch and effort statistics are likely to give a misleading picture of stock trends and health, and hence whether some more systematic and expensive program may be worthwhile* » (1992: 16-17). Or dans notre cas, les résultats montrent que l'indice de recrutement dépend très largement des évolutions de l'activité de la flottille et que les changements enregistrés à moyen terme dans cet indice sont plus sûrement le résultat d'une modification de la répartition de l'effort de pêche que ceux d'une variation réelle du niveau de recrutement. La présence de cette relation est due au gradient taille-profondeur dont on avait souligné l'existence dans la partie descriptive concernant le cycle biologique de l'espèce³⁰. On se souvient que ce gradient est lié à une stratification de la répartition spatiale des individus, stratification caractérisée par la présence des jeunes adultes arrivant dans la pêcherie près des côtes, et celle des adultes plus âgés au large.

La conséquence de ces remarques est directe. Peu de pêcheries bénéficient d'un suivi direct du recrutement et un grand nombre d'études basent leurs travaux sur l'usage des données commerciales. Pour les ressources dont la distribution apparaît fortement structurée spatialement comme c'est le cas pour les Penaeides, l'adoption de cette approximation peut se révéler dangereuse. En effet, si les données commerciales sont utilisées comme indice de recrutement sans que la dynamique spatiale de la flottille soit elle aussi intégrée à l'analyse, alors, les estimations des stocks basées sur ces analyses seront à interpréter avec prudence. Répétons le, ce n'est pas l'usage des données commerciales qui est problématique, c'est le fait de les utiliser sans étudier en parallèle la dynamique de la flottille à partir de laquelle ces données sont extraites puis utilisées dans un but d'évaluation.

³⁰ Cf. pp.24-25.

2.7.4. En guise de conclusion

La conclusion principale de cette section est donc double. L'objectif initial était de tenter d'améliorer les connaissances sur le déterministe du recrutement de *Penaeus subtilis*. L'étude, basée sur une procédure prenant en compte les faiblesses méthodologiques des études précédentes, indique qu'une des difficultés rencontrées dans l'identification des processus à la base de ce recrutement est sans doute liée à l'existence de plusieurs échelles fonctionnelles, spatiales et temporelles, intervenant dans la dynamique du processus.

Cependant, cette étude soulève dans le même temps une question en relation directe avec la dimension halieutique du processus de recrutement. Cette question est celle qui concerne l'objet "d'évaluation de stock" par rapport à laquelle bon nombre d'études et de programmes de recherches ont été et sont encore aujourd'hui proposés. Ainsi que le rappellent à ce propos Walters et Hilborn (1992: 5-6) dans l'introduction de leur ouvrage : « *Stock assessment is sometimes viewed as a rather narrow biological discipline that might be summarized as "the interpretation of commercial catch statistics to estimate potential yields."* A well done stock assessment is much more than this. First and foremost, stock assessment involve understanding the dynamics of fisheries. » (souligné par les auteurs). Les travaux présentés ici vont pleinement dans le sens du constat dressé par Hilborn et Walters. Ils illustrent par un exemple empirique le besoin d'intégrer dans toutes les études scientifiques se revendiquant d'une approche halieutique l'analyse de la dynamique de la flotte.

~o0o~

SECTION 3. RECHERCHES SUR LA NATURE DES OSCILLATIONS
ANIMANT LA PÊCHERIE

3.1. Quand le chaos chasse le lynx

L'origine des oscillations périodiques qui caractérisent la dynamique de certaines populations est sans doute l'une des questions qui a animé le plus de recherches en écologie théoriques durant la première partie du siècle, et il n'était pas un manuel dans les années 60-80 qui ne commençait son chapitre « Dynamique de Population » par les célèbres séries temporelles des fourrures de lynx et de lièvres ramenés par les trappeurs de la Baie d'Hudson (cf. **Fig.1.7**). L'usage de cette série comme illustration systématique de cette partie de la recherche en écologie peut s'expliquer par une double raison. D'une part l'observation d'un phénomène si régulier pendant presque un siècle (1845-1935) a quelque chose de troublant et de fascinant pour l'étudiant qui découvre la problématique des variations d'abondance dans les populations naturelles, et d'autre part parce que cette série permet d'introduire la modélisation dans ce domaine particulier de l'écologie, généralement au travers du modèle de Lokta et Volterra³¹.

À ce propos, la dynamique de population est certainement l'un des plus vieux exemples de fusion interdisciplinaire entre mathématiques et biologie. Ainsi, aux alentours de 1220, Léonard de Pise étudiait déjà la croissance des populations (en particulier celle des lapins) en s'appuyant sur l'utilisation de séries discrètes³². La raison de cette adoption précoce (par rapport à d'autres domaines de la biologie) des outils mathématiques dans la dynamique de population tient en deux points. D'une part parce que ce que l'on mesure est l'abondance d'une population, une grandeur qui peut s'exprimer sans problème en mathématiques par un nombre entier, et deuxièmement parce que ce que l'on étudie de cette abondance, c'est sa variation (généralement au cours du temps), ce qui là aussi est parfaitement formalisable du

³¹ Ce qui est d'ailleurs assez étonnant puisque ces oscillations peuvent difficilement être expliquées par le modèle de Lokta-Volterra. Ce dernier prédit en effet un déphasage entre les maxima des proies et des prédateurs, ce qui ne semble pas être le cas ici. Pour certains auteurs, ces oscillations seraient plutôt dues aux changements de comportement des chasseurs lors des crises cycliques qui marquèrent le développement économique aux États-Unis.

³² Ces séries deviendront d'ailleurs par la suite les célèbres suites de Fibonacci.

point de vue mathématiques sous la forme d'équations différentielles ou d'équations aux différences.

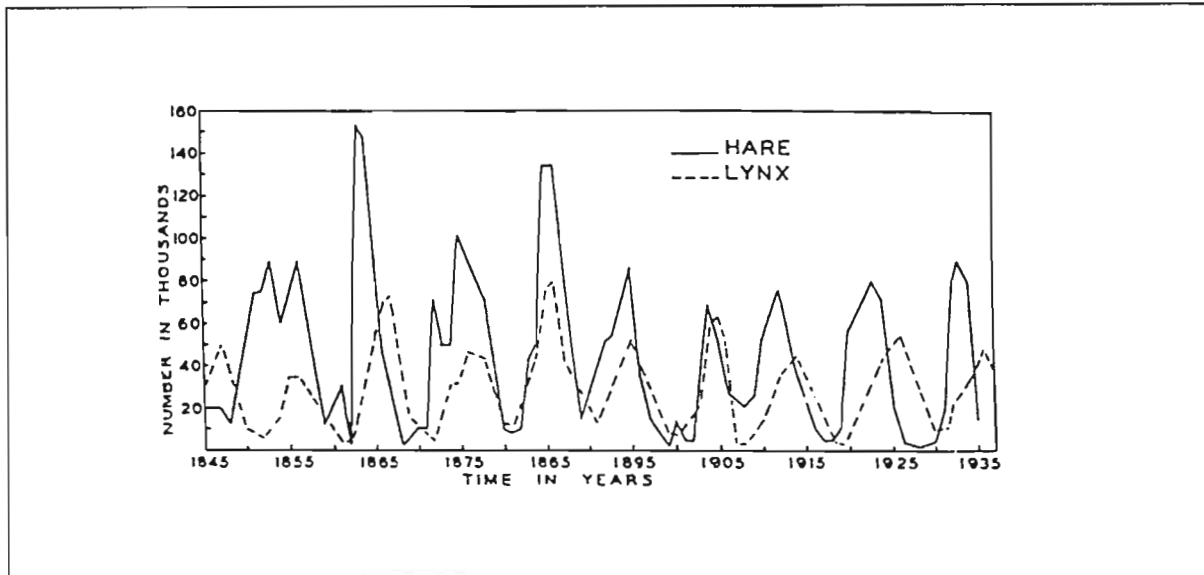


Fig. 1.7. La fameuse série de la "Hudson Bay Company", utilisée dans les manuels d'écologie pour illustrer les variations d'abondance de populations (ici tirée par exemple de *Fundamentals in Ecology* de Odum 1953).

Au début des années 70, l'émergence du concept du chaos dans les différents corpus disciplinaires et notamment dans le domaine de la dynamique de population a entraîné une évolution des problématiques et des paradigmes : le concept d'équilibre de la nature du début du siècle a été remplacé par celui du chaos et des bifurcations, et le modèle de Lotka-Volterra s'est vu progressivement substitué dans les manuels par la logistique discrète de May. L'usage des outils mathématiques s'est quant à lui renforcé dans ce domaine spécifique de la biologie. L'objectif de la partie qui suit est justement de voir dans quelles mesures ces outils mathématiques peuvent améliorer la compréhension du système halieutique guyanais. Pour cette seconde étude sur le déterminisme du recrutement de *P. subtilis*, nous ferons donc appel à la modélisation dynamique. Notre travail restera cependant à un niveau qualitatif, de surcroît très partiel, pour les raisons apparues dans la section 1 : la pauvreté des données quantitatives. La validation ne pourra, dans ces conditions, qu'être très qualitative. Il reste cependant intéressant de voir jusqu'à quel point la modélisation dynamique peut être utilisée de manière acceptable dans ces conditions. Au lecteur d'en juger.

3.2. Oscillations auto-entretenues ou oscillations forcées ?

Un examen rapide des données indique que la ressource exploitée est animée d'une variabilité caractérisable à deux échelles de temps distinctes : à l'échelle inter-annuelle, le niveau moyen de la ressource varie sans tendance déterministe apparente. A l'inverse, à l'échelle intra-annuelle, la nature saisonnière (et donc prévisible) de la fluctuation est manifeste. Nous allons nous concentrer sur ce deuxième type de variabilité, la variabilité saisonnière. Le point de départ de notre recherche peut être symbolisé par la Fig.1.8. Cette figure représente l'évolution de la ressource et de la répartition spatiale de l'effort de pêche. On observe que les deux séries sont animées de mouvements saisonniers simultanés. À la vue de cette figure, il vient immédiatement à l'esprit de ceux qui ont travaillé sur les systèmes dynamiques la question suivante: quelle est la nature des oscillations qui caractérisent cette pêcherie ? La théorie des systèmes dynamiques nous enseigne en effet que si des oscillations périodiques sont observées dans un système dynamique, celles-ci peuvent être de deux natures différentes : soit il s'agit d'oscillations auto-entretenues, soit d'oscillations forcées³³. Dans notre cas, la question revient par conséquent à déterminer si les mouvements saisonniers qui caractérisent simultanément l'indice d'abondance de la ressource et celui de la répartition spatiale de l'effort de pêche résultent de l'interaction entre cette ressource et la flottille qui l'exploite (oscillations auto-entretenues) ou si ces oscillations sont le résultat de l'impact saisonnier d'un facteur exogène (oscillations forcées). En nous basant un système dynamique très simple, nous proposons donc de tenter de répondre à cette question en abordant le problème de la manière suivante:

1. Dans un premier temps nous chercherons à déterminer s'il est possible à partir d'un système dynamique minimal³⁴ représentant l'interaction ressource-flottille d'obtenir des solutions périodiques oscillantes tout en gardant un environnement constant. Si c'est le cas, il

³³ En fait, dans le domaine des systèmes dynamiques représentés par des équations différentielles, il existe trois types d'oscillations régulières. On peut obtenir soit des oscillations *forcées* (engendrées par des forces extérieures périodiques), soit des oscillations *auto-entretenues* qui sont décrites par des cycles stables (oscillations périodiques permanentes). Dans ce cas, le terme 'auto-entretenues' provient du fait que ces oscillations peuvent apparaître même lorsque le système est placé dans un environnement stationnaire ; ces oscillations n'ont pas besoin d'une force extérieure périodique pour apparaître. Dernière possibilité d'oscillations régulières, celles des oscillations *amorties* observées, par exemple, dans le cas d'un pendule libre.

³⁴ Un modèle est considéré comme 'minimal' lorsqu'il possède le nombre minimal de variables d'état nécessaires à la traduction mathématique de la question posée.

nous faudra alors déterminer si ces oscillations sont qualitativement comparables à celles observées empiriquement.

2. Dans le cas contraire, la question se déplacera alors vers le problème de savoir si l'introduction d'un forçage supposé représenter l'impact de l'environnement peut permettre d'obtenir des oscillations qui soient en accord avec la dynamique empirique de la pêche.

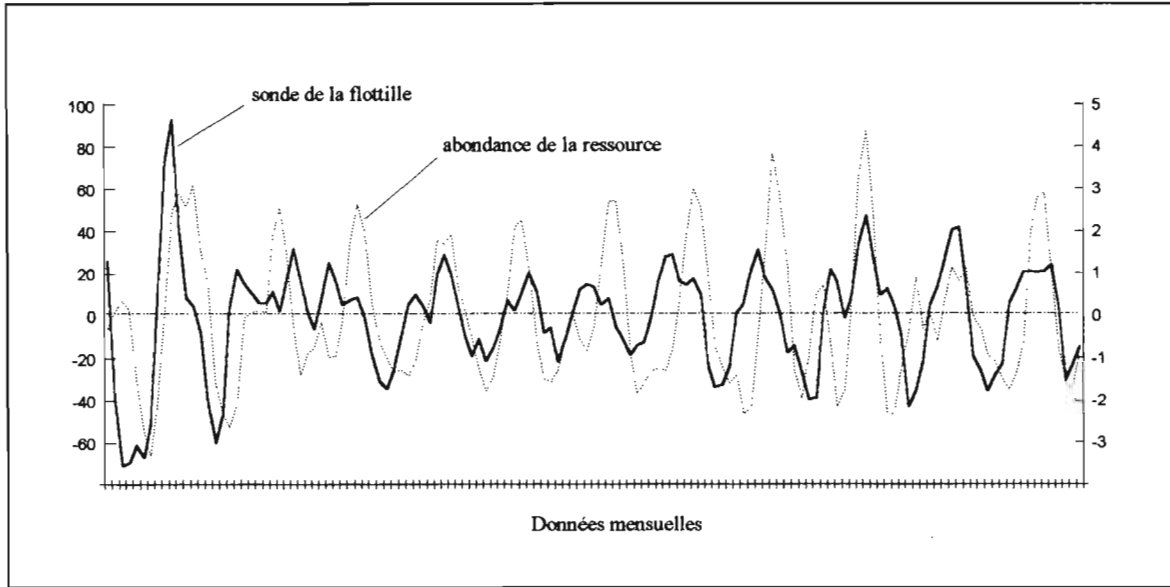


Fig.1.8. Évolution simultanée des composantes saisonnières[°] des séries de l'abondance de la ressource et de la sonde de la flottille. Les deux séries sont animées d'oscillations simultanées qui suggèrent, soit une interaction endogène de type auto-entretenu, soit l'impact d'un facteur saisonnier exogène. (données mensuelles initiales : abondance en kg par jour de mer, sonde en mètre, sur la période janv.79-déc.93 : source IFREMER Cayenne).

[°] Les tendances inter-annuelles des séries ont été éliminées par un processus de moyenne mobile calculée sur 12 mois.

La volonté de déterminer si les oscillations peuvent s'expliquer sans faire appel à un terme forçant peut sembler curieux puisque le système est soumis à un environnement variable saisonnier. On remarquera cependant que, à proximité de l'Équateur, les variations saisonnières en mer sont très peu marquées (à la différence de celles concernant la pluviométrie à terre) et qu'une pêche est en quelque sorte un système proie - prédateur dont on sait que certaines représentations mathématiques possèdent des oscillations entretenues.

3.3. Identification qualitative de la dynamique de la pêche

Commençons par analyser les données empiriques décrivant la dynamique de la pêche. Les résultats des études de Garcia et al. (1984) et de Dintheer et Rosé (1989) soulignant

l'existence de mouvements saisonniers dans les indices d'abondance de la ressource ont été confirmés par une étude plus récente (Béné 1996 Annexe 1). Dans cette dernière, la série temporelle des captures par unité d'effort (CPUE) est analysée sur la période 1981-1993. L'étude indique que la saison de pêche est caractérisée par une période de hauts rendements pendant la première moitié de l'année (janvier-juin) suivie d'une période de rendements plus faibles de juillet à décembre (cf. **Fig.1.9.a**). En l'absence de données d'estimations directes sur une longue période³⁵, il n'y a pas d'autre alternative (cf. section précédente) que de supposer que ces CPUE sont de bons estimateurs de la ressource. Cette dernière est donc abondante pendant la première moitié de l'année. Son abondance diminue ensuite de manière significative pendant la seconde moitié de l'année. Ces oscillations caractéristiques peuvent être représentées par les indices de saisonnalité de la série temporelle des CPUE. Ces indices sont illustrés sur la **Fig.1.9.b**.

Parallèlement, l'étude des CPUE pour chacune des différentes strates de profondeur a pu être effectuée³⁶ (Béné 1996 Annexe 1). Ces séries indiquent que la période de fortes abondances du début de l'année a lieu à la fois près des côtes et au large (en janvier-juin) et que la chute d'abondance de la période juillet-décembre est observée simultanément dans les strates du large et celles de la côte. Cela signifie que les mouvements caractéristiques de la ressource tels qu'ils ont été identifiés au niveau de la zone globale de pêche (**Fig.1.9**), sont aussi observables à l'intérieur des différentes strates de la zone (**Fig.1.10**). Ces résultats, qui ont été obtenus en analysant les fiches de pêches sur la période 1984-1990, sont nouveaux par rapport aux connaissances acquises jusque là sur la pêcherie. Ils impliquent que l'abondance des jeunes individus à la côte évolue de manière synchrone avec celle des individus plus âgés au large³⁷.

³⁵ Les seules estimations directes de l'abondance de *Penaeus subtilis* qui aient été effectuées selon un protocole expérimental précis l'ont été en 1993-1994 dans le cadre d'un contrat d'étude FEDER (Union Européenne). Il s'agissait de quatre campagnes (mai et octobre 93 et mai et octobre 94) effectuées par l'IFREMER dans la ZEE guyanaise et en parallèle par le Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et des Pêches du Surinam dans la ZEE surinamaïenne. Si ces campagnes permirent d'établir une cartographie ponctuelle de la répartition spatio-temporelle des adultes et des juvéniles, elles ne permirent pas en revanche d'inférer les évolutions intra ou inter-annuelles de la ressource (Moguedet et al. 1995).

³⁶ Jusqu'à présent, il s'agissait des CPUE globales estimées pour l'ensemble de la zone de pêche.

³⁷ Cette conclusion nous a interpellés pendant plusieurs mois : comment deux stades, séparés par plusieurs semaines au niveau du cycle biologique peuvent-ils présenter des extrema synchrones ? La logique voudrait en effet que le maximum du stade mature apparaisse plus tard dans la saison par rapport à celui du stade jeune adulte. La réponse à cette question nous sera offerte par les travaux de Bernard et Souissi (cf. § 3.6.3. de ce chapitre).

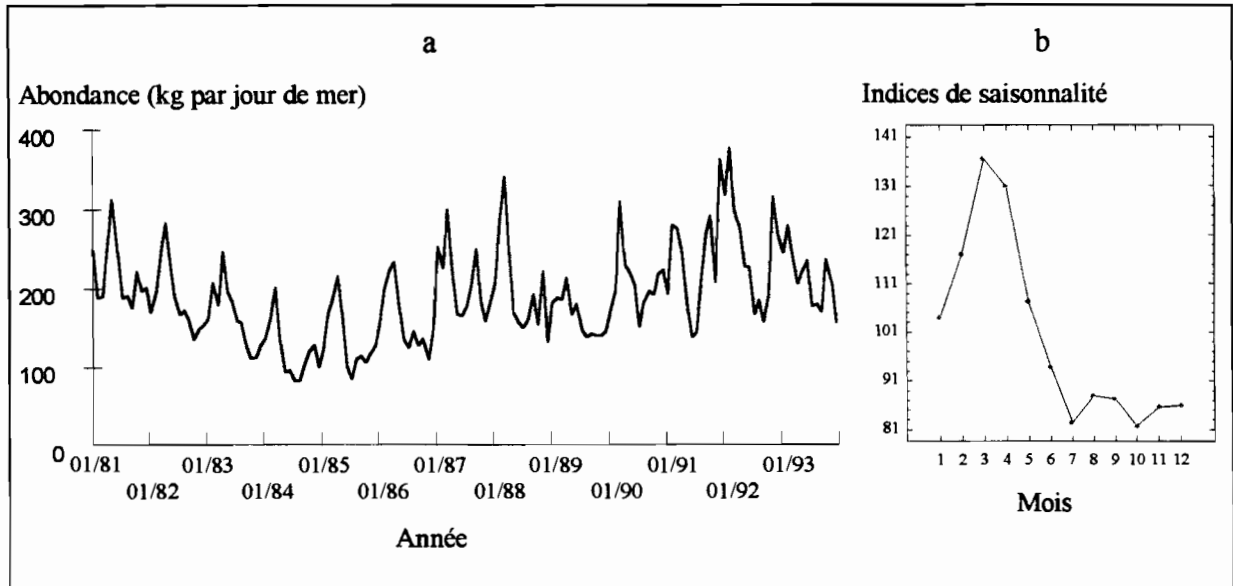


Fig.1.9. (a) Évolution de l'abondance de la ressource estimée par les CPUE (en kg par jour de mer) sur la période janv.81-déc.93. (b) Indices de saisonnalité de la série (Série mensuelle initiale : source IFREMER Cayenne).

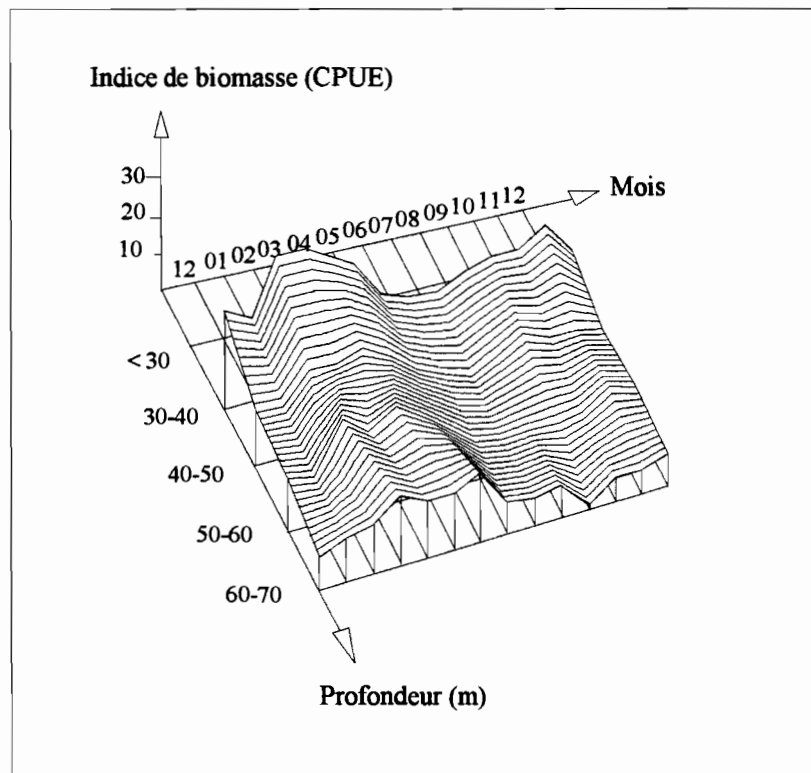


Fig.1.10. Représentation de la répartition spatio-temporelle annuelle de la ressource, estimée[□] par la série des CPUE (axe Z) en fonction des strates de profondeurs (axe Y) et du mois (axe X). La tendance saisonnière qui est observée sur l'année (cf. Fig.1.9) concerne en fait l'ensemble des différentes strates. Cela implique que l'abondance des jeunes individus à la côte évolue de manière synchrone avec celle des individus plus âgés au large.

[□] Les courbes entre chaque strate principale (30-40, 40-50, 50-60, 60-70 mètres) ont été interpolées pour une meilleure visualisation. Estimations obtenues à partir de l'analyse des fiches de pêche sur la période 1984-1990 -cf. Béné 1996 Annexe 1 pour le détail des calculs. Source : IFREMER Cayenne).

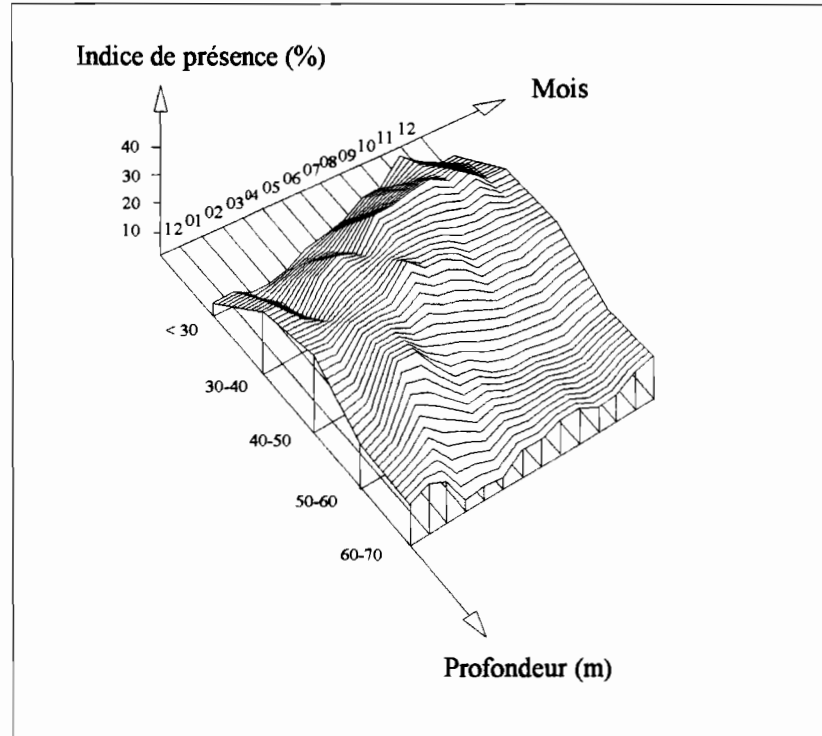


Fig.1.11. Représentation de la répartition spatio-temporelle annuelle de la flottille, estimée par l'indice de présence des bateaux (axe Z) en fonction des strates de profondeur (axe Y) et du mois (axe X). La flottille apparaît être animée d'un mouvement saisonnier, se déplaçant progressivement des strates les plus profondes (50-60 et 60-70 mètres) où elle se trouve pendant les premiers mois de l'année vers les strates de plus faible profondeur (< 30 et 30-40 m) pendant le seconde moitié de l'année (cf. Béné 1996 Annexe 1 pour le détail des calculs de l'indice de présence des navires. Source : IFREMER Cayenne).

Dans le même temps, l'analyse des fiches de pêche permet de montrer que l'activité de la flottille est, elle aussi, caractérisée par un mouvement saisonnier au niveau de la répartition spatiale de son effort de pêche. Les pêcheurs semblent concentrer leur effort au large pendant la première moitié de l'année puis reporter progressivement cet effort vers la côte au fur et à mesure que la saison avance (cf. **Fig.1.11**) (notons d'ailleurs qu'en combinant les **Fig.1.10** et **1.11**, on retrouve la dynamique mise en évidence au niveau de la **Fig.1.8**).

En résumé, les deux principales caractéristiques de l'interaction entre la ressource et la flottille sont les suivantes : (i) les oscillations qui la constituent sont robustes, c'est-à-dire que la saisonnalité, même si elle peut apparaître plus ou moins marquée en amplitude d'une année sur l'autre, est en revanche systématiquement observée sur l'ensemble des 13 années qui constituent la série temporelle de base 1981-93, (ii) ces oscillations sont symétriques, c'est-à-dire que les maxima et les minima apparaissent régulièrement espacés dans le temps, ayant lieu tous les six mois. C'est cette succession d'extrema robustes et symétriques qui va nous servir de référence dans la suite de notre réflexion.

3.4. Le système dynamique

La seconde étape consiste à construire un système dynamique supposé représenter l'interaction entre la ressource exploitée et la flottille qui exerce la pression anthropique. Pour cela nous nous sommes appuyés sur le modèle proposé par Béné and Lobry (Annexe 5). Dans ce modèle, les stades exploités sont regroupés en deux catégories, les jeunes adultes vivant à la côte et les adultes matures localisés au large (cf. Fig.1.12). Ces deux catégories sont représentées par deux variables notées (x) et (y). Le recrutement R (les juvéniles qui rejoignent les jeunes crevettes en sortant des nurseries) constitue l'entrée du système. Les autres processus biologiques introduits dans le modèle sont la mortalité naturelle μ qui agit sur les adultes matures et la migration m par laquelle les jeunes adultes migrent vers le large et passent ainsi dans la catégorie des adultes matures³⁸.

La pression anthropique est introduite dans le modèle sous la forme d'une mortalité par pêche dont la répartition de type « bang-bang³⁹ » est basée sur le principe de maximisation des revenus. Ainsi en notant E l'effort total de pêche et ϕ et φ les mortalités par pêche exercées respectivement sur les jeunes (x) et sur matures (y), le processus décisionnel est formalisé de la manière suivante :

$$(1) \quad \begin{cases} \phi = \begin{cases} E & \text{si } \delta \leq \frac{x(t)}{y(t)} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \\ \varphi = E - \phi \end{cases} \quad \text{avec} \quad \delta = \frac{w_y}{w_x} \cdot \frac{p_y}{p_x}$$

avec p_x et p_y les prix unitaires (tels $p_x < p_y$), w_x et w_y les poids moyens des individus des deux catégories (tels $w_x < w_y$). L'effort E est supposé constant. On note Δ la droite d'équation $y = x / \delta$. Cette droite Δ matérialise dans l'espace des phases la "frontière" entre deux régions que l'on propose de noter R_x et R_y . Ces deux régions sont associées à deux stratégies de pêche différentes : dans la région R_x de l'espace des phases (en dessous de Δ) on pêche exclusivement des jeunes adultes "à la côte" alors que dans R_y (au-dessus de Δ), on pêche exclusivement des adultes matures "au large".

³⁸ Sous le formalisme adopté dans ce modèle, l'introduction d'une mortalité naturelle sur les jeunes individus est équivalente au niveau du comportement qualitatif du modèle à augmenter le taux de migration m .

³⁹ Une stratégie (un contrôle) est dite bang-bang si elle prend uniquement deux valeurs extrêmes $u_{\min}$ et $u_{\max}$. C'est le cas ici avec les valeurs 0 et E (cf. expression (1)).

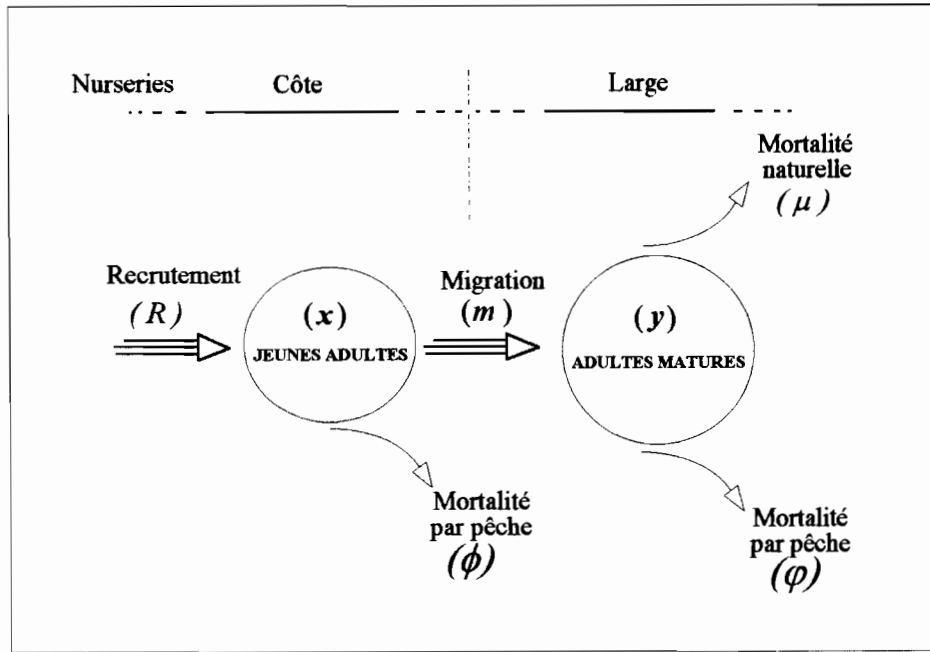


Fig 1.12. Schéma conceptuel du système dynamique à partir duquel l'étude a été menée. Les deux compartiments correspondent aux deux catégories exploitées par la flottille: les jeunes adultes (x) localisés à la côte et les adultes matures (y) vivant plus au large. Le reste du cycle (les post-larves se développant dans les nurseries) est pris en compte dans le modèle par l'intermédiaire du recrutement (R). La mortalité naturelle n'agit que sur les adultes matures*. Les autres processus biologiques et anthropiques intégrés dans le modèle sont la migration côte $\rightarrow$ large, notée (m), des jeunes vers les matures et les mortalités par pêche (ϕ) et (φ) agissant respectivement sur les jeunes adultes et les matures.

* cf. note 38.

Le choix du type de répartition de l'effort (type bang-bang) mérite une explication dans la mesure où il ne correspond assurément pas à celui qui est observé réellement -les pêcheurs ne répartissent pas leur effort de la manière exclusive décrite par cette répartition bang-bang. Une proportion des navires se trouve en effet toujours à la côte, même en période de haut rendement, de même qu'il y a toujours quelques navires au large même en période de bas rendements. La raison de ce choix tient dans le fait que notre objectif est uniquement de déterminer l'origine des oscillations qui sont observées empiriquement et non de représenter avec le plus d'exactitude possible un phénomène donné⁴⁰. La stratégie bang-bang, parce qu'elle est exclusive, permet une analyse mathématique plus claire de la dynamique d'interaction entre la ressource et la flottille.

En l'absence de pêche le système est du type Leslie classique avec des coefficients constant :

⁴⁰ Nous reviendrons sur ce point dans la Conclusion, p.210 et suivantes.

$$\begin{cases} \dot{x} = -mx(t) + R \\ \dot{y} = mx(t) - \mu y(t) \end{cases}$$

Il devient avec la pression anthropique de la forme suivante :

$$(2.a) \quad \begin{cases} \dot{x} = -(m + \phi)x(t) + R \\ \dot{y} = mx(t) - (\mu + \phi)y(t) \end{cases}$$

ou, sous forme matricielle :

$$(2.b) \quad \begin{cases} \dot{X}(t) = B(X)X(t) + v \\ X(0) = X_0 \end{cases} \quad v = \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{avec} \quad B(X) = B_1 = \begin{bmatrix} -(m+E) & 0 \\ m & -\mu \end{bmatrix} \quad \text{si } \delta \leq \frac{x(t)}{y(t)}$$

$$B(X) = B_2 = \begin{bmatrix} -m & 0 \\ m & -(\mu+E) \end{bmatrix} \quad \text{sinon.}$$

Ce modèle est en fait un système linéaire non-homogène dont certains paramètres sont densité-dépendants. Plus précisément, le système peut être considéré comme une combinaison de deux sous-systèmes non-homogènes linéaires S_x et S_y tels que :

$$(3) \quad \begin{array}{cc} S_x & S_y \\ \begin{cases} \dot{X}(t) = B_1 X(t) + v \\ X(0) = X_0 \end{cases} & \begin{cases} \dot{X}(t) = B_2 X(t) + v \\ X(0) = X_0 \end{cases} \end{array}$$

où le passage d'un sous-système à l'autre est densité-dépendant. Ces deux sous-systèmes sont simplement les deux systèmes décrivant la dynamique que l'on obtiendrait en pêchant exclusivement, soit les jeunes à la côte, soit les matures au large. Notons que chacun des sous-systèmes est particulièrement simple puisqu'il est triangulaire (cf. B_1 et B_2). La non-trivialité du modèle découle uniquement de la "densité-dépendance" du choix entre l'un ou l'autre de ces deux sous-systèmes.

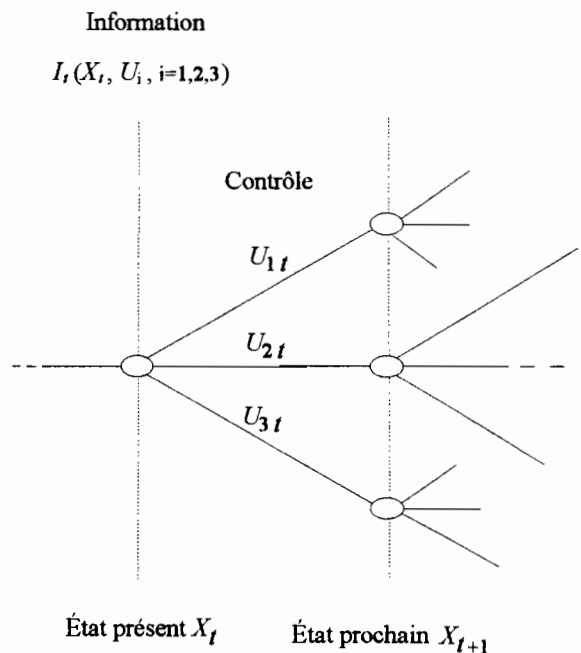
Par ailleurs, les processus de décision intervenant dans les systèmes anthropiques sont rarement des mécanismes continus, mais plus généralement des processus se produisant à des périodes discrètes dans le temps (Holling 1978, Walters 1986, Conrad and Clark 1987) (cf. Encadré 1.3). Deux types de processus de décision ont par conséquent été envisagé : un processus (peu réaliste) où les pêcheurs sont capables d'adapter instantanément la répartition de leurs efforts aux variations d'abondances de la ressource (ce que nous avons nommé un "*Instantaneous Control (IC) System*") (cf. Appendix1 in Béné and Lobry An-

nexe 5 pour les détails) et un deuxième type de processus (plus réaliste) où les pêcheurs réajustent cette fois leur effort aux variations de la ressource de manière discrétisée, c'est-à-dire à des instants régulièrement espacés dans le temps.

Encadré 1.3. Les processus de décision.

Dans la littérature s'intéressant aux systèmes dynamiques contrôlés, les processus de décision sont généralement représentés comme résultant de la succession de deux étapes distinctes: (1) la prise d'information sur l'état du système et sur son environnement, ce que l'on nomme "*the sample*", et (2) l'action (le contrôle) dont le choix découle de la comparaison du résultat de (1) avec un objectif défini à l'avance. Le contrôle issu de l'étape (2) est ensuite maintenu inchangé ("*hold*") jusqu'à la prochaine réestimation (d'où le terme utilisé en théorie du contrôle pour désigner ce type de système contrôlé : les "*Sample and Hold Control Systems*"). C'est la succession des deux étapes (1) et (2) qui donne sa dynamique discrète au système, et la manière classique de le symboliser est d'utiliser 'des arbres de décision' ("*decision trees*") où la nature discrète du processus apparaît alors explicitement.

Le fait que ces deux étapes soient généralement associées à des coûts (d'information, de production, etc.) entraîne que la fréquence du processus de décision peut être beaucoup plus basse que celle qui permettrait de suivre de façon 'continue' la dynamique du système contrôlé. Ceci implique des délais dans le contrôle qui peuvent être à l'origine de différences importantes dans le comportement des solutions lorsque l'on compare un système IC avec un système SHC.



Dans ce cas, la répartition de l'effort est maintenue constante pendant les intervalles séparant ces phases de ré-estimations. Cette formalisation correspond à ce que l'on appelle en théorie du contrôle un « *Sample-and-Hold Control (SHC) System* ». L'ensemble des questions et des hypothèses qui seront abordées dans cette étude a été rappelé dans la Fig.1.13.

3.5. Comportement du système sous l'hypothèse d'un recrutement constant (système non forcé)

Dans le cas du système IC non forcé, il est possible de montrer que le système est globalement asymptotiquement stable. En particulier, en se basant sur des analyses dérivées des travaux de Filippov (1964) sur les systèmes différentiels à second membre discontinu, nous avons pu démontrer qu'il existait en fait trois points vers lesquels les solutions du système IC convergent selon les valeurs des paramètres (cf. Appendix1 in Béné and Lobry pour les détails de l'analyse et sur les notions de systèmes différentiels à second membre discontinu). La conclusion est donc que dans le cas du système IC et sous l'hypothèse d'une sortie de nurserie constante, il n'est pas possible de d'obtenir d'oscillations entre la ressource et la flottille l'exploitant. Ces résultats ont été illustrés par des simulations numériques (Fig.1.14).

En revanche, l'étude indique que pour le système SHC non forcé, il existe des valeurs des paramètres pour lesquelles les solutions ne convergent vers aucun point d'équilibre. Ces valeurs particulières sont identifiables analytiquement. Elles forment une région de l'espace des paramètres. Cette zone, dénommée (B), est représentée sur la Fig.1.15. Des simulations numériques illustrent ces résultats analytiques. On observe que les solutions sont caractérisées par des oscillations périodiques soutenues, indépendantes des conditions initiales. Plusieurs types d'oscillations sont ainsi observables (cf. Fig.1.16). Ces différents cycles permettent de diviser la région (B) en plusieurs sous-régions en fonction des types d'oscillations qui y sont observées (cf. Fig.1.15). Dans le reste de l'espace des paramètres, les trajectoires convergent vers un équilibre. La prise en compte de la discrétisation du processus de décision sous la forme d'un formalisme SHC entraîne donc l'apparition d'oscillations dans le système, ceci même si les deux sous-systèmes S_x et S_y qui le constituent (cf. expression (3) pour mémoire) sont globalement asymptotiquement stables⁴¹.

⁴¹ L'étude analytique de S_x et S_y montre en effet que ces deux sous-systèmes, lorsqu'ils sont considérés séparément, sont globalement asymptotiquement stables (voir p.63 pour les coordonnées des points d'équilibre).

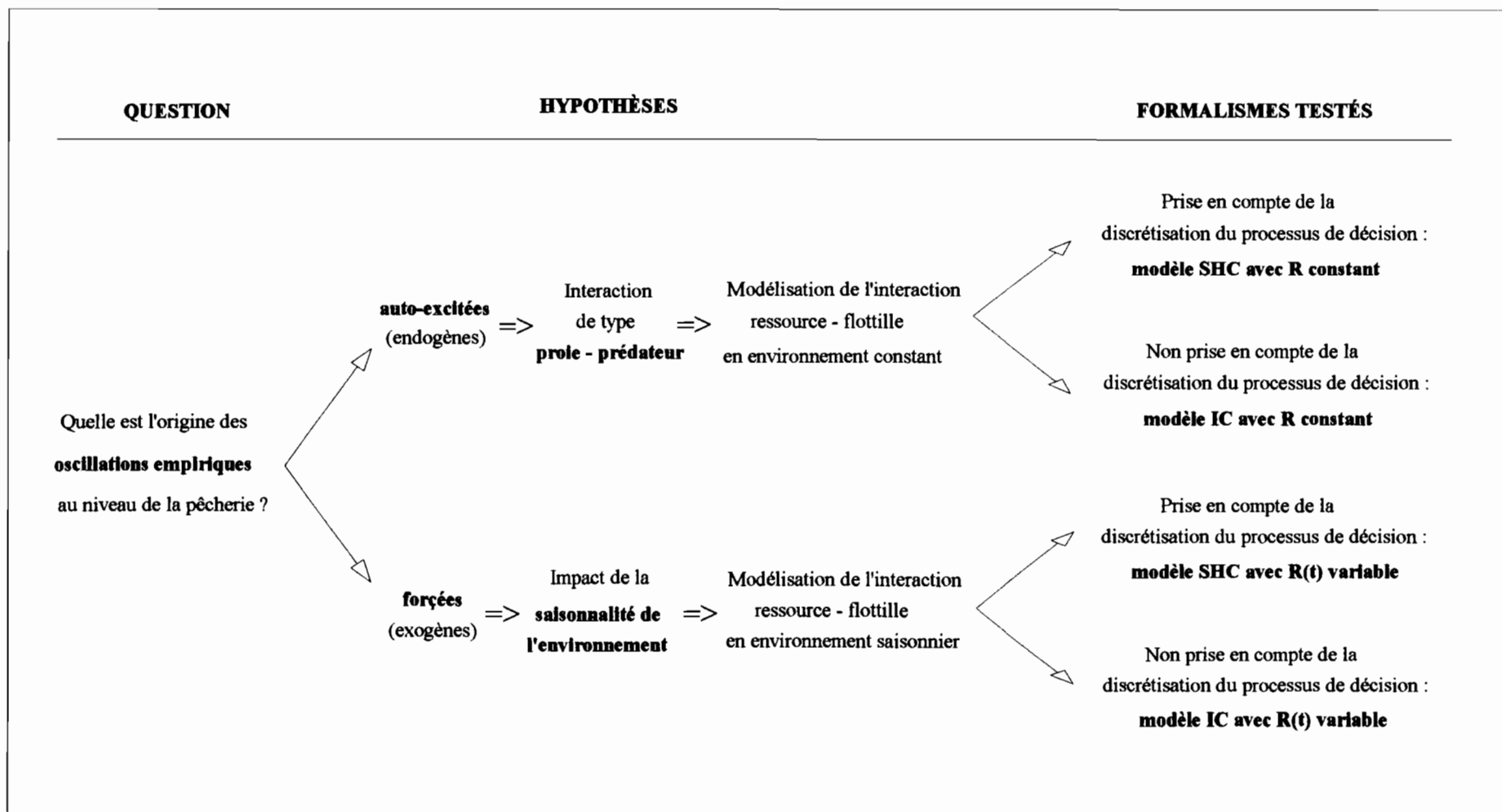


Fig.1.13. Schéma récapitulatif de la problématique développée au cours de la partie de modélisation dynamique de ce premier chapitre. Modèle SHC : *Sample and Hold Control model* ; modèle IC : *Instantaneous Control model* ; R : recrutement (voir texte pour détails).

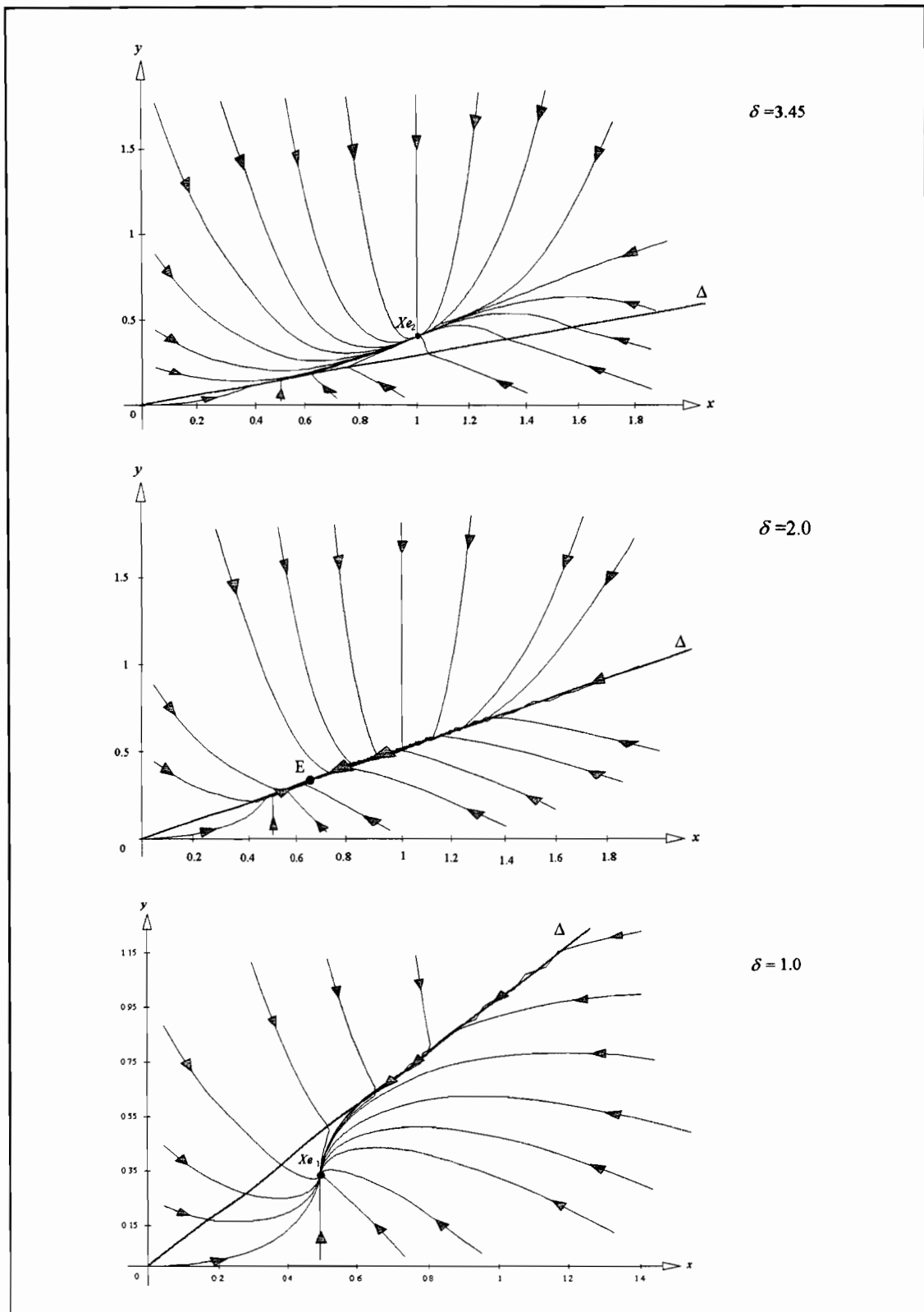


Fig.1.14. Simulations numériques du système IC non-forcé. Le système est globalement asymptotiquement stable et les solutions convergent vers trois points d'équilibre X_{e1} , X_{e2} , ou E , en fonctions des paramètres (ici c'est δ qui varie) (Axes : x = jeunes adultes ; y = adultes matures). On rappelle que la droite Δ d'équation $y = x/\delta$, représente dans l'espace des phases, la frontière entre les deux régions R_x et R_y (cf. § 3.4.).

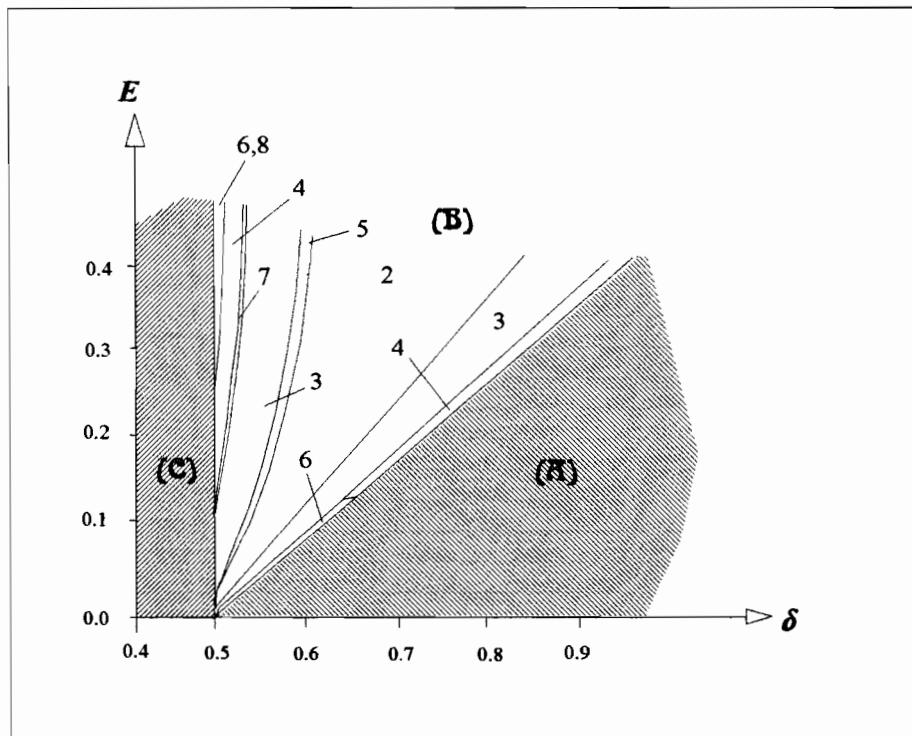


Fig.1.15. Étude du système SHC non-forcé : dans l'espace des paramètres, la région (B) correspond à l'ensemble des couples de paramètres pour lesquels les solutions ne convergent vers aucun point d'équilibre. Pour l'ensemble de ces paramètres, les trajectoires du système sont en fait des cycles. Ces cycles divisent la région (B) en plusieurs sous-régions caractérisées chacune par un type unique de cycle. Les chiffres indiquent la période de ces cycles. Les régions (A) et (C) correspondent à des couples de paramètres pour lesquels le système est stable quelque soient les conditions initiales.

Il nous reste maintenant à déterminer si les oscillations obtenues avec ce système SHC sont qualitativement comparables à celles observées au niveau de la pêche guyanaise. Rappelons que pour cette dernière les oscillations présentent la double caractéristique d'être à la fois symétriques (la période des hauts rendements est égale à celle des bas rendements) et robustes (la saisonnalité est observée sur l'ensemble des 13 années constituant la série des données) et ceci bien que l'environnement ne soit pas resté stable pendant toute cette période.

Nous nous intéresserons par conséquent aux oscillations du modèle dont les périodes sont paires (i.e. de période $T = 2, 4, 6$, etc.) et qui restent inchangées même après de petites variations des paramètres. Les séries qui satisfont la propriété de symétrie sont directement identifiables à partir de l'observation des séries (cf. Fig.1.16).

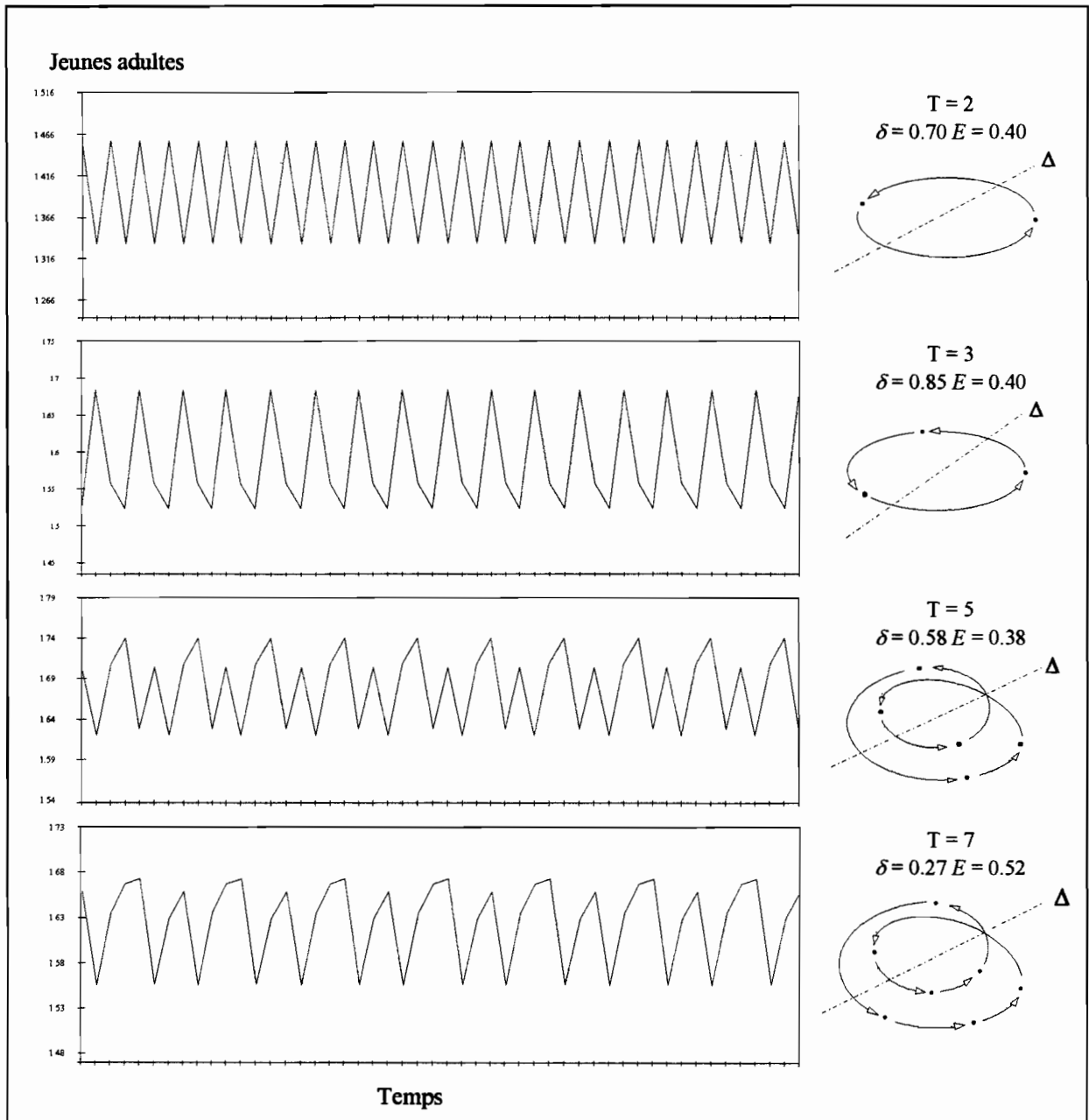


Fig.1.16. Simulations numériques des trajectoires du système SHC non-forcé. Les séries à gauche représentent les valeurs de la variable x (les jeunes adultes) en fonction du temps. Les schémas à droite précisent, pour les valeurs des paramètres δ et E indiquées, la période T des cycles et la localisation dans le plan de phase (x,y) des points d'oscillations par rapport à la droite Δ définie en (1). Les valeurs des autres paramètres utilisés pour ces exemples sont $\mu = 1.0$ et $m = 0.5$.

La propriété de robustesse peut, quant à elle, se déduire de la Fig.1.15 : les oscillations robustes sont en effet celles qui apparaissent sur de larges régions de l'espace des paramè-

tres⁴². L'étude du système montre que, de toutes les oscillations obtenues pour le système SHC, seules celles qui sont de période $T = 2$ satisfont la double condition de symétrie et de robustesse. En effet les autres oscillations symétriques ($T = 4, 6, 8$) concernent des régions très restreintes de l'espace des paramètres et les deux autres régions relativement étendues (correspondant par conséquent à des cycles robustes) concernent des cycles de période $T = 3$ donc non-symétriques (cf. **Fig.1.15**). Dans le cas des oscillations de période $T = 2$, les simulations indiquent qu'après une période transitoire, les trajectoires du système s'installent dans un comportement oscillant entre deux points X^*_1 et X^*_2 dont il est possible de déterminer analytiquement les coordonnées⁴³. Cependant, ces oscillations ne correspondent pas à un processus décisionnel qui semble réaliste du point de vue du comportement pour les pêcheurs : en effet le fait que la période soit $T = 2$ signifie que la ré-estimation de l'abondance de la ressource par les pêcheurs (le "*sampling*" cf. Encadré 1.3) ne s'effectue que deux fois dans l'année, et par conséquent que la flottille n'est susceptible de changer de zone de pêche que tous les six mois.

Par rapport à la **Fig.1.13**, la conclusion générale qui émerge donc de cette analyse est que, sous l'hypothèse d'un recrutement constant, aucun des deux formalismes envisagés (ni le système IC ni le système SHC) ne permet de générer des oscillations auto-excitées du type proie-prédateur qui soient en accord qualitatif, même grossier, avec la saisonnalité observée au niveau de la pêche guyanaise.

3.6. Comportement du système sous l'hypothèse d'un recrutement saisonnier (système forcé)

Il nous reste maintenant à déterminer si l'introduction d'un forçage supposé représenter l'impact de l'environnement sur la ressource peut générer des mouvements se rapprochant de ceux caractérisant la dynamique de la pêche empirique. La théorie des systèmes dynamiques nous dit à ce propos que l'introduction d'un forçage dans un système entraîne généralement l'apparition d'oscillations au niveau de la dynamique globale du système. Il

⁴² Si les oscillations ne sont observées que sur des petites régions de l'espace des paramètres, cela signifie qu'il s'agit d'oscillations qui disparaissent dès que l'on se déplace dans cet espace, c'est-à-dire, dès que des variations, même minimes, affectent les paramètres.

⁴³ Il est en particulier possible de montrer que les coordonnées de ces points d'orbite sont indépendantes du ratio δ .

nous faudra par conséquent re-étudier l'interaction ressource-flottille sous les deux formalismes possibles : le système IC et le système SHC.

3.6.1. Généralités sur les problèmes liés à l'étude des systèmes forcés

L'introduction d'un forçage complexifie le problème et l'étude analytique des systèmes devient plus délicate. En particulier, l'étude des équilibres et de leur stabilité, qui joue un rôle important dans la dynamique de population, est remplacée par l'analyse, plus difficile, de la stabilité de solutions périodiques d'équations différentielles. Une conséquence directe est que les techniques usuelles d'analyse, utilisées pour les systèmes autonomes (comme par exemple l'analyse dans le plan de phase pour les systèmes en 2D, ou les méthodes algébriques de linéarisation autour des points d'équilibres pour les systèmes non-linéaires) ne sont plus valables. Quant aux systèmes discrets non-autonomes, très peu de travaux ont été proposés jusqu'à présent dans la littérature (voir néanmoins ceux de May et Oster (1976) ou ceux de Kot et Schaffer (1984)). Nous nous sommes par conséquent appuyés pour une grande part sur les simulations numériques pour nous guider dans l'étude de la dynamique du système forcé.

Le forçage envisagé concerne l'entrée du système, c'est-à-dire l'arrivée des juvéniles dans la pêcherie au moment du recrutement. Ce recrutement, représenté par le paramètre R avait jusqu'à présent été supposé constant. Nous le considérerons désormais variable et nous lui imposerons plus particulièrement une dynamique de type sinusoïdale :

$$R(t) = \underline{R} + a_R \cdot \cos(2\pi t),$$

le point important pour nous étant d'introduire une fonction périodique qui présente à la fois un maximum et un minimum au cours d'une période de manière, à se rapprocher du profil saisonnier observé pour les facteurs climatiques (pluviométrie, débits des fleuves, etc.). Le choix de la fonction sinusoïdale est ensuite très arbitraire et nous sommes conscients que son remplacement par un autre type de fonction pourrait radicalement changer les résultats obtenus.

Sous l'impact de ce forçage sinusoïdal les points d'équilibre vers lesquels les deux sous-systèmes S_x et S_y (définis en (3)) convergeaient lorsqu'ils étaient considérés séparément (cf. note 41) sont désormais animés de mouvements de période 1. L'identification des équations

de ces mouvements est possible. Il s'agit de la résolution d'un système linéaire triangulaire forcé par une fonction périodique. Ces équations sont pour le sous-système S_x de la forme :

$$(4.a) \quad x(t) = \frac{R}{(m+E)} + \frac{a_R}{\sqrt{4\pi^2 + (m+E)^2}} \cos(2\pi t - \delta) + \left(x_0 - \left(\frac{R}{(m+E)} + \frac{a_R \cos(-\delta)}{\sqrt{4\pi^2 + (m+E)^2}} \right) \right) e^{-(m+E)t}$$

$$(5.a) \quad y(t) = \frac{mR}{(m+E)\mu} + \frac{ma_R}{\sqrt{4\pi^2 + (m+E)^2} \sqrt{4\pi^2 + \mu^2}} \cos(2\pi t - \lambda) + \left(y_0 - \left(\frac{mR}{(m+E)\mu} + \frac{ma_R \cos(-\lambda)}{\sqrt{4\pi^2 + (m+E)^2} \sqrt{4\pi^2 + \mu^2}} \right) \right) e^{-\mu t}$$

avec $\delta = \arctan\left(\frac{2\pi}{m+E}\right)$ et $\lambda = \delta + \arctan\left(\frac{2\pi}{\mu}\right)$, et

$$(4.b) \quad \dot{x}(t) = \frac{R}{m} + \frac{a_R}{\sqrt{4\pi^2 + m^2}} \cos(2\pi t - \delta) + \left(x_0 - \left(\frac{R}{m} + \frac{a_R \cos(-\delta)}{\sqrt{4\pi^2 + m^2}} \right) \right) e^{-mt}$$

$$(5.b) \quad y(t) = \frac{mR}{(\mu+E)m} + \frac{ma_R}{\sqrt{4\pi^2 + (\mu+E)^2} \sqrt{4\pi^2 + m^2}} \cos(2\pi t - \lambda) + \left(y_0 - \left(\frac{mR}{(\mu+E)m} + \frac{ma_R \cos(-\lambda)}{\sqrt{4\pi^2 + (\mu+E)^2} \sqrt{4\pi^2 + m^2}} \right) \right) e^{-(\mu+E)t}$$

avec $\delta = \arctan\left(\frac{2\pi}{m}\right)$ et $\lambda = \delta + \arctan\left(\frac{2\pi}{\mu+E}\right)$ pour le sous-système S_y .

Les expressions (4.a) et (4.b) indiquent que $x(t)$ se confond (après un transitoire en e^{-mt} pour S_x ou $e^{-(m+E)t}$ pour S_y) avec une fonction sinusoïdale qui oscille autour de la valeur d'équilibre du système non-forcé ($x^* = -R/(m+E)$ pour S_x et $x^* = -R/m$ pour S_y). On ob-

tient de même pour $y(t)$ des trajectoires qui oscillent autour de $y^* = \frac{mR}{(m+E)\mu}$ pour S_x et $y^* = \frac{mR}{(\mu+E)m}$ pour S_y). Dans le plan (x,y) les trajectoires des sous-systèmes considérés sépa-

rément ressemblent donc à des "spirales" qui tendent vers une ellipse (**Fig.1.17**).

En revanche, pour le système global constitué des deux sous-systèmes S_x et S_y , la question de déterminer la nature exacte du mouvement périodique n'est pas triviale. On peut néanmoins tenter de mettre en évidence quelques 'règles' très générales. En premier lieu, ce mouvement va dépendre du formalisme utilisé (modèle IC ou SHC), c'est-à-dire, du fait que le processus de décision soit discrétisé ou non.

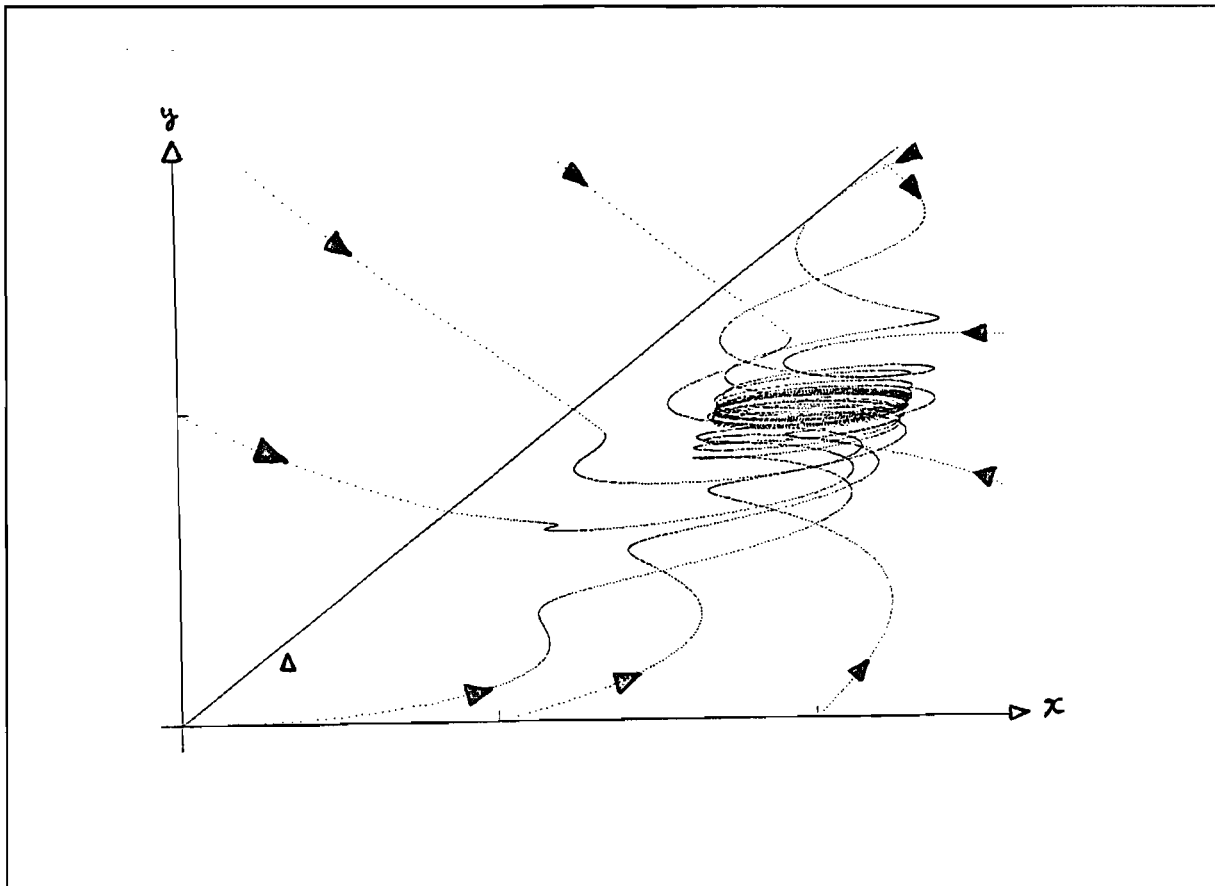


Fig.1.17. Illustration du comportement des sous-systèmes S_x et S_y pour le système IC forcé par une entrée $R(t)$ sinusoïdale. Après le transitoire, les trajectoires tendent vers une ellipse dont le centre est le point d'équilibre du système non-forcé (dans le cas présent, il s'agit des trajectoires obtenues pour le sous-système S_x à partir de plusieurs conditions initiales et pour les valeurs des paramètres suivants : $\delta = 1.25$; $E = 1.0$; $\underline{R} = 2.0$; $a_R = 1.0$; $m = 1.0$; $\mu = 1.0$)

3.6.2. Analyse du système IC

Dans le cas du modèle IC forcé, les simulations indiquent que le comportement du système est caractérisé par l'occurrence de cycles périodiques qui s'établissent après la période de transitoire. Ces cycles sont tous de période égale à la période du forçage. Cependant, ils ne résultent pas simplement de la "juxtaposition" des parties des cycles obtenus de part et d'autre de Δ pour les sous-systèmes S_x et S_y . Ils correspondent à des trajectoires 'transitoires'

périodiques qui s'établissent entre ces deux cycles. Les simulations numériques indiquent que le rapport entre la pression anthropique et le forçage par le recrutement $R(t)$ va jouer un rôle important dans la forme du cycle. Trois types de cycles peuvent ainsi être observés en fonction de la valeur du ratio E / a_R . Ces cycles sont représentés sur la Fig.1.18.

Lorsque l'effort E est faible par rapport à a_R (Fig.1.18.a), le cycle qui s'établit après le transitoire passe alternativement d'une des sous-régions de l'espace des phases à l'autre et présentent deux discontinuités. Ces discontinuités correspondent aux deux prises de décision qui amènent aux changements de zones de pêche. Notons que ces discontinuités sont localisées sur la droite Δ puisque le formalisme IC correspond à la situation où il n'y a pas de retard dans la prise de décision. La réorientation de l'effort se fait donc instantanément dès que le système croise Δ . Lorsque la valeur de l'effort augmente par rapport au forçage d'entrée $R(t)$ (Fig.1.18.b), une partie du cycle reste 'collée' sur la droite Δ . Cela correspond à la partie du cycle où l'impact de l'effort de pêche est suffisamment important par rapport au forçage pour que le système passe alternativement d'une région à l'autre à chaque unité de temps⁴⁴. Ce n'est que lorsque le forçage d'entrée $R(t)$ présente les valeurs les plus importantes de sa fonction sinusoïdale (en valeur absolue) qu'il surpasse cet effet et que la trajectoire 'décolle' de la droite Δ . Enfin, le dernier cas (Fig.1.18.c) correspond à la situation où les valeurs de la pression anthropique E sont telles que quelques soient les valeurs du forçage $R(t)$ le système passe alternativement de l'une à l'autre des deux sous-régions pendant l'ensemble du cycle du forçage. Les trajectoires restent alors collée sur Δ pendant l'ensemble de ce cycle et se déplacent alors uniquement le long de Δ (en réalité en un mouvement très rapide de R_x vers R_y et inversement).

3.6.3. La preuve de l'impact anthropique ?

Remarquons à partir de cette Fig.1.18, qu'au fur et à mesure que le ratio E / a_R augmente, les occurrences des maxima respectifs des deux variables (représentés par les symboles $|+$ pour x et $+$ pour y) se rapprochent de plus en plus dans le temps au cours du cycle. Ils finissent d'ailleurs par se confondre (cf. Fig.1.18.c) (les minima symbolisés par $-|$ pour x et $-$ pour y faisant de même).

⁴⁴ C'est ce qui donne l'impression visuelle que la trajectoire reste sur Δ (cf. Fig.A5 de Appendix1 in Béné and Lobry Annexe 5).

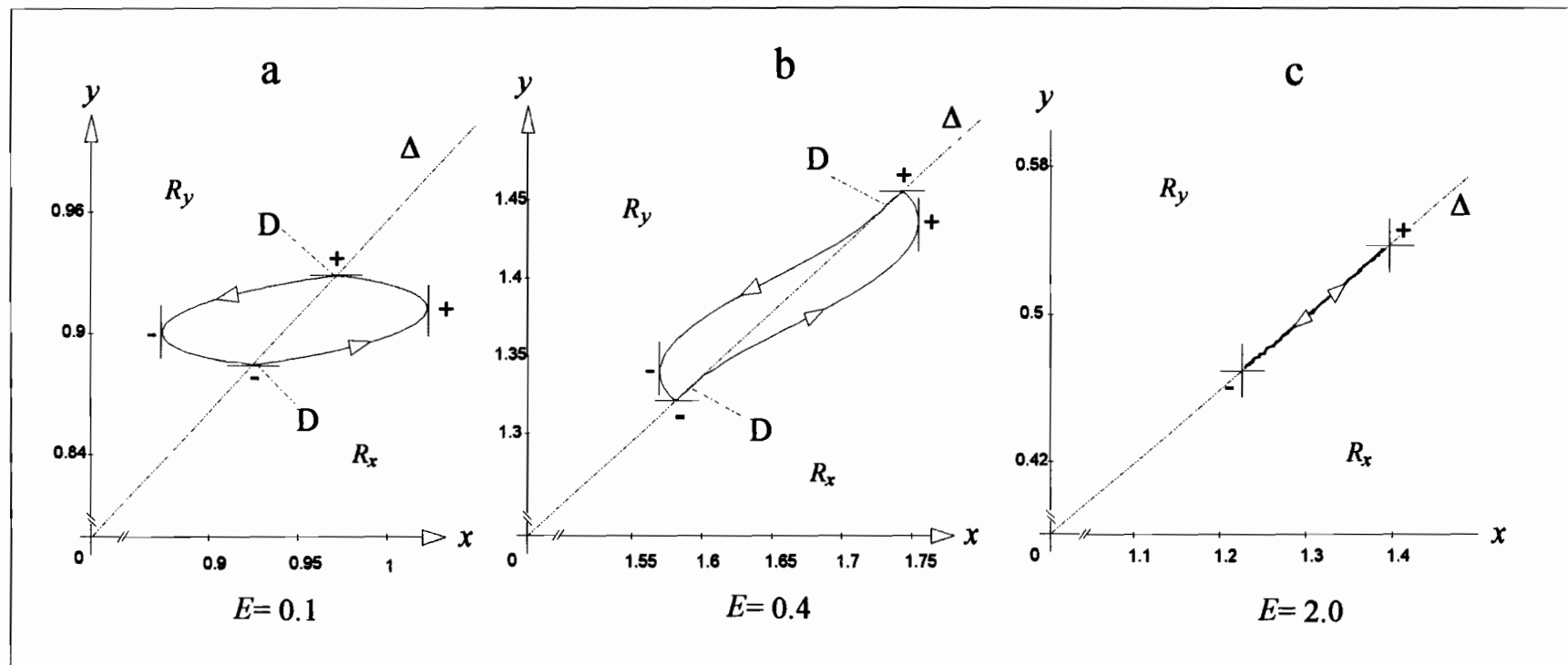


Fig.1.18. Illustration des trois types de cycles obtenus dans le cas du système IC. Axes : x = jeunes adultes ; y = adultes matures. Les quatre extrema du cycle sont représentés par les symboles $|+$ et $|+$ pour les maxima respectifs de x et y et $-|$ et $-|$ pour les minima. Les symboles (D) indiquent les discontinuités associées aux cycles*. Le ratio E / a_R augmente de gauche à droite (les exemples donnés comme illustrations ont été obtenus pour les valeurs des paramètres : $\underline{R} = 2.0$, $a_R = 1.0$, $m = 1.0$, $\mu = 1.0$ et les valeurs de E indiquées sur les diagrammes).

* Dans le cas (a) il n'y a que deux discontinuités, dans le cas (b) les discontinuités ont lieu tout le long de la partie du cycle localisée sur Δ et dans le cas (c) elles ont lieu tout le long du cycle qui s'est établi entièrement le long de Δ entre les extrema. Ces derniers se sont d'ailleurs rejoint et ne forment plus que deux points (cf. texte pour commentaires).

Ceci signifie que les extrema des jeunes adultes et des adultes matures, qui, lorsque aucune pression anthropique n'est imposée⁴⁵, ont lieu à des moments différents au cours du cycle, peuvent ensuite apparaître simultanément sous l'effet de la mortalité par pêche. Autrement dit, l'introduction de la pression anthropique exercée par la flottille sur le stock amène à la concordance des extrema des deux catégories. Il est intéressant de rapprocher cette remarque, issue de simples simulations numériques, des travaux récents de Bernard and Souissi (soumis). Ces derniers démontrent analytiquement puis illustrent par des exemples empiriques que l'impact d'une relation trophique sur une population structurée en stades (une prédation sur une population de crustacés par exemple) peut modifier l'ordre avec lequel les extrema des différents stades de cette population vont apparaître au cours du temps.

Or on rappelle que l'étude des données de *P. subtilis* avait mis en évidence un phénomène similaire de concordance entre les extrema des jeunes adultes et des adultes matures. Les analyses indiquaient en effet que la période de forte abondance des jeunes stades à la côte avait lieu en même temps que celle des stades matures au large, et qu'il en était de même pour la période de faible abondance (cf. **Fig.1.10** pour rappel). Ce phénomène de concordance d'extrema nous avait d'ailleurs amenés à ce stade de l'analyse à nous interroger sur l'exactitude de nos résultats⁴⁶. L'interprétation est désormais différente. L'existence de ce phénomène suggère que si notre modèle est correct, nous nous trouvons alors dans une situation où la pression anthropique est suffisamment forte pour avoir modifié la structure de la population par rapport à celle qu'elle présenterait si elle était inexploitée ou faiblement exploitée⁴⁷. Cette remarque reste bien entendu à l'état d'hypothèse dans la mesure où elle est fortement liée au formalisme qui a été adopté pour le modèle. Elle souligne en tous cas la nécessité de mener une étude plus détaillée basée sur des estimations directes de la ressource (et non plus à partir des données commerciales comme c'est le cas ici), dans le but de déterminer avec précision si, réellement, les maxima des différents stades exploités ont lieu à la même période de la saison. Si c'est le cas, on pourra alors conclure avec assurance que l'effort de pêche de la flottille a un impact significatif sur la population exploitée et en parti-

⁴⁵ Le maximum [resp. minimum] des jeunes étant observé avant celui des matures.

⁴⁶ Cf. note 37.

⁴⁷ Les formules (5.a) et (5.b) montrent que dans le cas du sous-système S_1 (exploitation des matures uniquement) le déphasage entre la dynamique des matures et des juvéniles (le terme $\delta\lambda$) est d'autant plus faible que l'effort E est grand).

culier en modifie la structure. Cela n'autorise pas, en revanche, à tirer de conclusion sur un éventuel état de surexploitation du stock.

3.6.4. Analyse du système SHC

Dans le cas du système SHC forcé, l'étude est encore plus complexe. Les analyses qu'elle implique dépassant largement le cadre de cette thèse, nous nous sommes 'contentés' d'observer, à partir de simulations numériques, le comportement général du système et de déterminer dans quelles mesures cette analyse visuelle nous permettait de tirer des enseignements utiles par rapport à notre problématique. Au préalable, on peut cependant tenter, à défaut de la surmonter, d'expliquer la difficulté. Une des raisons de la complexité de l'étude du système SHC forcé est la suivante : on se souvient que dans le cas du système SHC non forcé, on avait observé que ce dernier était caractérisé par l'occurrence de cycles dont la période était variable et dépendait entre autres des valeurs des paramètres μ , m , δ , et E (cf. Fig.1.15 et 1.16 pour mémoire). Dans le cas du système forcé, ce phénomène est toujours présent mais il vient s'y surimposer l'impact du forçage saisonnier de $R(t)$.

Une fréquence de décision intéressante à analyser est $F = 12/P$ (où P représente la période du forçage, supposée s'étendre sur la saison). Ce cas correspond à la situation où la flottille réestime l'état de la ressource tous les mois. La longueur des marées étant d'environ 25 jours, si l'on tient compte de l'immobilisation de 2 à 3 jours des navires au port entre chaque marée pour l'avitaillement et la maintenance technique, on observe que les navires font environ 12 marées par an. Le choix de cette fréquence $F = 12/P$ satisfait donc à un certain degré de réalisme : on suppose ainsi que les pêcheurs décident à chaque début de marée la zone où ils vont exercer leur activité de pêche (côte ou large).

Des analyses préliminaires ont cependant été menées avec une autre fréquence : $F = 2/P$. Cette fréquence est beaucoup moins en accord avec ce que l'on peut s'attendre à observer empiriquement puisque dans ce cas le processus décisionnel est engagé seulement tous les six mois⁴⁸. Néanmoins l'étude de l'interaction ressource-flottille sous cette hypothèse est simplifiée par rapport aux autres cas, dans la mesure où cette fréquence bi-annuelle correspond à la fréquence minimale possible pour les processus décisionnels. Dans ce cas, les si-

⁴⁸ On se souvient d'ailleurs que cette représentation trop grossière de la réalité avait été rejetée dans le cadre du modèle SHC non forcé.

simulations numériques montrent qu'un cycle s'établit après le transitoire, passant alternativement de l'une des deux sous-régions de l'espace des phases à l'autre (i.e. de part et d'autre de la droite Δ).

Dans le cas où $F = 12/P$, (et en fait pour tous les cas où $F > 2/P$) les simulations numériques indiquent que le système atteint, là aussi, asymptotiquement un cycle périodique mais que ce dernier peut se relever relativement compliqué. De la même manière que pour le formalisme IC forcé, la forme du cycle va, dans le cas du modèle SHC forcé, dépendre de la combinaison entre l'impact de la mortalité par pêche et celui du forçage saisonnier du recrutement. Ces deux facteurs ont, en effet, des impacts opposés⁴⁹ pendant une partie de la saison (en fait la moitié de cette dernière). La Fig.1.19 illustre quelques uns des cycles que l'on peut obtenir dans ce cas.

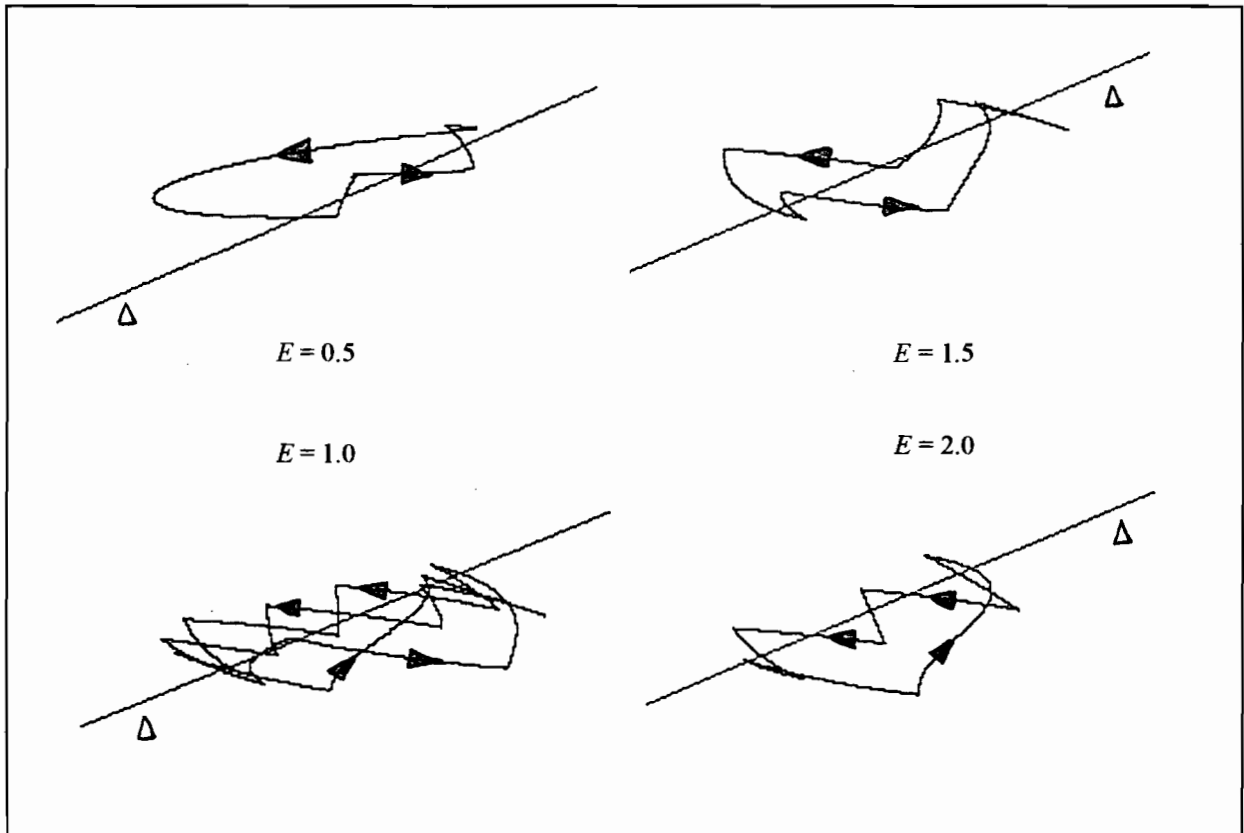


Fig.1.19. Quatre exemples de cycles obtenus après le transitoire pour le modèle SHC forcé avec une fréquence de décision $F = 12/P$. Les valeurs des paramètres utilisés pour ces exemples sont les suivants : $\underline{R} = 2.0$; $a_R = 1.0$; $m = 1.0$; $\mu = 1.0$; $\delta = 2.5$ et les valeurs indiquées sur la figure pour E .

⁴⁹ Ainsi, du point de vue géométrique ces impacts se traduisent par le fait que le forçage tend pendant cette période à éloigner la trajectoire de la droite Δ alors que la mortalité par pêche tend à 'plaquer' la trajectoire sur Δ .

Si l'on replace ces derniers résultats et ceux obtenus pour le modèle IC par rapport à la problématique de départ schématisée par la Fig.1.13, l'ensemble de ces analyses semblent indiquer que seul un système de type IC forcé est en mesure de générer des oscillations qui se rapprochent de celles observées empiriquement au niveau de la pêche. Cela nous amène donc à pencher pour l'hypothèse suggérant des oscillations de nature exogènes, induites par la saisonnalité de l'environnement. Ce serait ensuite la saisonnalité de la ressource résultant de cet impact qui entraînerait les mouvements de la flottille. Remarquons cependant que cette conclusion ne signifie pas pour autant que la pression anthropique imposée par la flottille ne se combine pas au forçage exogène de l'environnement pour entretenir les oscillations de la ressource.

3.6.5. La pression anthropique, effet stabilisant ou déstabilisant ?

Les expressions (4.a-b) et (5.a-b) qui représentaient les oscillations de $x(t)$ et $y(t)$ dans les sous-systèmes S_x et S_y nous permettent de déterminer l'impact de l'effort lorsque ces deux sous-systèmes sont considérés séparément. Elles indiquent que lorsque E augmente, ces amplitudes diminuent. En revanche, l'impact de l'effort E sur la forme des oscillations obtenues pour le modèle global n'est pas clairement établi. En particulier, on peut s'interroger sur les effets de la saisonnalité côte-large de l'effort de pêche sur l'amplitude des oscillations : est-ce que cette répartition saisonnière accentue encore les oscillations générées par l'environnement ou bien, au contraire, est-ce qu'elle les réduit ? C'est pour tenter de répondre à cette question que de nouvelles simulations ont été effectuées à partir du modèle IC forcé. Par ces simulations, nous avons observé l'évolution des amplitudes des oscillations affectant $x(t)$ et $y(t)$ lorsque l'effort E varie. Le résultat est représenté sur la Fig.1.20. On observe que les amplitudes des oscillations ne sont pas indépendantes de l'effort et plus particulièrement que la relation est non-monotone. Ainsi, pour les faibles valeurs de E , les oscillations de $x(t)$ diminuent lorsque E augmente alors que celles de $y(t)$ augmentent. Au contraire, pour une pression anthropique plus forte, les oscillations de $x(t)$ augmentent de nouveau (très légèrement) alors que celles de $y(t)$ diminuent de manière conséquente. Cette non-monotonie provient de la modification de la forme du cycle qui accompagne l'augmentation de l'effort⁵⁰. La conclusion à tirer de cette analyse est donc qu'il n'est pas possible de

⁵⁰ Pour le domaine des valeurs de E choisies dans l'exemple on passe du type de cycle représenté sur la Fig.1.18.b au type représenté sur la Fig.1.18.c.

déterminer, au niveau du modèle, si la pression anthropique accentue les oscillations générées initialement par le forçage de $R(t)$ ou bien au contraire si elle les amortit.

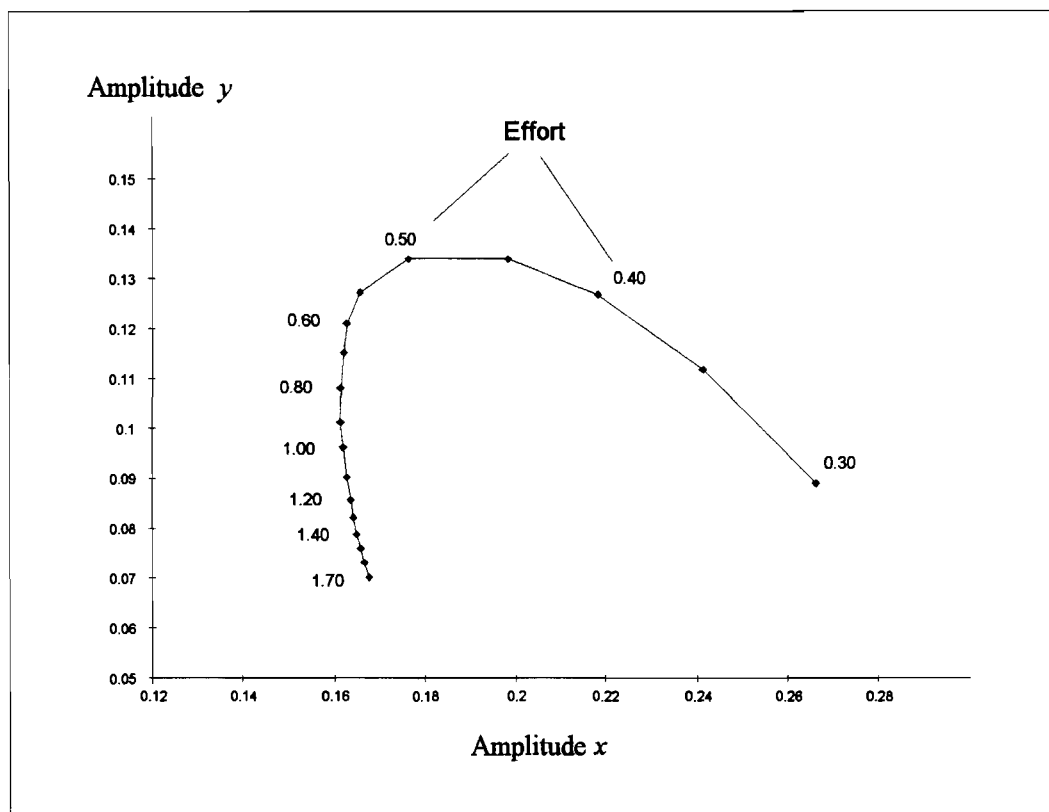


Fig.1.20. Amplitude des oscillations de la ressource en fonction de l'effort E . Les couples de points de la courbe indiquent les amplitudes pour la variable $x(t)$ (axe X) et ceux pour la variable $y(t)$ (axe Y) dans les cycles stables obtenus pour les valeurs de l'effort indiquées sur le diagramme (cycles obtenus après le transitoire à partir de simulations numériques du modèle IC, pour les valeurs des paramètres suivants : $\underline{R} = 2.0$; $a_R = 1.0$; $m = 1.0$; $\mu = 1.0$). Pour les commentaires, voir texte.

Cette incertitude se retrouve au niveau de la pêche elle-même. En admettant que l'origine des oscillations observées empiriquement soit bien liée à l'impact d'un facteur environnemental (agissant, par exemple, sur les post-larves se développant dans les nurseries), il est difficile, dans l'état actuel de nos connaissances, de savoir si les mouvements saisonniers qui animent la répartition de l'effort de pêche accentuent ou non ces oscillations d'origine environnementales.

À ce stade, la poursuite des travaux de modélisation pourrait s'envisager de la manière suivante :

- (i) Étude systématique du modèle au recrutement saisonnier.
- (ii) Reprise, sous l'hypothèse d'un recrutement constant, des hypothèses SHC et IC dans un modèle structuré en plus de deux stades, voire dans un modèle continu en taille de type Von Foester (1959)-McKendrick (1926), et analyser alors l'apparition de solutions périodiques éventuellement plus réalistes que celles observées jusqu'à présent.
- (iii) Reconsidérer, en fonction des résultats, le cas du recrutement saisonnier.

Ce travail de mathématiques expérimentales (expérimentales en ce sens que l'impossibilité du calcul 'à la main' est palliée par des simulations sur ordinateur) semble ne pas devoir rencontrer d'obstacle majeur, à tel point qu'il pourrait difficilement être considéré comme un travail de recherche en mathématiques. Toutefois, il risque d'être long : quelques années pour un individu seul, quelques mois pour une équipe ayant les compétences techniques nécessaires. En tout état de cause, la pertinence d'un tel travail nous semble être étroitement liée à la possibilité d'effectuer un travail sur le terrain permettant d'acquérir des données. En l'absence de données supplémentaires concernant en particulier le recrutement et le profil de sortie des nurseries, il nous semble inutile de continuer dans cette direction.

3.7. Synthèse des résultats et enseignements

Rappelons notre problématique de départ: au vu de la **Fig.1.8** nous cherchions à déterminer si les différentes oscillations observées au niveau de la pêche guyanaise résultent d'une interaction de type proie-prédateur entre la ressource et la flottille ou bien si ces oscillations découlent de l'impact de l'environnement saisonnier sur un des premiers stades du cycle de la ressource(cf. **Fig.1.13**). La théorie des systèmes dynamiques nous confortait dans notre interrogation puisqu'il a été montré depuis longtemps que les oscillations périodiques soutenues apparaissant dans un système dynamique peuvent être soit endogènes (c'est-à-dire engendrées par une interaction entre les composants du système -les relations proie-prédateur rentrent dans cette catégorie), soit forcées (et dans ce cas les oscillations résultent d'un forçage exogène oscillant). Les deux conditions étant réunies (une relation proie-prédateur et un environnement saisonnier) au niveau de la pêche guyanaise, les deux types d'oscillations étaient donc théoriquement possibles. La question se déplaçait alors vers le problème de savoir si les connaissances empiriques que nous possédions pouvaient nous aider à déterminer lequel de ce deux types d'oscillation étaient à l'origine des oscillations observées.

Plusieurs points méritent d'être notés. Le premier concerne l'aspect 'mathématique théorique' du contenu de ces travaux. Aussi limité soit-il, ce contenu présente une certaine cohérence avec les connaissances apportées par la théorie des systèmes dynamiques. Par exemple, le fait que le système SHC non-forcé (prenant en compte la discrétisation du processus de décision) soit caractérisé par un comportement plus complexe que son équivalent en continu (le système IC non-forcé) s'accorde avec certains principes de cette théorie. Cette discrétisation correspond en effet à l'introduction d'un retard dans la dynamique de contrôle du système, ce qui est généralement reconnu comme une source d'instabilité pour les systèmes.

Le second point concerne l'interprétation à proprement parlé de tous ces résultats par rapport à notre objectif de départ. En dehors de toute contrainte imposée par la recherche d'une validation, soit elle qualitative, deux arguments essentiels laissent à penser que les conclusions auxquelles nous arrivons sont correctes et que l'origine des oscillations qui caractérisent la ressource se trouve bien dans l'action de l'environnement sur le stock.

Premièrement, du point de vue mathématique, nous avons constaté que la nature des oscillations endogènes obtenues avec le système SHC non-forcé était fonction des valeurs des paramètres. En particulier la période et le profil de ces oscillations dépendent de la valeur de l'effort. Si les oscillations de la pêche étaient de même nature que ces oscillations théoriques (i.e. auto-entretenues), cela signifierait que la période et le profil des premières devraient changer au fur et à mesure que ces pêcheries se développent et que leur effort de pêche augmente. Or nulle part dans la littérature, il n'a été reporté de tels changements dans les fluctuations saisonnières qui animent les pêcheries crevettières.

Cette dernière remarque sur les autres pêcheries crevettières nous permet d'introduire le second argument suggérant la validité des conclusions proposées. Une recherche bibliographique effectuée sur les pêcheries crevettières équatoriales et tropicales en activité dans le monde montre que toutes ces pêcheries sont caractérisées par des oscillations saisonnières de leur ressource, ou, dans le cas d'absence d'estimations directes de la ressource, des rendements des flottilles qui les exploitent. C'est par exemple ce qu'observèrent Staples et al. (1984) ou Somers et al. (1987) pour la pêche du Golfe de Carpentaria (Australie), Brunenmeister (1984) ou Carothers and Grant (1987) pour la pêche américaine du Golfe du Mexique et Gracia (1991) pour la partie mexicaine, Browder (1985) pour la pêche de Floride, Lam et al. (1989) pour la pêche de Caroline du Sud. Dans leur synthèse biblio-

graphique Dall et al. (1990: 293) notent d'ailleurs : « *In all the countries examined, the period of higher catch per unit of effort appears to coincide with the main period of rainfall* ». Toutes ces études semblent donc indiquer que les propriétés qui caractérisent les oscillations de la pêche guyanaise (entre autres les propriétés de symétrie et de robustesse) ne sont pas spécifiques à cette pêche, mais qu'elles sont, au contraire, observées dans un grand nombre de pêcheries tropicales ou équatoriales. La généralisation de ces caractéristiques fait donc penser que ces oscillations proviennent d'un facteur commun à toutes les pêcheries. Seul un facteur exogène global tel que la saisonnalité de l'environnement peut donc être à l'origine de ces oscillations.

~ o0o ~

CONCLUSION AU CHAPITRE 1

La ressource est généralement la première source de perturbation que l'on observe lorsque l'on s'intéresse à la variabilité qui affecte les systèmes d'exploitation. Nous nous devons par conséquent de commencer notre réflexion par l'étude de la variabilité de l'espèce exploitée par la pêche crevettière guyanaise. Ce fut l'objet de ce premier chapitre.

Cette étude nous a ainsi appris que *Penaeus subtilis* ne peut pas être considérée comme une ressource 'instable', au sens où on l'entend pour certaines autres ressources rencontrées dans le domaine halieutique. L'analyse des séries temporelles des captures souligne en effet que la variabilité globale de *P. subtilis* est marquée essentiellement par sa composante saisonnière, et les pêcheurs de la pêche parlent d'ailleurs de la ressource en faisant allusion à une partie de cache-cache : « *Shrimp ? It keeps paying hide-and-seek game ! It disappears during the dry season but you get it back at the start of the rainfall season* ». On peut donc être tenté de parler de 'fluctuabilité prévisible', ce qui en soit peut sembler un concept quelque peu paradoxal mais qui, dans les faits, correspond à quelque chose de relativement classique. Dans certaines circonstances, les fluctuations qui affectent notre environnement se révèlent importantes mais prévisibles. C'est exactement ce qui est observé ici au niveau de l'évolution intra-annuelle de la ressource. Les variations saisonnières qui animent la ressource excluent l'idée d'équilibre statique mais autorisent, en revanche, à parler de prédictibilité relative : bon an, mal an, le début de la saison sera toujours marqué par des niveaux de captures élevés alors que la fin de la saison sera, au contraire, caractérisée par des rendements plus faibles (cf. Fig.1.9 pour mémoire). Rien à voir donc avec les 'caprices' ou les 'sautes' d'abondance imprévisibles qui secouent certaines populations marines, par exemple les petits pélagiques⁵¹.

Cette variabilité prévisible, imprimée par la saisonnalité, c'est en quelque sorte la 'dynamique ostentatoire' de la ressource, celle que l'on identifie par une simple étude des séries temporelles des captures. Nous avons, à ce propos, reconnu au cours de ce premier chapitre le rôle primordial que joue cette saisonnalité dans l'activité de la pêche. C'est elle, en effet,

⁵¹ Pour un état de l'art sur ces populations marines instables et sur les problèmes qu'elles soulèvent en terme de gestion, cf. Béné (1992). Voir également l'article de synthèse de Garcia (1984) et l'ouvrage de Cury et Roy (1991).

qui est à l'origine des mouvements saisonniers observés au niveau de la flottille. Cependant, les analyses ont également montré que sous cette dynamique 'de premier abord', s'en trouve une seconde, plus discrète, et pourtant tout aussi fondamentale. Cette dynamique cachée, c'est celle du « découplage des générations » menant à l'absence de relation stock-recrutement entre les générations successives constituant le stock -voir à ce propos les positions de Garcia (1983) et McGuire (1990). Les analyses ont en effet confirmé ce que les études sur les autres *Penaeides* suggéraient par analogie. L'abondance du stock reproducteur n'a pas d'influence sur l'abondance des nouvelles recrues qui arriveront dans la pêcherie la saison suivante. Or, constater l'absence de relation de stock-recrutement (RSR) pour une espèce marine fait partie des conclusions qui ont embarrassé les biologistes marins depuis toujours. Dans les premiers temps des études halieutiques, au début du siècle, l'espoir était encore de mise. Les échecs répétés dans cette recherche étaient expliqués à l'époque par les limitations réelles des techniques d'échantillonnage. Cependant, lorsque ces dernières se furent améliorées et ne pouvaient alors plus être considérées comme la raison de cet échec, les biologistes furent contraints de reconnaître que l'absence de RSR empirique avait quelque chose de troublant et d'exaspérant. Le concept de RSR jouit en effet d'une existence justifiée par une règle biologique des plus solides : il n'y a pas de générations spontanées. Autrement dit, « *The argument begins with logical necessities: without stocks, recruitment is zero, and when there are stocks, there will be recruitment* » (Peters 1991: 191).

Cependant, dans le cas des *Penaeides*, l'idée d'un découplage des générations a été plus facile à admettre dans la mesure où, pour ce type de ressource, une explication possible existe. C'est le fait que la partie du cycle concernant les jeunes stades du cycle (par définition les plus fragiles), se trouve en contact avec un environnement particulièrement variable. Cette phase critique du cycle est celle qui se déroule dans les mangroves et les marais, là où l'influence des facteurs terrestres comme la pluviométrie et le débit des fleuves est très marquée. Dans ces circonstances, l'abondance des stocks s'avère directement proportionnelle à la quantité des post-larves qui sortent des nurseries (d'où l'importance d'essayer de déterminer le profil annuel de sortie de ces nurseries) mais elle n'est en revanche pas proportionnelle à la quantité des larves qui y sont rentrées. L'impact de l'environnement au niveau de ces nurseries rompt complètement la continuité qui lie initialement les générations successives entre elles et entraîne un découplage entre les dynamiques respectives de ces dernières.

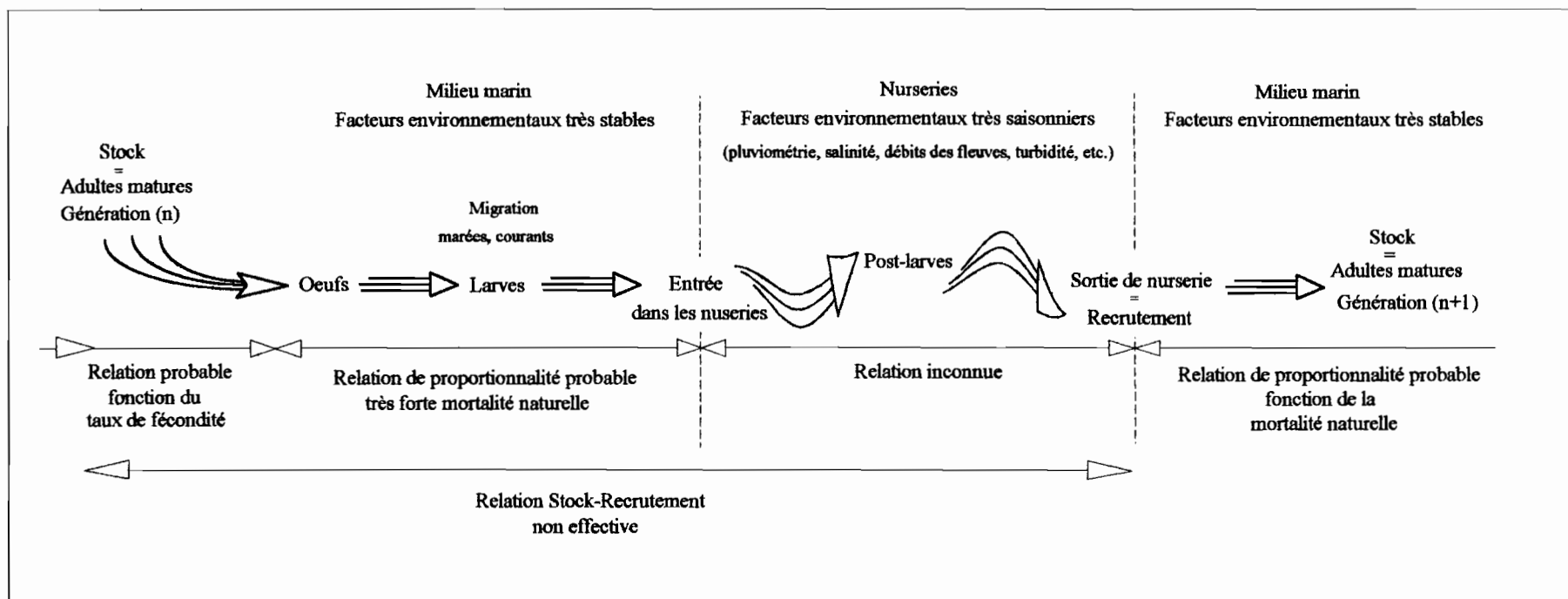


Fig. 1.21. Schémas synthétique rappelant l'argumentation qui nous mena à adopter l'hypothèse du découplage entre les générations successives constituant les stocks de Penaeidae et à considérer la relation Stock-Recrutement comme inexistante pour ce type de ressource.

C'est cette idée de découplage que l'on a essayé de représenter sur la Fig.1.21 en même temps que l'ensemble des arguments qui nous ont conduits à cette conclusion.

Ce découplage entre générations a donc une explication écologique. Ses conséquences, en revanche, se retrouvent au niveau halieutique. Rappelons que les *Penaeides* sont des espèces à vie très courte (environ 18 mois dont au moins 4 avant que les juvéniles rejoignent la fraction du stock exploitée). Dans ces conditions, les stades exploités ne restent guère plus d'une saison dans la pêcherie. Cela signifie que les différentes fractions exploitées de chaque génération ne se chevauchent pas et surtout que la flottille exploite au cours de la saison les individus d'une seule cohorte (pêcherie 'mono-cohorte'). Cette caractéristique avait déjà été notée pour de nombreuses autres espèces de *Penaeides*. Elle est généralement présentée comme l'une des spécificités majeures de ce type de pêcherie. La différence est grande par conséquent avec les pêcheries où les captures annuelles intègrent plusieurs cohortes et où surtout, chaque cohorte est exploitée sur plusieurs saisons de pêche. Dans ce dernier cas, le volume des captures d'une saison dépend bien évidemment de ce qui n'a pas été prélevé la saison précédente, c'est-à-dire, de la 'fraction survivante' (*'escapement'*). C'est la raison pour laquelle, ce concept de fraction survivante est si important en général en halieutique.

Dans le cas des *Penaeides*, les choses sont bien différentes. Le volume des captures d'une saison donnée est complètement indépendant de la fraction survivante de la saison précédente (fraction qui d'ailleurs tend à être nulle du fait de la vie courte des *Penaeides*). Les débarquements ne dépendent par conséquent en aucun cas de l'effort qui a été imposé sur la ressource la saison précédente (pour les valeurs de l'effort telles qu'elles sont actuellement appliquées dans la pêcherie). Toutes ces remarques forment la base du raisonnement qui nous a amené à considérer la ressource comme une variable exogène à l'activité anthropique de la flottille.

Le point majeur de ce premier chapitre tient dans cette dernière phrase : l'hypothèse selon laquelle, dans les conditions actuelles d'exploitation, on peut penser que l'abondance de la ressource est indépendante de la pression de pêche. C'est cette hypothèse que nous allons adopter par la suite et sur laquelle nous avons développé les deux chapitres qui suivent. En attendant, terminons ce Chap.1 en soulignant les implications qu'entraînent les résultats présents en terme de programme de recherche. En particulier, pendant très longtemps on a véhiculé l'idée que les variations du recrutement étaient fortes et que tant que l'on ne connaissait pas la relation stock-recrutement et l'impact du milieu sur le recrutement, on ne

pouvait pas gérer la pêche. Qu'en est-il de ce postulat au vu des résultats présentés dans de ce Chap.1 ?

Deux remarques nous semblent importantes. Si l'on s'en tient aux résultats purement biologiques de ce Chap.1 et si un programme dont l'objectif est d'améliorer les connaissances du recrutement doit voir le jour, alors il serait intéressant que ce dernier se concentre sur la détermination du profil annuel de sortie des nurseries. Rappelons en effet qu'à l'heure actuelle, nous ne savons toujours pas si les juvéniles sortent des nurseries de manière continue, saisonnière, ou sporadique (cf. Chap.1-§ 1.2.3.). Or, comme nous l'avons souligné, aucun travail de modélisation n'est désormais raisonnablement envisageable sans avoir déterminé au préalable ce profil de sortie des nurseries (cf. commentaires p.72). Par ailleurs, les résultats des travaux sur les autres espèces de *Penaeides* s'accordent avec les conclusions de notre analyse pour souligner que la sortie des nurseries est la partie critique du cycle de l'espèce. Si, comme il semble que c'est le cas, la mortalité des post-larves dans les nurseries est fortement inféodée aux conditions environnementales rencontrées dans ces zones dessalées et est telle qu'elle entraîne un découplage complet entre les générations successives (voire une absence de relation entre l'abondance des larves rentrant dans les nurseries et celle des juvéniles en sortant quelques semaines plus tard), alors la question du recrutement ne pourra être éclaircie qu'à partir d'un échantillonnage *direct*, effectué à la *sortie* des nurseries et non à leur *entrée* comme il a été fait lors du dernier programme effectué sur cette question en Guyane (Lhomme 1991, 1992, Vendeville 1992). Cet échantillonnage en sortie de nurserie est le seul, en effet, qui permettrait, en comparant l'abondance des juvéniles de la génération (n+1) à celle du stock des matures de la génération (n), de savoir si véritablement il n'existe aucune Relation de Stock-Recrutement (RSR) comme les études semblent le suggérer à l'heure actuelle. Il apparaît en revanche totalement improbable au vu de la Fig.1.22 et des conclusions soulignées par la littérature qu'un échantillonnage effectué au niveau de l'entrée des nurseries puisse apporter des informations interprétables en terme de dynamique de recrutement⁵².

⁵² Bauer (1989) donne même l'exemple de neuf espèces de crevettes tropicales qui, bien que caractérisées par des pontes continues tout au long de l'année, présentent des recrutements saisonniers. D'après l'auteur, ce phénomène serait dû à l'action des facteurs environnementaux au niveau des nurseries.

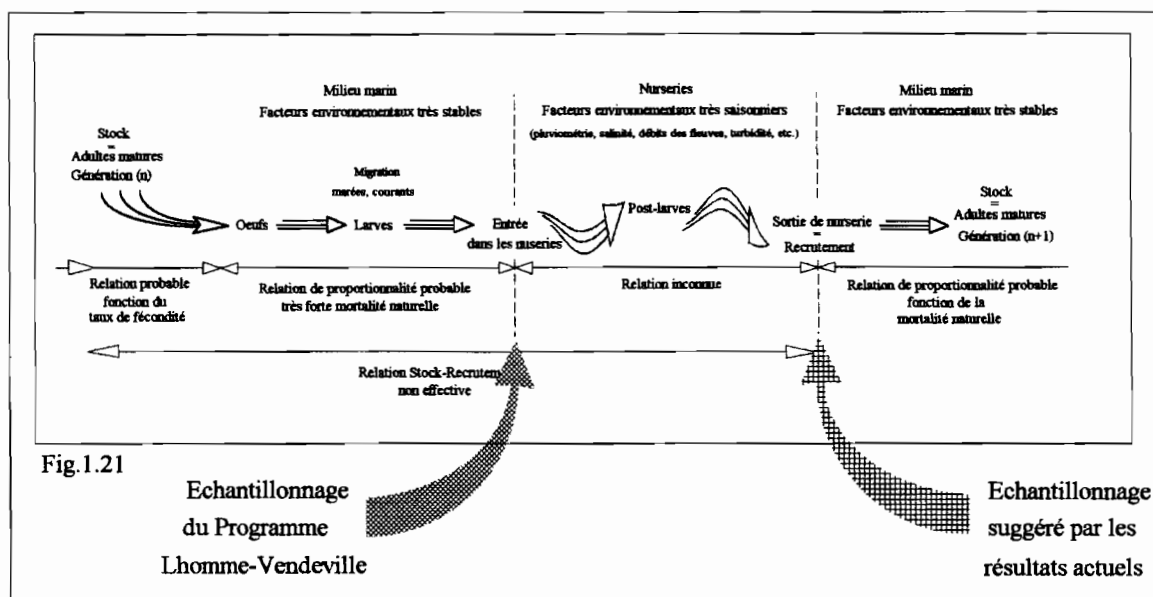


Fig.1.22. Localisation de l'échantillonnage tel qu'il a été effectué au cours du précédent programme d'étude du recrutement de *P. subtilis* en Guyane (Lhomme 1991, 1992 - Vendeville 1992) et tel que les conclusions auxquelles nous arrivons le suggèrent. Pour illustrer notre argumentation, nous avons repris la Fig.1.21 mettant en évidence le processus de découplage des générations.

L'estimation en sortie de nurseries permettrait de plus de déterminer s'il existe une relation entre le niveau d'abondance des juvéniles au sortir des nurseries et le niveau d'abondance du stock mature (issu de ces juvéniles) quelques mois plus tard -ce que l'on appelle la Relation Recrutement-Stock (RRS). L'existence de cette RRS a déjà été mise en évidence par certaines études (Berry and Baxter 1969, Yokel et al. 1969, Barrett and Gillespie 1973), ce qui suggérerait une possibilité d'estimer, pour chaque début de saison, le niveau "souhaitable" d'effort annuel à imposer au stock. Garcia and LeReste (1981) restent cependant sceptiques quant à l'utilisation effective de cette information. Cette dernière remarque nous amène tout droit à notre second commentaire par rapport à ces études sur le recrutement.

Si les études sur la relation de stock-recrutement représentent un intérêt biologique et scientifique incontestable dans le cadre de l'amélioration des connaissances générales sur les espèces marines, en revanche, l'intérêt vis-à-vis de la problématique de gestion du stock semble beaucoup moins évident. En effet, du point de vue de la gestion, l'amélioration de la connaissance de la RSR n'apparaît pas prioritaire. Nous avons souligné que la ressource est caractérisée par des oscillations annuelles prévisibles, oscillations que les pêcheurs ont su intégrer dans leur stratégie de pêche (par l'intermédiaire des mouvements intra-annuels de la flottille entre la côte et le large). En revanche, face aux fluctuations inter-annuelles imprévi-

sibles, fruit de l'impact des facteurs environnementaux sur les phases critiques du cycle, la réponse des pêcheurs a été l'adoption de la "stratégie de non-stratégie", c'est-à-dire d'un comportement passif qui consiste à n'adopter aucune stratégie particulière vis-à-vis de ces fluctuations inter-annuelles. Cette passivité des pêcheurs est à relier essentiellement à l'impossibilité de prédire le sens des fluctuations et à l'absence de relation de co-investissement : le fait que le niveau de la ressource soit complètement découplé de l'effort fait que les pêcheurs n'ont aucun moyen de rétro-contrôle sur son niveau inter-annuel.

Par conséquent, pour reprendre le fil de notre développement et pour répondre au postulat ci-dessus (l'idée que tant que l'on ne connaît pas la RSR, on ne peut pas gérer la pêche), il semble au contraire que dans le cas des ressources telles que les crevettes *Penaeides*, gérer la pêche ne passe pas obligatoirement par l'identification de la RSR. Les processus les plus importants à étudier sont plutôt ceux liés à l'entité qui impose en premier lieu sa contrainte. Nous allons découvrir au cours du chapitre à venir qu'il s'agit des marchés.

~ oOo ~

CHAPITRE 2.

DYNAMIQUES DES MARCHÉS IMPACTS SUR LE SYSTÈME-PÊCHE

Economics has a direct interaction with the biological state of the exploited fish stock, and so, although it might be claimed that this field is properly the concern of economists, we think that biologists should know the problem. The economic analysis of fisheries is in fact a new and growing discipline.

T. Pitcher and P. Hart.

INTRODUCTION AU CHAPITRE 2

Le chapitre précédent a été consacré à l'étude de l'interaction entre la flottille et la ressource. Cependant la dynamique d'une flottille ne se réduit pas à la relation qui la lie à la ressource qu'elle exploite. La dimension économique inhérente à ce type d'activité se doit aussi d'être prise en compte. Il est clair, en effet, que l'environnement des pêcheries est défini et conditionné non pas simplement par les fluctuations des ressources exploitées mais aussi par celles des marchés sur lesquels elles exportent leur production. Prix, demande, coûts d'exploitation, font partie des facteurs qui agissent de manière indiscutable sur le comportement des pêcheurs, et à travers ce comportement individuel, sur la dynamique globale de la pêche. Malheureusement, force est de constater que cette composante économique n'est encore que très imparfaitement prise en compte au niveau des différentes étapes constituant le processus d'évaluation des pêcheries (Hilborn and Walters 1992, Quenière 1993, Clay and McGoodwin 1995). Cette sous-représentation doit être interprétée comme une des conséquences au fait que, jusqu'à très récemment, les scientifiques qui s'étaient intéressés au problème de l'exploitation des ressources renouvelables l'avaient fait en privilégiant l'aspect biologique du problème (Sissenwise 1984, Allen and McGlade 1986, Stephenson and Lane 1995). Carl Walters (1986: 2) considère d'ailleurs cette tendance comme la première des deux critiques majeures que l'on puisse faire aux sciences halieutiques : « *It appears now that there were at least two fundamental flaws in the early development of the renewable resource sciences. The first flaw has been obvious to scientists from other disciplines, particularly economics for many years: research and management have concentrated primarily on biological/ecological and technical harvesting issues* »¹. Les choses ont cependant évolué positivement, puisque les analyses économiques représentent désormais une part non négligeable, voire croissante, des travaux de recherche proposés en halieutique.

¹ La seconde erreur selon Walters (1986: 2) est de ne considérer la gestion des ressources que comme l'adoption de mesures 'douces', c'est-à-dire, sans risque pour la ressource, et ainsi de ne jamais explorer d'autres stratégies ou mesures de gestion que des mesures conservatives. Cette attitude, selon lui, ne permettra jamais d'obtenir les informations exactes sur les véritables capacités d'adaptation des systèmes, notamment lorsque ces derniers sont confrontés à des perturbations qui divergent de celles imposées par cette gestion conservative.

Par rapport à ces remarques, il semble évident que cette étude, ayant pour objectif d'analyser le fonctionnement du système-pêche guyanais, ne peut se concevoir sans qu'une très forte part de ses travaux soit rattachée au domaine de l'économie. L'ensemble du Chap.2 sera par conséquent consacré à des réflexions ayant trait à l'environnement économique du système-pêche guyanais. L'objectif qui animera ces analyses reste néanmoins très simple et peut être vu comme le 'symétrique' de celui du Chap.1 par rapport à la question principale. Il s'agira en effet de tenter d'identifier les différentes sources de perturbation (de nature économique cette fois) qui agissent sur le système-pêche, et d'analyser les moyens développés par le système pour amortir ces perturbations. Ces analyses mettront en particulier en évidence le fait qu'au cours des deux dernières décennies, cet environnement économique a été essentiellement marqué par des perturbations liées à deux événements majeurs : (i) l'apparition des crevettes d'aquaculture et (ii) le plan de francisation de la flottille.

Pourquoi est-ce que l'expansion des crevettes d'élevage a pu représenter une source de perturbation importante pour la pêcherie crevette guyanaise ? En fait, il s'avère que jusqu'à l'apparition de ces crevettes d'élevage, la totalité de la production mondiale reposait exclusivement sur les captures des pêcheries de crevettes sauvages. Ces pêcheries jouissaient donc d'une situation privilégiée de "quasi-monopole" face à la demande des marchés mondiaux. Le développement de très nombreuses fermes aquacoles un peu partout dans le monde a bouleversé ce paysage international, et a, entre autres, fait disparaître cette situation monopolistique au profit d'un marché plus compétitif. Dans ces circonstances, la pêcherie guyanaise a été, au même titre que les autres pêcheries crevette, largement affectée par ces changements.

Une série de questions vient alors à l'esprit. On peut par exemple s'interroger sur la nature des facteurs au travers desquels ces perturbations se sont manifestées. Ainsi, le prix de la crevette guyanaise a-t-il été modifié par celui des crevettes d'élevage ? Dans quelles mesures les échanges commerciaux de la pêcherie ont été altérés par la brusque arrivée de nouvelles espèces sur le marché ? La pêcherie a-t-elle vu la demande pour sa production chuter ? Autant de questions auxquelles il va falloir essayer de répondre, en même temps qu'il faudra analyser les moyens par lesquels le système guyanais a tenté de réagir à ses différentes perturbations.

Le second événement à l'origine de perturbations importantes pour le système guyanais fut la mise en application du plan dit de « francisation » de la flottille guyanaise. En deux mots,

car nous reviendrons dessus en détail lors de la première section de ce chapitre, ce plan de francisation était à l'origine un programme mis en place par le gouvernement français au tout début des années 80 et dont l'objectif était le remplacement des compagnies étrangères par des investisseurs français désireux se lancer dans l'activité de la pêche crevettière en Guyane. Ce programme, qui revenait en définitive à remplacer la quasi-totalité de la flottille (cette dernière ayant été jusqu'en 1977 composée exclusivement de navires étrangers), allait entraîner de profondes modifications, tant dans la structure que sur la dynamique du système-pêche guyanais. Par conséquent, une nouvelle série de questions vient à l'esprit, de la même teneur que celles qui concernaient l'impact de l'expansion des crevettes d'élevage. On peut ainsi se demander quelle fut exactement la nature des perturbations que ce programme de francisation entraîna sur le système guyanais ou par quels moyens ce dernier a-t-il tenté d'amortir ces perturbations.

Le Chap.2 est organisé de manière à aborder ces différentes séries de questions. Dans la Section 1 nous reviendrons en détail sur ces deux phénomènes que sont l'expansion des crevettes d'élevage et le processus de francisation, et nous identifierons les différentes perturbations que ces deux phénomènes entraînerent sur le fonctionnement du système-pêche guyanais. La section 2 sera consacrée à l'analyse de la réponse du système aux perturbations nées de la francisation. La section 3 concernera, quant à elle, l'étude de l'impact de l'expansion de la crevette d'aquaculture sur la crevette de Guyane et les processus adaptatifs que cet impact a fait naître au sein du système-pêche.

~ o0o ~

SECTION 1. LES PERTURBATIONS ÉCONOMIQUES IMPOSÉES AU SYSTÈME GUYANAIS

1.1. Le processus de francisation : rétablir une situation politiquement inacceptable.

On ne peut comprendre la dynamique d'une pêcherie sans en avoir étudié l'histoire. Le message n'est pas nouveau. Mais il va ici prendre une importance tout particulière. Tout le fonctionnement actuel de la pêcherie découle en effet du processus de francisation qui a été mis en place au cours des années 80. Nous avons précisé en introduction à ce chapitre que cette francisation était un programme adopté le Gouvernement français dans le but de substituer les compagnies étrangères présentes dans la pêcherie guyanaise par des compagnies françaises. Ce que l'on se propose de faire dans la première partie de cette section c'est de décrire ce processus de francisation (ce qui nous donnera l'occasion de préciser un certain nombre de détails concernant la pêcherie et ses spécificités), puis de chercher à identifier quels impacts cette francisation a eu sur le fonctionnement du système.

Il y a en fait deux manières d'interpréter ce programme de francisation. On peut essayer de l'analyser au niveau micro-économique, en listant le plus exhaustivement possible l'ensemble des moyens mis en oeuvre par les pouvoirs publics pour en assurer le succès. C'est ce qu'ont fait par exemple Gilly et Cochet (1988) ou Le Cabellec (1984). On peut aussi choisir d'analyser ce phénomène en le replaçant dans son contexte historique de manière à en comprendre les origines mais surtout à en identifier les conséquences pour l'activité et le devenir à long terme de la flottille. C'est cette approche que nous nous proposons d'adopter ici.

1.1.1. Cayenne, comptoir U.S. en Amérique du Sud

Le processus de francisation est apparu comme la volonté de l'État français de régulariser une conséquence imprévue du « Nouveau Droit de la Mer » de 1977. Pour comprendre l'origine de cette situation un retour sur le développement de la pêcherie s'impose.

L'exploitation économique du stock des "*brown shrimp*" de Guyane commença au début des années 1960 lorsque des armements américains, basés initialement dans le Golfe du

Mexique, étendirent leur zone d'activité aux Barbades et le long du plateau « des trois Guyanes² », entre le Venezuela et le Brésil. Près de 400 crevettiers débarquaient alors chaque année jusqu'à 20 000 tonnes de crevettes, pêchées le long des 2000 km du plateau. L'ensemble de cette production était exporté au fur et à mesure par des navires affrétés par les armements, sous la forme de crevettes étêtées, vers le marché américain (Dintheer et al. 1991). C'est ainsi que pendant près de 20 ans, Cayenne, mais aussi Paramaribo (Surinam) et Georgetown (Guyana) furent utilisés comme de véritables comptoirs par ces armements américains. À la même période, des armements japonais, contrôlés par le Bureau Japonais des Produits de la Mer, s'installaient eux aussi au Surinam, en Guyane et au Brésil, de manière à alimenter de leur côté le marché japonais très demandeur de ces produits.

1.1.2. Les faits, et derrière les faits, les raisons

La situation n'évolua pas jusqu'à la fin des années 70, plus exactement jusqu'en 1977, année où les Zones Économiques Exclusives (ZEE) furent étendues à 200 milles au large des côtes dans le cadre du « Nouveau Droit de la Mer ». L'extension de la ZEE française autour de l'ensemble de ses côtes entraînait *de facto* celle de la ZEE au large des côtes de la Guyane. Une partie du stock de *Penaeides* présent tout le long du plateau continental guyano-brésilien passait ainsi du jour au lendemain à l'intérieur des eaux dont l'exploitation était limitée au seul État côtier, en l'occurrence la France. Malheureusement, la Guyane ne possédait pas à cette époque de flottille en mesure d'exploiter la partie du stock de crevette confinée à l'intérieur de sa ZEE³.

Il n'en était pas moins vrai que la présence de navires étrangers exploitant une ressource, au demeurant très rémunératrice, à l'intérieur de sa ZEE, n'était, ni politiquement, ni économiquement, acceptable pour l'État français (cf. Béné a). C'est de la volonté de modifier cet état de fait qu'est né le programme de francisation des flottilles. Ce programme avait dans les faits pour objectif de rediriger les profits de l'activité de pêche vers le DOM⁴. Pour ce

² Guyana, Surinam (ex-Guyane hollandaise), et Guyane française

³ Quelques années auparavant, en 1970, le Brésil avait anticipé ce Nouveau Droit de la Mer et avait expulsé de ses 200 milles les compagnies américaines exploitant le stock. Cependant, ce pays avait pu assumer économiquement cette décision politique dans la mesure où il possédait déjà à l'époque une flottille qui disputait l'exploitation de ces crevettes aux navires américains.

⁴ Une expulsion brutale des compagnies américaines aurait été suivie de plusieurs années de transition - celles nécessaires au développement d'une pêcherie - sans que le stock soit pleinement exploité. La substitution devait par conséquent être effectuée sans interrompre l'exploitation puisque le DOM bénéficiait déjà à l'époque de certaines retombées économiques de l'exploitation (essentiellement par l'intermédiaire des

faire, un certain nombre de primes et d'incitations à l'investissement, d'exonérations fiscales et des prêts, fut consenti aux investisseurs et aux armements français⁵.

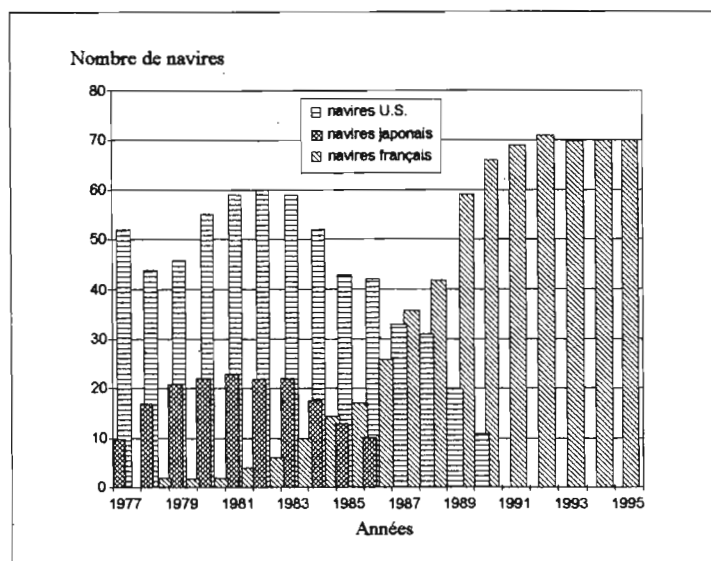


Fig.2.1. Composition de la flottille crevettière guyanaise depuis la création de la ZEE (données annuelles, en unités). Les dernières unités japonaises présentes dans la pêche furent rachetées en 1987 par un armement français et la dernière compagnie américaine quitta la pêche en 1990. Depuis cette date, la francisation est donc effective : la totalité des armements présents est désormais détenue par des investisseurs français (source IFREMER-Cayenne).

On peut considérer que ce programme de francisation fut effectif puisque, comme l'illustre la Fig.2.1, les 13 dernières unités japonaises encore présentes en 1986 passèrent sous pavillons français l'année suivante (rachetées par un armement français) et que la dernière compagnie américaine encore présente à Cayenne (la Sahlman Sea Food) quitta la Guyane en octobre 1990 pour redéployer ses navires sur les zones de pêches du Surinam et du Guyana (Béné et Moguedet 1996). Cet historique est à l'origine d'un bon nombre des caractéristiques qui forment l'environnement direct dans lequel évolue aujourd'hui la pêche. Quelques unes de ces spécificités ont été précisées dans l'Encadré 2.1. Certaines d'entre elles peuvent être présentées comme de véritables particularités de la pêche (on pense ici en particulier à la nationalité des membres d'équipage), d'autres en revanche sont des caractéristiques que l'on rencontre classiquement dans de nombreuses pêcheries.

emplois créés par l'unique usine de transformation en activité à l'époque à Cayenne). Il était donc prévu que cette francisation se fasse progressivement, au rythme de 5 nouveaux chalutiers français entrant annuellement dans la pêche (selon les souhaits du IX plan quinquennal).

⁵ Pour une description détaillée de ces différentes aides et incitations financières, voir Gilly et Cochet (1988) et Le Cabellec (1984).

Encadré 2.1. Les spécificités du système-pêche guyanais.

La pêcherie crevette guyanaise est caractérisée par un certain nombre de spécificités fortes.

► La première d'entre elle est liée au fait que cette flottille d'environ 70 chalutiers est entièrement constituée de crevettiers de type floridien⁶, aux caractéristiques techniques très uniformes (longueur des bateaux, puissance des moteurs, nombre d'hommes embarqués, etc.), ce qui lui confère une homogénéité remarquable par rapport à la plupart des flottilles composites en activités sous ces latitudes. Ce système-pêche, organisé en armements, présente de plus la particularité, relativement rare en halieutique, d'être basé sur l'exploitation, par un type unique d'engin de pêche (le chalut), d'une seule espèce. Cette caractéristique fait de cette pêcherie un système mono-espèce, mono-engin des plus simples qu'il soit possible de rencontrer en halieutique. Pour les pêcheurs, cette caractéristique implique l'impossibilité d'adopter des stratégies de pêche reposant sur le principe classique de substitution de métiers⁷ très fréquemment observé dans les pêcheries plurispécifiques (cf. Chap.3).

► La seconde spécificité de la pêcherie tient à la nationalité des marins employés par les armements. En effet, ces marins (capitaines et hommes d'équipages) sont tous de nationalités étrangères, la majorité étant du Guyana ou du Surinam voisins. Il s'agit là du dernier vestige de la période américaine. Les armements U.S. employaient en effet des marins de ces pays tiers sur leurs bateaux du fait de leurs coûts de main-d'œuvre plus faible. En 1990, les investisseurs sont partis mais les hommes sont restés. De même, un certain nombre de capitaines japonais, arrivés avec les armements nippons au début des années 80, sont eux aussi restés après le retrait des compagnies japonaises en 1987. La raison de la persistance de cette situation, par ailleurs unique dans le cadre des pêcheries françaises, est à relier au fait que ces marins (capitaines et hommes d'équipages) sont les seuls à connaître parfaitement la pêcherie et que la transmission de l'information à l'extérieur de cette communauté est inexistante. À titre d'illustration, les armements français, dans une volonté d'affaiblir ce

⁶ Plus techniquement, c'est le fait que ce soit, non les bateaux mais les gréements qui soient semblables à ceux des crevettiers floridiens en activité dans le Golfe de Mexique, qui est à l'origine du terme « crevettiers floridiens ».

⁷ Un métier est défini en halieutique comme la combinaison d'une espèce cible et d'un type d'engin de pêche.

« lobby », avaient tenté dans les premières années de leur installation de faire venir des capitaines de Métropole. Ces derniers sont tous repartis depuis, incapables d'assurer des rendements suffisants pour rentabiliser leurs sorties en mer.

► Le système de gestion en application actuellement peut être considéré comme la dernière spécificité notable de cette pêcherie. Il résulte de la combinaison d'un T.A.C. annuel fixé par l'U.E. et d'un système de licence mis en place par les instances locales (Préfet)⁸. Il est intéressant de noter que les mises en place respectives de ces deux moyens de contrôle de l'effort de pêche global, décidées à des niveaux différents de l'organisation politique, ont été motivées par des considérations elles aussi différentes. Le quota, fixé annuellement a été mis en place par mesure de précaution vis à vis de la ressource (T.A.C. dit « de précaution »⁹). Le système de licence a, par contre, été instauré localement de manière à limiter l'accès de la zone de pêche aux seules compagnies 'autochtones'. Il permet en effet aux autorités locales d'empêcher que des navires de l'U.E. autres que ceux installés en Guyane viennent temporairement exploiter le stock, qui, par définition, leur est pourtant juridiquement accessible (puisque dans les eaux de la ZEE française et donc de l'U.E.). Il convient cependant de noter que ce système local de licences ne bénéficie d'aucune ratification de la part de Bruxelles.

1.2. Une conséquence imprévue de la francisation

On peut affirmer rétrospectivement que le processus de francisation n'a pas eu comme seule conséquence les objectifs recherchés initialement (Béné and Moguedet 1994). L'exclusion des compagnies japonaises puis américaines a entraîné la fermeture progressive des marchés de ces deux pays. Cette fermeture, qui s'est effectuée de manière 'naturelle' jusqu'au début de 1992, s'explique par le fait que ces deux marchés sont caractérisés par des concurrences extrêmement fortes. Leurs accès n'avaient été possibles que parce que des intérêts américains et japonais, présents dans la pêcherie, permettaient d'entretenir les contacts indispen-

⁸ L'instauration du quota communautaire remonte à 1985 mais le système de licences locales date de 1992.

⁹ Depuis son instauration en 1985, ce système, dont l'objectif était d'assurer la préservation de la ressource, n'a été atteint qu'à une seule reprise, en 1994. Béné et Moguedet (1996) à ce sujet ont montré que pour les valeurs du rendement telles qu'elles ont été observées au cours des années 80, une flottille de 70 crevetiers pêchant sans interruption tout au long de l'année débarque en moyenne une quantité de crevettes inférieure aux 4108 tonnes du quota. Dans ces circonstances, le quota annuel est pour l'instant inopérant et c'est en fait le système de licence qui limite indirectement les quantités de crevettes ponctionnées annuellement sur la ressource.

sables à la réussite des accords commerciaux. La fermeture progressive de ces deux marchés imposa à la pêcherie guyanaise de se tourner vers d'autres débouchés. C'est logiquement vers les marchés européens et, en particulier, vers les marchés méditerranéens, demandeurs de ce type de crevettes, que s'est fait dans les premiers temps cette re-orientation. En mai 1992, la Parlement Law N°101162¹⁰ ferma définitivement l'accès au marché américain. Malheureusement, en Europe, les dévaluations successives de la Lire et de la Pesetas entraînèrent des hausses substantielles du prix relatif de la crevette guyanaise sur ces marchés. Seul le marché français resta plus ou moins accessible aux exportations guyanaises. C'est la raison pour laquelle plus de 95 % de la production guyanaise est désormais exportée vers ce marché Français (cf. Fig.2.2).

1.2.1. La saisonnalité du marché français

Bien que la chute des prix et la plus grande offre découlant de l'arrivée des crevettes d'aquaculture aient entraîné une certaine 'démocratisation' de ces produits, plusieurs analyses indiquent que les crevettes tropicales sont encore considérées en France comme des produits haute de gamme (Anon. 1991, Josupeit 1992, d'Andréa 1989). Elles sont par conséquent essentiellement consommées à l'occasion des fêtes de fin d'année. La Fig.2.3, qui illustre la consommation française de crevettes tropicales, confirme ce caractère saisonnier. Au contraire les marchés américains et japonais étaient (et sont toujours) caractérisés par une consommation plus ou moins soutenue tout au long de l'année. Les armements guyanais, lorsqu'ils étaient encore en contact avec ces marchés, exportaient par conséquent leur production au fur et à mesure de leurs débarquements, sans délais ni stockage. La réorientation vers le marché français introduisit donc une saisonnalité dans la demande, saisonnalité que les armements furent contraints d'intégrer dans leur fonctionnement.

1.2.2. La demande préférentielle en petites catégories

« *En France, c'est la S qu'ils veulent* ». La "S", c'est la "Small", la petite crevette dans le jargon des professionnels. Comprenez par ces paroles de l'un d'entre eux le fait que la part la plus importante de la demande sur le marché français concerne les petites catégories (Hottlet 1992, Josupeit 1992), qui sont essentiellement distribuées en grandes surfaces, à

¹⁰ La Parlement Law N° 101162 section 609 du 01 mai 1992 (loi du parlement américain) légitime l'embar-go des États-Unis sur les crevettes des pêcheries dont les navires ne sont pas équipés de chaluts sélectifs, les fameux T.E.D. (Turtle Extruder Devices).

des prix beaucoup plus bas que les grandes catégories (50-60 FF kg⁻¹ contre 100-120 FF kg⁻¹, donnée 1994).

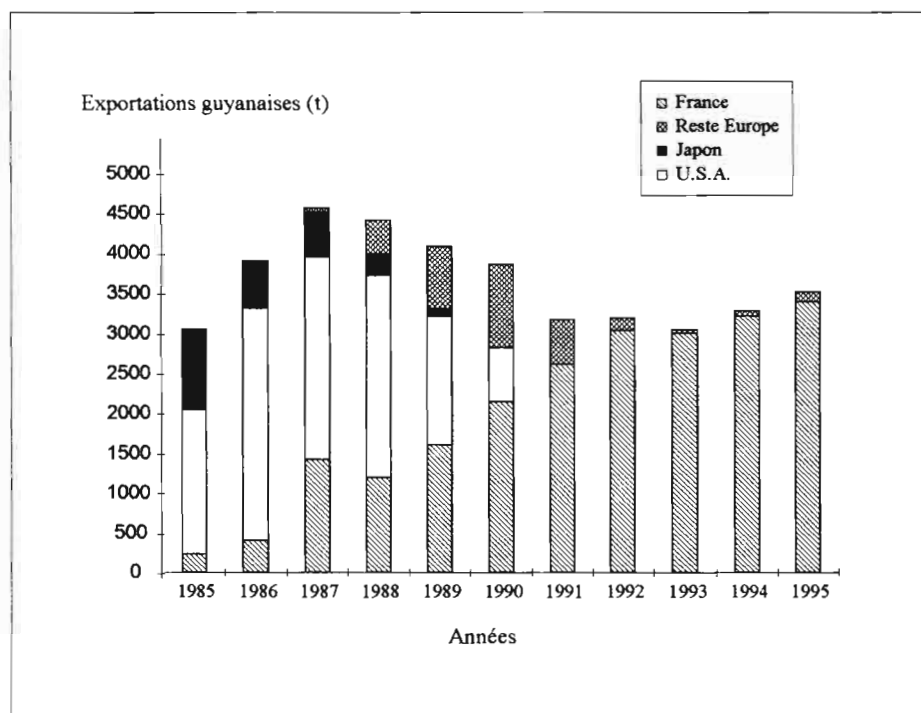


Fig.2.2. Volumes des exportations de la pêche guyanaise vers les différents marchés mondiaux (en tonnes, données annuelles) sur la période 1985-1995. À partir de 1990, plus de 95% de la production est exportée en direction du marché français (Source CCI Guyane).

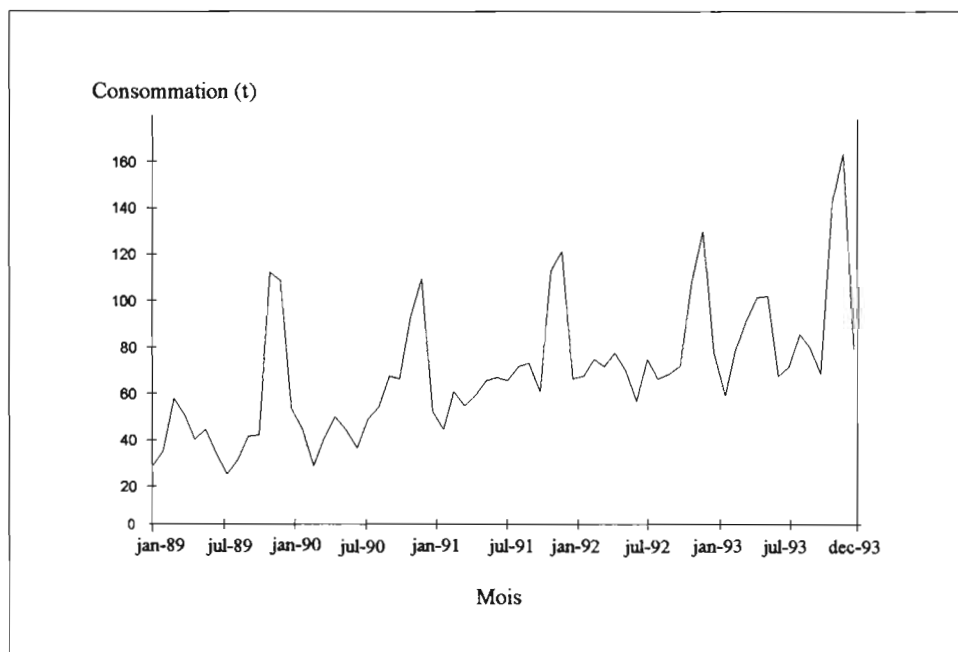


Fig.2.3. Évolution de la consommation de crevettes tropicales (Gambas) en France (en tonnes, données mensuelles) sur la période janv.89 - déc.93. Les crevettes tropicales, encore considérées comme des produits haut de gamme en France sont essentiellement consommées pendant les fêtes de fin d'année. C'est ce qui confère à la courbe de consommation son caractère saisonnier très marqué (source : FIOM Paris).

Le marché américain et surtout le marché japonais étaient au contraire essentiellement consommateurs de grosses crevettes (Chauvin 1992). Les armements français, en réorientant leurs exportations, ont donc eu à modifier la composition en catégories de leurs exportations et par conséquent la composition en taille de leurs débarquements. On peut donc affirmer que la deuxième perturbation à laquelle la pêcherie eut à faire face, en plus de la saisonnalité de la demande, est la réduction de la taille de ses crevettes capturées.

Les modifications imposées par la réorientation des exportations vers le marché français ne furent cependant pas les seules perturbations pour la pêcherie au cours de ces dix dernières années. Nous avons souligné en introduction qu'un second événement majeur, intervenu à l'échelle internationale, avait, lui aussi, été à l'origine de modifications importantes dans le fonctionnement du système-pêche. Cet événement, c'est l'arrivée des crevettes d'élevage sur les marchés internationaux.

1.3. Les marchés mondiaux : naissance et expansion de la crevette d'aquaculture

Le marché mondial de la crevette a connu un essor très important durant la dernière décennie. Passant de 1.6 millions de tonnes à 2.6 millions de tonnes entre 1980 et 1990, les crevettes représentent désormais plus de 30% (en valeur) des espèces commercialisées dans le monde (Anon. 1993). Néanmoins, il apparaît que cette expansion, qui résulte d'une augmentation conjointe de l'offre et la demande, ne concerne pas l'ensemble de la production mondiale. L'analyse des statistiques montre en effet que, sur cette même période 1980-90, la quantité de crevettes sauvages débarquée est restée constante (cf. Fig.2.4).

Ce sont donc en fait uniquement les crevettes d'aquaculture qui ont bénéficié de cette expansion. On estime ainsi que depuis 1992 ces crevettes d'élevage représentent respectivement plus de 46 et 50% des importations des marchés japonais et américain (Ferdouse 1992). Ces crevettes d'aquaculture sont essentiellement produites par des fermes aquacoles installées en l'Asie du Sud Est. La Chine est ainsi le premier producteur mondial (données 1994), malgré les sérieux problèmes d'épidémie et de pollution qu'elle connaît depuis 1993. L'Indonésie et la Thaïlande sont, respectivement, second et troisième producteurs mondiaux. Le premier pays non-asiatique est l'Équateur. Il se place au 4^e rang mondial.

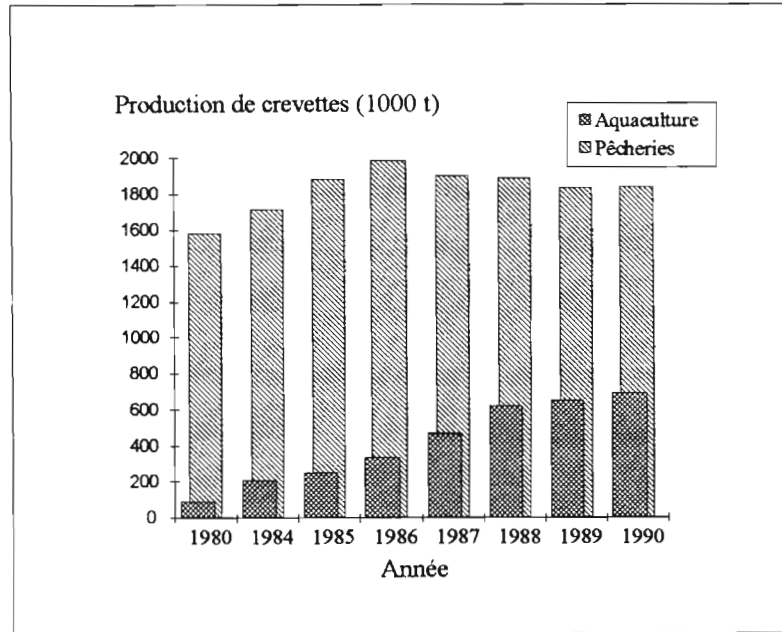


Fig.2.4. Production mondiale de crevettes sauvages et d'élevage (données annuelles en milliers de tonnes) sur la période 1980-1990. Ce sont les crevettes d'aquaculture qui ont bénéficié de l'expansion du marché. La production de crevettes sauvages est, elle, restée constante sur cette période (source : Chauvin 1992).

L'entrée des crevettes d'élevage sur le marché européen (le 3^e marché mondial) s'est faite un peu plus tard que sur ceux du Japon et des États-Unis, en raison d'une consommation traditionnelle en crevettes d'eaux froides, notamment dans les pays du Nord de l'Europe. Néanmoins ces crevettes d'aquaculture représentent aujourd'hui plus de 25 % des importations européennes, avec des valeurs d'ailleurs nettement supérieures pour les pays méditerranéens. Ainsi, le marché français avec un volume de plus de 60 000 tonnes par an depuis 1993, est aujourd'hui au second rang européen, juste derrière l'Espagne. Ce marché français est en progression constante depuis le milieu des années 1980 (cf. Fig.2.5). La prédominance des crevettes d'élevage y est particulièrement marquée¹¹.

L'expansion de la crevette d'aquaculture peut s'expliquer par deux phénomènes de natures différentes : (i) un phénomène purement économique : le prix extrêmement compétitif auquel sont proposées ces crevettes d'aquaculture et (ii) un phénomène plus technique : le fait

¹¹ L'Asie et l'Amérique Latine ont ainsi fait des entrées remarquables sur ce marché français. Leurs exportations sont passées respectivement de 17% à 38% et de 8% à 26% des importations françaises de crevettes d'aquaculture entre 1981 et 1993. La plus grosse croissance sur le marché français fut celle de l'Équateur, dont les exportations annuelles, parties de zéro en 1986, dépassèrent 6000 t en 1993 (Anon. 1993), soit 10% du marché. Dans le même temps les pêcheries d'Afrique de l'Ouest, qui assuraient jusqu'au début des années 80 plus de 35% des importations française de Gambas, connurent un net recul. Leurs exportations totales ne représentent plus aujourd'hui qu'environ 10% des importations du marché français (Josupeit 1992).

que ces crevettes d'élevage offrent des avantages importants pour les transformateurs par rapport aux crevettes sauvages (cf. Encadré 2.2).

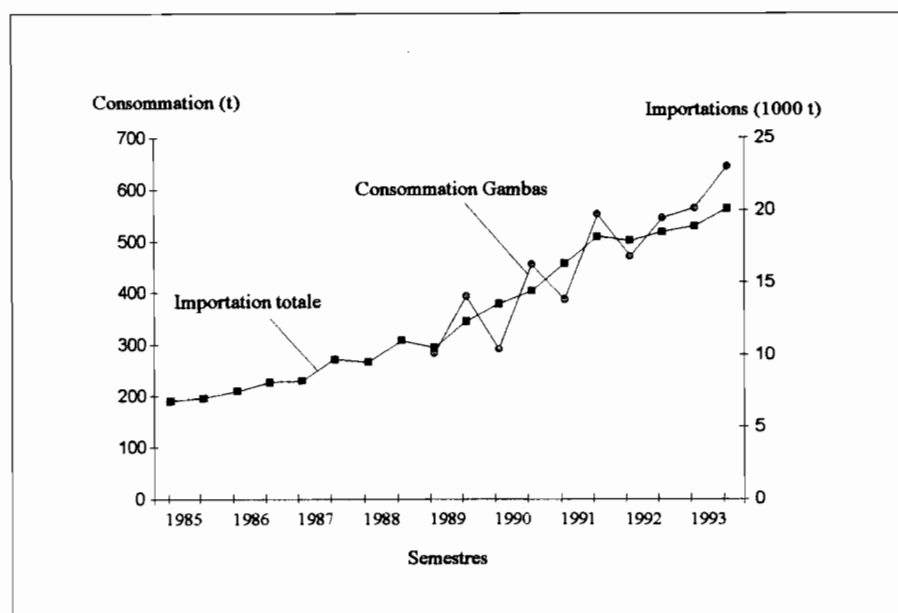


Fig.2.5. Évolution des importations de crevettes (Gambas + crevettes d'eaux froides) (données semestrielles, en milliers de tonnes) en France sur la période 1985-1994, et consommation de crevettes tropicales (Gambas) (données semestrielles, en tonnes) sur la période 1989-1994 (Source : FIOF Paris et DNSCE Toulouse).

Encadré 2.2. La prédominance des crevettes d'aquaculture sur les crevettes sauvages.

On s'inspire de Csavas (1992) pour proposer cette synthèse sur les raisons de la prédominance commerciale des crevettes d'aquaculture sur les crevettes sauvages. Cette prédominance est due à plusieurs facteurs.

► **La constance** : la production de crevettes sauvages résulte de captures qui sont généralement saisonnières et imprévisibles, notamment pour les pêcheries tropicales. Ces fluctuations peuvent varier de façon conséquente d'une partie de l'année à une autre et d'une année sur l'autre et ainsi entraîner des problèmes importants au niveau des chaînes de transformation et de conditionnement. À l'inverse, la production de crevettes d'aquaculture peut être planifiée à l'échelle annuelle, ce qui réduit bon nombre de problèmes de commercialisation ou d'exportation et permet de plus de réduire les coûts de stockage.

continu page suivante

► La flexibilité : la demande des consommateurs évolue rapidement, notamment en terme d'espèces et de tailles. La production aquacole, parce qu'elle permet de sélectionner les espèces produites et la taille à laquelle on les retire des bacs d'élevage, offre de meilleures opportunités pour s'adapter à ces évolutions. La composition en taille ou en espèce des crevettes sauvages est en revanche plus rigide puisqu'elle dépend généralement de la période dans la saison et/ou de la zone du globe où ces crevettes sont pêchées.

► La qualité : parce que l'autolyse débute immédiatement après leur mort chez les crustacés, un glaçage rapide est indispensable. Malheureusement, après chaque trait ramené sur le pont des chalutiers, les membres d'équipages doivent séparer les crevettes des prises accessoires (qui représentent en général plus de 90% des captures) puis les trier par taille avant de les congeler. Par conséquent il n'est pas rare d'observer des quantités très importantes de crevettes qui ont subi des autolyses partielles et qui sont par conséquent invendables.

Toutes ces raisons expliquent pourquoi les crevettes d'aquaculture sont généralement préférées au niveau des importateurs et/ou des transformateurs par rapport aux crevettes sauvages, et ceci même s'il est reconnu que ces dernières présentent des qualités gustatives bien supérieures aux crevettes d'élevages.

1.3.1. L'emprise croissante des espèces d'élevage sur les prix mondiaux

L'expansion des crevettes d'aquaculture au niveau mondial a bien entendu entraîné de profondes modifications dans la structure et la dynamique des marchés internationaux. Tenter d'estimer ou même de lister l'ensemble de ces modifications serait difficile. On peut en revanche aisément distinguer deux événements majeurs dans cette évolution.

Le premier événement caractéristique de l'évolution des marchés mondiaux est l'influence que les crevettes d'aquaculture ont commencé à exercer dans la formation des prix sur les places internationales (Adams et al. 1987, Csavas 1992, Keithly et al. 1993). Parce que ces crevettes d'aquaculture étaient, pour la plupart, produites à de faibles coûts de production,

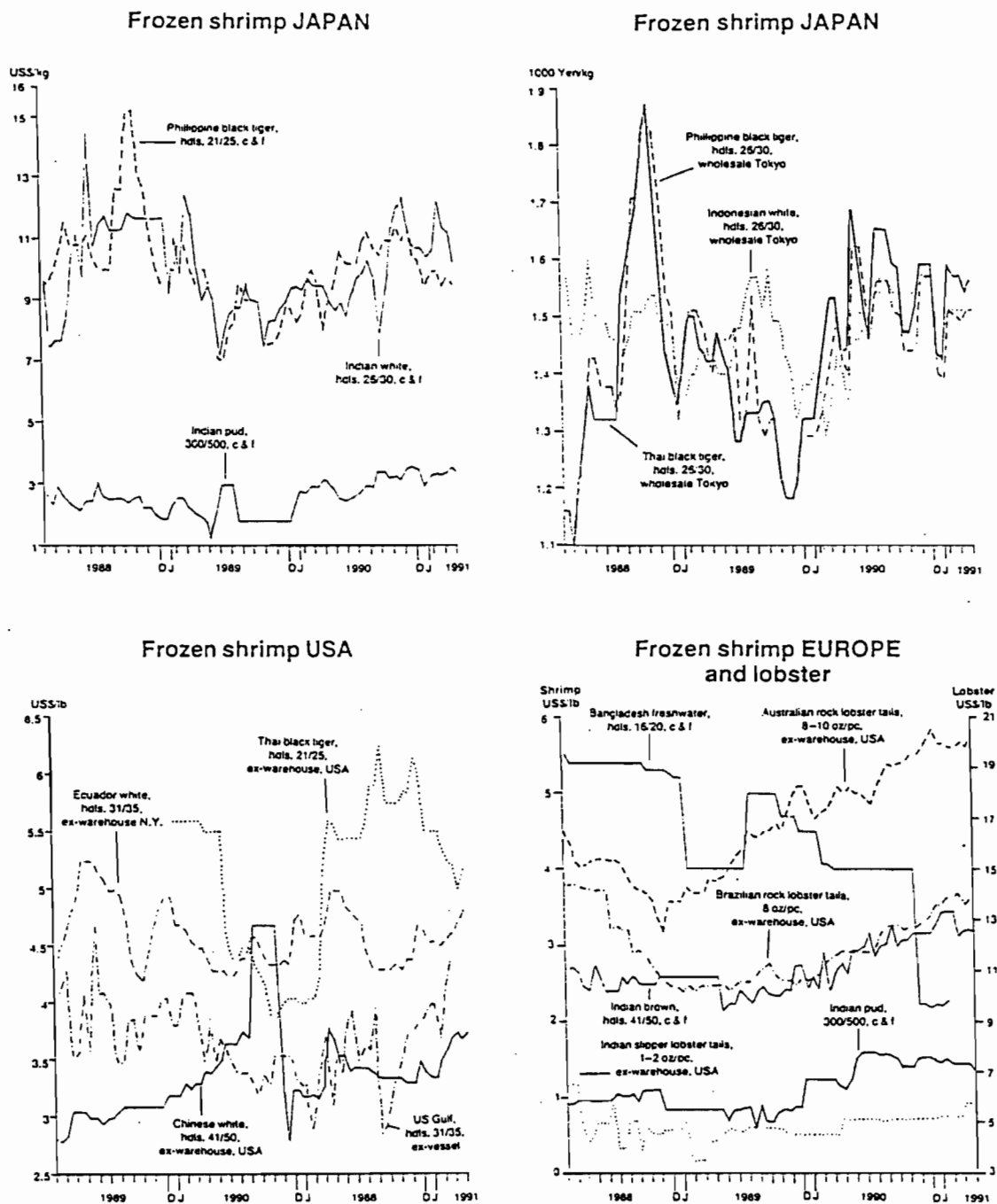
les fermes aquacoles purent profiter de marges importantes pour les injecter à des prix bien inférieurs à ceux imposés jusqu'alors par les pêcheries de crevettes sauvages¹².

C'est ainsi qu'apparurent parmi ces espèces d'élevage des « espèces-indicateurs », dont les prix furent peu à peu utilisés comme références pour l'ensemble des transactions sur les grands marchés mondiaux. Les producteurs des autres crevettes d'aquaculture mais aussi des crevettes sauvages durent dès lors aligner leur prix sur celui de ces crevettes-indicateurs. Il est d'ailleurs admis aujourd'hui qu'une part importante des fluctuations observées sur les principales places mondiales (Tokyo, New-York) est en fait dictée par les mouvements des prix de ces espèces-indicateurs. Parmi ces dernières se trouvent la « Black Tiger » (*Penaeus monodon*), une espèce principalement produite en Asie du Sud Est, et plus particulièrement en Thaïlande, et l'« Ecuador White » (*Penaeus vannamei*) produite, comme son nom l'indique, en Équateur. Sur la **Fig.2.6** nous avons représenté le "Market Barometer" de la revue spécialisée INFOFISH *International*. On y observe que la Black Tiger (BT) et l'Ecuador White (EW) sont effectivement utilisées comme des indices des prix pour les marchés japonais et américains. Cette figure illustre ainsi le rôle implicite que les spécialistes reconnaissent à ces espèces dans la formation des prix mondiaux.

1.3.2. La fin d'une époque

La seconde conséquence majeure de l'expansion des crevettes d'aquaculture est la libéralisation des marchés internationaux. Jusqu'alors, l'ensemble de la production mondiale était exclusivement assuré par les pêcheries qui s'étaient développées depuis le début des années 60 dans le Golfe du Mexique, en Afrique de l'Ouest, dans le Golfe de Carpentaria (Australie) et dans la zone du Golfe Persique. Ces pêcheries bénéficiaient ainsi depuis ces années 60 d'une situation de 'quasi-monopole' par rapport à l'ensemble des marchés mondiaux.

¹² Les faibles coûts de main-d'œuvre ne sont pas les seules raisons des prix très compétitifs de ces crevettes d'aquaculture. Des événements d'une toute autre nature peuvent y avoir aussi contribué. Ainsi dans le cas de la Guyane, le règlement CEE 3211/90 du Conseil du 29.10.1990, voté par le conseil des ministres des Affaires Étrangères de l'U.E., permit d'inclure dans les Schémas de Préférences Tarifaires Généralisées (S.P.G.) les quatre pays d'Amérique du Sud suivants : la Colombie, la Bolivie, l'Équateur et le Pérou. L'adoption de ce règlement avait pour objectif initial d'aider à l'accroissement des recettes d'exportations de ces pays dans un but de lutte contre la production de cocaïne. Cette loi concernait *de facto* les productions de crevettes d'Équateur. Dénommée « loi Cocaïne » par l'ensemble de la profession crevetteuse guyanaise, elle permettait en fait de faire bénéficier ce pays de l'exemption de la franchise de droit de douane, abaissant de ce fait le prix à l'exportation déjà très bas de ces crevettes d'aquaculture. À la plus grande satisfaction des professionnels et à la suite de la demande de la France, les crevettes équatoriennes furent de nouveau exclues de ces S.P.G. à partir de 1995.



Based on the INFOFISH Trade News

Fig.2.6. Extrait de la revue INFOFISH International à la page du 'Price Barometer' pour les crevettes. Les espèces Black Tiger et Ecuador White font partie des 'espèces-indicateurs' utilisées sur les places internationales de New-York et Tokyo (Source : INFOFISH).

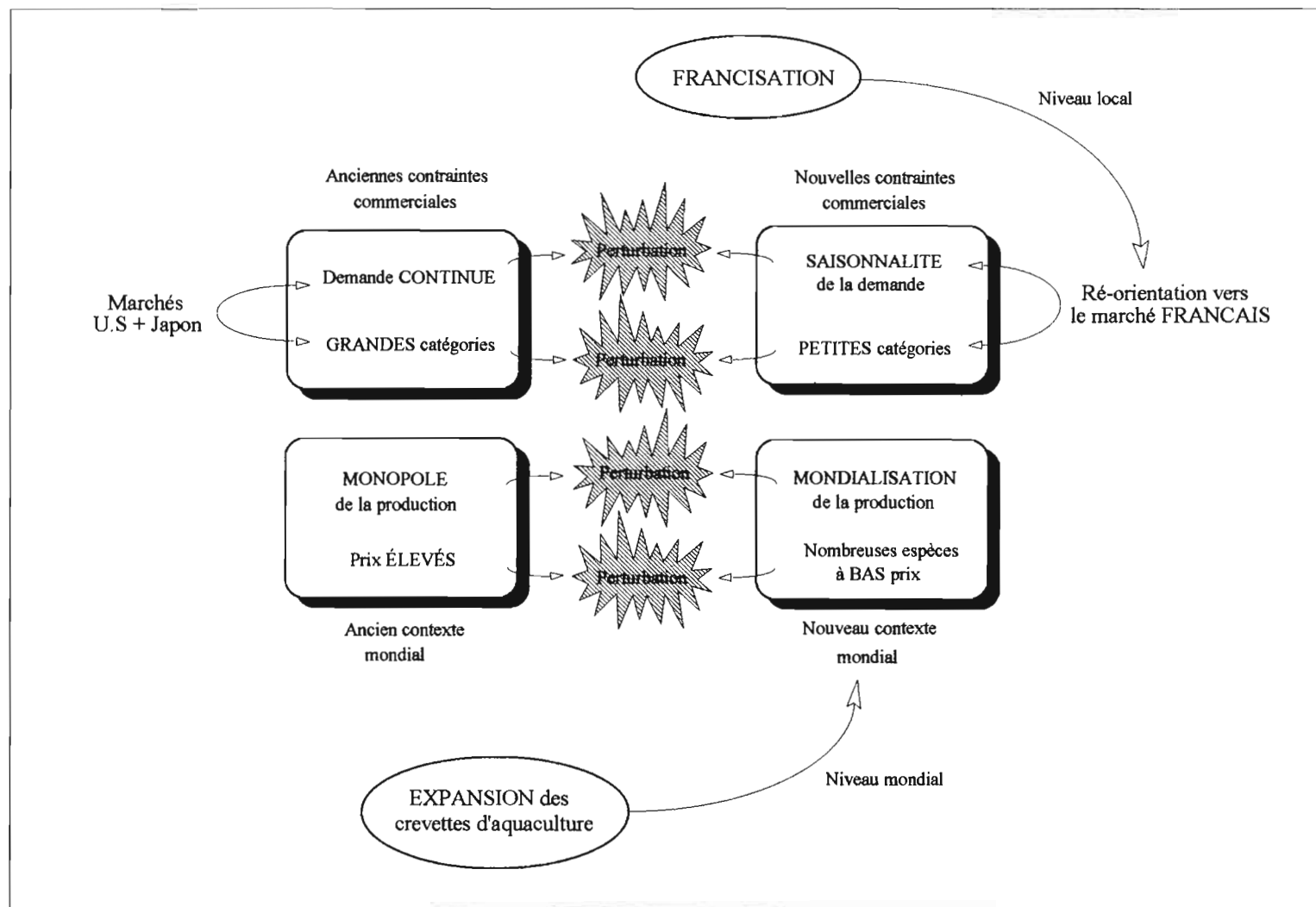


Fig.2.7. Schéma de synthèse représentant les quatre perturbations de nature économiques que la francisation au niveau local et l'expansion des crevettes d'élevage au niveau mondial ont entraînées sur le système-pêche guyanais : (i) la demande pour la production guyanaise est désormais saisonnière, (ii) elle concerne les petites catégories, (iii) le marché est devenu très compétitif et (iv) les prix sont dictés par les espèces d'aquaculture.

C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la valeur commerciale de ce type de produit fut, jusque dans les années 80, particulièrement élevée (Chauvin 1992). Cependant, le développement de très nombreuses fermes aquacoles à travers le monde a permis d'accroître de façon substantielle la quantité et le nombre d'espèces proposées les marchés. La position de force dont jouissaient jusqu'alors les pêcheries disparut peu à peu au profit d'un marché plus compétitif. La réflexion du sous-directeur de la coopérative des artisans-pêcheurs de Guyane est, à cet égard, tout à fait illustratrice : « *Le pouvoir était chez le producteur, il est passé chez les consommateurs* ». Fini donc de l'époque où les crevettes étaient vendues avant même d'être capturées, place à la libre concurrence !

1.3.3. Schéma récapitulatif

Les deux perturbations résultant de l'entrée des crevettes d'élevage sur les marchés internationaux peuvent être associées à celles que l'analyse de la dynamique du marché français avait permis de mettre en évidence. Le résultat de ces deux analyses a été synthétisé sous la forme d'un schéma récapitulatif (cf. Fig.2.7). On obtient une vision d'ensemble des différentes perturbations que l'environnement "économique" a imposées sur le fonctionnement du système-pêche guyanais. Cette Fig.2.7 va en fait représenter la base des quatre études proposées dans les deux sections suivantes.

~ o0o ~

SECTION 2. ADAPTATION DU SYSTÈME AUX CONTRAINTES DE SON NOUVEAU MARCHÉ

2.1. Le déphasage entre ressource et marché

Nous avons souligné dans la section précédente qu'une des spécificités de la dynamique du marché français était la saisonnalité de sa demande, caractérisée par des périodes de très forte consommation en fin d'année (cf. **Fig.2.3** pour rappel). On se souvient par ailleurs que la ressource exploitée est, elle aussi, animée par des oscillations intra-annuelles très marquées. Cette saisonnalité se traduit au niveau de la pêcherie par des périodes de forts rendements pendant les premiers mois de l'année, auxquelles succèdent des périodes de rendements plus faibles pendant la seconde moitié de l'année (cf. **Fig.1.9** pour rappel). Lorsque l'on considère alors simultanément ces deux dynamiques, il apparaît un déphasage important (d'environ six mois) entre le maximum de la demande et celui de l'offre qui est censé la satisfaire. Pour illustrer nos propos, nous avons superposé les deux courbes, celle de l'offre, représentée par les captures, et celle de la demande, représentée par la consommation, sur la période juil.89-juil.91 (cf. **Fig.2.8**). Le déphasage est évident.

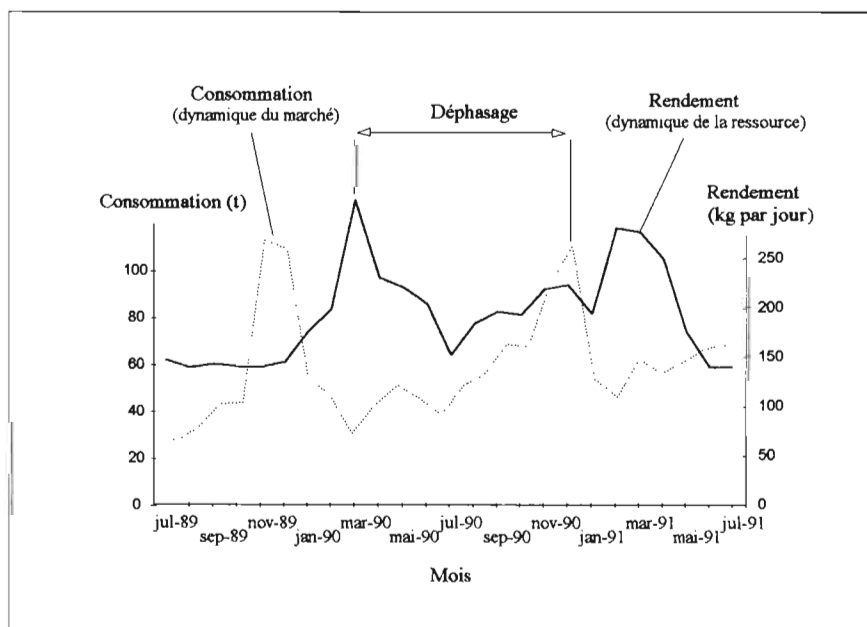


Fig.2.8. Le déphasage entre l'offre (le rendement de la pêcherie) et la demande (la consommation de Gambas sur le marché français) illustré sur la période juil.89-juil.91 (données mensuelles) (source : IFREMER Cayenne et FIOM Paris).

On peut aisément imaginer que ce déphasage va être un des éléments centraux de la dynamique intra-annuelle de la pêche. Son existence souligne en tous cas qu'un des facteurs fondamentaux dans le fonctionnement du système-pêche sera le contrôle du volume de stockage. Ce dernier dérive en effet directement des écarts entre les captures et la demande du marché. Cette remarque conduit tout naturellement à s'interroger sur la manière avec laquelle le système a, dans les faits, appréhendé ce problème du déphasage. La partie qui suit est la synthèse des résultats issus de cette investigation.

2.1.1. Le marché américain comme contrôle de la fluidité des exportations

Les études montrent que la capacité totale de stockage de la pêche en Guyane est relativement faible. Elle n'excède pas 120 tonnes. Depuis 1990, l'ensemble de la production est en fait exporté très rapidement vers la Métropole, essentiellement en direction du port autonome du Havre. Là, elle est stockée par des entreprises privées spécialisées dans le stockage réfrigéré. Les raisons de ce fonctionnement sont essentiellement à rechercher dans le caractère ultra-périphérique de la pêche (cf. Encadré 2.3).

Encadré 2.3. Les raisons du stockage de la production en Métropole.

Lorsque l'on interroge les armateurs sur les raisons pour lesquelles ils ne stockent pas leur production en Guyane mais en Métropole en sous-traitant des entreprises privées, ces armateurs avancent trois raisons essentielles :

- La fréquence des navires marchands reliant Dégrad-des-Cannes à la Métropole, et plus particulièrement au Havre, étant variable, ce facteur est une source d'incertitude que les armements ont cherchée à éliminer, de manière à contrôler au maximum l'ensemble du processus d'exportation.
- Le marché de la crevette, comme tout marché de denrées alimentaires, est plus ou moins fluctuant (volatil), tant par les prix que par les variations soudaines de la demande. C'est donc aussi dans le but de pouvoir répondre sans délais à une demande importante et imprévue que les armements ont adopté cette stratégie de stockage en Métropole.
- La présence, dans les ports Métropolitains comme celui du Havre, d'infrastructures plus développées que sur les quais de Dégrad-des-Cannes et le fait que les conditions de température et d'humidité soient plus contraignantes pour la conservation d'une marchandise con-

gelée en Guyane que sous le climat tempéré de la Métropole, rendent la qualité du stockage plus facile à contrôler en Métropole qu'à Cayenne.

En revanche, il faut noter que les coûts de sous-traitance et de manutention supplémentaires qui découlent de ce stockage au Havre rendent le coût global de stockage en Métropole supérieur à celui de Guyane. Dans le dilemme d'un coût inférieur ou d'une plus grande flexibilité par rapport aux aléas de la demande, les armements ont donc opté pour la seconde alternative.

Nous avons tenté d'identifier la dynamique de ces volumes de stockage du Havre, en pensant dans un premier temps que celle-ci contenait une information intéressante par rapport au fonctionnement global de la pêcherie. Nous nous sommes cependant peu à peu rendu compte que ces volumes ne représentaient qu'un volant inerte entre les ventes en partance pour Rungis et les importations en provenance de Dégrad-des-Cannes¹³, et certainement pas un véritable régulateur, dans le sens "contrôle", du processus de production. En revanche, il est apparu de plus en plus manifeste que la régulation des stocks se faisait en partie au niveau de la Guyane et ceci malgré la faible capacité de stockage des armements. À ceci vint s'ajouter un phénomène qui n'avait pas été pris en compte jusqu'à présent : la possibilité, pour ces mêmes armements, de stocker une partie de leur production dans des containers réfrigérés, à même le quai de Dégrad-des-Cannes. Cette possibilité augmente de façon considérable les capacités de stockage et par conséquent les possibilités de régulation au niveau local. La véritable information, si elle existait, se trouvait donc sur les quais de Guyane et non sur ceux du Havre !

Il nous a été possible de reconstruire la série de ces stockages locaux sur la période janv.86-août 93. Cette série, que l'on va dénommer « surplus de production » (SP), fut obtenue en faisant la différence entre les volumes débarqués au Larivot par l'ensemble des armements guyanais (données IFREMER) pour un mois donné, et les volumes des crevettes exportées à partir de Dégrad-des-Cannes pour le même mois (données Service des Douanes Guyane). Bien que ces volumes ne représentent, en valeur absolue, que de faibles quantités, l'analyse

¹³ Dégrad-des-Cannes est le port commercial de Cayenne d'où sont exportés les conteneurs de crevettes (le port où les navires de pêche débarquent leurs captures étant, nous le rappelons, le port du Larivot).

de leur dynamique va s'avérer instructive à plus d'un égard. La série est représentée sur la **Fig.2.9**.

La figure indique que les variations mensuelles des SP oscillent autour de zéro, confirmant le fait que le stockage en Guyane reste globalement faible. Cependant, en comparant cette série avec celle des volumes de captures (également représentée sur la **Fig.2.9**), on observe que leurs évolutions conjointes séparent la période totale en deux sous-périodes distinctes : la période pré-1990 au cours de laquelle les deux séries ne sont pas corrélées, et la période post-1990, où au contraire, les deux séries apparaissent cette fois fortement corrélées. L'année 1990 semble donc séparer deux dynamiques d'exportation différentes. Or, 1990 correspond à l'année où la dernière compagnie américaine encore présente en Guyane a cessé ses activités et à partir de laquelle plus de 95% de la production guyanaise ont été exportés vers la Métropole (cf. **Fig.2.2** pour mémoire). Nous avons par conséquent décomposé la série SP en deux "sous-séries", selon la direction des exportations : les États-Unis d'un côté (série SP_{USA}) et l'Europe de l'autre (série SP_{Europe}), (cette dernière série reflétant d'ailleurs essentiellement la dynamique d'exportation vers la France).

L'étude graphique de la série SP_{Europe} (cf. **Fig.2.10**) indique que cette dernière est cette fois corrélée aux volumes de débarquement sur l'ensemble de la période étudiée (1986-93), et non plus uniquement sur la période 90-93 comme c'était le cas pour les SP. L'existence de cette corrélation nous renseigne sur le comportement des armements français face au problème du déphasage : pendant les premiers mois de l'année, alors que les rendements sont encore élevés et que la demande en France reste faible, les armements stockent une partie de leurs débarquements en Guyane, dans la limite de leurs capacités locales ; ceci correspond aux parties positives de la courbe SP_{Europe} apparaissant à chaque début d'année, à la même période que les forts rendements. Ensuite, le fait que la courbe SP_{Europe} décroisse, voire devienne négative, pendant la seconde moitié de l'année, signifie que les armements exportent alors vers l'Europe l'ensemble de leurs nouvelles captures et écoulent en plus les volumes stockés au début de la saison.

En revanche, l'absence de corrélation entre les SP globaux (incluant les exportations vers le marché U.S.) sur la période 1986-90 et la série des captures suggère que les exportations vers les U.S.A. permettaient à cette époque de réduire complètement le déphasage. Ceci est en accord avec les connaissances que l'on a du marché américain, à savoir le fait qu'il ne présente pas de saisonnalité au niveau de la demande.

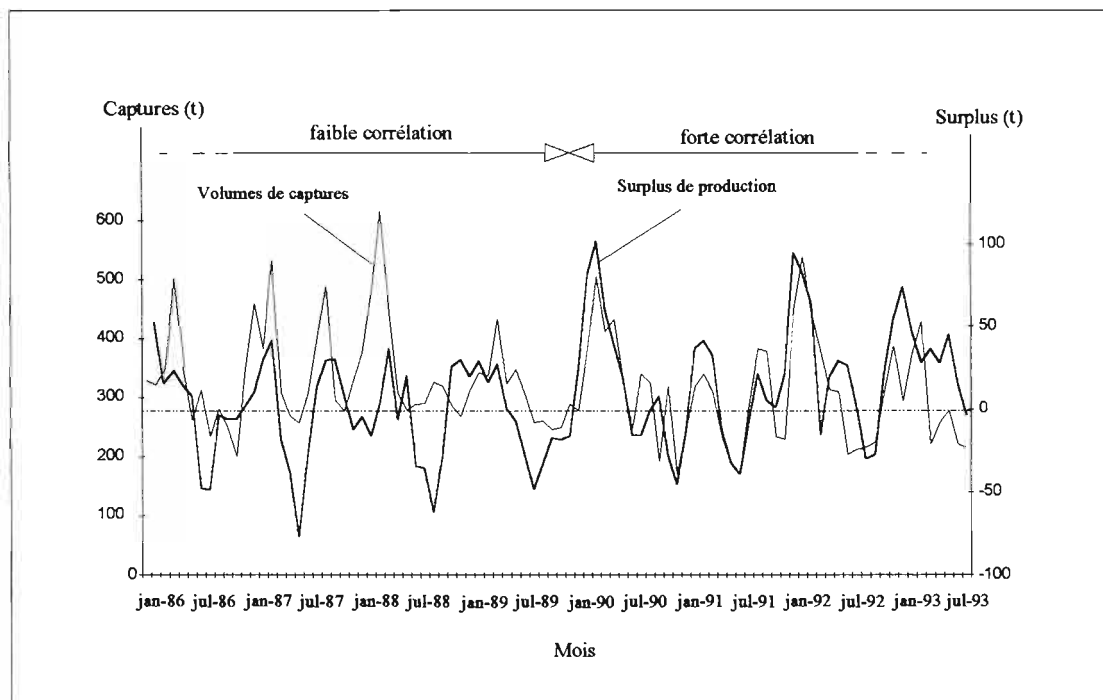


Fig.2.9. Évolutions simultanées des surplus de production (SP) et des volumes des captures (en tonnes, données mensuelles) pour la période janv. 86 - août 93. Alors que jusqu'en 1989, les deux séries évoluent de façon indépendante, leurs évolutions semblent très largement corrélées à partir de 1990 (Source : IFREMER Cayenne et CCI Guyane).

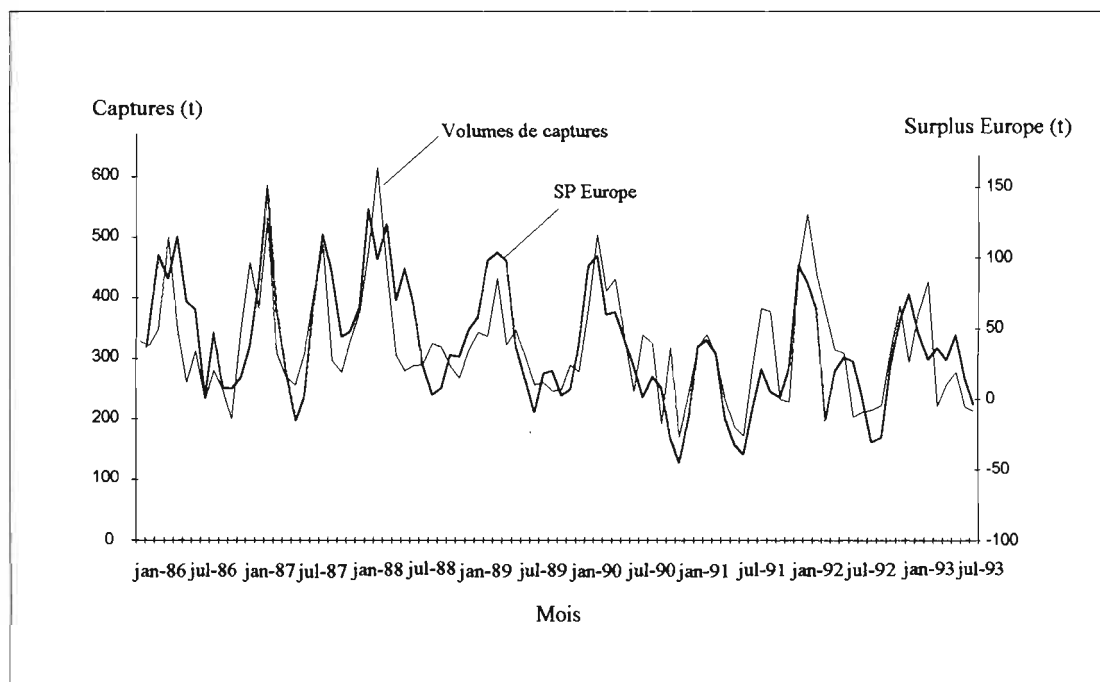


Fig.2.10. Évolutions simultanées des surplus de production Européens (SP_{Europe}) et des volumes des captures (en kg, données mensuelles) pour la période janv. 86 - août 93. Comparons avec la Fig.2.9 : les deux séries évoluent cette fois de façon corrélée sur toute la période. (Source : IFREMER Cayenne et CCI Guyane).

Les exportations vers ce marché permettaient donc, lorsqu'il était encore accessible aux armements français d'amortir, voire même d'éliminer, les effets de la saisonnalité du marché français. Ce phénomène de tampon n'a plus été ensuite possible après la fermeture du marché américain en 1990.

2.1.2. Hypothèses sur les raisons d'un stockage au niveau local

Nous venons d'écrire qu'il était « *de plus en plus manifeste que la régulation des stocks se faisait en partie au niveau de Cayenne et ceci malgré la faible capacité de stockage des armements* ». Quels sont les éléments qui nous permettent d'affirmer l'existence d'un tel phénomène ? Notre raisonnement est le suivant : si ce processus de stockage au niveau de Dégrad-des-Cannes était un phénomène passif, dans le sens non régulé, les armateurs exporteraient leur production au fur et à mesure des captures, comme ils le faisaient du temps des marchés américains et japonais. La différence entre les captures et les exportations serait alors une sorte de bruit blanc, de moyenne zéro et de variance constante. Or ici la saisonnalité de la série SP_{Europe} est incontestable. Cela signifie qu'il y a bien rétention (d'une partie au moins) de la production pendant les premiers mois de l'année, et ensuite 'relargage' de ces volumes stockés, en même temps que se fait l'exportation des faibles captures de fin d'année. Trois raisons au moins peuvent être avancées pour expliquer ce comportement.

Premièrement, nous avons vu que le coût de stockage en Métropole était supérieur à celui en Guyane (cf. Encadré 2.3). Les armements ont donc tout intérêt à exporter une quantité minimum 'de sécurité' en Métropole, de manière à pouvoir répondre sans rupture à un pic imprévu de la demande, mais tout en conservant autant que possible une partie de la production là où le coût de stockage est moindre, c'est-à-dire en Guyane. La seconde raison possible à ce comportement est liée à une contrainte commerciale. Les mouvements saisonniers des pêcheurs au sein de la zone de pêche induisent une variation de la composition des captures au cours de l'année. Les grosses crevettes sont principalement débarquées en début de saison alors que, au contraire, ce sont des petites crevettes qui sont capturées en fin d'année (cf. Fig.2.a in Béné 1996 Annexe 1). En stockant une partie de ces grosses crevettes capturées en début d'année, les armements gardent ainsi une plus grande flexibilité dans le choix des catégories commerciales qu'ils peuvent proposer au moment du pic la demande de fin d'année. La troisième hypothèse possible est liée au problème du transport. L'exportation vers la métropole se fait par voie maritime. Cependant la fréquence des navires mar-

chands faisant la liaison Guyane-Métropole n'est pas sous le contrôle des armements (cf. Encadré 2.3). Elle n'est donc pas définie de façon optimale par rapport aux volumes des captures débarquées qu'il faut exporter. Les armements ont par conséquent intérêt à garder une partie de la production pendant les mois à rendements élevés afin de toujours disposer d'une fraction de production 'tampon' permettant de compléter les containers frigorifiques moins 'remplis' qui seront exportés en fin d'année.

2.1.3. Rôle des stockages dans la viabilité économique des pêcheries : une approche théorique

L'observation du déphasage entre la production et la consommation nous a incités à nous interroger sur la dynamique de stockage adoptée par les armements guyanais. L'analyse des données empiriques a confirmé le rôle important de ces stockages dans le fonctionnement de la pêche. Une étude théorique a également été menée par rapport à ce problème (Béné and Doyen Annexe 4). Cette étude est basée sur ce que l'on appelle une « Analyse de Viabilité ». Les principes de cet outil mathématique, développé à partir de la théorie des systèmes dynamiques contrôlés, sont présentés dans l'Encadré 2.4. Dans le cas présent, l'objectif de cette analyse de viabilité découle directement des constations précédentes. Il s'agit en effet d'analyser le rôle des volumes de stockage dans le maintien de la « viabilité économique » d'une pêche théorique. Cette analyse peut être vue comme une représentation "stylisée" de la pêche guyanaise. Les principales hypothèses du modèle sont en effet tirées de notre expérience guyanaise. On y suppose ainsi que la dynamique de la ressource exploitée et celle du marché sur lequel les captures sont injectées sont toutes deux saisonnières et animées par des oscillations déphasées (à la manière du stock de *P. subtilis* et du marché français de la crevette). La viabilité économique de la pêche est alors "cristallisée" sous la forme d'un certain nombre de « contraintes de viabilité » que le système doit satisfaire pour que cette viabilité soit assurée.

Les résultats de l'analyse (Annexe 4) révèlent un ensemble de conclusions intéressantes. La première d'entre elles est assurément le fait qu'il est possible, même avec les conditions de déphasage supposées ci-dessus, d'assurer la pérennité du système. Pour cela, il suffit que la capacité maximale de stockage soit supérieure à un seuil limite dynamique (identifiable analytiquement) et que les volumes de stockages soient régulés de manière appropriée.

Encadré 2.4. Les principes de l'Analyse de Viabilité.

Une analyse de Viabilité est une méthode d'analyse mathématique développée par J.P. Aubin (1991) et ses collaborateurs du CEREMADE (Centre de recherche de mathématiques de la décision, Paris-Dauphine) dans le cadre des systèmes dynamiques contrôlés. Si le premier contact avec ces travaux peut quelquefois prendre la forme d'un message venu d'un autre monde : « *Remarquons que les principaux Théorèmes de Viabilité (cf. [4, Th. 3.3.2., 3.3.4., 3.3.5]) sont vrais pour la classe des applications multivoques semi-continues supérieurement non triviales à valeurs convexes et compactes et à croissance linéaire.* » (Müllers, 1995: 13), au-delà de ces 'écarts de langage' inhérents au cadre mathématique de la méthode, se trouve un outil d'analyse puissant pour l'étude des systèmes dynamiques (Katharina nous pardonnera donc certainement l'usage détourné de ses écrits).

Ce qu'il faut retenir ici de ce concept (pour une présentation succincte et rigoureuse voir Aubin 1993), c'est qu'une analyse de viabilité peut se définir comme l'étude de la compatibilité entre la dynamique (éventuellement incertaine) et les contraintes de viabilité, c'est-à-dire, les conditions à satisfaire pour assurer la persistance, d'un système. Ainsi, par exemple, dans le cas d'un système décrivant les évolutions d'une population, une des contraintes de viabilité sera que la variable représentant l'abondance de cette population devra toujours rester positive. En terme formalisé, on aura le système :

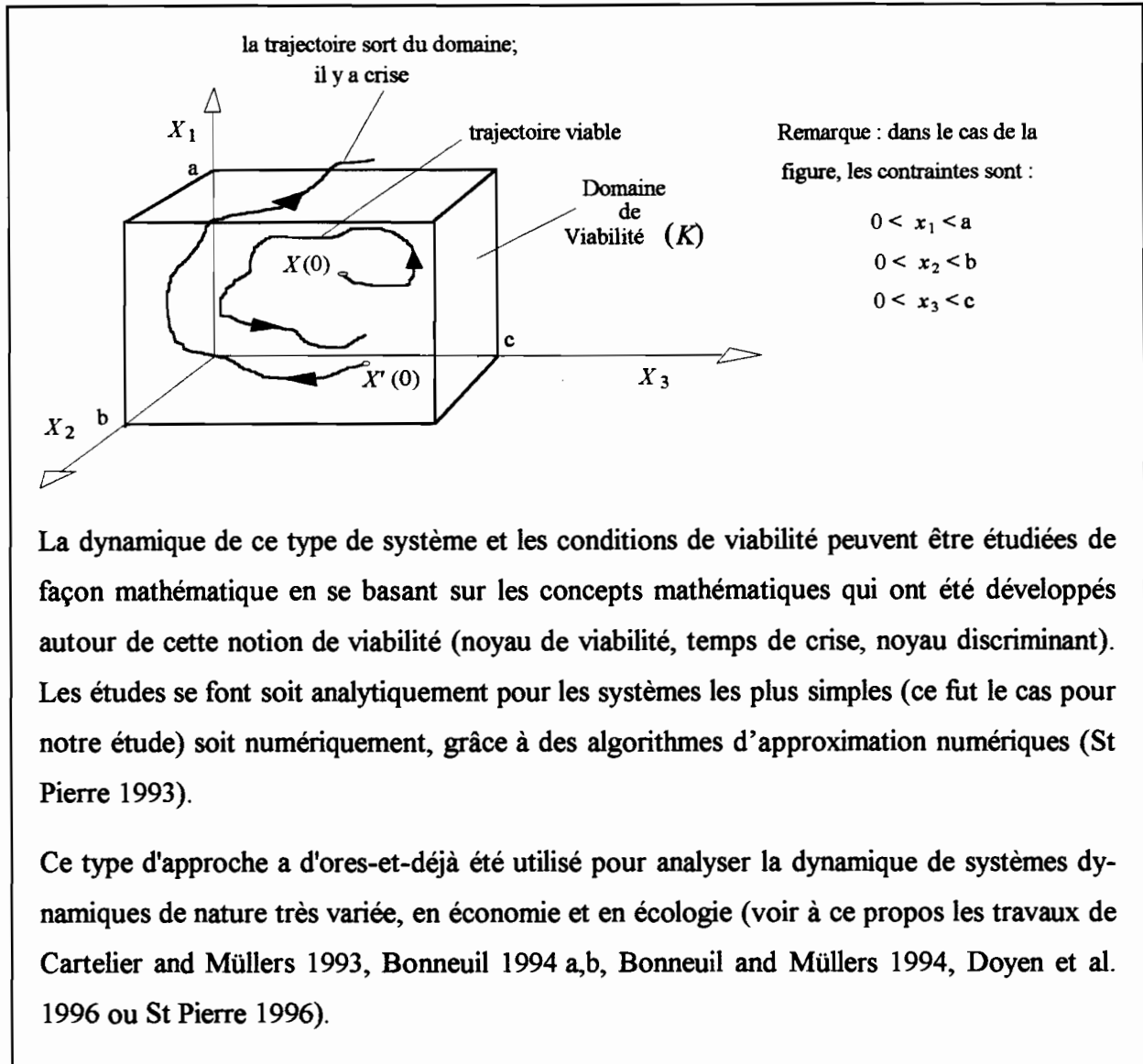
$$\dot{X}(t) = f(X(t), u(t))$$

avec $X(t)$ l'abondance de la population et $u(t)$ le contrôle (par exemple la pression anthropique exercée par une pêche). La contrainte de viabilité sera alors :

$$X(t) > 0, \forall t \geq 0.$$

L'ensemble des différentes contraintes (qui peuvent aussi concerner les variables de contrôle -par exemple si l'on suppose que l'effort de pêche ne peut pas être supérieur à une certaine valeur $u_{\max}$) définissent un domaine dans l'espace des phases, que l'on appelle « domaine de viabilité du système » et que l'on dénote K . Ce domaine est tel que lorsque le système est à l'intérieur il est viable (il ne viole aucune de ses contraintes de viabilité). En revanche, lorsqu'il en sort, on dit qu'il y a crise (cf. schéma ci-après).

continu page suivante



On démontre en effet qu'il existe deux périodes critiques de la saison, au cours desquelles il est nécessaire d'anticiper la dynamique des stocks pour éviter de violer les contraintes de viabilité (voir l'article original pour les détails).

Le second résultat majeur de cette analyse est le fait que, sous certaines conditions sur la capacité maximale de stockage, il est possible d'assurer la viabilité du système alors que pendant toute une partie de l'année les coûts globaux d'exploitation sont supérieurs aux valeurs commerciales des volumes débarqués. Il est intéressant de noter que cette propriété est

en fait en accord avec ce que l'on sait du comportement d'adhérence¹⁴ observé chez les agents (individuels ou collectifs) engagés dans des activités économiques. Alors que la théorie classique affirme que les firmes ne produisent que lorsque le profit de leurs ventes est supérieur aux coûts globaux de production, il est au contraire observé empiriquement que les entreprises ne cessent pas obligatoirement leurs activités à chaque fois que leurs coûts de production sont supérieurs à la valeur marchande de leur production. De même, les pêcheurs ne vont pas immobiliser leurs bateaux à quai même s'ils savent que pendant plusieurs semaines (voire plusieurs mois) le bénéfice de leurs captures sera inférieur aux coûts d'exploitation. Ce comportement correspond donc à ce qui est dénommé dans la littérature du terme de comportement d'adhérence (*'stickiness behaviour'*) des agents économiques. Cette opposition entre théorie et réalité économique pose généralement des problèmes de formalisme et le comportement d'adhérence est par conséquent le plus souvent négligé dans les modèles (ou, s'il est intégré, il l'est de manière *ad hoc*). Le point important est que, dans le cas de l'étude de viabilité présente, cette propriété d'adhérence 'émerge naturellement', sans qu'aucune hypothèse *ad hoc* ou *a priori* ait été introduite dans ce but.

Le troisième résultat intéressant concerne le "flux d'exportation", c'est-à-dire, la quantité des captures exportée par unité de temps (ce qui représente la variable de contrôle dans le système). On aurait pu s'attendre à ce que ce flux apparaisse plus ou moins corrélé à la quantité de crevettes en stock, selon une 'loi' très générale du genre : « Plus le stock est important, plus les volumes qui sont exportés sont importants ». On découvre en fait que la 'réalité théorique' décrite par le modèle est tout autre et que le flux d'exportation peut en l'occurrence varier à l'intérieur d'une large gamme de valeurs sans suivre une quelconque relation dictée par les quantités déjà stockées.

Enfin le dernier point à souligner est le fait que la pêcherie peut se révéler non-viable si les amplitudes des oscillations qui animent l'abondance de la ressource ou celles de la demande du marché sont trop importantes. Dans ce cas, l'analyse montre alors que la viabilité ne dépend plus de la capacité maximale de stockage mais de l'amplitude de ces oscillations (et des coûts de stockage). Cela signifie qu'à coût de stockage constant, la condition de non-viabilité ne pourra pas être renversée même en investissant dans une capacité de stockage

¹⁴ Nous avons défini ce qu'est un comportement d'adhérence dans l'Introduction Générale (cf. § "Les limites de l'analogie proie-prédateur", p.15)

supérieure. En d'autres termes, dans une situation de non-viabilité, re-investir dans des capacités de stockage plus importantes ne permettra pas de restaurer la viabilité de la pêche-rie.

En conclusion, cette analyse de viabilité renforce les résultats de l'analyse empirique effectuée précédemment. Parce que ce sont eux qui amortissent les écarts positifs et/ou négatifs entre les volumes de captures et la demande des marchés, le stockage représente un élément central du processus de production des pêcheries. Sa régulation permet en effet de maintenir la viabilité économique de ces pêcheries alors que ces dernières évoluent le plus souvent dans un environnement où les conditions nécessaires au déroulement normal du processus de production ne sont pas assurées de manière continue.

2.2. La seconde adaptation du système : la réduction de la taille moyenne des crevettes capturées

Dans la partie qui vient, nous nous intéresserons à la deuxième adaptation à laquelle le système a eu à faire face à la suite de la réorientation de ses exportations vers le marché français. On se souvient que ce marché français est caractérisé par une forte demande de crevettes de petite catégorie, alors que les marchés américains et japonais étaient, au contraire, demandeurs de grosses et moyenne crevettes. Les armements ont donc dû modifier la composition de leurs exportations, ce qui a nécessairement impliqué une modification de la composition en taille des captures. On peut dès lors chercher à savoir quelle a été la nature des mécanismes qui ont été activés pour arriver à cette modification de la composition des captures.

C'est à ce stade que va apparaître l'importance du gradient « taille-profondeur » dont l'existence avait été soulignée lors du premier chapitre. On se souvient que ce gradient se traduit par le fait que les jeunes individus, correspondant aux petites catégories, sont généralement pêchés à la côte alors que les individus matures, constituant les grandes catégories, sont capturés plus au large¹⁵. Une modification de la taille moyenne des individus dans les débarquements implique nécessairement une ré-orientation de l'effort de pêche. En particulier, dans le cas présent, la "logique" veut que la diminution de la taille moyenne des captures

¹⁵ Cf. § 1.1. du Chap.1.

imposée par les nouvelles contraintes d'exportation soit accompagnée d'un rapprochement à la côte de l'effort de pêche. Or, c'est ce qui est effectivement observé. L'analyse de la sonde moyenne de la flottille indique en effet que la flottille a modifié la répartition de son activité pour venir travailler dans des zones plus côtières (cf. Fig.2.11).

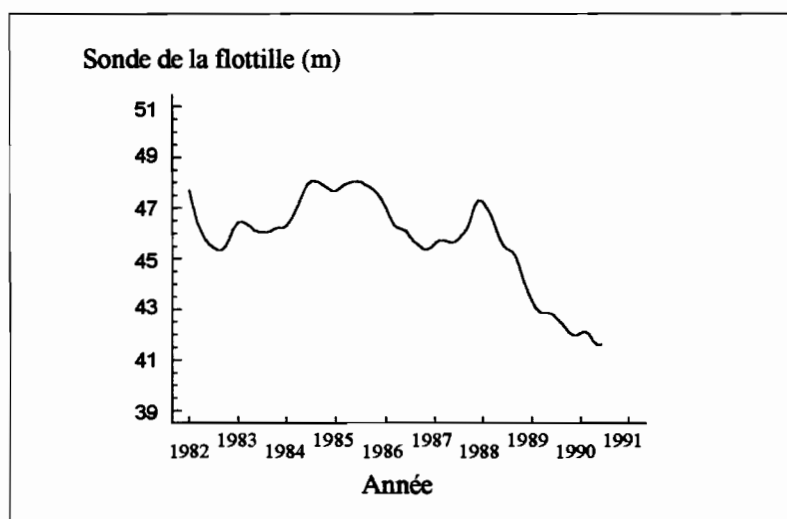


Fig.2.11. Tendence annuelle[□] de la sonde de la flottille (en mètre). La sonde exprime la profondeur moyenne des zones où la flottille exerce son activité de pêche. On observe ici que la flottille guyanaise est restée dans des zones aux alentours de 46 mètres jusqu'en 1987, puis qu'elle s'est déplacée à partir de cette date vers des zones moins profondes, c'est-à-dire plus à la côte, là où les crevettes sont de plus petite taille (données initiales mensuelles sur la période janv.1982-déc.1990, source : IFREMER Cayenne).

[□] La composante saisonnière a été éliminée par une procédure de moyenne mobile calculée sur 12 mois

Parallèlement, la série des données de débarquement montre que les proportions de petites crevettes dans les captures ont augmenté à l'époque où a eu lieu ce rapprochement à la côte (cf. Fig.2.12). La simultanéité des deux phénomènes suggère que ces derniers sont reliés par une relation de causalité¹⁶.

¹⁶ Plus précisément, il a fallu vérifier que la réponse des pêcheurs à l'évolution de la demande des marchés était la seule explication possible à la modification de la répartition de l'effort de pêche. Nous avons pour cela montré que la modification de l'effort de pêche ne correspondait pas à une réaction des pêcheurs face à une modification de la répartition spatiale de la ressource (Béné 1996 Annexe 1). Un test statistique (Chalmond 1981), dont la fonction est de vérifier la significativité des ruptures de moyenne dans les séries temporelles, a été utilisé dans ce but. Mené à la fois sur (i) la série de la sonde de la flottille, (ii) la composition en taille des captures et (iii) un indicateur de la répartition spatiale de la ressource, le test montre que seules les deux premières séries présentent des ruptures significatives dans leur moyenne. Le fait, en revanche, que l'indicateur de la répartition de la ressource ne présente pas de rupture signifie que la distribution de cette ressource n'a pas été modifiée au cours de la période étudiée. Par conséquent elle n'a pas pu être à l'origine de la modification des stratégies de pêches (cf. Annexe 1 pour les détails de l'analyse).

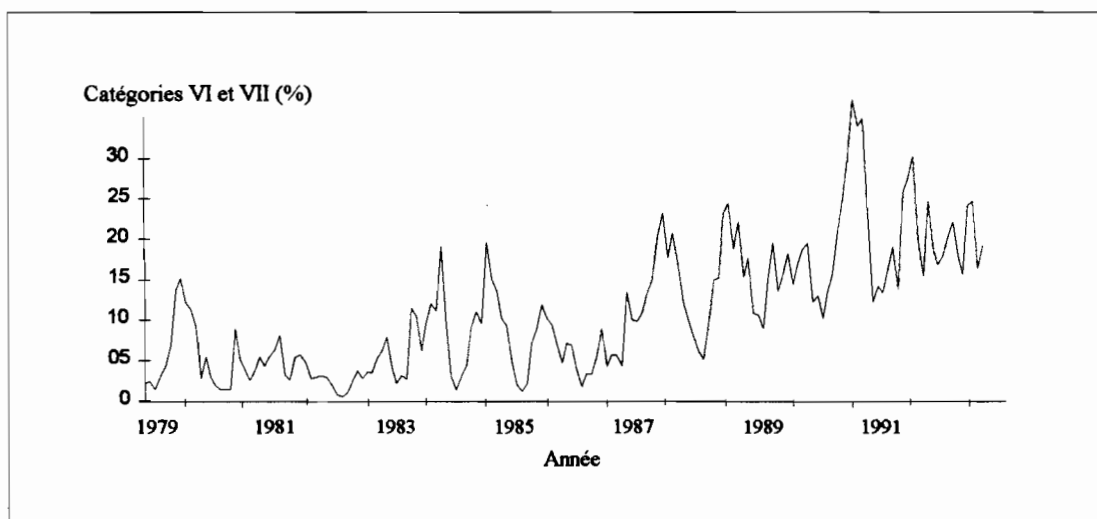


Fig.2.12. Évolution du pourcentage des deux plus petites catégories commerciales (catégories VI et VII) dans les débarquements sur la période 1979 - 1992 (données mensuelles, source : IFREMER Cayenne).

2.2.1. Le système de rémunération : un outil de contrôle pour les armements

Si la modification de la distribution de l'effort de pêche est le moyen par lequel la pêcherie a adapté la composition de ses captures aux nouvelles contraintes du marché, cela ne précise pas, en revanche, comment ce changement a pu s'effectuer, ou plus exactement comment les responsables des armements ont pu imposer cette modification à leurs capitaines.

L'hypothèse que l'on va tenter de démontrer au cours de la partie qui suit est que cette modification des stratégies de pêche des capitaines leur a été imposée par le biais du système de rémunération. Nous allons en effet découvrir que la structure très particulière de ce système de rémunération transforme ce dernier en un outil très efficace, à la fois pour contrôler les tâches effectuées par les membres d'équipage à bord, mais aussi pour influencer les capitaines dans l'orientation de leur effort de pêche (cf. Béné 1997). La mise en évidence de ce mécanisme complexe de contrôle passe par plusieurs étapes.

Quand pêcheurs et armateurs ne rament pas tous dans le même sens.

Commençons par démontrer une affirmation qui va sans doute paraître surprenante à certains et évidente à d'autres, le fait qu'il existe une divergence entre les objectifs des capitaines et ceux des armements¹⁷.

¹⁷ La primauté de cette affirmation revient aux auteurs du rapport SÉPIA puisque l'on peut lire dans la version provisoire du rapport : « En pratique, les stratégies préconisées par les armements ont dans une grande mesure pour limite les propres stratégies des capitaines. » (Anon. 1991).

Pour comprendre l'origine de cette affirmation, il nous faut revenir au phénomène de déphasage entre débarquements et demande mis en évidence au début de cette section. L'existence de ce déphasage signifie que la production est exportée en direction de la métropole avant même d'être vendue en totalité. Il existe donc un découplage entre la production (les exportations) et la vente réelle des crevettes, vente qui peut avoir lieu deux, trois, voire six mois après que les crevettes ont été débarquées à Cayenne. Or les capitaines sont rémunérés tous les mois, non en fonction des volumes de crevettes qui sont vendues à Rungis mais bien évidemment en fonction de ce qu'ils ont débarqué sur les quais du Larivot. En supposant que l'objectif de ces capitaines soit de maximiser leur revenu (hypothèse raisonnable), la stratégie de ces derniers va alors consister à positionner leur effort de pêche selon un choix optimal au sein de la matrice de répartition spatio-temporelle des différentes tailles et abondances des crevettes, de manière à maximiser le revenu découlant de ces captures. Les armateurs, quant à eux, vont adopter les stratégies commerciales qui leur permettent d'espérer maximiser leur profit à venir (c'est-à-dire le produit des ventes qui se fera dans plusieurs mois) en fonction de la demande des marchés.

De manière à être clair et à souligner la subtilité de la différence, utilisons les termes "*volumes*" et composition en "*taille*" pour désigner les débarquements et "*quantités*" et composition en "*catégories*" pour désigner les exportations. On a alors d'un côté des capitaines dont la stratégie de pêche se traduit au niveau des débarquements par une combinaison {*volume/taille*} contrainte par la dynamique de la ressource, et dont la composition est celle qui leur permet de maximiser leur revenu instantané (c'est-à-dire du mois présent). De l'autre, on a les armateurs dont la stratégie commerciale se traduit au niveau des exportations par la recherche d'une combinaison {*quantité/catégorie*} supposée leur permettre de maximiser leurs profits en fonction des ventes qui auront lieu trois, voire six mois plus tard. Rien du point de vue intuitif ou même logique ne permet d'affirmer que ces deux combinaisons, définies par rapports à des contraintes et des périodes différentes convergent vers une seule et unique solution optimale. Il est d'ailleurs reconnu du point de vue mathématique que les multi-objectifs sont généralement sous-optimaux. Ces problèmes, bien connus des économistes, sont à la base des notions d'équilibre de Nash ou de Pareto-efficience.

Nous voilà donc en présence d'un système où les deux communautés qui le composent vont chercher à satisfaire des objectifs différents au travers d'un seul et unique vecteur, celui constitué par le volume et la composition des stocks de crevettes débarquées. Bien que sur

le long-terme, il soit exact que la survie de la pêcherie passe par la vente de la production et donc par la satisfaction des contraintes du marché, sur le court-terme, en revanche, la divergence est réelle, et les armements vont avoir à la gérer. Le problème est donc posé. Passons à sa résolution.

Analyse du système de rémunération des hommes d'équipage

Première étape, donnons quelques précisions sur le système de rémunération. Le système liant les équipages et les capitaines aux armements qui les contractent découle directement du système qui avait été "importé" par les armements américains lors du développement de la pêcherie au début des années 60. Pour les hommes d'équipage, ce système a, jusqu'en 1991, été structuré selon un contrat dit « à la pièce », et non « à la part » comme il est observé communément dans les pêcheries et les systèmes agraires. Quelles différences y a-t-il entre ces deux systèmes ? Dans le système classique à la part, la rémunération du pêcheur est directement proportionnelle au chiffre d'affaires tiré de la production, c'est-à-dire, au produit $p \cdot Q$ où p est le prix et Q la production (cf. Encadré 2.5). Dans un système à la pièce, l'intéressement (i.e. le revenu) est au contraire uniquement basé sur la quantité produite Q . Dans le cas d'une pêcherie cela signifie que le revenu est proportionnel au volume débarqué et non à la valeur commerciale de ce volume.

Encadré 2.5. Le contrat à la part ("*the share contract*").

Le contrat à la part est le système de rémunération que l'on retrouve le plus largement répandu dans les systèmes agraires (Cheung 1969, Stiglitz 1974, Reid 1976). Sous cette forme de contrat, la rémunération du paysan apparaît comme un pourcentage (une part) du revenu issu de la vente de la récolte. Le complément de cette part revient au propriétaire-terrien qui a contracté le paysan. Ce système a également été adopté depuis longtemps dans la majorité des pêcheries (Zoetewij 1956). Sutinen (1979) par exemple en retrouve la trace dans l'oeuvre de H. Melville "Moby Dick" décrivant l'épopée des grands baleiniers du XIX^e siècle. Maran (1974) l'avait d'ailleurs précédé dans cette observation puisqu'il tire d'un document d'époque un passage illustrant la manière avec laquelle les armateurs¹⁸ considèrent les avantages du contrat à la part : « *compensation by shares increased crew's productivity* :

¹⁸ C'est-à-dire les équivalents des propriétaires terriens dans le cas de pêche, i.e. ceux qui possèdent le capital (les bateaux) et pour qui les pêcheurs travaillent.

lookouts were sharper, boat crews were quicker, and blubber cutters were faster when paid by shares ».

Il est communément affirmé en théorie du contrat que cet intéressement à la production ("*the incentive effect*"), auquel le passage ci-dessus fait référence, existe et est effectif, ceci grâce à la nature même du contrat : le système à la part 'récompense' en effet les travailleurs proportionnellement au revenu tiré de la vente des biens qu'ils produisent. Dans ce sens, le contrat à la part est considéré comme potentiellement capable de limiter la tentation de 'tirer au flan', à la différence par exemple du contrat horaire où le revenu ne dépend pas du revenu tiré de la vente de la production (Newbery 1977). Dans la littérature classique, il existe une deuxième explication (d'ailleurs très souvent associée à la première) pour justifier la prédominance du contrat à la part sur les autres types de contrats dans les systèmes agraires ou halieutiques. C'est le phénomène de l'aversion pour le risque (Stiglitz 1974, Sutinen 1979). Dans un environnement incertain comme l'est celui de l'agriculture (en tous cas, dans les pays en voie de développement) ou de la pêche, les revenus issus de la récolte ou de la vente des débarquements, mais aussi les coûts de production qui leur sont associés, sont généralement très variables. Face à cette incertitude, le système à la part permet aux paysans ou aux pêcheurs non-propriétaires de 'partager' le risque concernant les fluctuations de profit avec les propriétaires terriens ou avec les armateurs. C'est ce que l'on dénomme le partage du risque ("*the risk sharing*")¹⁹.

En ce qui concerne le formalisme utilisé dans le domaine de la pêche, les quelques travaux de référence (Sutinen 1979, Anderson 1982, or Plourde and Smith 1989) proposent pour décrire la relation qui lie l'armateur au pêcheur la formule :

$$r \cdot p \cdot Q \text{ versus } (1-r) \cdot p \cdot Q$$

où (r) représente la part du pêcheur et ($1-r$) le complément de cette part revenant à l'armateur, (p) est le prix et (Q) les captures. Ce formalisme peut être considéré comme la 'forme canonique' du contrat à la part dans la mesure où il est, sous cette forme, similaire à celui adopté par la plupart des études menées dans le domaine des systèmes agraires (Stiglitz 1974, Reid 1976, Bell 1977, Braverman and Stiglitz 1982).

¹⁹ Ce n'est pas le cas, par contre de la 'rente fixe' qui existe dans certains systèmes agraires où les paysans payent aux propriétaires une redevance dont le montant est fixé à l'avance. De ce fait, ils supportent entièrement les aléas (les risques) dus aux fluctuations du niveau de la récolte.

L'existence de ce système à la pièce dans la pêche guyanaise et sa persistance depuis plus de trente ans alors que la majorité des pêcheries fonctionnent sous le système du contrat à la part peut surprendre quelque peu. Une autre manière de raisonner est de remarquer que si ce système a été conservé aussi longtemps, c'est que son existence devait certainement correspondre à une réelle raison d'être. Restait alors à l'identifier. Nous l'avons retrouvé dans la littérature classique traitant de la théorie du contrat²⁰ (cf. Béné 1997). Stiglitz (1975) et Roumasset and Uy (1980) montrent que le contrat à la pièce permet d'éviter l'*effort shirking*²¹. L'*effort shirking* peut, par exemple, être observé dans un contrat horaire lorsque les travailleurs ne sont pas récompensés par une augmentation de leur salaire proportionnelle à l'augmentation de l'effort qu'ils sont prêts à consentir. Le contrat à la pièce (tout comme celui à la part) évite ce genre de problème. On a donc une explication possible à la survivance de ce contrat particulier au sein de la pêche guyanaise.

Le système de rémunération de la pêche est néanmoins caractérisé par une seconde particularité, à savoir l'existence d'un certain nombre de bonus qui viennent compléter la rémunération de base issue du contrat à la pièce. Là encore, c'est une recherche bibliographique dans la littérature sur la théorie du contrat qui nous a offert une explication plausible à l'existence de ces bonus. Cette explication est la suivante : ainsi qu'il a déjà été précisé (cf. Encadré 2.2), l'essentiel des tâches de l'équipage à bord consiste à séparer les crevettes des captures accessoires puis à trier les premières selon les catégories qui seront ensuite utilisées lors de la commercialisation. Bien que cette opération de triage doive être faite le plus rapidement possible pour éviter les problèmes d'autolyse, l'aspect extérieur des crevettes est tout aussi important, et il fait l'objet d'une attention toute particulière (une crevette dont les antennes sont cassées peut perdre jusqu'à 30% de sa valeur marchande). La composante "qualité du travail" est donc primordiale pour ce type de produit. Cependant, Roumasset and Uy (1980) montrent que le contrat à la pièce a tendance à engendrer un *quality shirking*²², spécialement dans les cas où le contrôle par l'employeur n'est pas facile et où un effort pour améliorer la qualité du produit risque d'entraîner une baisse du rendement et donc

²⁰ Cette littérature concerne malheureusement essentiellement le milieu agricole; très peu d'études ont été menées par rapport aux pêcheries, d'autant moins qu'il s'agit ici d'un contrat d'une nature peu répandue.

²¹ Nous n'avons trouvé aucune traduction française de cette expression. Littéralement "*to shirk*" signifie 'tirer au flanc'; l'expression "*effort shirking*" se rapporte donc à la *quantité* de travail qui a été perdue par manque de motivation. Nous allons voir dans un instant qu'il existe aussi l'expression "*quality shirking*" qui se rapproche au contraire de l'idée de travailler 'à la va-vite', en d'autres termes, privilégier la *quantité* au détriment de la *qualité*.

²² cf. note 21.

du revenu. Ces deux conditions étant rencontrées dans le cas de la pêcherie crevettière guyanaise, il y avait donc un réel risque de *quality shirking*. C'est en tous cas ce que les armateurs semblaient penser et c'est ce qui les a poussés à compléter le système à la pièce par une série de bonus dont les montants étaient directement proportionnels au pourcentage de crevettes non-autolysées et non cassées (cf. Béné 1997). L'objectif recherché était clairement annoncé. On pouvait ainsi lire sur les feuilles de salaire des hommes d'équipage, à la ligne concernant le "grading bonus"²³ :

« Company will make tests on shrimp, for black shrimps²⁴, soft shrimps broken and bad grading. If quality and/or grading are not good, this bonus will not be paid ».

Le rôle de ces bonus était donc d'encourager la qualité du conditionnement à bord et ainsi de corriger la tendance au *quality shirking* induite par le contrat à la pièce. Cette situation tout à fait particulière permet d'expliquer la prédominance de ce contrat mixte "à la pièce-plus-bonus" sur le contrat horaire. Mais elle ne permet pas d'expliquer pourquoi le contrat à la part n'a pas été mis en place avant 1991. Il est en effet théoriquement possible d'obtenir cette exclusion combinée de l'*effort shirking* et du *quality shirking* par un simple contrat à la part. Stiglitz (1975) propose une explication à cette situation. Il démontre que lorsque la qualité du travail est variable et difficile à estimer pour l'employeur, le contrat à la pièce peut être un moyen pour identifier et décourager les travailleurs les moins rapides. Il est en effet théoriquement possible d'imposer une rémunération suffisamment basse pour que seuls les travailleurs les plus habiles reçoivent un salaire décent et acceptent le travail...

Analyse du système de rémunération des capitaines

Le système de rémunération des capitaines est différent de celui des hommes d'équipage. En ce qui concerne les capitaines, le contrat est très proche du contrat à la part classique. C'est d'ailleurs certainement la raison pour laquelle Le Cabellec (1984) ou Gilly et Cochet (1988) avaient affirmé lors de leurs études respectives qu'il s'agissait d'un contrat à la part. Il existe cependant une différence essentielle entre le système à la part classique tel qu'il a été décrit dans les études de références (Sutinen 1979, Anderson 1982, Plourde and Smith 1989 cf.

²³ Rappelons ici que la majorité des marins embarquant sur les crevettiers sont soit guyanais, soit surinamien soit japonais. La langue de communication entre armement et pêcheurs est par conséquent ... l'anglais.

²⁴ *black shrimps* = les crevettes autolysées.

Encadré 2.5) et celui adopté dans la pêche guyanaise. Dans la situation présente, les capitaines sont payés mensuellement, sur les bases des *projections* du produit de la vente et non sur la base des ventes *réelles* effectuées par les armements²⁵. Prenons le temps de décrire plus en détail les bases de ce système car elles vont nous permettre de souligner des conclusions intéressantes. La rémunération des capitaines est calculée par l'intermédiaire d'un vecteur de paramètres. Notons r_i les éléments qui composent ce vecteur pour faire la distinction avec les éléments p_i du vecteur prix unitaire observé sur le marché (avec i : catégorie). Les paramètres r_i (en FF/kg) sont les éléments qui servent à calculer le revenu des capitaines, alors que les valeurs p_i (toujours en FF/kg) sont les prix auxquels sont ensuite vendues les crevettes sur les marchés. Les paramètres r_i sont fixés et réévalués par les armements tous les six mois environ (voir Béné 1997 pour les détails de l'analyse) alors que les prix p_i varient à chaque transaction. Bien que les rapports $(r_i/r_j)_t$ ($j \neq i$) pour une période (t) soient plus ou moins conditionnés par les rapports $(p_i/p_j)_t$ des prix correspondants, [i.e. $(r_i/r_j)_t$ peu différent de $(p_i/p_j)_t$], en pratique l'évolution du rapport $(r_i/r_j)_t$ au cours du temps est dans les faits entièrement sous le contrôle des armements. Cela signifie que les armements ont donc la possibilité de modifier (dans une certaine mesure) le rapport r_i/r_j des vecteurs de rémunération. Nous allons voir que cette possibilité représente l'outil par lequel ces armements vont contrôler les stratégies des capitaines et les orienter dans le sens qui leur permette ensuite de répondre à la demande du marché.

Pour que la démonstration soit plus " parlante", imaginons-nous capitaine d'un crevettier. On se souvient que notre stratégie consiste à répartir notre effort de pêche quelque part sur la matrice taille-abondance de la ressource de manière à maximiser notre revenu. Imaginons maintenant que l'armement pour lequel nous travaillons réoriente ses exportations vers un nouveau marché, et que ce marché soit caractérisé par une demande pour des catégories plus petites que celles qui nous permettent de maximiser notre revenu.

Pour satisfaire le nouveau besoin des armateurs en crevettes de petites catégories il nous faudrait modifier notre stratégie de pêche, c'est-à-dire nous 'déplacer' sur la matrice taille-

²⁵ Remarquons que cette distinction ne portait pas à conséquence jusqu'à la fin des années 80 dans la mesure où il n'y avait pas, à cette époque, de décalage entre les débarquements et la vente effective de ces débarquements (plusieurs armateurs nous ont même expliqué que pendant cette période faste de la pêche, la production d'une marée étaient vendue avant même que les navires quittent le port).

abondance, de notre position actuelle, supposée optimale, vers une autre position (par définition sous-optimale).

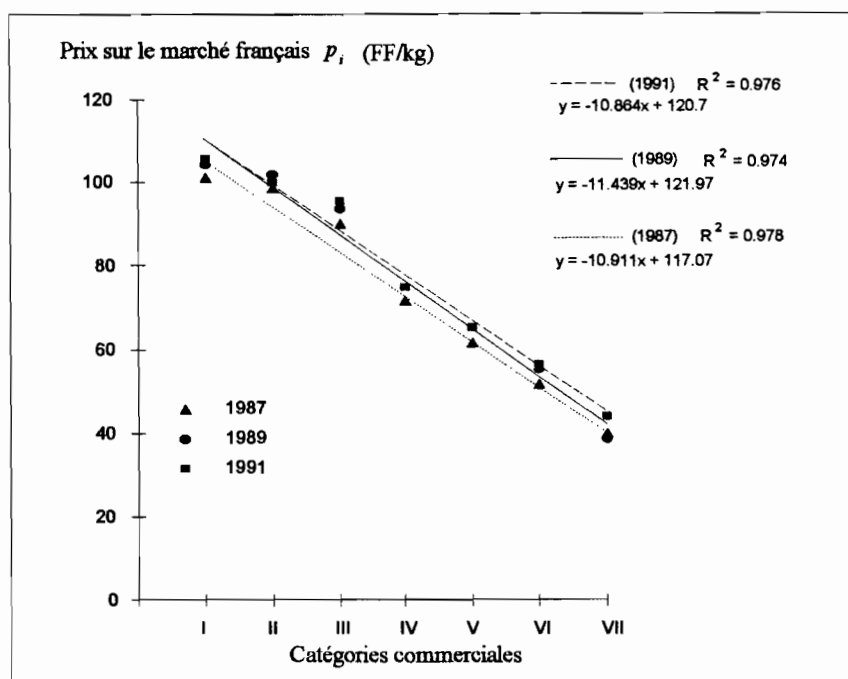


Fig.2.13. Prix des crevettes guyanaises par catégories sur le marché français pour les années 1987, 1989 et 1991 (données annuelles, en FF kg⁻¹) et estimation des régressions pour les trois années (source : Organisation Professionnelle des Producteurs Guyanais).

Tabl.2.1. Test de comparaison de pentes pour les régressions estimées en Fig.2.13. Ce test est utilisé ici pour déterminer si les rapports des prix entre catégories p_i / p_j , $i \neq j$ ont évolué entre 1987 et 1991. La procédure est la suivante : la valeur de la pente estimée pour 1987 est considérée comme la valeur de référence i.e. $\alpha_{87} = \alpha_{th}$, et les valeurs des pentes des régressions obtenues pour les années 1989 et 1991 (notée α_{89} and α_{91} respectivement) sont comparées à cette valeur de référence. L'hypothèse nulle H_0 est : $\alpha_{th} = \alpha_{89} = \alpha_{91}$, l'hypothèse alternative H_1 est : $\alpha_{th} < \alpha_{89}$ et $\alpha_{th} < \alpha_{91}$ (test unilatéral). H_0 est rejetée si $|t_{ac}| > t_\alpha$ et acceptée sinon, avec $t_{ac} = \frac{\alpha_{testé} - \alpha_{th}}{\sqrt{\text{var}(\alpha)}}$ et $\text{var}(\alpha) = \frac{S_y^2 \cdot (1 - R^2)}{(n - 2) \cdot S_x^2}$. La valeur t_α est tirée de la Table t -Student (pour $n-2$ d.f. et un risque de première espèce de 5%). Dans le cas présent $\alpha_{87} = \alpha_{th} = -10.910$; $n = 7$ et $t_\alpha = 2.016$.

Année	S_y^2	S_x^2	R^2	$\alpha_{testé}$	$ t_{ac} $	$t_\alpha = 2.016$	
1989	626.574	4.667	0.97	$\alpha_{89} = -11.439$	0.640	$ t_{ac} < t_\alpha$	N.S.
1991	564.202	4.667	0.97	$\alpha_{91} = -10.864$	0.061	$ t_{ac} < t_\alpha$	N.S.

N.S.: différence non significative par rapport à la valeur de référence α_{87} , i.e. les prix relatifs des différentes catégories n'ont pas évolué entre l'année de référence et l'année testée.

Si notre rémunération était basée sur les prix du marché p_i (non contrôlé par les armements) et que ces prix n'évoluent pas dans le sens d'une valorisation des petites catégories, rien ne nous inciterait à réorienter notre effort de pêche des grosses crevettes bien rémunérées vers des crevettes plus petites moins bien rémunérées. Dans ces circonstances, il y a fort à parier qu'il y aurait conflit dans la mesure où les armements devraient nous imposer la réorientation vers les petites catégories, ce qui correspond à une stratégie non-optimale pour nous (dans le cas contraire, nous l'aurions déjà adoptée). C'est exactement la situation de crise qui aurait été observée si le système de rémunération des capitaines avait été basé sur un système classique à la part. L'étude montre en effet que le rapport p_i/p_j entre le prix des différentes catégories n'a pas évolué sur le marché français entre 1987 et 1991 (voir Fig.2.13 et Tab.2.1 pour les explications et la procédure du test utilisé).

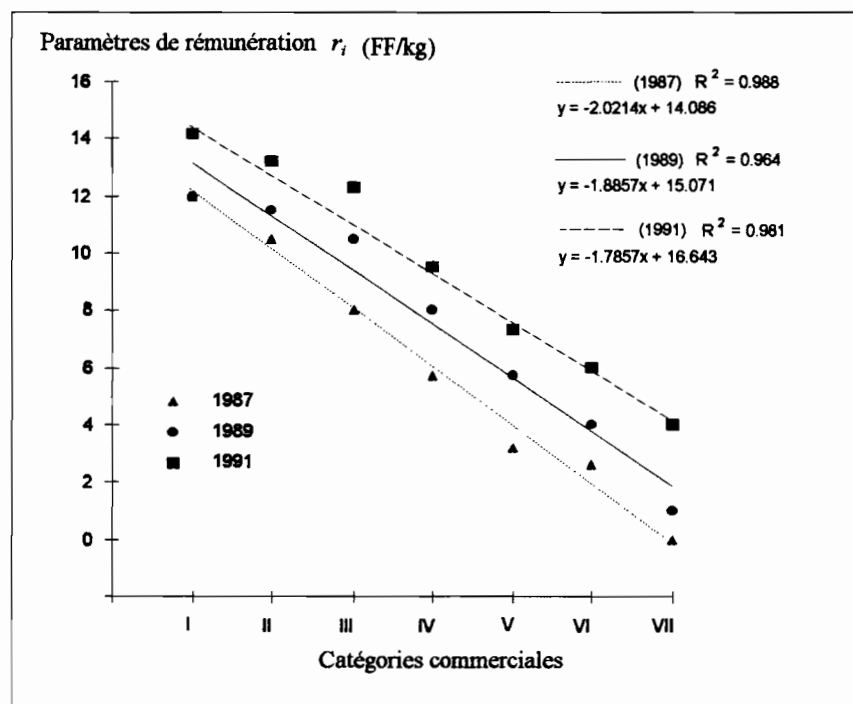


Fig.2.14. Valeurs des éléments r_i du vecteur de rémunération servant de base de calcul au salaire des capitaines pour les trois années 1987, 1989 et 1991 (en FF kg⁻¹) et estimation des régressions correspondantes (source : armements guyanais).

Le test du Tab.2.1 confirme l'évidence de la Fig.2.13. Les rapports entre les prix des différentes catégories n'ont pas évolué. Les prix du marché n'auraient, par conséquent, pas pu inciter les pêcheurs guyanais à modifier leur stratégie de pêche en faveur des petites catégories. En revanche, l'étude montre que, dans le même temps, les modifications que les arme-

ments ont apportées aux valeurs r_i du vecteur de rémunération sont significatives (voir Fig.2.14 et Tab.2.2). Ces modifications, qui sont observées au moment où, par ailleurs, prend place la réorientation de l'effort de pêche (entre 1987 et 1990), vont, de plus, dans le sens d'une valorisation des petites catégories.

Tabl.2.2. Test de comparaison des pentes des régressions estimées en Fig.2.14 pour les paramètres de rémunération r_i . La procédure du test et les règles de décision sont les mêmes que pour le Tab.2.1. Dans le cas présent, $\alpha_{87} = \alpha_{th} = -2.021$, $n = 7$ et $t_\alpha = 2.016$.

Année	S_y^2	S_x^2	R^2	$\alpha_{testé}$	$ t_{ac} $	$t_\alpha = 2.016$	
1989	17.205	4.667	0.96	$\alpha_{89} = -1.885$	0.838	$ t_{ac} < t_\alpha$	N.S.
1991	15.160	4.667	0.98	$\alpha_{91} = -1.785$	2.155	$ t_{ac} > t_\alpha$	*

N.S.: différence non significative par rapport à α_{87} .

* : indique une différence significative avec α_{87} (à 5 %), i.e. les paramètres de rémunération de l'année testée ont été modifiés de façon significative par rapport à ceux de l'année de référence.

Tous ces éléments étayent donc l'hypothèse d'un contrôle, par les armements et grâce aux paramètres de rémunération, des stratégies de pêche des capitaines. En modifiant ces paramètres, les armements furent donc en mesure de mener les capitaines à ré-orienter leur effort de pêche vers des catégories plus petites. Cette modification permet alors aux armements d'ajuster la composition de leurs exportations à l'évolution de la demande des marchés.

~o0o~

SECTION 3. IMPACT DES MARCHÉS MONDIAUX SUR LE SYSTÈME-PÊCHE GUYANAIS

Nous venons d'analyser la manière avec laquelle le système-pêche s'est adapté aux deux contraintes entraînées par la réorientation de ses exportations vers le marché français. Il nous reste maintenant à tenter d'identifier l'impact des deux dernières perturbations que l'environnement économique a imposées sur le fonctionnement du système. Un retour sur la **Fig.2.7** nous rappelle que celles-ci sont liées (i) à l'influence que les crevettes d'élevage ont commencé à exercer sur la dynamique des prix mondiaux à travers l'apparition d'espèces-indicateurs, et (ii) à la perte de la situation "monopolistique" dont jouissaient les pêcheries de crevettes jusqu'au début des années 80.

3.1. Études des liens dynamiques entre la crevette guyanaise et la crevette de Thaïlande

3.1.1. Aspect théorique des liens dynamiques entre prix de produits substitués

Nous avons précisé lors de la section 1 de ce chapitre que, parmi les espèces-indicateurs qui s'étaient imposées au cours des années 80, se trouvaient la Black Tiger (*BT*) de Thaïlande et l'Ecuador White (*EW*) d'Équateur (cf. **Fig.2.6** pour mémoire). Ces deux espèces sont précisément celles avec lesquelles la crevette produite en Guyane est en compétition sur le marché français (Anon. 1991). Or, lorsque deux ou plusieurs produits sont en compétition sur un même marché, on observe généralement que leurs prix sont fortement liés entre eux, de telle sorte que les séries évoluent suivant des mouvements communs (Pindyck and Rotemberg 1990, Lord 1991, Deaton and Laroque 1992). On dit que les séries présentent alors des « co-mouvements ». Ce phénomène de co-mouvements se traduit statistiquement par l'existence d'une relation dite « d'équilibre » ou « de long-terme » dont les prix semblent ne pouvoir s'éloigner que sur de très courtes durées. Cette dernière caractéristique est due à l'existence de « mécanismes d'ajustement de court-terme » qui sont activés dès que les séries divergent un peu trop de la relation de long-terme qui lie les uns aux autres.

Cette relation de long-terme et les mécanismes d'ajustement qui lui sont associés forment ensemble les liens dynamiques à la base du processus de formation des prix sur les mar-

chés. L'étude de ces liens dynamiques permet d'inférer un certain nombre de conclusions sur la structure et la dynamique des marchés étudiés. En particulier, cette étude permet de déterminer si l'un des prix est un "prix-leader" sur lequel les autres s'alignent²⁶, ou si, au contraire, chacun d'eux est un indicateur pour les autres, de telle manière que l'ensemble évolue selon une dynamique commune "quasi-instantanée".

C'est l'idée de l'existence possible de co-mouvements entre prix de produits substitués qui nous a amené à rapprocher le prix de la crevette guyanaise (*GF*) et celui de la Black Tiger (*BT*) sur le même graphique²⁷. Le résultat est illustré sur la Fig.2.15. Leur évolution simultanée est en accord avec la théorie. Les deux prix sont animés par des variations conjointes.

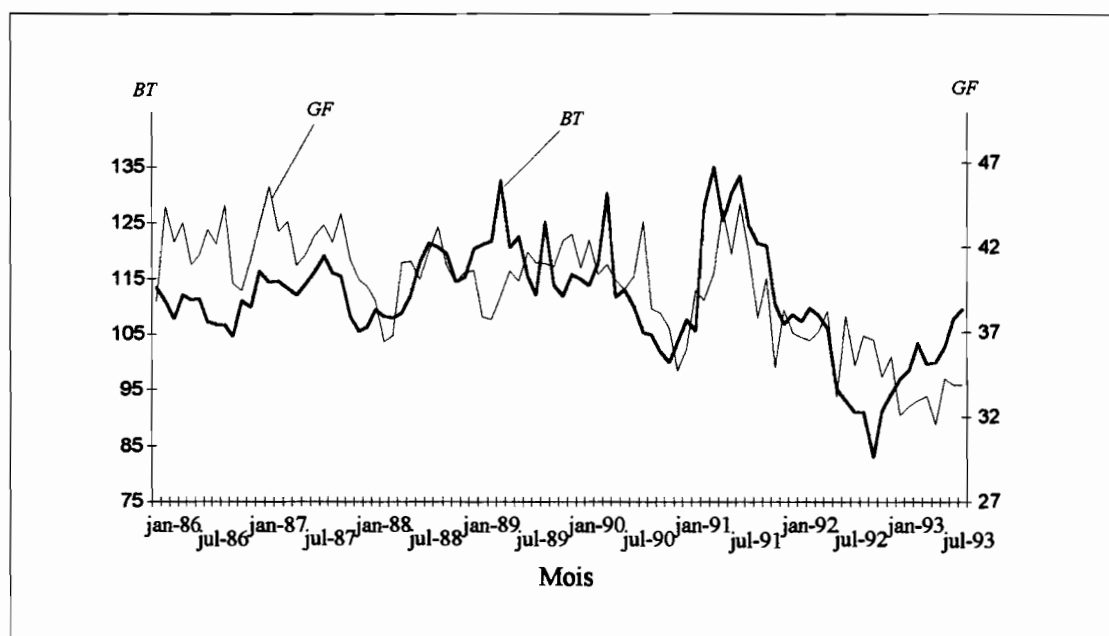


Fig.2.15. Les deux séries des prix (*GF* = Guyane française, *BT* = Black Tiger) sur la période janv.86-jul.93 (données mensuelles en FF kg⁻¹) (source : CCI Guyane et FAO Globefish).

Il semble dès lors intéressant d'essayer de déterminer si cette relation graphique peut être confirmée de manière statistique, et établir de même si le prix de la crevette Thaï a une emprise réellement significative, au sens statistique du terme, sur la formation du prix de la

²⁶ Dans ce cas, le prix-leader est toujours un peu en avance sur les autres, mais sans pour autant que cela soit visible graphiquement.

²⁷ La seule série suffisamment longue que l'on ait pu obtenir pour *BT* est celle du prix de la plus grande catégorie commercialisable pour *P. monodon* (the Black Tiger). La série *GF* est, en revanche, la moyenne des prix de toutes les catégories de *P. subtilis* (ce qui correspond donc à une "catégorie moyenne" plus petite que celle de la série *BT*). C'est ce qui explique la différence entre les deux prix moyens et le fait que l'on ait utilisé deux échelles différentes sur la Fig.2.15.

crevette de Guyane. Pour répondre à cette question, nous avons fait appel aux méthodes économétriques. L'objet de cette discipline est de tenter d'apporter des éléments de réponse à des problèmes économiques par le biais de l'analyse statistique. La motivation des économétriciens peut être vue comme la recherche du cadre approprié permettant de tester de manière rigoureuse des hypothèses économiques, que ces dernières soient le fruit de raisonnements purement théoriques ou correspondent à des réalités plus empiriques. Dans ce sens, l'économétrie est un outil de *validation* (ou d'invalidation, selon la manière dont on voit les choses) d'hypothèses formulées préalablement. Notre hypothèse, en ce qui concerne notre problème, est identifiée; il s'agit de l'existence d'une éventuelle relation entre le prix de *BT* et celui de *GF*. Reste alors à déterminer l'approche méthodologique appropriée pour tester cette hypothèse.

3.1.1. Le regard critique de l'économétrie sur certains outils

Dans le cadre d'une analyse économétrique récente, Keithly et al. (1993) s'appuient sur ce que l'on dénomme en économétrie « les modèles à équations simultanées » (MES) pour identifier les effets de l'importation croissante en crevettes d'aquaculture sur les prix des marchés américains. Notre objectif s'avérant remarquablement proche du leur, on aurait pu penser que ces MES étaient les outils appropriés pour répondre à notre question. Il s'avère en fait que ce n'est pas le cas.

Les MES relégués à un rôle didactique

Ces MES, développés dans les années 60, et utilisés par les économétriciens jusqu'au début des années 80, ont, depuis, été largement critiqués (Lucas 1976, Sims 1980, Engle and Granger 1987). À la lecture de la littérature récente, on s'aperçoit en effet que ces techniques sont désormais considérées par leurs anciens utilisateurs comme des outils 'archaïques'. En fait, si ces MES sont toujours présents dans les manuels d'économétrie, c'est uniquement dans le but d'illustrer les limites qui leur sont reprochées, et d'introduire ainsi les techniques plus récentes qui ont été développées depuis (voir par exemple les Chaps.9 et 14 de Maddala 1992). Le but des MES était d'estimer et de prévoir l'impact de changements introduits au niveau des variables exogènes d'un système sur les variables endogènes de ce même système. Or on rappelle que l'objectif de l'économétrie est de formaliser des modèles économiques (étape de spécification) tels que ces derniers soient empiriquement *testables* (étape d'inférence). Dans cette optique, la nature exo/endogène des variables doit, elle aussi, être

testée. Or l'utilisation des MES implique, lors de l'étape de spécification, que ces derniers soient construits à partir de restrictions *ad hoc* des paramètres, où la distinction entre variables endogènes et exogènes (et par là même la structure des systèmes spécifiés) est déterminée *a priori*. D'où la critique majeure²⁸ conférée à cette approche : la distinction entre variables exo et endogènes étant arbitraire, la structure du modèle n'est plus *testable*.

Vu sous un autre angle, il est en fait reproché aux MES une partie des limitations qui était reprochée aux équations multi-variables (cf. § 2.2. du Chap.1), à savoir, le fait que les retards ne sont pas introduits de façon systématique dans la structure du modèle mais en fonction d'une structure prédéfinie par la théorie.

Les limites de la méthode de Box - Jenkins

On peut penser alors que, face aux mêmes maux, les mêmes remèdes seront prescrits, et, qu'en conséquence, la solution sera de se tourner vers les techniques d'analyses de séries temporelles (dans la mesure où ces dernières, en intégrant initialement et en testant systématiquement tous les retards, ne présupposent pas de la structure du modèle). Jusque là le raisonnement s'avère juste. En revanche, penser que l'approche de Box and Jenkins (1979), déjà utilisée dans le Chap.1 pour analyser des séries temporelles, pourrait de nouveau être l'outil approprié pour mener cette analyse est une erreur.

Un certain nombre de critiques à l'égard de cette méthode a, là aussi, été mis en évidence par les économétriciens²⁹. Ces critiques, d'ordre technique, concernent les biais induits par la méthode utilisée pour stationnariser³⁰ les séries. Expliquons-nous. Dans l'approche de Box and Jenkins, la technique classique de stationnarisation consiste à "différencier" les séries, c'est-à-dire, à travailler sur les séries $\Delta x_t = x_t - x_{t-1}$ obtenues en soustrayant les termes successifs des séries initiales. Malheureusement, cette transformation, si elle permet d'obtenir des séries stationnaires, a comme conséquence de faire disparaître une partie de l'infor-

²⁸ Les MES souffrent aux yeux des économétriciens d'un deuxième défaut important. Celui-ci concerne le fait que ces modèles ne peuvent pas prendre en compte les comportements adaptatifs des agents économiques qu'ils sont censés représenter. Cette limitation est connue sous la dénomination de critique de Lucas (1976).

²⁹ cf. Chap.13 de Maddala (1992), et plus particulièrement p.542-549.

³⁰ Toutes les techniques d'inférence statistique nécessitent que les séries étudiées soient stationnaires (on rappelle qu'une série n'est pas stationnaire si, par exemple, sa moyenne varie au cours du temps). L'étape initiale lors des études de séries temporelles est donc de vérifier la stationnarité des séries et de les stationnariser si nécessaire. Il existe pour cela plusieurs techniques, dont celle suggérée par Box et Jenkins (cf. texte).

mation contenue dans les séries initiales. En particulier, elle élimine l'information concernant les relations à long-terme³¹ susceptibles d'exister entre les séries (Engle and Granger 1987, Perman 1989). Or, notre objectif étant justement l'identification de la relation de long-terme qui semble exister entre les deux séries des prix, l'approche de Box et Jenkins n'apparaît donc pas la méthode la plus appropriée.

C'est pour faire face à la non-validité des MES ou de l'approche de Box and Jenkins que les économétriciens ont développé durant les années 80 la théorie de la co-intégration et les modèles VAR (Vector AutoRegressive) qui lui sont étroitement associés³². Cette théorie est aujourd'hui celle communément utilisée pour étudier les relations existant entre les prix de plusieurs produits évoluant sur le même marché où sur des marchés parallèles : par exemple ceux du bétail sur différents marchés mondiaux (Goodwin and Schroeder 1991), du saumon et du turbot sur le marché de Rungis (Gordon et al. 1993.a) des saumon sauvages et d'aquaculture en Finlande (Mickwitz 1996), du mouton sur différents marchés de l'U.E. (Gordon et al. 1993.b) ou même de la farine de poisson et de bétail (Durand et al. 1995). C'est cette approche que nous avons adoptée pour notre étude. Une présentation succincte de cette théorie est proposée dans l'Encadré 2.6.

Les détails des analyses effectuées dans notre cas sont précisés dans Cadren et al. (cf. Annexe 2). Ces analyses se révèlent relativement techniques. On se propose ici d'en synthétiser les principaux résultats avec un minimum de termes techniques.

Encadré 2.6. La théorie de la co-intégration³³

La théorie de la cointégration est un ensemble de tests qui permettent d'analyser les relations dynamiques censées exister entre deux ou plusieurs séries temporelles.

► La notion de co-intégration à proprement parlé a été proposée par Engle et Granger (1987). Elle dérive directement des propriétés que possèdent les séries temporelles lorsque

³¹ Cette différenciation induit de plus des processus MA qui peuvent entraîner l'apparition de cycles dans les séries transformées Δx_t , alors qu'il n'en existe pas dans les séries brutes x_t (ce dernier biais est connu sous le terme d'effet Slutsky).

³² Bien que les VAR soient aussi par leur structure des modèles à équations simultanées, la terminologie "MES" est cependant réservée aux modèles antérieurs, dans lesquels la différenciation variables endogènes / exogènes est arbitrairement définie (ce qui n'est pas le cas dans les modèles VAR où toutes les variables sont endogènes).

³³ Voir les articles de Perman (1989) et Maurel (1989) ou le Chap.14 de l'ouvrage de Maddala (1992) pour une introduction synthétique de cette théorie.

ces dernières sont animées par des co-mouvements tels qu'il apparaisse alors une relation de long terme entre ces séries. Mener une analyse de co-intégration revient, dans ces circonstances, à formuler les conditions qui permettent de tester les caractéristiques de ces séries temporelles par rapport à cette relation de long terme.

► Quelques années auparavant, l'approche VAR avait été proposée par Sims (1980), pour permettre de résoudre les problèmes conceptuels entraînés par les modèles d'équations simultanées. Cette approche est en fait une généralisation multi-variable des modèles autorégressifs (AR) appliquées aux séries temporelles. À travers la notion de réponses impulsionnelles ("*impulse response function*") ces modèles VAR constituent des outils statistiques permettant de quantifier l'impact d'une variable du système sur une autre.

► Engle et Granger (1987) ont montré par ailleurs que les modèles VAR sont équivalents aux Modèles à Correction d'Erreur (ECM) développés dans les années 70. Or, l'objectif de ces ECM était de rendre compte des dynamiques de correction à court-terme qui existent entre des séries lorsqu'elles sont reliées par une relation d'équilibre. Les modèles VAR, sous leur forme ECM, constituent par conséquent une représentation adéquate pour analyser les ajustements à court terme qui existent aussi dans les séries cointégrées.

► Parallèlement, deux autres tests, développés pendant cette même période, constituent des outils complémentaires pour la théorie de la co-intégration. Ce sont (i) les tests de racine unité, utilisés pour vérifier si une série est stationnaire ou non selon une approche plus rigoureuse que la méthode initiale de Box et Jenkins (basée sur l'analyse graphique des corrélogrammes), et (ii) les tests de causalité de Granger qui permettent de déterminer, lorsque deux séries sont cointégrées, si l'une d'elle précède ou non l'autre dans leur co-mouvements.

Dans notre cas, ces tests vont permettre d'identifier les relations dynamiques qui existent entre le prix de la *GF* et celui de la *BT*.

3.1.1. Application de la théorie de la co-intégration : résultats

Il est juste de commencer cette partie en soulignant que le principal résultat de cette analyse peut être interprété comme la simple confirmation statistique d'un phénomène visible à la vue de la Fig.2.15, à savoir l'existence d'une relation effective entre le prix de la *BT* et celui de la *GF*. Rester à ce stade de l'interprétation serait cependant réducteur. Ces travaux per-

mirent en effet de mettre en évidence d'autres conclusions, plus subtiles, notamment sur la structure et la dynamique des marchés des deux espèces considérées.

L'analyse³⁴ indique que la série du prix Thaï est intégrée³⁵ d'ordre 1 mais ne présente qu'un processus autorégressif d'ordre 1 : AR(1). Cela signifie qu'il s'agit d'une série de type marche aléatoire³⁶ et que l'on se trouve en présence d'un phénomène de '*clearing*'³⁷ quasi-instantané du marché. En d'autres termes, ces résultats indiquent que le marché de la crevette Thaï est très compétitif. À l'inverse, la série du prix de la crevette guyanaise est caractérisée par un processus AR(11) (mais sans saisonnalité significative), ce qui correspond au comportement d'un marché local typique où les agents (producteur, acheteurs), peu nombreux, mémorisent l'évolution passée des prix (remontant jusqu'à la valeur de l'année précédente) et en tiennent compte pour les transactions présentes.

La présence d'une relation de co-intégration³⁸ entre les deux séries permet d'affirmer l'existence effective de la relation de long-terme observée sur la Fig.2.15. L'analyse de cette relation de co-intégration permet de plus d'identifier quantitativement la relation de long-terme. Dans le cas présent, normalisée par rapport au prix guyanais, elle est de la forme :

$$GF_t = -4.86 + 1.809 BT_t$$

avec GF_t : prix guyanais et BT_t : prix de la BT. Le fait que la valeur estimée du vecteur de co-intégration (= 1.809) soit supérieure à 1 indique que le prix guyanais est caractérisé par une variabilité plus importante que le prix Thaï. Ce résultat peut être expliqué par les tailles respectives des deux marchés et par les différences qu'il existe dans les procédures de production (cf. Encadré 2.2).

L'analyse du modèle à correction d'erreur (ECM)³⁹ offre une bonne idée des processus d'ajustements de court terme entre les deux séries co-intégrées. Les variations mensuelles ΔBT_t du prix Thaï apparaissent ne dépendre que des variations passées de cette même série ΔBT_{t-i} , ($i \neq 0$), alors que dans le même temps, les variations de la série guyanaise ΔGF_t dé-

³⁴ L'analyse s'est faite sur les séries log-transformées.

³⁵ Une série x_t est dite intégrée d'ordre 1, notée I(1), si elle est non-stationnaire mais que sa différenciée $\Delta x_t = x_t - x_{t-1}$ est stationnaire.

³⁶ Une marche aléatoire est un type particulier de série I(1) telle que $x_t = x_{t-1} + \varepsilon_t$ avec ε_t bruit blanc.

³⁷ On dit qu'il y a *clearing* du marché lorsque la demande égale l'offre.

³⁸ Une relation de co-intégration de 1^{er} ordre existe entre deux séries X_t et Y_t si ces deux séries sont I(1) et s'il existe un β tel que la relation $X_t - \beta Y_t$ soit I(0).

³⁹ Cf. Encadré 2.6.

pendent à la fois des variations passées du prix guyanais ΔGF_{t-i} et de celles du prix Thaï ΔBT_{t-i} . Toutes les autres analyses effectuées (test de causalité de Granger, identification des fonctions de réponse impulsionnelles)⁴⁰ sont cohérentes et indiquent que le prix Thaï est un prix-leader pour le prix guyanais. À titre d'illustration, les fonctions de réponse entre les deux séries ont été représentées sur la Fig.2.16. Ces fonctions indiquent qu'un choc sur la série du prix thaïlandais *BT* génère une réponse du prix guyanais *GF*. Cette réponse reste significative pendant les trois mois qui suivent la perturbation (cf. diagramme en haut à droite et légende de la Fig.2.16 pour les explications). À l'inverse, un choc imposé sur *GF* n'a aucun impact sur le prix Thaï (diagramme en bas à gauche).

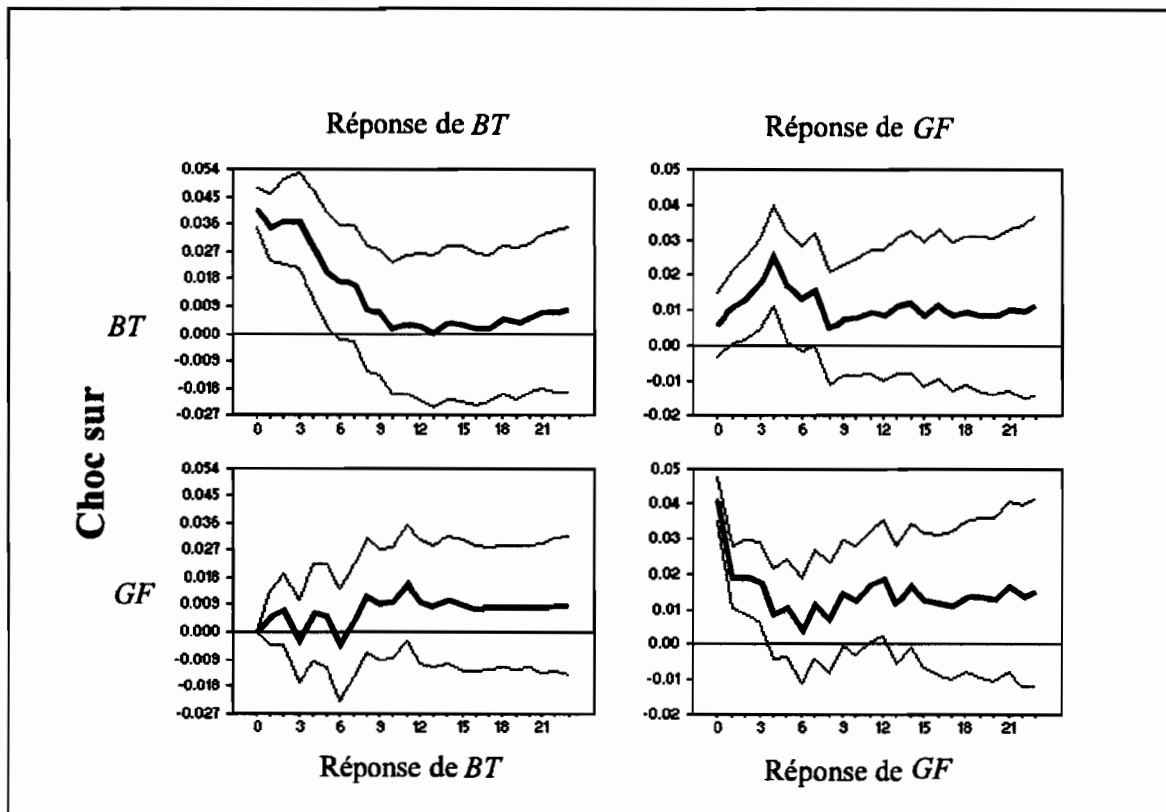


Fig.2.16. Fonctions de réponse des deux séries : *GF* = Guyane française, *BT* = Black Tiger. Ces fonctions de réponses illustrent la manière avec laquelle une série répond à un choc imposé sur l'autre série (diagrammes en haut à droite et en bas à gauche). La réponse est significative (en fait significativement différente de zéro par rapport au critère choisi⁴¹) si les valeurs de l'intervalle contenant la fonction de réponse (les deux écart types) se trouve au-dessus ou en dessous de l'axe X. On remarque sur le diagramme en haut à droite que la fonction de réponse de *GF* à un choc imposé sur *BT* est significative pendant les trois mois qui suivent le choc. Cela signifie que les fluctuations du prix de la *BT* sur les marchés internationaux ont un impact perturbateur significatif sur le prix local de la crevette guyanaise. L'inverse (en bas à gauche) n'est pas vrai.

⁴¹ Ici le critère choisi est deux fois l'écart type (trait fin).

⁴⁰ Cf. Encadré 2.6.

3.1.2. Interprétations

L'ensemble de ces différentes analyses contient une information intéressante par rapport à notre question de départ⁴¹. En observant que le prix de la *Black Tiger* est un prix-leader pour la crevette guyanaise, on vient en fait de souligner que la variabilité du prix (i.e. la volatilité) de certaines espèces de crevettes d'élevage, utilisées comme prix-indicateurs sur les principales places internationales, représente une source de perturbation externe importante pour les marchés locaux. Ces derniers ne possèdent aucun moyen de contrôle sur ce forçage externe. Ce résultat signifie que, même s'ils possèdent leur propre dynamique (ce que suggère l'AR(11) de la série du prix guyanais), ces marchés locaux restent sous l'influence de la variabilité des marchés mondiaux. Cette dernière remarque a de fortes conséquences en terme de gestion de la pêche. Elle signifie en particulier qu'une politique de stabilisation des prix menée au niveau local, aussi effective soit elle, sera toujours dépendante des conditions de stabilité des marchés mondiaux et qu'elle risque d'échouer, non pas pour des raisons intrinsèques au système ou aux moyens employés, mais à cause de la volatilité importante qui caractérise les marchés internationaux.

3.2. Les premiers symptômes de surproduction

3.2.1. Mise en évidence des problèmes de commercialisation

L'analyse de l'impact de la crevette thaïlandaise et plus généralement de l'expansion des crevettes d'élevage sur la pêche guyanaise ne se résume cependant pas uniquement à l'étude des liens dynamiques entre les prix de ces différents produits. Le passage du marché à tendance monopolistique où les pêcheries assuraient, seules, l'ensemble de la production mondiale à un marché compétitif où évoluent désormais un grand nombre de producteurs a entraîné de nombreuses perturbations pour l'ensemble des pêcheries crevettières (cf. **Fig.2.6** pour rappel). Dans ce nouveau contexte, la pêche crevettière guyanaise n'a pas été épargnée par ces bouleversements. Le scénario était d'ailleurs prévisible : dès lors que les transformateurs-importateurs ont exprimé leurs préférences pour les crevettes d'aquaculture⁴², il était à craindre que l'ouverture des marchés se traduise par l'apparition de difficultés pour

⁴¹ On rappelle que cette question est : identifier les différentes sources de perturbation auxquelles peut se trouver confronté un système-pêche et analyser la manière avec laquelle ce système réagit face à ces perturbations.

⁴² Cf. Encadré 2.3.

les armements guyanais, en particulier de problèmes de commercialisation. La Fig.2.17 représente les exportations guyanaises sur le marché français entre 1985 et 1993. Il ressort clairement de cette figure que la pêcherie a connu un tassement important de ses parts de marché à partir de 1990.

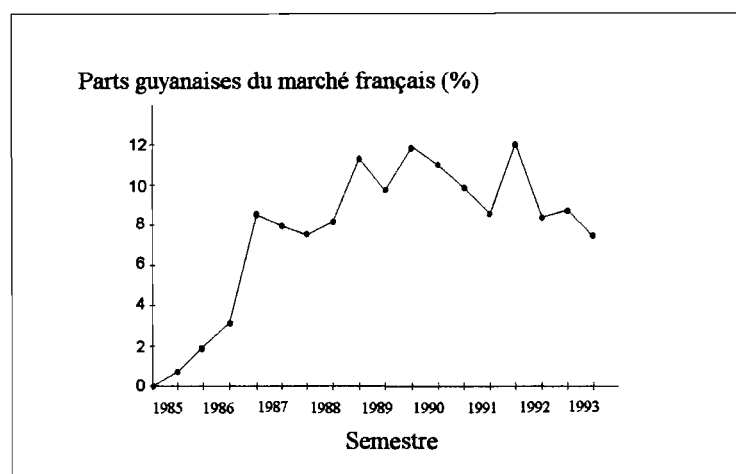


Fig.2.17. Évolution des parts de marché de la crevette guyanaise sur le marché français des crevettes tropicales (données semestrielles) pour la période 1985-1993. À partir du début des années 90, la courbe indique un 'tassement' des exportations guyanaises, correspondant à l'arrivée massive des crevettes d'aquaculture (source DNSCE et FAO).

Ce tassement s'est traduit par des difficultés au niveau de l'écoulement de la production. Pour illustrer ceci, nous avons de nouveau fait appel à la série des surplus de production. On se souvient que lors de la précédente analyse⁴³, le choix des séries SP et SP_{Europe} s'était révélé pertinent pour illustrer la dynamique à court-terme du processus d'exportation. Cette fois, c'est la série des SP cumulées (SPC) qui sera utilisée. Sous cette forme, elle permet d'analyser la dynamique de long-terme des exportations. Le fait de cumuler la série signifie en effet que les écarts entre production et exportations seront reportés d'un mois sur le suivant à la manière dont se déroulent les choses empiriquement. La série des SPC est représentée sur la Fig.2.18. Son observation permet d'identifier deux périodes bien distinctes. De 1986 à 1989, les SPC oscillent autour de zéro, ce qui signifie que les armements écoulent sans problème l'ensemble de leur production. En revanche, à partir de 1990, on observe une tendance positive qui croît de manière continue jusqu'à la fin de la période étudiée. Cette tendance très nette illustre les problèmes de commercialisation que les armements ont connus à partir de 1990.

⁴³ Cf. § 2.1.1. de ce chapitre.

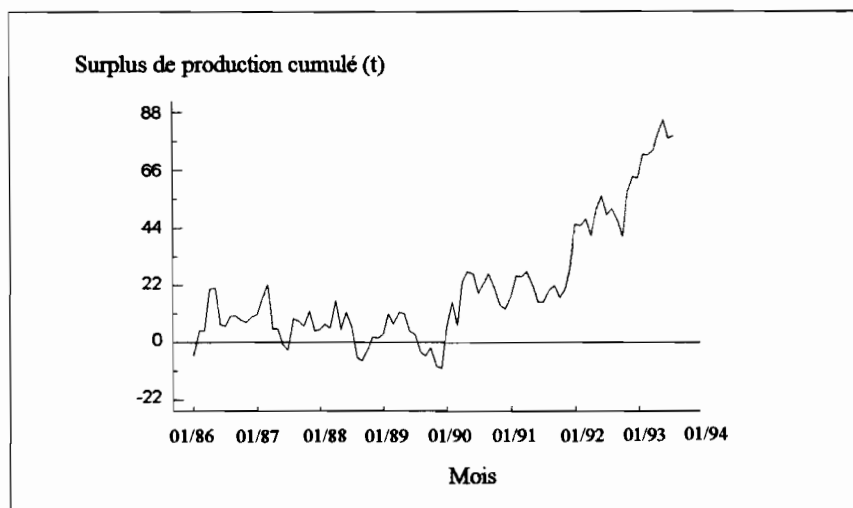


Fig.2.18. Évolution des surplus de production cumulés (SPC) sur la période 1986 - 1993 (données mensuelles, en tonnes). Jusqu'en 1990, la série oscille autour de zéro. La tendance croissante qui est ensuite observée est un symptôme du problème de commercialisation apparu à partir de 1990 (Source : IFREMER Cayenne et CCI Guyane).

Un autre indice que celui des SPC peut être utilisé pour illustrer les difficultés commerciales que rencontrèrent les armements autour des années 90. C'est l'évolution du nombre de marchés vers lesquels ces armements ont exporté leur production pendant cette période. Cette évolution est représentée sur la Fig.2.19. L'augmentation soudaine qui apparaît dans la série et surtout les fluctuations qui la caractérisent suggèrent une phase de très forte instabilité commerciale pendant cette période.

3.2.2. Quand arrivent les premiers conflits...

Les difficultés de commercialisations rencontrées à partir de 1990 s'accompagnèrent d'une dégradation générale de la situation financière des armements. Un des premiers signes 'manifestes'⁴⁴ de cette dégradation fut la série de mouvements sociaux qui secoua la pêche à partir de 1990. Une manière de visualiser ces mouvements est d'utiliser la série mensuelle du nombre de bateaux actifs enregistrés par les Affaires Maritimes de Cayenne⁴⁵. Cette série est représentée sur la Fig.2.20.

⁴⁴ Sans jeu de mots avec la suite...

⁴⁵ Un bateau est considéré comme actif s'il a quitté le port au moins un jour dans le mois.

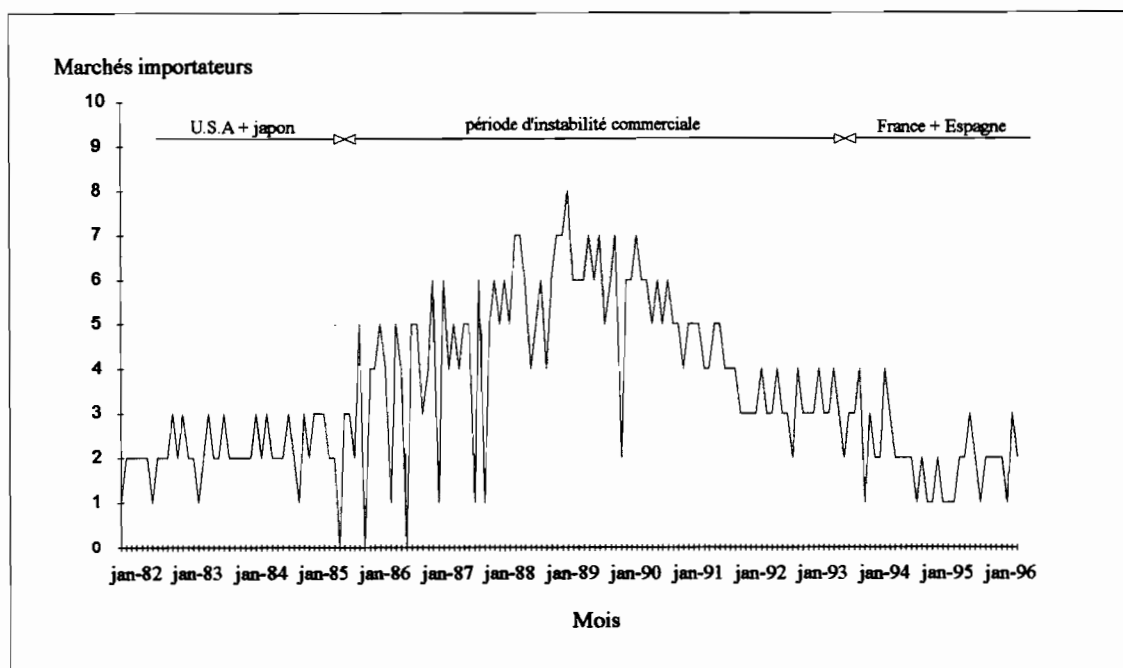


Fig.2.19. Nombre de marchés vers lesquels la pêche exporte sa production sur la période janv.82-août 96 (données mensuelles). On remarque qu'entre 1986 et 1994, ce nombre présente des fluctuations très importantes en amplitude (entre 0 et 8) et en fréquence, ce qui peut être interprété comme le signe d'une forte instabilité commerciale pour la pêche. Actuellement la situation semble de nouveau s'être re-stabilisée : le marché français absorbe désormais 95% des exportations et le marché espagnol les 5% restants (Source : CCI Guyane).

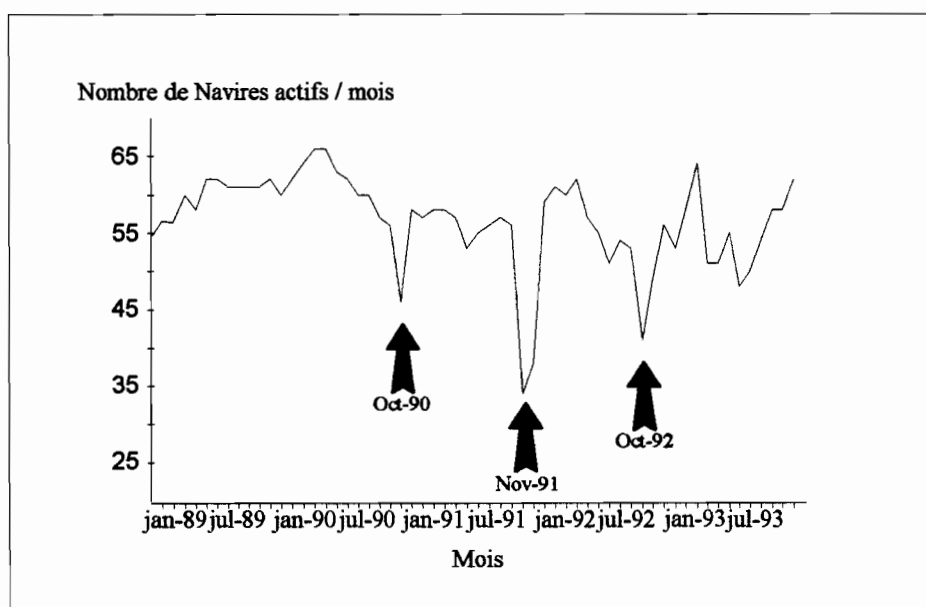


Fig.2.20. Série du nombre de bateaux actifs par mois sur la période 1989-1993. Cet indice de l'effort de pêche permet de mettre en évidence les différents conflits sociaux qui ont émaillé l'historique de la pêche au début des années 90. On y reconnaît ainsi le mouvement de 1990 qui fut à l'origine de l'Audit de la filière (Rapport SÉPIA -Anon. 1991) effectué à la demande des autorités locales, la grève de 1991 qui amena la refonte du système de rémunération réclamée par les pêcheurs, et enfin le mouvement de 1992, pendant lequel le port de Cayenne fut bloqué par les professionnels et interdit de trafic pendant près de trois semaines.

Les trois grands conflits qui secouèrent la pêche entre 1989 et 1993 (cf. légende de Fig.2.20) y sont parfaitement identifiables. Ce qui est également intéressant de remarquer, c'est le caractère cyclique de ces mouvements. Ces derniers ont, en effet, tous eu lieu dans le dernier quart de l'année civile, respectivement en octobre 90, novembre 91 et octobre 92. Un rapide retour en arrière au niveau de la dynamique de la ressource (cf. Chap.1) nous rappelle que cette période de l'année correspond simplement au moment où les rendements sont au plus bas...

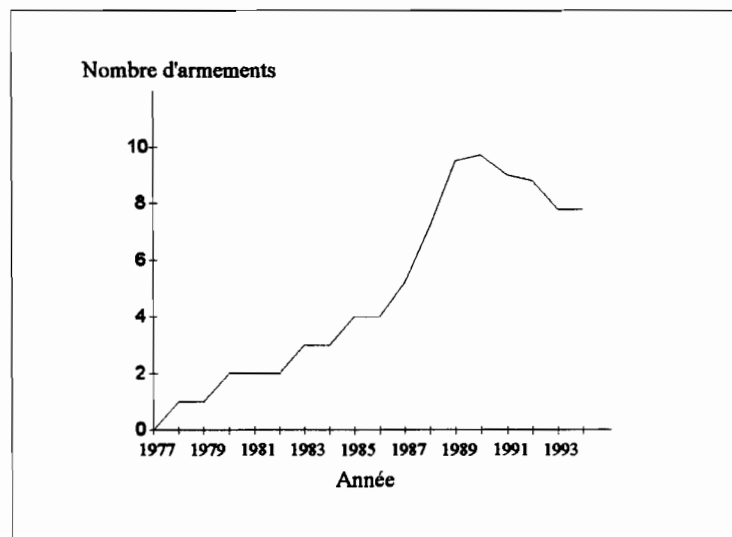


Fig.2.21. Nombre d'armements français en activité dans la pêche depuis l'arrivée du premier d'entre eux en 1978 (données initiales mensuelles ramenées à l'année par moyennisation. Source : IFREMER Cayenne).

Aussi calculés soient-ils, ces mouvements sociaux se voulaient néanmoins l'écho des difficultés financières importantes rencontrées par les armements depuis la fin des années 80. L'IEDOM estimait d'ailleurs en 1993 que ces difficultés avaient entraîné un endettement de plus de 195 millions de francs dès la fin de 1990 (IEDOM 1993). Ces problèmes financiers débouchèrent d'ailleurs sur le dépôt de bilan de deux armements ainsi que sur la liquidation judiciaire d'un troisième. La Fig.2.21 représente l'évolution du nombre d'armements français au sein la pêche depuis l'arrivée du premier de ces armements dans la pêche en 1978. On observe distinctement que ce nombre d'armements n'a cessé d'augmenter jusqu'en 1990 et que l'arrêt de cette expansion coïncide avec les premières difficultés de commercialisation des armements.

À ce stade de l'analyse, une question doit venir à l'esprit du lecteur : pourquoi les armements, à la suite de l'apparition des premières difficultés de commercialisation, ont-ils continué à exporter des petites crevettes ? On est en effet en droit de se demander si la stratégie commerciale qui consiste à vouloir coller à la tendance générale du marché, là où les crevettes d'aquaculture dictent leurs prix et imposent leurs avantages commerciaux est la meilleure stratégie pour les armements. La production guyanaise est, somme toute, relativement faible (moins de 4000 tonnes par an) et on peut aisément imaginer dans ces conditions qu'il est possible de développer une stratégie commerciale qui soit basée sur le principe de la "différenciation", plutôt que celui de la "tendance générale". Les qualités organoleptiques (i.e. les qualités de 'goût') de la crevette guyanaise en font un produit très apprécié par une frange ciblée de consommateurs, amateurs de grandes crevettes de qualité (d'Andréa 1989, Anon. 1991, Josupeit 1992). Pourquoi, dans ces conditions, ne pas essayer de s'imposer dans cette "niche", au lieu de s'attaquer à des catégories où les crevettes d'aquacultures possèdent de toute façon des avantages commerciaux indiscutables ? En choisissant la production de grosses crevettes, les armements se seraient affranchis de leurs infériorités commerciales vis-à-vis des crevettes d'aquaculture. Cette suggestion avait d'ailleurs déjà été faite dès 1991 lors de l'Audit Sépia (Anon. 1991). La question qui s'impose alors est : pourquoi les armements ont-ils négligé cette stratégie et se sont cantonnés à suivre l'autre alternative, celle consistant à exporter des petites crevettes ?

3.2.3. Conjecture sur les raisons du choix commercial des armements

On peut identifier trois raisons possibles à ce comportement :

□ La première est à rapprocher des conclusions d'un certain nombre de travaux théoriques concernant l'impact des quotas sur le comportement des pêcheurs. Il a ainsi été souligné que l'instauration de quotas a généralement pour conséquence d'éliminer les risques de surexploitation mais en même temps d'augmenter ceux de surinvestissement⁴⁶ (Scott 1979, Clark 1985, Garcia 1988). Pour les espèces à vie courte telles que les Engraulidés ou les Penaei-

⁴⁶ Ce postulat est basé sur le même principe que l'argument qu'avait utilisé Hardin (1968) pour affirmer que le libre accès mène à la surexploitation. C'est aussi celui utilisé par les défenseurs de l'instauration des QIT. Le raisonnement est simple : « en tant que pêcheur, vous avez intérêt à avoir l'engin de pêche le plus efficace possible de manière à prendre la plus grande proportion possible du quota. Si vous n'investissez pas dans le bateau le plus rapide, le power-block le plus puissant, ou le filet le plus grand, ce sont les autres pêcheurs, ayant acheté ces outils qui prendront la plus grosse proportion du quota ». Il s'instaure ainsi une sorte de compétition et de course à la capture qui débouche généralement sur un surinvestissement.

des, les conséquences sont même plus dramatiques puisque l'instauration d'un quota se traduit généralement par une concentration de l'effort sur les premiers mois de l'exploitation. Le même quota (en poids) est donc capturé de plus en plus tôt au cours de la saison. C'est ainsi que l'on peut aboutir à la situation décrite par Lucas et al. (1979) où 85% du stock de crevettes *Penaeus merguensis* du Golfe de Carpentaria était capturé durant les deux premiers mois qui suivait le recrutement⁴⁷. Cependant cette course à la capture n'apparaît que s'il y a réellement risque d'arrêt de l'activité due au dépassement du quota (généralement en fin d'année). Or, on observe que dans le cas de la Guyane française, le quota, fixé initialement à 4000 tonnes en 1985 et aujourd'hui à 4108⁴⁸, n'a officiellement été atteint qu'à une seule reprise (en 1994). Par conséquent il n'est pas du tout sûr que ce phénomène de course à la capture soit effectif dans le cas de la Guyane et que ce soit le quota qui ait induit les armements à privilégier les débarquements (et donc l'exportation) des petites crevettes.

□ Une explication qui semble plus probable est la suivante : au moment où les premières exportations ont commencé en direction du marché français, les crevettes d'aquaculture pesaient beaucoup moins sur les marchés européens qu'elles ne l'ont fait par la suite. Dans ces conditions, les armements, qui ne connaissaient pas encore de problème d'exportation, n'avaient aucun intérêt commercial à se démarquer de la tendance générale. Ils ont par conséquent orienté leurs stratégies commerciales (et *a fortiori* celles de leurs capitaines) de manière à coller au consommateur, c'est-à-dire, vers les petites crevettes -profitant d'ailleurs de l'expansion que ces dernières connaissaient sur le marché français. Les problèmes de commercialisation étant apparus de manière relativement soudaine à partir de 1990, il est en définitive 'excusable', ou tout au moins concevable, que les armements n'aient pas modifié la stratégie qui leur avait assuré jusque là une part satisfaisante des importations du marché. Ce scénario devient encore plus évident lorsque l'on prend en compte l'impact de l'aversion pour le risque : ainsi, lors d'une conversation avec le responsable commercial du plus gros armement guyanais de l'époque (en janvier 1994, c'est-à-dire, à un moment où les difficultés commerciales étaient importantes), ce dernier nous expliqua : « *la ML*⁴⁹ *se vend moyenne-*

⁴⁷ Dans le cas des crevettes de Guyane, ce phénomène de course à la capture ne se traduirait pas obligatoirement par une concentration de l'effort dans le temps mais certainement dans l'espace, dans les zones côtières, là où les jeunes crevettes sont en abondance et permettent de faire des captures importantes (en volume).

⁴⁸ Il est passé entre ces deux années par plusieurs autres valeurs : 4300 tonnes en 1987, 4680 en 1988, et 4810 en 1988 (Moguedet 1993).

⁴⁹ La ML = catégorie 30-40, c'est-à-dire la catégorie correspondant à une taille moyenne.

ment, la grosse se vend mal, mais la petite, tout le monde en demande ! ». On admettra aisément⁵⁰ que, lorsqu'une entreprise connaît certaines difficultés et que la vision que ses responsables ont du marché est celle donnée ci-dessus, leur réaction soit tout naturellement d'essayer de coller au maximum aux certitudes et non de prendre des risques en sortant de la tendance classique. Et les certitudes à cette époque, c'était la demande pour les petites crevettes.

□ La troisième et dernière raison pour laquelle les armements ont continué à privilégier les petites catégories après l'apparition de leurs problèmes de commercialisation peut être reliée à la nature des aides qu'ils ont reçues à l'époque de la part de l'U.E. Ainsi en est-il du règlement C.E.E.1503/94 du Conseil du 27 juin 1994 par lequel le Conseil des Ministres des Affaires Étrangères de l'U.E. décidait d'inclure les crevettes de Guyane dans les actions du Programme d'Options Spécifiques à l'Éloignement et à l'Insularité des départements français d'Outre-Mer (programme POSEIDOM). Dans le cadre de ce programme, les armements industriels touchèrent 865 écus par tonnes de crevettes (environ 6 FF kg⁻¹) pour une quantité maximale de 3500 tonnes par an⁵¹. Si l'objectif de ce règlement était évident -apporter une aide financière au secteur en difficulté- son impact réel sur l'activité de la pêche n'est pas aussi clair. En effet, à une période où les armements faisaient face à de graves difficultés financières, une aide dont le montant était directement proportionnel aux volumes des captures a pu les inciter à continuer, voire à privilégier, la recherche et la capture massive des jeunes crevettes en zone côtière. Il est clair en tous cas que cette mesure n'a pas contribué à entreprendre le changement de stratégie commerciale qui s'avérait pourtant indispensable⁵².

Des erreurs de stratégie ont donc été commises par les armements, menant ces derniers à une situation commerciale et financière relativement délicate. Reste maintenant à voir

⁵⁰ Il est certainement possible de redémontrer cette argumentation "verbale" par une analyse plus formelle. Il faudrait pour cela faire appel à des fonctions d'utilité du genre de celles utilisées en économie pour analyser l'impact de l'aversion du risque sur les processus décisionnels (voir par exemple Clark 1985: 210-267 pour des exemples appliqués aux pêcheurs).

⁵¹ Notons que 1994, année de promulgation de cette aide (proportionnelle aux volumes débarqués), correspond aussi à la première année où les armements déclarent avoir débarqué un volume total de captures juste à la limite du quota.

⁵² Aussi peut-on se demander si l'application d'une gestion basée sur une période de fermeture de la pêche ou, de manière plus adéquate dans le cas de la pêche crevettière guyanaise, sur l'instauration d'une zone d'interdiction de la pêche (du type du projet d'interdiction de pêcher dans les moins de trente mètres) n'aurait pas été un facteur suffisant pour inciter les armements à entamer ce changement de stratégie commerciale.

comment ces armements ont réagi et ont en particulier tenté d'amortir leurs problèmes de surproduction.

3.2.4. La réponse des armements au problème de surproduction

Dans une situation de surproduction, la réaction normale est de réduire l'effort de pêche de manière à réduire les volumes de débarquement. Dans une pêcherie structurée en armement, il existe trois stratégies possibles pour réduire cet effort. Les armements peuvent choisir (i) de réduire le nombre de navires sortant en mer, (ii) de maintenir ce nombre de navires actifs constant mais de diminuer la longueur des marées de chacun de ces navires, (iii) de combiner les deux précédentes alternatives. Nous avons cherché laquelle de ces stratégies avait été adoptée par la pêcherie guyanaise. La Fig.2.22 représente l'évolution du nombre de bateaux inactifs sur la période 1985-1993. Cette série permet d'obtenir des informations par rapport à la stratégie (i).

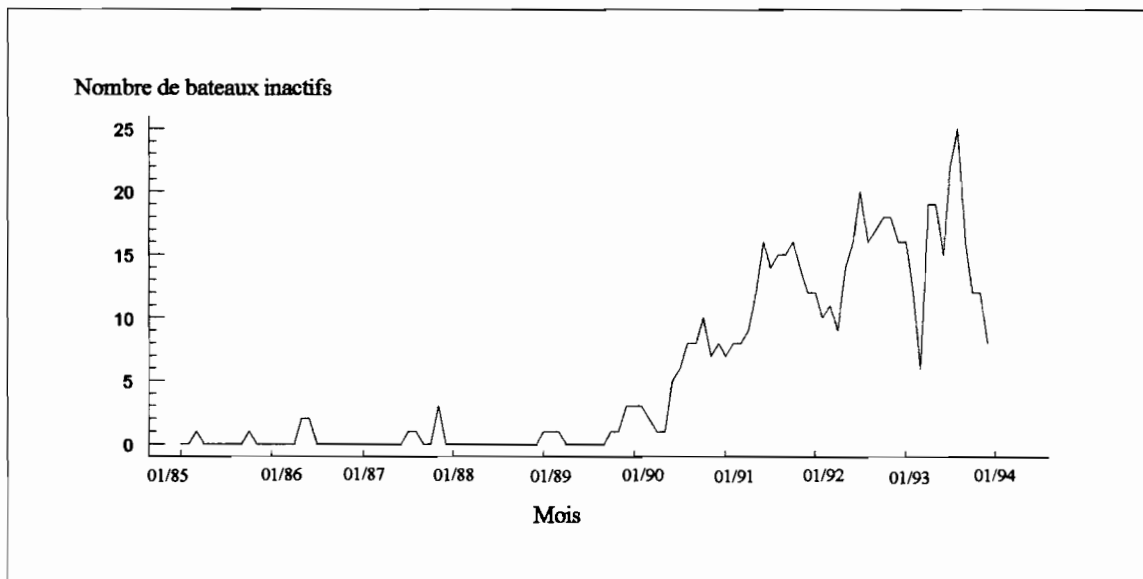


Fig.2.22. Évolution du nombre de navires inactifs* (données mensuelles en unité) sur la période 1985 - 1993. La courbe montre deux périodes distinctes : avant 1990, aucun bateau n'était immobilisé à quai (à l'exception des navires en cale-sèche pour réparation ou révision). En revanche après 1990, un nombre significatif de navires est systématiquement gardé à quai par les armements. Cette courbe suggère donc que les armements ont choisi, pour tenter de réduire l'effort de pêche et les problèmes de surproduction, de garder un certain nombre de navires immobilisés à quai (source : IFREMER Cayenne).

* De manière à ce que la présence des trois conflits sociaux (cf. Fig.2.20) ne biaise pas l'analyse, les valeurs initiales des mois correspondants à ces trois conflits (oct.90, nov.91, oct.92) ont été remplacées par la moyenne des valeurs observées pour les mois précédant et suivant directement les conflits).

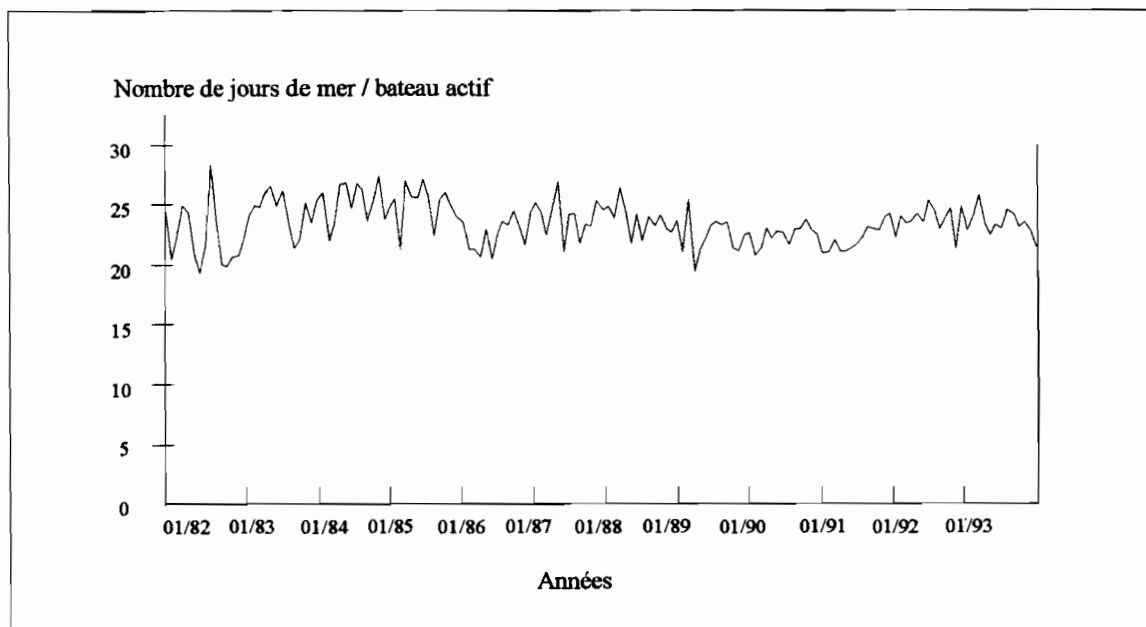


Fig.2.23. Évolution du nombre de jours de mer par bateau actif par mois, sur la période 1982-1993. Cette série peut être considérée comme un estimateur de la longueur des marées. La série indique que les navires n'ont pas modifié la longueur de leurs marées sur la période considérée (source : IFREMER Cayenne).

La Fig.2.23 représente, quant à elle, l'évolution du nombre de jours passés en mer par chacun des navires actifs. On peut considérer que cette série représente un indice convenable de la longueur moyenne des marées, donc de l'alternative (ii).

L'observation de cette Fig.2.23 indique que la longueur des marées n'a pas évolué au cours de la période étudiée (1982-93). En revanche, la Fig.2.22 souligne clairement qu'un changement important a eu lieu à partir de 1990 dans le nombre des navires immobilisés à quai : alors que ce nombre était resté quasiment nul jusqu'en 1990 (les rares valeurs non-nulles correspondent aux navires immobilisés pour raisons techniques : réparation, révision, etc.), ce nombre de navires inactifs devint largement significatif à partir de 1990, atteignant dès 1991 entre 10 et 20 unités par mois. Notons d'ailleurs que ce constat avait déjà été fait par certains autres observateurs. Dans son rapport de 1993, l'IEDOM (1993 : 59). soulignait en effet que : « *le nombre moyen de bateau en activité chaque année est sensiblement plus faible que le nombre de navires armés* ». Or, sur la même période, le nombre total de navires armés (toutes flottilles confondues) est resté constant, autour de 75 unités (cf. Fig.2.24). On observe donc sur cette période un taux d'immobilisation de 15 à 30% de la flottille, ce qui est loin d'être négligeable.

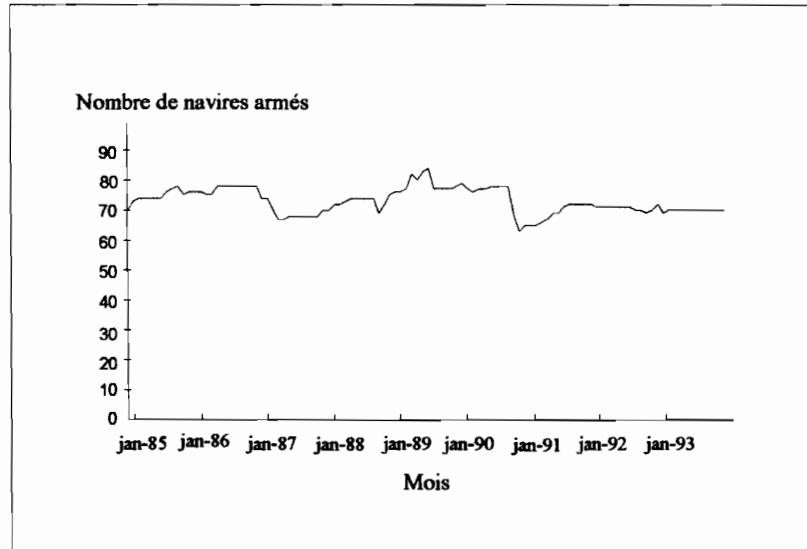


Fig.2.24. Nombre total de navires armés dans la pêche (navires américains, japonais et français) (données mensuelles en unité) sur la période 1985 - 1993. On observe que la taille de la flottille est restée relativement constante, autour de 75 unités (source : IFREMER Cayenne).

On peut par conséquent penser que ce phénomène est l'expression d'une volonté délibérée des armements de diminuer le nombre de navires en activité dans la pêche. Le fait que cette diminution de l'effort de pêche soit observée à un moment où les armements connaissent de sérieuses difficultés de commercialisation nous amène à penser que cette stratégie fut adoptée en réponse à ces problèmes de surproduction.

Une explication possible de la prédominance de cette stratégie par rapport aux deux autres alternatives est l'existence des coûts fixes par marée. Ces coûts fixes (les frais d'avitaillement par exemple) dont les montants sont indépendants de la longueur des marées, obligent les armements à optimiser les captures par sortie. Réduire la longueur des marées ne diminuerait pas les coûts fixes et augmenterait au contraire leur part relative par rapport aux profits issus des débarquements. Une analyse micro-économique de la structure des coûts d'exploitation par armement permettrait d'estimer l'importance de ces coûts par marée et ainsi de vérifier cette hypothèse.

CONCLUSION AU CHAPITRE 2

Le Chap.1 avait été consacré à la dynamique de la ressource et à l'étude de l'interaction entre cette dynamique et de celle de la flottille. Le chapitre présent a, quant à lui, été consacré à l'étude de l'environnement économique de la pêcherie. Cet environnement économique est en grande partie défini par la dynamique des marchés avec lesquels la pêcherie est en relation. Il s'agissait donc d'analyser cette dynamique et de se concentrer sur l'analyse des impacts que ces marchés ont imposés sur la pêcherie. C'est l'identification de ce forçage "économique" et l'analyse de la réponse du système que nous avons tenté d'accomplir au cours de ce Chap.2.

À cet égard, deux points concernant la manière avec laquelle ces études ont été abordées doivent être rappelés. Tous les facteurs qui constituent la composante économique des pêcheries font partie de processus pouvant intervenir aussi bien à l'échelle micro qu'à l'échelle macro-économique. La prise en compte de tous ces processus se doit par conséquent d'être assurée par l'adoption d'une approche 'globale' intégrant l'ensemble des différentes échelles susceptibles d'être associées à ces processus. C'est ce que nous avons tenté de faire en regroupant dans ce chapitre des analyses micro et macro-économiques. Rappelons de plus que cette étude économique 'globale' s'est faite selon la même philosophie que l'analyse de la ressource dans le Chap.1, c'est-à-dire, en privilégiant une approche dynamique.

Ces analyses ont plus particulièrement porté sur les modifications que le développement des crevettes d'élevage a entraînées à la fois sur la structure et sur la dynamique des marchés internationaux et sur celles de la pêcherie guyanaise. Ainsi, l'influence des prix de ces crevettes d'élevage sur ceux des crevettes sauvages a été démontrée au travers de l'étude des liens dynamiques existant entre le prix de la crevette de Thaïlande et celui de la crevette guyanaise (Cadren et al. Annexe 2). De même furent analysées les conséquences du passage d'un marché à tendance monopolistique à un marché compétitif. Cette libéralisation des marchés entraîna un certain nombre de dysfonctionnements aux niveaux des pêcheries crevettières. En Guyane, ces difficultés se traduisirent par un endettement important des armements puis par la sortie des moins compétitifs. Les autres tentèrent, quant à eux, d'amortir l'impact de ces problèmes de commercialisation en réduisant leur effort de pêche.

Parallèlement, des analyses ont été menées sur les contraintes commerciales imposées plus spécifiquement par le marché français. Ces études permirent, entre autres, de montrer que la réorientation des exportations guyanaises vers ce marché français a été à l'origine de deux modifications majeures dans le fonctionnement du système : (i) les pêcheurs guyanais durent modifier la répartition de leur effort de pêche de manière à augmenter la proportion des petites crevettes dans leurs captures (cf. Béné 1997) ; (ii) un mécanisme de stockage fut développé par les armements pour faire face au déphasage apparu entre la demande du marché et les captures de la flottille. Les études théoriques et empiriques menées par rapport à ce problème de déphasage s'accordèrent pour souligner le rôle primordial des volumes de stockages comme régulateur de l'activité de la pêche (cf. § 2.1.1 et Béné and Doyen Annexe 4).

Cependant, au-delà des résultats directs de ces travaux, se dégage une autre conclusion. L'ensemble des travaux proposés dans ce Chap.2 apparaît en effet important d'un point de vue méthodologique. La manière avec laquelle ce chapitre a été abordé est l'expression directe de la philosophie avec laquelle l'approche globale de la Thèse a été pensée : celle où la dynamique d'un système-pêche est considérée comme résultant du couplage entre la dynamique d'une ressource renouvelable et celle d'un marché. C'est cette approche qui a été représentée sur la Fig.2.25.

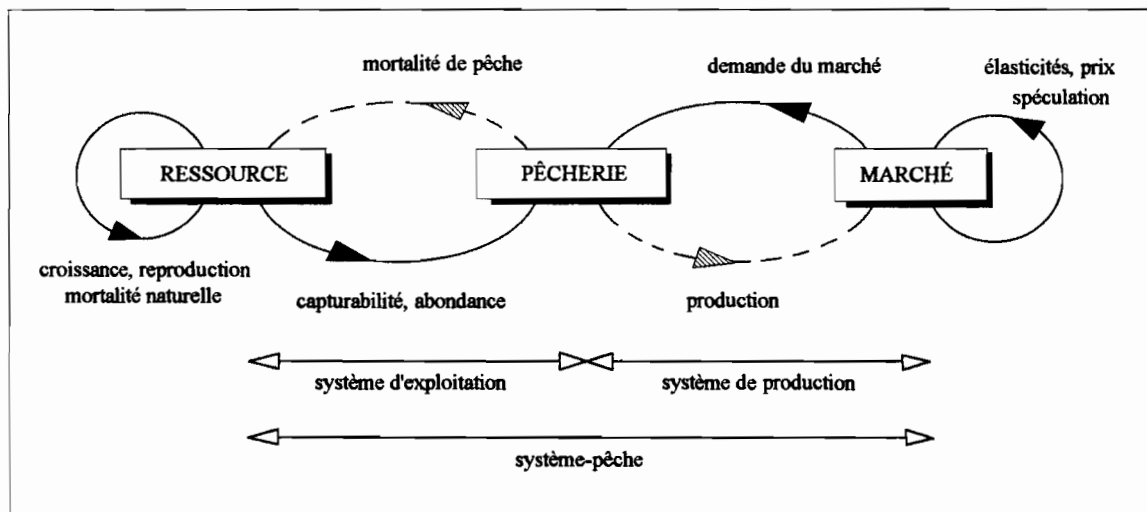


Fig.2.25. Une pêcherie se trouve à l'interface entre deux entités dynamiques : une ressource exploitée et un marché. Selon cette vision globale, le fonctionnement du système-pêche résulte donc du couplage entre un système d'exploitation et un système de production. Les flèches pleines symbolisent les dynamiques exogènes des deux entités imposant un forçage sur la pêcherie. Les flèches pointillées représentent les relations inverses. Dans le cas présent, ces relations inverses ne modifient pas la dynamique des deux entités, qui restent par conséquent exogènes.

On a souhaité souligner par cette figure qu'une pêcherie est à la fois un système d'exploitation et un système de production, mais que chacun de ces deux systèmes est caractérisé par ses propres contraintes (biologiques et/ou économiques) et ses propres objectifs, en un mot, sa propre dynamique.

Dans ce sens, nous reprenons complètement à notre compte les propos de Hilborn et Walters (1992: 142) lorsqu'ils décrivent les pêcheries comme un « *squeeze between biological and economic forces* » (souligné ajouté). Le challenge pour les acteurs de ce double système est alors de s'entendre pour atteindre un optimum commun, et le nôtre est d'analyser cette dualité système d'exploitation - système de production. Selon cette approche, un système-pêche est une seule et même entité économique qui résulte de l'interaction entre un système d'exploitation d'une ressource renouvelable et un système de production relié à un marché de produits de la mer. C'est cette conception qui est donc à la base de l'approche globale développée et revendiquée dans cette thèse.

Cependant, même si l'apport majeur de ce chapitre est d'avoir souligné (ou peut être simplement rappelé pour certains d'entre nous) que les pêcheries sont des systèmes "squeezés" entre la dynamique de la ressource et celle des marchés, il ne faudrait pas que cette conclusion nous amène à réduire le problème du fonctionnement des systèmes-pêche à celui de l'adéquation entre les flux de captures et ceux de la demande des marchés. À nous de ne pas réitérer l'erreur reprochée à certains travaux trop fortement influencés par la vision Odu-mienne des systèmes où : « *La théorie sous-jacente réduit les interactions entre organismes vivants à des flux de matières et d'énergie, excluant les comportements de ces organismes du champ de l'analyse* » (Weber in prep.). Car avant d'être une entité économique, une pêcherie est un système anthropique, composé d'acteurs qui ont pour principale propriété d'être capables d'évoluer, de s'adapter, d'interagir, de cohabiter ou même de s'affronter.

L'étude d'un système-pêche passe donc également par l'analyse des comportements de ses agents. Pas étonnant donc que l'étude ait 'dérapé' à plusieurs reprises vers une analyse qui tenait plus de l'étude socio-économique que de l'analyse écologique ou mathématique. Une illustration directe de cette réalité socio-économique est l'intégration, dans ce Chap.2, de l'analyse du système de rémunération (Béné 1997). Cette intégration s'est faite suivant deux étapes : (i) la reconnaissance de la nature duale du système-pêche débouche sur la mise en évidence de la divergence entre les objectifs des deux communautés (pêcheurs/armateurs) et (ii) l'observation de cette divergence déplace l'analyse vers l'élément qui forme le lien entre

les deux communautés, le système de rémunération. La démonstration du rôle de ce système de rémunération dans le contrôle du travail des membres d'équipage et des stratégies de pêche des capitaines par les armements est la preuve que ce système de rémunération est bien le lien (unilatéral, certes, mais effectif) entre les deux communautés du système-pêche.

Cette thèse ne se veut pas pour autant novatrice dans les idées abordées. Elle épouse simplement le discours développé par un certain nombre de scientifiques depuis quelques années dans le domaine des sciences halieutiques. Ainsi Opaluch et Bockstael (1984), qui invitent à l'usage de "*behavioral modellings*" pour étudier ce que Charles (1995) dénomme de son côté l'"*Human dynamics*", cette composante des systèmes-pêche qui, à leur gré, n'est pas assez souvent vue dans les études halieutiques et qui, pourtant, prend une part au moins aussi importante que la dynamique de la ressource ou celle des marchés dans le fonctionnement général des systèmes-pêche. « *In a sense we are arguing for a change in research focus from the behaviour of fish to the behavior of fishermen.* » (Opaluch and Bockstael, 1984: 107).

Les choses évoluent néanmoins (ou commencent à évoluer) et l'on est en droit de penser qu'elles le font dans le bon sens, puisque de plus en plus d'articles, prenant la suite de l'article précurseur de Pringle (1985) soulignant la nécessité de prendre en compte la dimension humaine des systèmes-pêche, apparaissent dans les revues scientifiques "à préoccupation halieutique" comme *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* ou *Aquat. Living Resour.* (Charles 1992, Smith 1995, Clay and McGoodwin 1995, Lane and Stephenson 1995). Encore un peu d'attente et ces articles-annoncements seront remplacés par les travaux empiriques dont ils se veulent les initiateurs. L'apparition de ces questions comme thèmes centraux dans les réflexions de certains chercheurs est d'ailleurs désormais réalité, essentiellement au travers de travaux en modélisation du type orientée-objet (simulation multi-agents) (Bousquet 1993, Bousquet and Cambier 1994, Le Fur 1995, 1996), modélisation dont l'usage entraîne encore quelques abcès de scepticisme (même au sein des utilisateurs) découlant sans doute des problèmes d'interprétation inhérents à son absence de fondement théorique, mais dont le formalisme semble particulièrement adapté à l'étude des relations entre agents.

Avant d'en terminer avec ce Chap.2 et de passer à la troisième partie de cette étude, celle concernant l'analyse de la dynamique d'investissement, il nous semble important d'ajouter ici un commentaire sur les outils de gestion classiquement utilisés dans les pêcheries crevettières et de tenter d'expliquer les raisons pour lesquelles le système mis en place dans la pê-

cherie guyanaise se distingue de façon notable de ceux appliqués dans les autres pêcheries crevettières.

La première étape constituant cette démarche est de caractériser le système de gestion 'classique' adopté pour les pêcheries crevettières et de le replacer par rapport aux systèmes de gestion des autres types de pêcheries (i.e. non crevettières). Lorsque l'on observe ces dernières, il apparaît que la majorité d'entre elles sont pluri-spécifiques, multi-engins, et qu'elles exploitent des stocks pluri-cohortes très rarement confinés géographiquement (comportement migratoire, stock chevauchant). Par rapport à ce tableau général, les pêcheries crevettières s'opposent pratiquement point par point à ces caractéristiques : ce sont des pêcheries mono-cohortes, bien souvent mono-espèces, et basées sur un système d'exploitation mono-engin (généralement le chalut). Les espèces exploitées possèdent un cycle de vie très court et les stocks, bien qu'ils puissent dans certains cas être chevauchants, sont le plus souvent très localisés. On s'attend par conséquent à ce que les plans de gestion développés dans le cadre des pêcheries crevettières soient spécifiques et s'avèrent relativement différents de ceux adoptés pour les pêcheries plus "classiques".

La littérature nous apprend qu'il existe effectivement un type de système de gestion plus spécifiquement associé aux pêcheries crevettières. Ce système de gestion est basé sur l'usage conjoint de deux outils servant à contrôler des éléments différents de l'activité des pêches⁵³. Le premier de ces deux outils concerne le contrôle de la répartition de l'effort de pêche entre les différentes classes d'âge. Cette mesure de gestion est adoptée dans le but de limiter la mortalité par pêche sur les plus petites catégories de crevettes et ainsi d'augmenter les captures des futures grosses catégories. Pour déterminer la répartition "optimale" de l'effort permettant d'atteindre cet objectif, on utilise généralement des modèles de type Rendement-par-recrue ("Yield per recruit") de Beverton and Holt (1957). C'est par exemple ce genre de modèle que proposèrent Grant et Griffin (1979) pour les pêcheries du Golfe du Mexique, Garcia (1977) pour celles de Côte d'Ivoire, ou Somers (1985) pour celles du Golfe de Carpentaria (Australie).

Ces modèles de rendement-par-recrue peuvent de plus intégrer les prix par catégories ou les coûts d'exploitation et offrir ainsi les ébauches de modèles bio-économiques (Blomo et al.

⁵³ Les outils sur lesquels ce système repose peuvent cependant être rencontrés séparément dans les autres types de pêcheries.

1978, Clark and Kirkwood 1979, Dudley and Waught 1980, Willmann and Garcia 1985). Le problème se réduit alors à un compromis ("*trade-off*") entre les pertes immédiates induites par la capture retardée et l'augmentation des gains découlant de la croissance des individus survivants. Les outils de contrôle associés à ce type de gestion sont généralement ceux qui concernent la régulation de la maille des filets ou de la taille minimale autorisée des débarquements. Cependant, les crevettes étant des animaux à croissance rapide dont le recrutement est généralement reconnu comme saisonnier, cet objectif peut également être atteint en régulant la saison de pêche et en particulier en imposant des périodes de fermetures, soit temporelle de la pêcherie ("*temporal seasonal closure*"), soit spatiale de certaines régions de la zone de pêche ("*spatial seasonal closure*") (Lucas et al. 1979, Sluczanowski 1984, Die and Watson 1992). Ce système de gestion a été par exemple appliqué dans plusieurs pêcheries d'Australie (Bowen and Hancock 1985), du Golfe du Mexique (Leary 1985) ou d'Amérique Centrale (Nicaragua, Honduras) sur la côte Caraïbe (Moguedet, IFREMER La Rochelle, comm. pers., déc.96).

Au-delà du constat, on peut également chercher à identifier la raison de la généralisation de ce type de gestion. Cette raison est simple et facilement identifiable. Ce type d'outil satisfait au moins partiellement et en même temps les attentes des différents partis concernés par l'exploitation des ressources crevettières. La conservation des petites crevettes et la réorientation de l'effort vers les grandes catégories constitue en effet un consensus complet entre les intérêts des biologistes, d'une part, qui voient dans ces mesures le moyen de limiter les risques de surexploitation de croissance ("*growth overfishing*"), et les intérêts des économistes et des pêcheurs d'autre part, pour qui ce type de système de gestion permet de satisfaire le principe de maximisation des revenus.

Pourtant, bien qu'ils offrent les bases d'un accord général (chose relativement rare en halieutique) ces outils ne suffisent pas, à eux seuls, pour fournir le cadre d'un système de gestion satisfaisant pour les pêcheries crevettières. En effet, ainsi que le rappelle Garcia (1989: 290), ni les modèles de rendement par recrue, ni les systèmes de gestion par saison ou zone de pêche n'exercent de contrôle sur le niveau d'effort global : « *Because those measures exert no influence on fleet size they cannot prevent excessive investment and fishing cost. (...) Because they do not address the main cause of the overfishing problem (an excess of effort) they cannot be expected to solve it.* » Or, comme nous le découvrirons au cours du Chap.3 ce qui caractérise avant tout la dynamique d'investissement des pêche-

ries crevettières, c'est l'absence de facteur endogène jouant le rôle de régulateur du niveau de l'investissement. C'est la raison pour laquelle tous les spécialistes des pêcheries crevettières ont depuis longtemps reconnu la nécessité de combiner les outils de contrôle de la taille de première capture avec des mesures de contrôle de l'effort global de la flottille (Gulland 1972, 1984, Caddy 1989, Garcia 1985, 1988, 1989) Gates précise par rapport à ce problème (1989: 475) : « *Les gains liés à la régulation de la taille de première capture sont aussi conditionnés par celle de l'effort : le contrôle de l'entrée constitue pratiquement une condition sine qua non de l'aménagement de la pêche* ». Ce contrôle de l'effort de la flottille se fait le plus généralement au travers d'un système de licence.

En résumé, l'approche 'orthodoxe' de gestion pour les pêcheries crevettières repose sur la combinaison d'un outil de contrôle de la taille de première capture (modèle de rendement-par-recrue ou fermeture saisonnière des pêcheries) et d'un outil de contrôle de l'effort (système de licence). Par rapport à ce système 'orthodoxe', les gestionnaires en charge de la pêche guyanaise semblent plutôt avoir fait preuve d'un non-conformisme marqué. En effet :

(i) En ce qui concerne le contrôle de l'effort global, le système de licence n'a en effet été installé que très tardivement, à partir de 1992 (cf. Encadré 2.1). L'explication à cette situation est peut-être à rechercher dans le fait que les pouvoirs publics français avaient justement besoin de cette tendance naturelle à investir des armements pour assurer la substitution des flottilles étrangères et ainsi parfaire le succès du programme de francisation. Remarquons d'ailleurs à cet égard que la décision d'instaurer le système de licence fut prise par la préfecture en 1991⁵⁴, c'est-à-dire juste après le départ de la dernière compagnie américaine (oct.1990).

(ii) En ce qui concerne le contrôle de la taille de première capture, le seul modèle de rendement-par-recrue qui ait été appliqué ne l'a été que dans le cadre d'une étude ponctuelle (Dintheer et LeGall 1988) dont le but n'était pas de contrôler l'effort sur les catégories, mais d'estimer le nombre de navires français qui produirait un effort de pêche équivalent à celui de la flottille américano-nippo-française présente jusqu'alors. De même, il n'y a jamais eu de tentative de gestion par une fermeture saisonnière de pêche -bien qu'il ait été question à un moment d'instaurer une interdiction de pêche dans la zone des moins de trente mètres

⁵⁴ Et donc appliquée dès 1992.

(Dintheer et Rosé 1989). Une explication possible à cette divergence par rapport l'approche classique est le fait que le marché français vers lequel les armements français ont exporté leur production dès leur entrée dans la pêcherie soit caractérisé par une demande préférentielle en petites catégories. Il n'y avait donc aucun intérêt à instaurer un type de gestion dont l'objectif tendrait à orienter l'effort de pêche vers des catégories (les grosses) qui ne correspondent pas à la demande de ce marché. Les décideurs, comme les professionnels, semblent avoir été parfaitement conscients de cet état de faits, et ont suivi un raisonnement apparemment recevable : il ne sert à rien d'identifier la composition en taille qui permette de maximiser la valeur commerciale des captures, si par ailleurs ces captures ne correspondent pas à la demande du marché. Que penser alors de ces outils classiques de contrôle de l'âge de première capture ("*Yield-per-recruit, Seasonal closures*") utilisés dans la majorité des pêcheries crevettières ? Auraient-ils leur place dans le système de gestion de la pêcherie guyanaise ?

Nous venons de souligner que la raison pour laquelle aucun d'entre eux n'avait été appliqué jusqu'à présent est sans doute liée au fait que la demande en petites catégories caractérisant le marché français est en désaccord avec l'objectif majeur de ce type de modèle. Il est clair par conséquent qu'aucune mesure allant dans le sens du contrôle de l'âge de première capture ne pourra être imposée aux professionnels sans risquer d'entraîner de conflit important. Cependant, la tendance à capturer des crevettes de plus en plus petite en réponse à la demande des marchés est préoccupante pour deux raisons majeures. Premièrement, d'un point de vue de principe, cette stratégie ne va pas dans le sens de "l'impératif de conservation de la ressource" que tout système de gestion doit pouvoir offrir. Deuxièmement, l'analyse des marchés tend à montrer que cette stratégie n'est résolument pas la meilleure option commerciale pour les armements guyanais.

La solution à ce problème passera par conséquent par une première étape qui sera de convaincre les armements à modifier leur stratégie commerciale et à réorienter leur effort vers les plus grandes catégories. À cet égard, il semblerait bon de veiller à ce que les aides du programme POSEIDOM ne soient plus calculées sur des bases incitant à la capture des petites crevettes (cf. p.138) mais au contraire de manière à inciter à la capture des grandes crevettes. Globalement, les efforts de gestion devront de toute façon intégrer les problèmes de commercialisation des armements. La priorité actuelle est en effet à l'amélioration de la situation commerciale des armements et non à celle biologique du stock.

En d'autres termes, et c'est là tout le symbole de ce type de pêche, des mesures comme la création d'un véritable Label « Crevettes Guyanaises » associé à la commercialisation des grandes catégories seraient plus utiles à la pêche qu'un nouveau programme d'étude du recrutement.

~ o0o ~

CHAPITRE 3.

DYNAMIQUE D'INVESTISSEMENT PROCESSUS ENDOGÈNES ET DISTORSION

In many fisheries, external factors such as other fisheries and subsidies may have an important impact, and investment may be only weakly related to profitability.

R. Hilborn.

INTRODUCTION AU CHAPITRE 3

Les deux premiers chapitres de ce travail auront été consacrés à ce qui est généralement considéré comme les deux principales sources de perturbation pour une pêche, à savoir les fluctuations de la ressource exploitée et celles des marchés sur lesquels la production est écoulee¹. Dans l'introduction de son article de 1983, McKelvey rappelle d'ailleurs (1983: 287) : « *An important feature of many real-world fisheries is extreme variability, both in the character of the fish population (quantity, locations, and time of appearance) and in market conditions (costs, prices, and demands). For example, annual shrimp stocks along the Pacific Coast may vary by a factor of 10, and the market for some fish species (e.g. black cod) may grow rapidly and then collapse* ». Nos travaux au cours du Chap.2 nous ont cependant permis de souligner que d'autres sources de perturbation existent. Nous avons ainsi observé que le comportement des différents groupes d'acteurs composant le système représente également un facteur d'instabilité, et que cette source de perturbation endogène doit, elle aussi, être prise en compte dans les analyses.

Tous ces aspects ont néanmoins trait à la finalité directe des systèmes-pêche, à savoir le couplage exploitation-production d'une ressource renouvelable. Il est un autre processus qui apparaît tout aussi essentiel dans et pour le fonctionnement d'une pêcherie, c'est le processus d'investissement. Ce processus est en effet le mécanisme qui permet à la pêcherie, en tant qu'entité, de se développer puis de perdurer dans le temps. L'investissement est donc un autre élément incontournable à analyser dès lors que l'on s'intéresse à un système-pêche, quel qu'il soit. Hilborn affirme d'ailleurs à ce propos (1985: 5) : « *Understanding the investment process is probably the most important area for research in fishery* ».

La raison pour laquelle l'étude de l'investissement est importante ne tient cependant pas uniquement à l'intérêt théorique ou académique que cette analyse représente pour la compréhension globale du système. L'étude des processus qui amènent les pêcheurs à acquérir de nouveaux navires est également fondamentale pour tenter de proposer une solution au problème du surinvestissement qui frappe actuellement l'ensemble des pêcheries mondiales. Il

¹ Remarquons qu'en ce qui concerne les marchés, les fluctuations de ces dernières ne résultèrent pas uniquement de la volatilité des prix et mais aussi (et surtout) de l'évolution de la structure de ces marchés (*structural changes*).

n'y a pas, en effet, une étude ou un ouvrage postérieurs à 1970 qui ne souligne l'occurrence du surinvestissement dans les pêcheries (Gulland 1971, Glantz and Thompson 1981, McKenzie 1983, Troadec 1989).

Pour tenter de résoudre ce problème, il y a deux approches possibles. La première, que l'on peut considérer comme une approche en aval du problème, consiste à réfléchir sur les outils de gestions qui permettent de freiner la tendance qu'ont les différents acteurs de la filière à surinvestir. C'est la voie qu'ont emprunté et qu'empruntent actuellement bon nombre de chercheurs, économistes pour la plupart, biologistes pour les autres (Scott 1979, Pearse 1980, Dewess 1989, Troadec 1994, Christy 1996). Après la période de relative confusion qui suivit le rejet définitif des modèles classiques (Gulland 1969, Larkin 1977, Sissenwise 1978) le débat en matière de gestion des systèmes halieutiques semble s'être aujourd'hui orienté vers l'usage des Quotas Individuels Transférables (QIT)² (Pearse and Walters 1992, Copes 1996, Willmann 1996).

L'autre voie se situe en amont du problème. C'est celle qui, avant de prétendre pouvoir le contenir, consiste à tenter de comprendre le processus du surinvestissement. Or, comprendre ce processus, c'est d'abord comprendre la dynamique 'normale' de l'investissement, c'est identifier les facteurs qui stimulent ce dernier, c'est également chercher ceux qui éventuellement le freinent ; c'est, en fait, 'démonter' les différentes étapes qui constituent ce processus complexe dans le but de saisir comment et pourquoi ce dernier mène généralement au surinvestissement. Malheureusement la plus grande partie de l'effort de réflexion s'est jusqu'à présent portée sur la voie en aval du problème. Ce déséquilibre entre les deux approches ne se justifie pas, bien au contraire. Les quelques études effectuées dans le domaine des pêches indiquent en effet que le processus d'investissement, dans ce domaine, se caractérise par l'existence de deux particularités : (i) la contrainte d'irréversibilité du capital et (ii) la propriété de co-investissement entre la ressource et le capital, et que leur présence conjointe au

² Ces QITs, discutés par la communauté scientifique depuis relativement peu de temps (Maloney and Pearse 1979, Copes 1986), sont en effet actuellement vus par certains comme la panacée qui permettrait de se débarrasser définitivement et simultanément du problème de la surexploitation des ressources et de celui du surinvestissement des pêcheries (Scott 1988, Neher et al. 1989, Ackroyd et al. 1990, Clark 1990, Scott 1993). On peut cependant s'interroger sur l'efficacité d'un outil unique de gestion face à la multiplicité et la spécificité des pêcheries rencontrées de part le monde. Quoi qu'il en soit, 'mode' (de gestion) passagère ou solution de long-terme, ces QITS, déjà appliqués dans de nombreuses pêcheries de Nouvelle Zélande et du Canada, risquent fort d'être les outils de gestion adoptés par un grand nombre d'administrations dans la décennie à venir.

sein des pêcheries exclut ces dernières du champ d'investigation des études économiques classiques.

Un chalut peut difficilement servir ailleurs qu'au bout des fûnes d'un navire... Cette réalité, c'est celle de l'irréversibilité du capital³. Cette notion réfère au fait qu'il existe très peu d'alternatives d'usage pour le capital investi dans la pêche, en dehors de l'activité de la pêche elle-même. La mise en évidence dans les pêcheries de cette irréversibilité du capital (en fait non-malléabilité du capital ou existence d'actifs spécifiques⁴) n'est pas récente. Plusieurs travaux y ont fait allusion dès les années 60 (FAO 1962, Christy and Scott 1965), en même temps qu'ils mettaient en évidence une autre non-malléabilité, celle du travail. La notion de non-malléabilité du capital est souvent confondue avec sa conséquence directe : la difficulté à réduire le capital (appelons cette caractéristique la non-réductibilité du capital). Cependant, une différence majeure les sépare : la non-malléabilité n'a pas de dimension temporelle propre, à la différence de la non-réductibilité qui, elle, est très largement dépendante de l'échelle d'observation. À court-terme la non-réductibilité est une réalité qui doit être prise en compte ; en revanche, sur le moyen-terme, le processus de dépréciation du capital en relativise l'impact et il l'annule même complètement sur le long-terme.

Le concept de co-investissement⁵, pris dans son sens initial, n'est pas non plus spécifique aux pêcheries. Il est observé en économie classique lorsque plusieurs facteurs de production sont liés par une fonction de production telle que tout investissement dans l'un de ces facteurs implique une modification des taux d'utilisation (les entrées) des autres. Dans le cas des pêcheries, cette situation peut aussi être observée⁶. Néanmoins, lorsque l'on parle de

³ Proviens du terme *irreversibility* utilisé à l'origine par Clark et al. (1979) et qui est ensuite resté dans la littérature halieutique. Nous allons voir qu'utilisé dans ce sens ce terme est impropre (cf. note suivante).

⁴ Il existe une différence entre les notions d'irréversibilité du capital d'un côté et de non-malléabilité ou d'actifs spécifiques de l'autre, même si Clark et al. (1979) ou Charles (1983.a, 1983.b) utilisent les deux premiers termes sans faire de distinction. Le terme irréversibilité fait référence au fait que la décision d'investir dans un nouveau bateau est une décision qui, lorsqu'elle est effective, entraîne un certain nombre de processus sur lesquels il n'est pas possible de revenir. Henry précise (1974: 1006) : « *A decision is considered as irreversible if it significantly reduces for a long time the variety of choices that would be possible in the future* ». C'est une notion qui n'est pas spécifique aux pêcheries. Elle est en fait assez commune en économie et dans tous les domaines où il est question de processus de décision. La notion de non-malléabilité ou d'actifs spécifiques est différente ; elle fait référence au fait qu'un navire de pêche n'est pas aisément réutilisable dans d'autres secteurs économiques. Là encore ça n'est pas une notion qui est unique à l'activité de la pêche. Cependant, elle y est particulièrement forte. Nous ferons essentiellement référence à la notion de non-malléabilité par la suite.

⁵ *joint-investment* en terme anglo-saxon.

⁶ Ainsi, le cas de l'investissement dans un chalut GOV (à grande ouverture verticale), imposant l'utilisation d'un moteur plus puissant pour le trainer, est un exemple de co-investissement, dans le sens classique du terme.

co-investissement pour les pêcheries, c'est généralement pour faire référence à un phénomène particulier : le fait que tout investissement dans le premier facteur de production, le capital (les bateaux, les engins de pêche), s'accompagne généralement d'un impact négatif sur le second facteur, la ressource⁷. En d'autres termes, une augmentation de la pression anthropique due à un investissement va, sur le long-terme et dans la plupart des cas, entraîner une baisse de l'abondance du stock exploité. Dans ces conditions, l'investissement doit donc être vu comme un compromis entre l'augmentation des captures à court-terme et la baisse des rendements à moyen-terme⁸.

Qu'en est-il maintenant de la pêche guyanaise par rapport à ces spécificités ? En ce qui concerne la non-malléabilité, force est de constater que celle qui caractérise la pêche guyanaise est une non-malléabilité 'extrême'. En effet, dans les pêcheries multi-spécifiques et/ou multi-engins, les pêcheurs, lorsqu'ils sont face à une chute de rentabilité (baisse du prix ou de l'abondance) d'une espèce, peuvent amortir cette baisse en reportant une partie de leur effort vers d'autres espèces, voire même, en changeant de pêche. C'est ce que l'on appelle la stratégie de substitution ("*switching strategy*"). Dans ces circonstances, l'investissement, s'il garde son caractère d'irréversibilité (tel qu'on l'a défini dans la note 4) perd en revanche un peu de sa non-malléabilité. La pêche guyanaise, comme la majorité des pêcheries crevettières, est au contraire mono-spécifique. Ses pêcheurs n'ont pas la possibilité de reporter leur effort vers d'autres espèces. Le caractère de non-malléabilité y est, par conséquent, beaucoup plus marqué que dans les pêcheries multi-spécifiques⁹.

En ce qui concerne la propriété de "co-investissement" entre la ressource et le capital, les conclusions du Chap.1 suggèrent au contraire sa non-validité dans le cas de la pêche guyanaise. L'analyse de la dynamique de la ressource a en effet souligné que le niveau du

⁷ Cette manière particulière avec laquelle le concept classique de co-investissement est utilisé dans les sciences halieutiques est critiquable pour deux raisons. Premièrement, notons que cette vision implique que la ressource est considérée comme un facteur de production. Nous reviendrons sur cette conception discutable ultérieurement (cf. p.168). Deuxièmement, en admettant que la ressource est bien un facteur de production, la diminution de ce facteur due à l'augmentation du capital doit en fait être plus interprétée comme une conséquence de la nature collective du premier facteur (la ressource) (cf. Conclusion du Chap.3 p.197) que comme celle d'une relation décroissante réelle entre ce facteur et le second (le capital).

⁸ Une autre manière de représenter ce compromis est de supposer une relation décroissante entre le profit par navire et le nombre de navires présents dans la pêche, à la manière de la Fig.4.2 p.150 de Clark (1985).

⁹ De surcroît, si la possibilité de revente d'un navire reste envisageable dans certaines pêcheries, la situation géopolitique de la Guyane exclue dans les faits cette alternative. En effet, les écarts de niveaux de vie avec les pays voisins proscrirent les possibilités de revente des navires à des armements Surinamien ou du Guyana. Le caractère de non-malléabilité du capital s'en trouve encore accentué.

stock dépendait essentiellement des conditions climatiques rencontrées par les stades juvéniles à l'entrée des nurseries, et non de l'effort exercé sur ce même stock les saisons précédentes¹⁰. Cette absence de relation entre abondance du stock et effort signifie que l'augmentation de la pression anthropique découlant d'investissements supplémentaires (l'entrée de nouveaux navires dans la pêche par exemple) n'a pas d'impact sur l'abondance de la ressource¹¹. Dans ces conditions il n'y a donc pas de phénomène de co-investissement entre le capital et la ressource.

La question directe qui découle de cette constatation est celle-ci : quelle peut être la dynamique d'investissement d'un système-pêche, lorsque celui-ci est confronté à une forte non-malléabilité de son capital et à une absence de co-investissement ?

Remarquons immédiatement que pour pouvoir répondre à cette question, il est nécessaire d'avoir identifié au préalable les rôles (ou les impacts) respectifs de la contrainte de non-malléabilité et de la propriété de co-investissement dans les pêcheries classiques. On ne peut, en effet, 'apprécier' la spécificité que la situation particulière de la pêche guyanaise entraîne sur sa dynamique d'investissement que par rapport à une référence. C'est pour cette raison que nous devons dans un premier temps identifier, d'une part, la dynamique "standard" d'investissement des pêcheries classiques, et d'autre part, préciser le rôle que jouent dans cette dynamique standard la non-malléabilité et le co-investissement. Ce n'est qu'à ces conditions qu'il nous sera possible de répondre à notre question initiale, et ainsi avancer un peu plus dans la compréhension du fonctionnement global de la pêche crevette guyanaise.

Le reste du chapitre est organisé en conséquence. L'objectif de la section 1 sera de proposer, à travers une revue commentée des quelques études menées sur le problème en halieutique, une synthèse permettant de décrire la dynamique classique d'investissement et le rôle de la non-malléabilité du capital et du co-investissement dans cette dynamique. Dans une seconde section, on tentera de formaliser le processus d'investissement d'une 'pêche crevette type' (c'est-à-dire caractérisée par l'absence de relation de co-investissement entre son capital et la ressource qu'elle exploite). On proposera alors à partir de ce formalisme un modèle dynamique relativement simple décrivant l'expansion d'une pêche sous ces hypo-

¹⁰ Cf. § 1.1. et § 2.7.1. du Chap. 1.

¹¹ Dans la mesure où le niveau d'investissement ne tend pas vers des valeurs trop importantes.

thèses. L'analyse de ce modèle théorique permettra de vérifier un certain nombre d'hypothèses concernant les processus à la base de la dynamique d'investissement dans les pêcheries, mais aussi de mettre en avant des divergences entre certains postulats de la littérature et la réalité de la pêche guyanaise. La section 3 sera consacrée à la recherche des raisons permettant d'expliquer ces divergences entre théorie et réalité.

~ o0o ~

SECTION 1. LA DYNAMIQUE NORMALE D'INVESTISSEMENT DANS LES PÊCHERIES

1.1. Les enseignements des études empiriques

1.1.1. Le rôle du profit comme moteur à l'investissement

La théorie néoclassique postule que les firmes compétitives continuent à investir tant que la valeur présente des revenus générés par une unité supplémentaire de capital est supérieure ou égale à son coût, ou, en d'autres termes, tant que le revenu marginal découlant de l'investissement est supérieur à son coût marginal. C'est ce que l'on appelle la "*marginal rule*" en terme anglo-saxon. Par rapport à ce point précis, les pêcheries ne divergent pas des autres formes d'activité économique puisqu'il est généralement admis dans la littérature que c'est le profit qui stimule les pêcheurs à investir (Copes 1972, Anderson 1977, Csirke 1983, Garcia 1984). Clark rebaptisa d'ailleurs la "*marginal rule*" en "*Modified Golden rule*" lors de ses travaux sur l'investissement dans les pêches (Clark 1976.a, Clark et al. 1979). Le profit escompté semble par conséquent représenter le moteur central du développement et de l'expansion des pêcheries. La transposition de ce résultat dans un cadre dynamique fait alors dépendre l'investissement des anticipations sur les profits futurs. Cette relation dépend néanmoins des hypothèses faites sur le caractère parfait du marché du capital. En d'autres termes, il n'y a pas ici de rigidités ou contraintes particulières dans l'accès à l'emprunt. Dans un monde réel très imparfait à cet égard, l'investissement apparaît contraint par les possibilités d'autofinancement. Ce sont alors les profits passés qui vont peser sur le taux d'investissement, pour autant que les profits escomptés révèlent l'investissement toujours attractif. Les études empiriques viennent confirmer cette dernière relation. Rounsefell (1975), Poffenberger (1984), Tettey and Griffin (1984) ou Penson et al. (1988) observent ainsi que les 'bonnes' années, caractérisées par des captures abondantes et donc des revenus plus élevés, sont généralement suivies par une augmentation des investissements. Bosford et al. (1983) notent d'ailleurs que le phénomène inverse est également vrai, c'est-à-dire que les sorties

augmentent lorsque les rendements chutent¹². Lane (1988), en utilisant un modèle de programmation dynamique assez complexe, basé sur une approche probabiliste, fut capable, quant à lui, de montrer que le processus d'investissement chez les pêcheurs de Colombie Britannique est largement influencé par les estimations que ces derniers se font de leurs revenus futurs (ces revenus futurs étant eux-mêmes le fruit d'une projection plus ou moins directe de leurs revenus présents). Dans le même ordre d'idée, mais à partir d'une approche plus classique à base de régressions multi-variables, Bjørndal and Conrad (1987.a) étudièrent le processus d'investissement de la pêcherie de Hareng de Mer du Nord. Ils conclurent, là aussi, que le niveau d'investissement dans cette pêcherie était relié aux profits enregistrés par les pêcheurs.

Il semble donc que le postulat affirmant que les investissements sont plus ou moins proportionnels aux profits tirés de l'activité soit une réalité empirique. Du point de vue formalisme, en notant π le profit, K le capital et γ le coefficient de dépréciation de ce capital, ce postulat s'exprime classiquement par :

$$(3.1) \quad \dot{K}(t) = I(t) - \gamma K(t)$$

avec $I(t) = n\pi(t)$ représentant la fraction du profit réinvesti. Sous forme discrète¹³ l'expression est :

$$(3.2) \quad K_{t+1} = K_t + I_{t+1} - \gamma K_t = n\pi_t + (1-\gamma)K_t$$

Le paramètre n des expressions (3.1) et (3.2) représente le coefficient d'ajustement de l'investissement, c'est-à-dire, la vitesse avec laquelle les investissements se font en réponse aux profits. On remarque à ce propos que quelle que soit la forme adoptée, discrète ou continue, le formalisme est supposé pouvoir également représenter le processus de désinvestissement (de sortie) de la pêcherie, lorsque les profits deviennent négatifs¹⁴.

¹² L'investissement en pêche ne se réduit pas simplement au nombre de navires achetés. On peut très bien considérer l'acquisition d'une licence autorisant l'entrée dans une pêcherie comme un investissement. Dans ces circonstances, lorsque le pêcheur ne renouvelle pas cette licence, il sort de la pêcherie, ce qui est considéré comme un désinvestissement.

¹³ Bien que les deux formalismes (discret et continu) soient tous les deux observés dans la littérature, il est généralement admis que les investissements (comme tout processus de décisions -cf. Encadré 1.3 du Chap.1) sont des phénomènes discrétisés dans le temps (Charles 1983.a, Clark 1985, Bjørndal and Conrad 1987.a). Ils interviennent, de plus, avec un certain retard par rapport aux stimuli, retard qui découle, entre autres, des délais de construction des bateaux. Le formalisme discret capture relativement bien cette double caractéristique ; c'est par conséquent la forme (3.2) qui est la plus généralement adoptée, même si la forme (3.1) peut être rencontrée (essentiellement pour des raisons techniques d'analyse, l'étude des équations différentielles étant généralement plus facile que celle des équations en différence).

¹⁴ Cf. la conclusion de Bosford et al. (1983) du paragraphe précédent.

1.1.2. Non-malléabilité et comportement d'adhérence

Cette remarque sur les paramètres d'entrée et de sortie nous ramène à la notion de comportement d'adhérence des agents économiques. On se souvient¹⁵ que pour ce qui est des pêcheries ce terme est utilisé pour décrire le fait que les pêcheurs ont tendance à ne pas sortir de la pêcherie même lorsque leurs profits sont devenus négatifs. En restant dans la pêcherie ils préservent la possibilité de profits positifs futurs. Cela renvoie au caractère spécifique des actifs engagés (i.e. la non-malléabilité du capital) qui seraient définitivement perdus en cas de sortie. Le comportement d'adhérence, qui a également été étudié par Terkla et al. (1985), peut donc être interprété comme une conséquence de la non-malléabilité du capital (et de celle du travail).

Pour en revenir aux coefficients d'entrée et de sortie, on trouve dans la littérature un certain nombre d'études où les auteurs tentent d'estimer les valeurs de ces coefficients et essayent notamment de déterminer si le coefficient d'entrée diffère de celui de sortie. Il apparaît dans la majorité de ces études une asymétrie entre les coefficients (Hannesson 1975, Tettey et al. 1984). Cette asymétrie sous-entend une myopie des investisseurs rentrant dans la pêcherie, c'est-à-dire, soit une très mauvaise information sur les conditions d'exploitation et notamment sur le caractère non-malléable des investissements, soit un taux d'actualisation très élevé reflétant une forte préférence pour le présent, soit les deux.

1.1.3. Une solution à la non-malléabilité du capital : la stratégie de substitution

Une analyse empirique semble pourtant ne pas confirmer cette asymétrie. C'est celle de Bjørndal and Conrad (1987.a) tirée de l'étude de la pêcherie de hareng de la Mer du Nord. Si les auteurs de cette étude confirment que le niveau de profit a un impact significatif sur les décisions d'investissement des pêcheurs, en revanche, leur analyse ne permet pas de mettre en évidence une différence significative entre le coefficient d'ajustement estimé pour les périodes de profit positif et celui estimé pour les périodes de profit négatif. Ces auteurs suggèrent que ce résultat contradictoire¹⁶ est dû à la présence de plusieurs autres pêcheries

¹⁵ Cf. § 2.1.3. du Chap.2.

¹⁶ En fait, comme le font remarquer Bjørndal et Conrad eux-mêmes, les valeurs estimées par le modèle vont bien dans le sens d'une élasticité supérieure du coefficient d'entrée (0.094) par rapport à celui de sortie (0.085) ainsi que le suggèrent les autres études. C'est en fait uniquement la différence entre les deux valeurs (0.094-0.085) qui n'est pas significativement différente de zéro.

dans la même zone que la pêche étudiée. Ils notent ainsi (Bjørndal and Conrad 1987.a: 71) : « *Accordingly the result that the rate of exit is not statistically different from the rate of entry is an indication of the availability of alternative fisheries* ». Remarquons ici que dans l'esprit de ces auteurs il y existe donc une relation entre (a)symétrie des coefficients et (présence) absence de comportement d'adhérence¹⁷ : les pêcheurs, parce qu'ils ont la possibilité de reporter une partie, voire la totalité, de leur activité dans d'autres pêcheries, ne vont pas développer de comportement d'adhérence : ils sortiront sans hésiter de la pêche dès que les profits deviennent négatifs et reporteront leur effort sur une autre pêche qui leur semble plus rentable. Selon cette interprétation, l'étude de Bjørndal et Conrad illustre donc le fait que la stratégie de substitution permet de réduire l'impact de la non-malléabilité.

1.2. L'apport des modèles théoriques dynamiques

1.2.1. Le rôle du co-investissement dans la dynamique d'investissement

L'identification du rôle du co-investissement dans la dynamique d'investissement impose une contrainte méthodologique. En effet, le co-investissement est, par essence, une propriété dynamique des systèmes-pêche dans la mesure où il découle de la réponse du stock à l'augmentation de l'effort. Seul l'usage de systèmes dynamiques peut, par conséquent, 'capturer' cette interaction entre flottille et ressource. Plusieurs études basées sur une approche dynamique ont ainsi été proposées pour analyser ce co-investissement et son impact sur le développement des pêcheries. Le modèle le plus connu (ou plus exactement celui auquel il est le plus souvent fait référence) est celui de Smith (1968, 1969). Il était par conséquent initialement prévu de s'appuyer sur les conclusions de ce dernier pour étayer nos propos et, entre autre, identifier l'impact du co-investissement sur la dynamique d'investissement. Cependant ainsi que nous l'a fait remarquer J.L. Gouzé (INRIA, Sophia, comm. pers., nov.96), ce modèle n'est ni plus ni moins que la reformulation d'un modèle plus ancien, tout aussi

¹⁷ Notons pourtant à propos de ce point précis que la symétrie des coefficients d'entrée et de sortie peut être observée et ceci même en présence d'un comportement d'adhérence des agents : si l'on suppose une anticipation par ces agents de la non-malléabilité du capital, ces derniers tiennent compte du caractère spécifiques des actifs lorsqu'ils décident d'entrer ou non dans la pêche. Cette anticipation fait diminuer l'élasticité d'entrée et la non-malléabilité n'implique plus l'asymétrie des coefficients. Cette situation peut par exemple s'observer dans les modèles à anticipation rationnelle.

fameux, mais généralement utilisé à de tout autres desseins : ce modèle, c'est celui de Schaefer (1954)¹⁸.

En fait, en dépit de la réputation d'approche statique qui accompagne désormais, voire même précède, son modèle dans la littérature actuelle¹⁹, on s'aperçoit que Schaefer, (bien que biologiste) avait déjà à l'époque parfaitement intégré le concept de co-investissement.

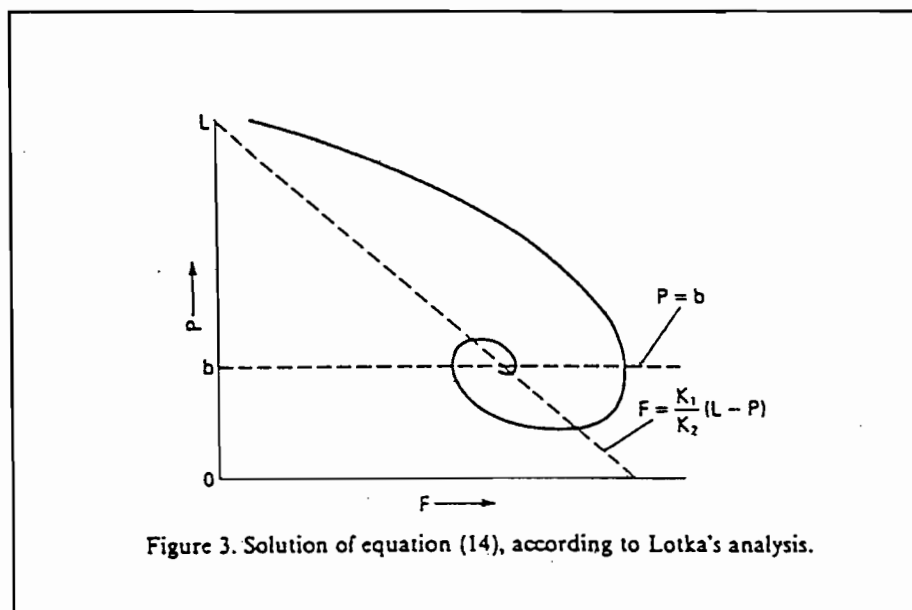


Figure 3. Solution of equation (14), according to Lotka's analysis.

Fig.3.1. Les trajectoires du système de Schaefer (1954) décrivant l'interaction entre la ressource et la flottille (voir texte et note 19 pour commentaires).

¹⁸ Ce modèle de Schaefer (1954) est en effet utilisé dans sa version 'statique' comme formalisme de base aux modèles classiques (ou modèles en cloches) auxquels nous avons fait allusion dans l'Introduction Générale (cf. § "F = q·E ou la loi de la passivité").

¹⁹ Ce modèle de Schaefer souffre de beaucoup de préjugés. Ainsi, il lui est souvent reproché le fait qu'il représente la situation d'équilibre vers laquelle tend sur le long-terme une pêcherie en accès libre sans pouvoir en préciser le transitoire, c'est-à-dire, sans pouvoir spécifier la manière avec laquelle cette situation d'équilibre est atteinte. Cunningham et al. (1985: 46-47) écrivent par exemple : « *Nonetheless, it does suffer a number of drawbacks. (...) On the economic side, the model is essentially long run. (...) [However] in an open fishery, the fishermen themselves are not concerned about the long run; they are concerned to exploit the stock as it exists at a given time (that is, they are concerned with the short run). Thus although the model, correctly characterizes open access as a situation where long-run total revenue equals long-run total costs (...) this is only part of the story, and probably the least interesting part at that.* ». Si ces remarques sont exactes lorsqu'elles sont prises dans leur généralité (le transitoire d'un système est un élément essentiel dans la compréhension de la dynamique et de la structure du système), en revanche il est inexact que ces remarques puissent concerner l'article original de Schaefer. La lecture de cet article montre que ce dernier était parfaitement conscient de l'importance des transitoires, ainsi que le confirme le titre et le début de paragraphe suivants (: 265 in 1991) :

« 10. *The course of development of an unregulated fishery and the manner of approach to stable equilibrium* [titre] *It is of considerable importance to our understanding of the fisheries to investigate the manner in which the population of fish and the amount of fishing react with each other in the course of development of the fishery.* »

Il avait su en particulier reconnaître dans la relation entre le capital et la ressource une interaction du type proie-prédateur décrite par Lotka (1923) : « *Lotka (1923) has investigated a more general pair of differential equations, which include our as special case. (...) according to Lotka's analysis, the solution would be a spiral inward toward the singular point. A diagram of this solution is shown in Fig.3.* » La Fig.3 originelle de Schaefer est redessinée en Fig.3.1. On pourra la comparer à celle, beaucoup plus célèbre, du modèle de Smith (1968), (redessinée en Fig.3.2).

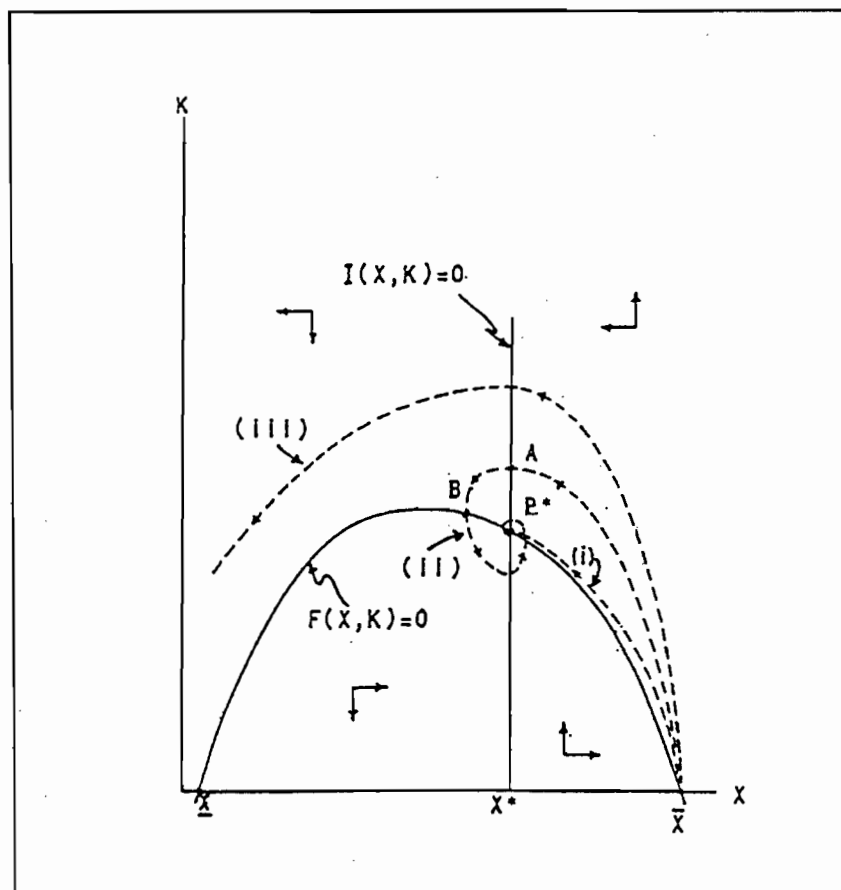


Fig.3.2. Le modèle de Smith (1968). Les trajectoires du type (ii) sont celles qui nous intéressent ici. Smith décrit la relation de co-investissement qui lie la ressource et le capital de la manière suivante : « *a cyclical path in which firms respond so quickly to pure profits that when industry equilibrium is reached at A the harvest exceeds the yield of the stock causing the stock to continue falling. But with the stock continuing to fall, cost rise, losses are incurred, and firms are forced out of the industry. The declining harvest eventually provides equilibrium of the resource stock, at B but the industry is declining. And so on in a convergent cyclical path with capital flowing in and out in response to cost change induced by the decline and rise of the stock level.* » (1968: 420-21).

L'avantage d'utiliser l'approche de Schaefer, c'est qu'en faisant explicitement référence aux travaux de Lotka (1923, 1925), il définit par là même implicitement le rôle du co-

investissement. Se référant à la dynamique de la relation proie-prédateur universalisée par les travaux de Lokta et ceux de Volterra (1926), on réalise que l'impact du co-investissement est équivalent à celui d'un frein pour la dynamique d'investissement. En d'autres termes, le co-investissement peut être vu comme un mécanisme d'autorégulation de la flotte vis-à-vis de son expansion.

Le modèle de Smith, déjà repris plusieurs fois dans sa forme initiale est en fait le modèle auquel les économistes ou les mathématiciens "halieutes" font généralement référence lorsqu'ils abordent le problème de la dynamique du développement des pêcheries (Fullenbaum et al. 1971, Gould 1972, Beddington et al. 1975, Leung and Wang 1976, Berck 1979, Clark 1985, McKelvey 1985, Bjørndal and Conrad 1987.b, etc.).

La raison de cette préférence par rapport au modèle de Schaefer tient peut-être dans le fait que Smith eut la chance de voir son modèle 'validé' par le travail de Wilen (1976). Ce dernier mit en effet en évidence la ressemblance troublante qui existait entre les spirales décrites par les trajectoires du système théorique de Smith et les données de la pêche de Phoque du Pacifique Nord (cf. Fig.3.3).

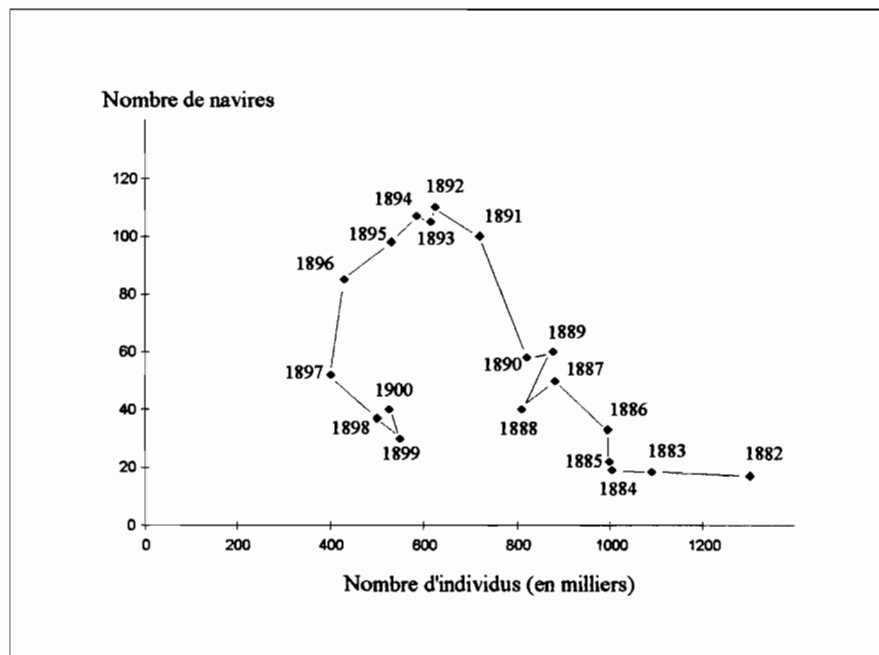


Fig.3.3. La série de Wilen (1976) décrivant l'évolution conjointe du stock de phoques et de la pêche du Pacifique Nord sur la période 1882 - 1900.

1.2.2. L'impact de la dépréciation du capital et le biais de l'échelle d'observation

Mais cette adéquation entre le modèle théorique de Smith (1968) et les données de Wilen (1976) représentent un danger pour qui se plonge dans la question du formalisme de la relation ressource-capital. En effet, le modèle Smith-Wilen (SW), s'il intègre et permet d'illustrer le rôle du co-investissement, ne prend en revanche pas en compte la non-malléabilité du capital. L'analyse des équations du modèle le confirme et Smith lui-même l'écrit : « *we assume capital to be equally mobile out as well as into an industry, i.e. there is no problem of irreversibility. More generally* [entendons "si l'irréversibilité était prise en compte"], *we could write*

$$\dot{K} = \begin{cases} \delta_1 \pi & \text{if } \pi \geq 0 \\ \delta_2 \pi & \text{if } \pi < 0. \end{cases} \quad \gg \quad (\text{Smith 1968: 415, note 7})^{20}$$

Cette non-prise en compte de la non-malléabilité du capital n'est pas évidente pour celui qui analyse ce modèle théorique pour la première fois. Ceci est peut-être dû à l'association avec la série empirique de Wilen. Parce que cette dernière s'étale sur 19 ans, elle couvre une période suffisamment longue pour que l'effet de la dépréciation sur le capital soit effectif et permette à ce capital de diminuer, en accord avec le modèle théorique. On retrouve ici la remarque concernant l'importance de l'échelle d'observation par rapport au problème de non-malléabilité du capital (cf p.153) : bien que le capital soit réellement non-malléable, les données empiriques décrivant les évolutions des flottilles, si elles sont observées sur le long-terme, sont capables de prendre des valeurs négatives à cause du fort taux de dépréciation dans le secteur de la pêche. Ces valeurs peuvent ainsi s'ajuster à des modèles même si ces derniers n'intègrent pas la contrainte de non-malléabilité. C'est ce qui se passe ici entre la série de Wilen et le modèle de Smith.

1.2.3. Le couplage {co-investissement / non-malléabilité}

Il faudra en fait encore attendre dix ans et un travail de Clark et de deux de ses collègues Clarke et Munro, pour voir apparaître un modèle qui intègre la non-malléabilité du capital dans la dynamique d'investissement (Clark et al. 1979)²¹. Le principal intérêt de cet article est d'avoir soulevé la question du double impact {co-investment + non-malléabilité} sur la

²⁰ Notons que l'on retrouve ici exactement l'hypothèse d'asymétrie du coefficient d'ajustement introduite dans le § 1.1.2.

²¹ Cela avait pourtant déjà été fait en économie 'classique' depuis plus de dix ans (Arrow 1968).

dynamique d'investissement. Cette approche a ensuite été reprise par Charles (1982, 1983.a, 1983.b). Ce dernier en améliora le formalisme, notamment en intégrant l'aspect discontinu des processus d'investissement. Il introduisit de même la dimension aléatoire des pêcheries par un processus stochastique au niveau de la relation de recrutement (Charles 1983.b) (cf. Encadré 3.1).

Encadré 3.1. Intégration de la non-malléabilité du capital et du co-investissement.

Clark, Clarke et Munro sont donc les premiers à avoir introduit conjointement les concepts de non-malléabilité et co-investissement dans un même modèle (Clark et al. 1979). La base biologique de ce modèle est le modèle de Schaefer (1954) qui avait été entre temps généralisé par Pella and Tomlinson (1969) au niveau de la fonction de grossissement $F(x)$:

$$\dot{x}(t) = \frac{dx}{dt} = F(x) - qE(t)x(t)$$

avec $F'(x) > 0$, $F''(x) < 0$, $0 \leq x \leq \bar{x}$, $\bar{x}$ tel que $F(0) = F(\bar{x}) = 0$. La partie économique, quant à elle, tire ses racines des travaux de Gordon (1954) et de Crutchfield and Zellner (1962). L'effort est néanmoins considéré comme variable $E(t)$. Le profit est de la forme :

$$(3.1.1) \quad \pi(t) = pqx(t)E(t) - cE(t)$$

où c est le coût unitaire d'exploitation supposé indépendant du niveau de l'effort $E(t)$. L'expansion du capital est celle déjà présentée (cf. 3.1, p.158) :

$$\dot{K}(t) = I(t) - \gamma K(t)$$

avec $I(t) = n\pi(t)$ représentant la fraction du profit qui est réinvesti. Couplé à cette expression se trouve la dernière équation de base du modèle :

$$0 \leq E(t) \leq K(t)$$

Notons que Clark et al. (1979) utilisent la forme continue de la dynamique d'investissement. Dans ce cas, la prise en compte de l'irréversibilité du capital se fait en supposant

$$0 \leq I(t) \leq +\infty.$$

Charles (1982, 1983.a) reprendra l'hypothèse de non-malléabilité mais sous sa forme discrète (cf. 3.2, p.158) :

$$K_{n+1} = I_{n+1} + K_n - \gamma K_n = n\pi_n + (1-\gamma) \cdot K_n$$

en tenant ainsi compte du caractère discontinu des processus de décision (cf. Encadré 1.3).

continu page suivante

Dans ce cas la non-malléabilité est exprimée par :

$$I_{n+1} \geq 0$$

De même, la base biologique n'est plus le modèle de Schaefer comme c'était le cas pour Clark et al. (1979) mais une formalisation discrète basée sur l'hypothèse de l'existence d'une relation stock-recrutement. Plus particulièrement, le renouvellement du stock X se fait d'une saison n sur la suivante $n+1$ par l'intermédiaire de la fraction survivante S_n ('escapement').

Charles inclura en plus l'incertitude par le biais d'un processus stochastique (1983.b). La fonction de renouvellement est alors de la forme :

$$(3.1.2) \quad X_{n+1} = F(S_n) \cdot Z_n : \text{processus stochastique.}$$

La fonction F représente ici la relation de stock-recrutement. Charles adopte pour cette dernière les deux formes classiques, celle de Ricker (1954) et celle de Beverton et Holt (1957). Pour introduire le co-investissement il suppose que la fraction S_n du stock qui échappe à la mortalité par pêche est fonction de l'effort :

$$(3.1.3) \quad S_n = G(R_n, E(t)) = R_n \exp\left[-q \int_0^T E(t) dt\right] \quad \text{Charles (1983.a: 2070)}$$

où T est la longueur de la saison. Notons que dans ce modèle, bien que la prise de décision d'investir soit discrète, la mortalité par pêche est continue. On obtient donc finalement en combinant (3.1.2) et (3.1.3) :

$$X_{n+1} = F(G(R_n, E(t)))$$

où l'état du stock à venir est fonction à la fois de l'état du stock présent mais aussi de l'effort. Il y a donc bien couplage entre le niveau de la ressource et celui du capital. On retrouve la notion de co-investissement.

Malheureusement les conclusions auxquelles Clark et al. (1979) ou Charles (1983.a, 1983.b) arrivent dans leurs articles respectifs, ne sont pas toutes exploitables. Ils adoptèrent en effet une approche du type contrôle optimal. Si l'utilisation de cette théorie pour les systèmes asservis est à la base d'un nombre important d'applications dans des domaines industriels de pointe comme l'aéronautique, la balistique, etc., en revanche l'interprétation et

l'application de ces techniques dans le cas des systèmes d'exploitation des ressources renouvelables est beaucoup plus délicate^{22, 23}.

Cependant, malgré le manque de réalisme inhérent aux hypothèses simplificatrices de l'approche, l'analyse de ces différents travaux permet de mettre en lumière un certain nombre de points intéressants (Charles 1983.b, 1992). On observe ainsi que la non-malléabilité de l'investissement augmente la précarité de l'activité des pêcheries, particulièrement pour les pêcheries exploitant des ressources à croissance lente : l'occurrence d'une mauvaise année peut alors amener à l'immobilisation du capital pendant une partie importante de sa durée de vie. Une deuxième conclusion est que la combinaison de la non-malléabilité et des fluctuations aléatoires de la ressource joue un rôle prépondérant dans l'apparition de surcapacité au niveau des flottilles. Des périodes de surinvestissement sont ainsi systématiquement observées à la suite d'années favorables où l'augmentation du profit entraîne un investissement net (c'est-à-dire supérieur à celui nécessaire au remplacement du capital). Cet investissement mène les années suivantes à une flottille surdimensionnée par rapport au niveau de la ressource redevenu normal entre temps. On retrouve en fait au travers de ces modèles théoriques les conclusions empiriques mises en évidence au niveau des pêcheries.

1.3. Une dynamique d'investissement en crémaillère

La représentation de cette succession composée d'augmentations rapides de la taille de la flottille suivies de réajustements lents, crée une sorte de "dynamique en crémaillère" qui a été illustrée sur la Fig.3.4. La surcapacité de la flottille subsiste tant que la dépréciation n'a pas réduit la taille de la flottille à un niveau de nouveau en accord avec le niveau moyen de la ressource, ou qu'une nouvelle année favorable n'a pas créé de nouveaux besoins d'investissements nets. Les enseignements de ces différents travaux²⁴ ont été regroupés au niveau

²² Voir l'article de Goh (1979) pour une toute autre position et celui de Cohen (1987) pour une revue détaillée des premiers travaux de contrôle optimal appliqués en halieutiques.

²³ Il est d'ailleurs intéressant de noter que Charles lui-même changea quelque peu son opinion vis-à-vis de la théorie du contrôle optimal et de son usage dans le cadre des ressources renouvelables. Ainsi en témoigne cette phrase de son article de 1992 : « *Emphasis here is on understanding the behavior of the fishery system, not on determining the optimal performance* » (1992: 193) (souligné par l'auteur).

²⁴ Cette revue est cependant loin d'être complète. Nous aurons pu aussi mentionner les travaux de Berck (1979), Dudley and Waught (1980), Hartwick (1982), ou McKelvey (1985). Berck (1979) démontre ainsi que prendre en compte la possibilité de garder des bateaux au quai pendant de courtes périodes ou supposer l'existence d'un seuil minimal de viabilité pour la ressource peut changer les conclusions proposées classiquement. Harwick (1982), quant à lui, aborde le problème du co-investissement non pas à l'échelle de la flottille comme il est fait classiquement, mais en considérant la somme des décisions individuelles prises par chacun des armements. Dudley and Waught (1980) introduisent l'incertitude par une approche stochastique

d'un schéma synthétique (Fig.3.5). On y retrouve les principales étapes de la dynamique d'investissement et les rôles respectifs du co-investissement et de la non-malléabilité.

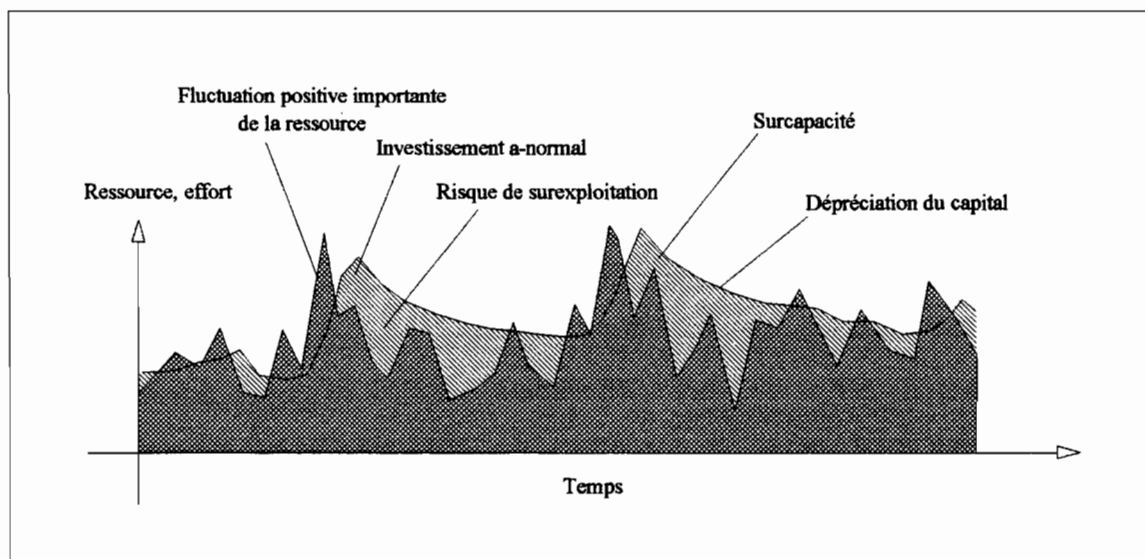


Fig.3.4. La dynamique "en crémaillère" de la flotte. Les périodes de surinvestissement apparaissent généralement à la suite de l'occurrence d'années favorables. L'augmentation du profit entraîne un investissement a-normal* qui débouche ensuite sur une surcapacité de la flotte. Cette dernière subsistera tant que la dépréciation du capital n'aura pas réduit la taille de la flotte à un niveau en accord avec le niveau moyen de la ressource. C'est cette dynamique faite d'augmentations rapides de la taille de la flotte mais de réajustements lents dus à la non-malléabilité du capital qui produit cette "dynamique en crémaillère".

* investissement a-normal : supérieur à l'investissement nécessaire pour remplacer le capital qui disparaît par dépréciation.

1.4. Une généralisation dangereuse ?

Pour rester rigoureux, on doit ajouter à ces conclusions deux derniers commentaires concernant le co-investissement.

□ Le premier point fait suite à la note 7 p.154 où nous soulignons que l'application du concept de co-investissement à l'halieutique nécessiterait de considérer la ressource comme un facteur de production. Or traiter le stock comme un facteur de production impliquerait que l'unité de décision, i.e. l'entreprise (ici l'armement), ait (i) le pouvoir juridique et (ii) la maîtrise technique sur ce facteur de production, c'est-à-dire sur le stock.

dans un modèle similaire à celui de Clark et Kirkwood (1979). McKelvey (1985), enfin, reconsidère le modèle de Gould (1972) en introduisant une contrainte de non-malléabilité du capital.

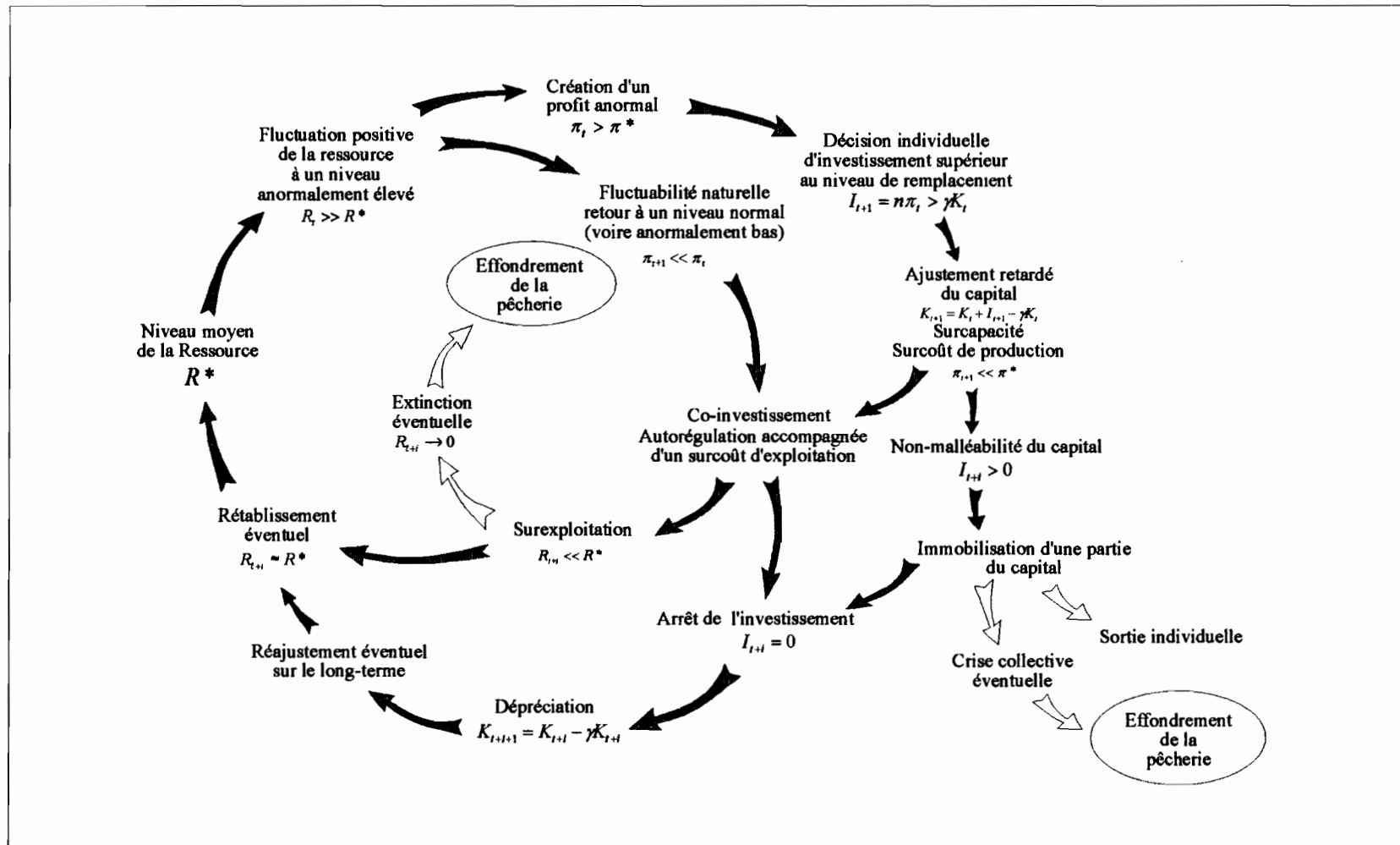


Fig.3.5. Dynamique d'investissement dans une pêcherie menant à l'évolution en crémaillère au niveau du capital. Le profit est l'indicateur qui stimule la dynamique d'investissement au niveau individuel. L'impact du co-investissement au niveau agrégé de la flotte joue le rôle d'autorégulateur. Le problème de l'investissement apparaît donc comme celui d'un "équilibre" entre les décisions individuelles et le résultat collectif qui s'exprime à travers le co-investissement. C'est la non-malléabilité du capital qui confère à l'évolution des pêcheries une image caractéristique de dynamique en "crémaillère" où les investissements impulsifs sont réajustés sur le long-terme par la dépréciation du capital. En blancs, sont indiquées les évolutions qui débouchent sur des situations de crise : sorties individuelles, effondrement biologique ou effondrement économique de la pêcherie.

On observe ici tout de suite les limites de cette approche puisque les armements ne possèdent ni l'un ni l'autre²⁵. Seul le droit d'accès au stock -sous la forme de quotas individuels transférables par exemple- pourrait à la rigueur être considéré comme un facteur de production (O. Godard, CIRED Paris, comm. pers., mars 97), mais certainement pas le stock en lui-même.

□ Nous avons vu que les seules études qui avaient tenté de prendre en compte ce co-investissement l'avaient fait par l'intermédiaire de modèles dynamiques du type proie prédateur (cf. Beddington et al. 1975, Leung and Wang 1976, Berck 1979, Bjørndal and Conrad 1987.b). Or, l'utilisation de ces modèles pour intégrer et estimer la relation de co-investissement entre ressource et capital n'est pas méthodologiquement correct. Utiliser un tel formalisme signifie poser *a priori* l'existence de la relation de co-investissement. Néanmoins, rien ne permet d'affirmer *a priori* l'existence systématique de cette relation pour toutes les pêcheries. Une approche plus rigoureuse aurait été de tester également la structure des modèles dynamiques appliqués dans les études.

Doit-on pour autant rejeter ces résultats ? On peut raisonnablement répondre par la négative. Il se trouve en effet que pour la plupart des pêcheries, l'hypothèse de l'existence d'une relation de co-investissement entre ressource et niveau d'effort semble biologiquement justifiée. En revanche on perçoit qu'en ce qui concerne le cas de la pêcherie crevette guyanaise, et plus généralement celui des Penaeides, l'extrapolation des conclusions présentes n'est plus possible. Pour ces espèces, le niveau de la ressource n'étant pas fonction de l'effort de pêche qui lui est imposé, il n'y a donc pas de relation de co-investissement. Cette dernière remarque forme la transition avec la prochaine section. Il y sera en effet question de déterminer la dynamique d'investissement d'un système-pêche en l'absence de co-investissement.

~ o0o ~

²⁵ Pour un commentaire du point (ii) maîtrise technique du facteur de production, voir § *Motivations of the study* de Béné and Doyen Annexe 4.

SECTION 2. DYNAMIQUE D'UNE PÊCHERIE LIMITÉE PAR SON MARCHÉ

2.1. Interrogations

Dans le cas de la pêche crevettière guyanaise, nous savons depuis le premier chapitre que *« le volume des captures pour une saison donnée est complètement indépendant de la fraction survivante de la saison précédente (fraction qui tend d'ailleurs à être nulle du fait de la vie courte des Penaeides). Les captures ne dépendent par conséquent en aucun cas de l'effort qui a été imposé sur la ressource la saison précédente (...) »* (Chap.1, Conclusion générale). Cette absence de relation entre l'effort imposé pendant une saison et le niveau du stock la saison suivante signifie qu'une augmentation de la pression anthropique n'est pas nécessairement suivie par une baisse de l'abondance de la ressource. Il est par conséquent probable que la dynamique d'investissement de la pêche guyanaise soit fortement déformée par rapport à la dynamique "standard" identifiée dans la section précédente. Dans le cas présent, l'indicateur normal de l'investissement (le profit) ne fonctionne plus et le mécanisme d'autorégulation de l'investissement a disparu. De plus, rappelons que dans le cas de la pêche guyanaise la non-malléabilité du capital est très importante, sans autre possibilité de réduction de l'effort que celle résultant la dépréciation du capital²⁶. D'une façon volontairement naïve, on peut alors exprimer ce constat par l'interrogation suivante : en l'absence de processus d'auto-régulation, ne doit-on pas s'attendre à voir les investissements évoluer de manière exponentielle jusqu'à l'effondrement biologique de la pêche ?

2.2. Le marché, facteur de régulation

Les pêcheries crevettières sont, semble-t-il, exposées au même titre que les autres pêcheries au problème du surinvestissement (Gulland and Rothschild 1984, Garcia 1989, McGuire 1990). Elles ne font cependant pas partie des pêcheries que l'on utilise habituellement comme illustration à la spirale de l'investissement menant à l'effondrement bio-économique d'une pêche (ce rôle étant généralement réservé aux Clupeides). Il semble donc que la

²⁶ Cf. Introduction au Chap.3, p.154.

question, telle qu'elle a été formulée ci-dessus n'a pas lieu d'être et que, même si le co-investissement n'est pas effectif pour ce type de pêche, d'autres facteurs vont venir prendre le relais et assurer un mécanisme similaire de frein à l'expansion des pêcheries. La question se réduit dès lors à : quels sont ces facteurs et comment interviennent-ils dans la dynamique d'investissement ?

2.2.1. Notion de capacité maximale d'absorption des marchés

À la première partie de la question, nous répondrons en proposant l'hypothèse suivante : dans le cas des pêcheries où le co-investissement est absent, c'est le marché qui joue le rôle de frein à l'investissement. Les bases de ce postulat sont tirées des résultats mis en évidence à la fin du Chap.2. On se souvient que l'expansion des crevettes d'aquaculture s'était traduite par la libéralisation des marchés, notamment à travers une plus grande quantité de crevettes proposées sur les marchés mondiaux. Cette évolution avait entraîné la perte des monopoles dont bénéficiaient jusqu'alors les pêcheries de crevettes sauvages et l'apparition de problèmes de commercialisation importants.

Une manière de représenter ce phénomène est d'imaginer l'existence d'une "capacité maximale d'absorption" du marché, représentant les contraintes de débouchés de court-terme pour le produit. Cette notion de Capacité Maximale d'Absorption (CMA) (exprimée en flux) traduit le fait que la consommation pour un type d'espèce est limitée sur le court-terme par une valeur maximale $A_{\max}$, reflétant essentiellement les habitudes culinaires des consommateurs²⁷ et la qualité du réseau de distribution. Cette valeur $A_{\max}$ exprime en fait la quantité qui est potentiellement absorbable par le marché sur ce court-terme. L'existence de la CMA n'est donc pas à relier à une simple relation, purement économique, du type offre-demande²⁸. Elle dépend de la structure du réseau de distribution et de la dimension culturelle (l'image sociale) qui sont associées au produit. Le fait que pendant une période donnée, ce potentiel de vente $A_{\max}$ ne soit pas satisfait n'a pas d'influence sur le prix du marché. Celui-ci ne va pas augmenter pour autant, à l'inverse de ce que qu'il se passe pour une véritable

²⁷ Cette capacité d'absorption est par exemple dans le cas des crevettes très élevée au Japon ou aux États-Unis. En Europe, pour les espèces tropicales genre "Gambas", elle est plus importante dans les pays méditerranéens que dans les pays du Nord (cf. § 1.3. du Chap.2).

²⁸ Diviser le prix du kilo d'escargot par trois et inonder le marché japonais de ce produit ne vous permettra pas de rétablir la balance commerciale de la France à l'égard du Japon... La propension naturelle des japonais à consommer l'escargot ne dépend pas de son prix sur le marché.

demande. L'idée derrière tout cela est de reconnaître que le pouvoir d'expansion d'un produit sur un marché est culturellement et commercialement limité (au niveau de la distribution) sur le court-terme, et de traduire cette réalité par la notion de seuil de saturation²⁹. En résumé, nous sommes en train d'affirmer que pour certaines pêcheries, ce n'est pas le taux de renouvellement de la ressource qui est le facteur limitant mais la capacité d'absorption du marché pour le type de produit qu'elles proposent.

2.2.2. Formalisation du flux d'exportation sous l'hypothèse d'une capacité limite d'absorption

Partant de cette hypothèse, on peut chercher à déterminer quelle est l'évolution sur le long-terme pour ce type de pêche. Pour cela on considère le cas d'une pêche où le niveau de la ressource est découplée du taux d'exploitation. On suppose de plus que cette pêche est en phase de développement. On note $N(t)$ le nombre de navires présent dans la flottille, c'est-à-dire, la taille de la flottille; $N(0)$ est donc proche de zéro. On désigne alors par $F(t)$ le flux d'exportation injecté sur le marché. En traduisant l'évolution de ce flux par une expression de la forme :

$$(3.3) \quad \dot{F} = rN(t)F(t)\left(1 - \frac{F(t)}{A_{\max}}\right),$$

on obtient une dynamique proche de celle recherchée : l'équation (3.3) indique en effet que tant que le flux F est inférieur à $A_{\max}$ il reste des clients potentiels sur le marché. Le flux d'exportation F peut donc augmenter ; la pêche va alors investir dans des capacités de production supplémentaires. En revanche lorsque $F = A_{\max}$, le marché est 'saturé', il ne peut pas absorber un flux supérieur. Notons que l'expression (3.3) est relativement proche de la loi logistique classique. La différence tient dans la présence de la variable $N(t)$ dans le membre droit de l'équation. Ceci indique simplement que la valeur $A_{\max}$ est atteinte d'autant plus rapidement qu'il y a de navires dans la pêche (ce qui est cohérent). D'autres fonctions que celle utilisée en (3.3) auraient très bien pu être choisies pour exprimer cette dynamique. Ce qui nous intéresse ici c'est de rendre compte qualitativement de la notion de saturation du marché.

²⁹ De manière plus rigoureuse il aurait fallu étudier l'élasticité de la demande pour les crevettes tropicales du marché français. Le temps et les données nous ont manqué pour cela.

2.3. Le modèle dynamique

2.3.1. Analyse du comportement des trajectoires

Autour de ce formalisme, nous allons construire un modèle dynamique. Les deux autres équations qui vont être couplées à l'expression (3.3) sont les équations qui définissent, d'une part, le profit et, d'autre part, le niveau d'investissement en fonction de ce profit. Nous avons adopté pour cela les équations :

$$(3.4) \quad \pi(t) = pF(t) - cN(t)$$

$$(3.5) \quad \dot{N}(t) = \alpha\pi(t) - \gamma N(t)$$

L'équation (3.4) est comparable à l'expression classique du profit agrégé obtenu pour la flottille³⁰ mais avec une différence importante : le profit $\pi(t)$ provient de la vente du flux d'exportation $F(t)$ et non de celle des captures $qN(t)X(t)$ comme il est supposé classiquement dans la littérature. L'équation (3.5) est similaire à l'équation classique (3.1) décrivant l'évolution du nombre de navires dans la flottille (i.e. du capital) en fonction de l'investissement et de la dépréciation. Le modèle dynamique s'écrit donc :

$$(3.6) \quad \begin{cases} \dot{F} = rN(t)F(t)\left(1 - \frac{F(t)}{A_{\max}}\right) \\ \dot{N}(t) = \alpha\pi(t) - \gamma N(t) \end{cases}$$

avec $\pi(t) = pF(t) - cN(t)$. Les isoclines nulles permettent d'identifier deux points d'équilibres défini par :

$$(F^{\#}, N^{\#}) = (0, 0)$$

$$(F^*, N^*) = \left(A_{\max}, \frac{\alpha p A_{\max}}{\alpha c + \gamma} \right).$$

La matrice jacobienne du système (3.6) s'écrit :

$$J = \begin{bmatrix} -(\alpha c + \gamma) & \alpha p \\ rN(t)\left(1 - \frac{F(t)}{A_{\max}}\right) & rN(t)\left(1 - \frac{F(t)}{A_{\max}}\right) - rN(t)\frac{F(t)}{A_{\max}} \end{bmatrix}.$$

³⁰ Cf. expression (3.1.1) de l'Encadré (3.1).

Pour le point d'équilibre (F^*, N^*) , cette matrice devient :

$$J^* = \begin{bmatrix} -(\alpha c + \gamma) & \alpha p \\ 0 & -rN^* \end{bmatrix}.$$

Ses racines $\lambda_1 = -(\alpha c + \gamma)$ et $\lambda_2 = -rN^*$ sont toutes les deux réelles négatives. Le point (F^*, N^*) est donc localement stable. L'interprétation de ce résultat en terme de dynamique d'expansion pour la flottille est la suivante : la pêche va se développer jusqu'à ce que le nombre de navires présents dans la flottille soit égal à N^* . Ce nombre correspond à la taille de la flottille qui s'avère nécessaire pour exporter une quantité égale à la capacité maximale d'absorption du marché $F^* = A_{\max}$. Le fait que les racines soient réelles indique de plus que cet équilibre est atteint sans oscillation.

2.3.2. Changement de variable et interprétation

Pour continuer l'analyse, nous allons effectuer un changement de variable. On ne considère plus le profit agrégé de la pêche π mais le profit par navire τ . Ce profit par navire s'écrit $\tau = \pi / N$, soit :

$$(3.7) \quad \tau(t) = p \frac{F(t)}{N(t)} - c$$

On différencie (3.7) et on obtient une nouvelle équation

$$(3.8) \quad \dot{\tau}(t) = -p \frac{F(t)\dot{N}(t)}{N^2} + p \frac{\dot{F}(t)}{\dot{N}(t)}$$

Par ailleurs puisque $\tau = \pi / N$, l'équation (3.5) devient

$$(3.9) \quad \dot{N}(t) = N(t) \cdot (\alpha \tau(t) - \gamma)$$

En substituant (3.9) dans (3.8), après re-arrangement, on obtient l'équation décrivant les évolutions instantanées des profits par navire:

$$(3.10) \quad \dot{\tau}(t) = (c + \tau(t)) \left(-\alpha \tau(t) + \gamma + rN(t) \left(1 - \frac{N(t)}{pA_{\max}} (c + \tau(t)) \right) \right).$$

Les équations différentielles (3.9) et (3.10) constituent les équations d'un nouveau système :

$$(3.11) \quad \begin{cases} \dot{N}(t) = N(t)(\alpha \tau(t) - \gamma) \\ \dot{\tau}(t) = (c + \tau(t)) \left(-\alpha \tau(t) + \gamma + rN(t) \left(1 - \frac{N(t)}{pA_{\max}} (c + \tau(t)) \right) \right) \end{cases}$$

dont les solutions décrivent la dynamique conjointe du nombre de navires entrés dans la pêcherie et du profit pour chacun de ces navires. Les équilibres de ce nouveau système sont :

$$(\tau^{\#}, N^{\#}) = \left(\frac{\gamma}{\alpha}, 0 \right) \quad (\tau^{\circ}, N^{\circ}) = \left(\frac{\gamma}{\alpha}, \frac{\alpha p A_{\max}}{\alpha c + \gamma} \right)$$

Les isoclines du système (3.11) sont représentées sur la **Fig.3.6**. Le point d'équilibre $(\tau^{\circ}, N^{\circ})$ du système (3.11) correspond au point d'équilibre (F^*, N^*) identifié comme un noeud stable pour le précédent système (3.6). Autour du point $(\tau^{\circ}, N^{\circ})$ le système est donc localement stable.

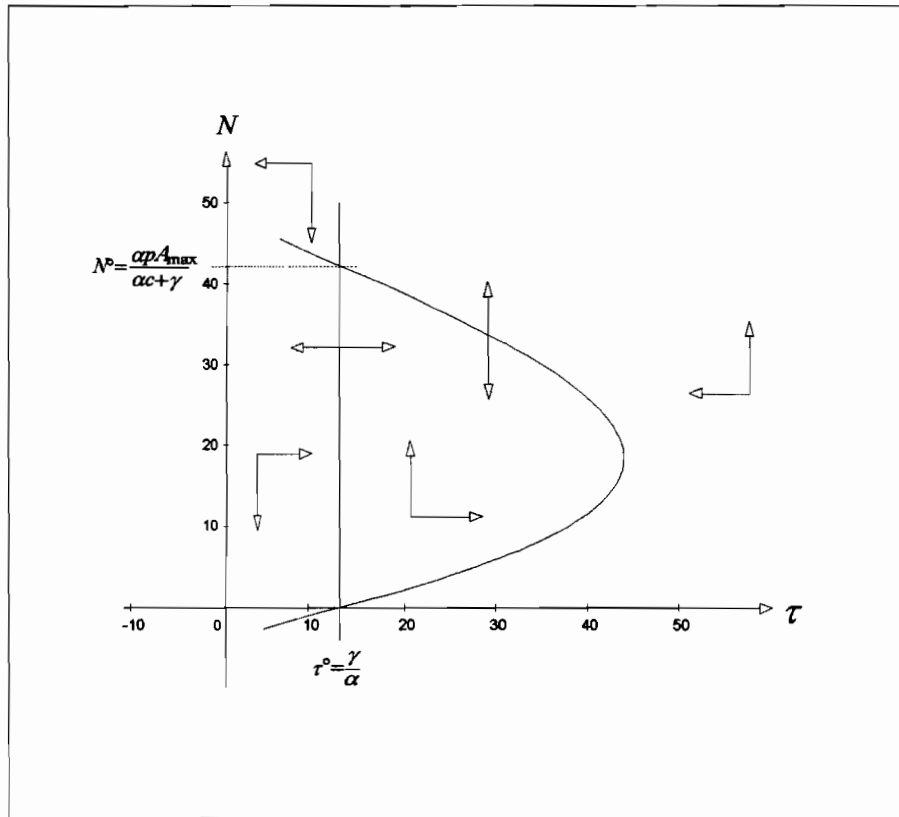


Fig.3.6. Isoclines nulles du système (3.11).

Ce résultat est confirmé par les simulations numériques (cf. **Fig.3.7**). Ce point est atteint après un transitoire sans oscillation. Ce transitoire correspond à la phase de développement de la pêcherie, alors que l'équilibre, lorsqu'il est atteint, est assimilable à la phase 'mature' de la pêcherie. À l'équilibre, le profit par navire est $\tau^{\circ} = \gamma / \alpha$. Cette égalité peut se réécrire $\alpha \tau^{\circ} = \gamma$. Cela indique que, une fois en phase mature, la proportion des profits par navire qui est réinvestie par les armements $(\alpha \tau^{\circ})$ correspond exactement à l'investissement normal,

c'est-à-dire à l'investissement nécessaire pour le remplacement du capital qui disparaît par dépréciation γ .

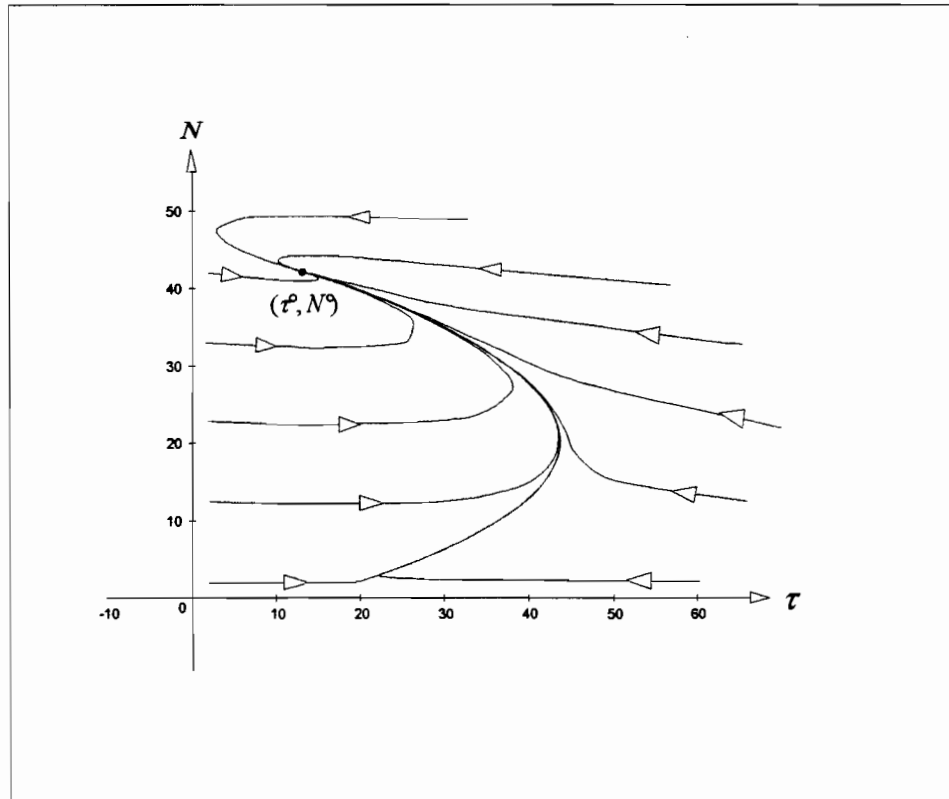


Fig.3.7. Trajectoires du système (3.11). Ces trajectoires convergent localement asymptotiquement vers le point d'équilibre (τ^*, N^*) (voir texte pour commentaires).

2.3.3. Limites et perspectives du modèle

Tel qu'il a été formalisé ici, i.e. sous une forme continue et sans introduction de retard (supposé représenter le délai de construction des navires), le modèle (3.6) ou (3.11) ne permet pas d'obtenir de phase de surinvestissement pour des trajectoires partant de valeurs proches de zéro. Il semble cependant *a priori* possible, au vu de la structure du modèle, que l'introduction d'un retard entraîne l'apparition d'oscillations et débouche ainsi sur des périodes de surinvestissement. C'est une des questions qu'il resterait à approfondir. De la même manière, la CMA (capacité maximale d'absorption) du marché a été supposé constante ; une alternative consisterait à introduire un élément de variabilité dans cette CMA (par un pro-

cessus stochastique, par exemple) reflétant les modifications inévitables des marchés³¹. Dans ce cas, une période d'augmentation de la CMA serait suivie d'une expansion de la pêche. Au contraire, une chute de la CMA (suite à un "tassement" du marché) serait suivie d'une période de surinvestissement (dont la longueur dépendrait à la fois du degré de non-malléabilité du capital et du paramètre de dépréciation γ).

La question est maintenant de savoir si le comportement du modèle est qualitativement comparable à ce que l'on observe au niveau de la pêche guyanaise. C'est l'objet de la section qui suit. Terminons néanmoins celle-ci en remarquant que si l'effet de la dépréciation du capital peut être identifié simplement, en revanche, l'impact de la non-malléabilité ne pourra être étudié que par simulations numériques³². Là encore le travail reste à faire. Il est cependant probable que l'on obtienne une dynamique en crémaillère semblable à celle de la Fig.3.4. Dans ce cas cependant, ce seront les fluctuations positives du marché et non celles de la ressource qui, en générant les impulsions du capital, seront à l'origine des périodes de surinvestissement.

2.4. Désaccord qualitatif avec les données empiriques

Le changement de variable qui nous a permis de représenter la dynamique d'expansion de la pêche en fonction du profit par navire avait été effectué afin de pouvoir comparer le modèle théorique aux données empiriques de la pêche. La Fig.3.8 représente l'évolution du système-pêche guyanais dans le même plan de phase que le modèle sur la Fig.3.7. La comparaison des deux figures amène aux commentaires suivants : pendant les premières années du développement de la pêche (1978-1985), la dynamique empirique du système-pêche est en accord (qualitativement parlant) avec celle du modèle théorique. En revanche, à partir de 1986, on observe que le nombre de navires entrant dans la flottille guyanaise augmente de façon exponentielle alors que les valeurs des exportations par navires en déclin depuis 1983 continuent à chuter.

³¹ L'évolution de la structure des marchés mondiaux suite à l'expansion des crevettes d'aquaculture décrite dans le Chap.2 est le genre d'événements successibles d'entraîner des modifications dans les valeurs des CMA des marchés pour les différentes espèces (sauvages et d'aquaculture).

³² La prise en compte de la non-malléabilité du capital peut se faire de manière simple en introduisant une dissymétrie dans le facteur d'ajustement α au niveau de l'expression (3.9). Dans ce cas cependant, cette dissymétrie rend difficile l'étude analytique du système. L'analyse des trajectoires se fera alors par l'usage des simulations numériques.

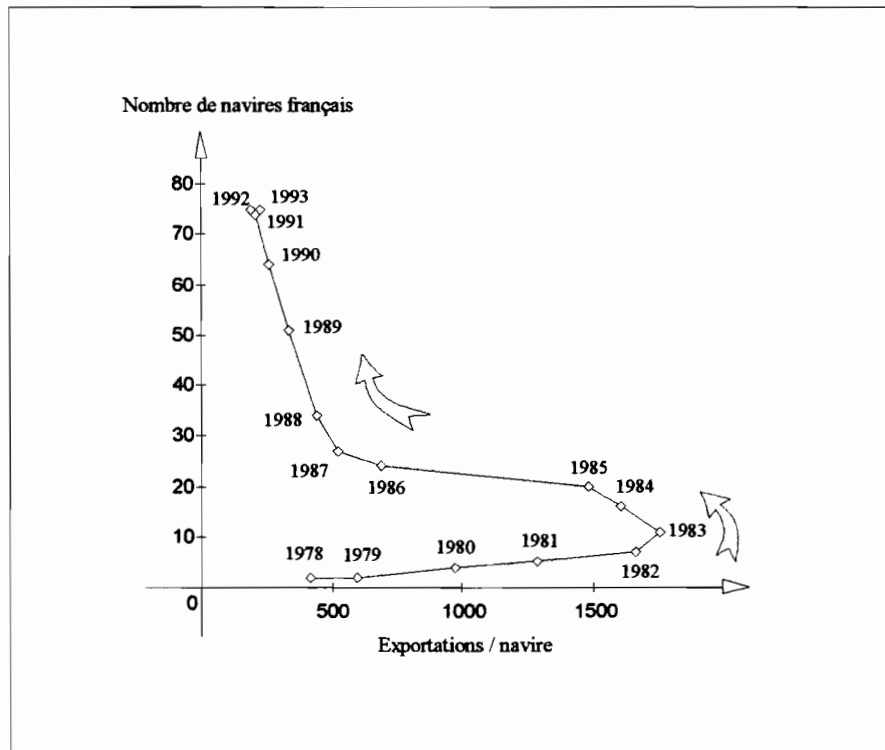


Fig.3.8. Évolution du nombre de navires français en fonctions des exportations en valeurs (en milliers de FF) sur la période 1978 - 1993 (Source : IFREMER Cayenne et CCI Guyane). La comparaison de ce "plan de phase" empirique avec celui du modèle théorique représenté sur la Fig.3.7 met en évidence une divergence de comportement entre les deux systèmes à partir de 1986.

Cette évolution est en complet désaccord avec le modèle théorique qui au contraire prévoit un arrêt de l'investissement. L'objet de la prochaine section sera de tenter d'expliquer les raisons de cette divergence.

~ oOo ~

SECTION 3. LE RÔLE DE LA FRANCISATION DANS LA SURCAPACITÉ DE LA FLOTTILLE

Nous avons terminé la section précédente en soulignant la divergence entre le plan de phase du modèle théorique et celui de la pêche guyanaise. La première étape de la section présente est donc de tenter d'expliquer cette divergence. Le modèle (3.11) étant basé sur deux hypothèses distinctes formalisées par les équations (3.3) et (3.5), on peut se demander si une de ces deux [voire les deux] hypothèses n'est pas invalidée par les données empiriques. Cependant l'usage du modèle n'ayant été que qualitatif, parler de "validation" ou "d'invalidation" dans le sens généralement employé en modélisation est délicat. Il s'agira en l'occurrence plus d'une vérification qualitative (voire simplement graphique pour la première des hypothèses) que d'une véritable validation.

3.1. Remise en cause des hypothèses du modèle

La première hypothèse correspond à l'affirmation de l'existence d'une capacité maximale d'absorption (CMA) pour le marché français³³. Cette hypothèse peut être "testée" en visualisant l'évolution au cours du temps des exportations guyanaises en direction de la Métropole. Si l'hypothèse de cette CMA est correcte, alors les exportations doivent, en partant de zéro, augmenter puis se stabiliser à un seuil qui sera alors identifié comme étant la CMA du marché français pour la crevette guyanaise. La **Fig.3.9** représente les données d'exportations guyanaises à partir de 1983, date des premiers envois en direction de la Métropole. Au vu de cette figure, il semble que l'hypothèse d'une CMA n'est pas graphiquement rejetée par les données empiriques. La forme de la courbe est en accord qualitatif avec ce que l'on tentait de formaliser par l'expression (3.3).

La seconde hypothèse est celle qui suppose l'existence d'une relation proportionnelle entre le niveau d'investissement et la rentabilité de la pêche³⁴ et qui avait été traduit par l'équation (3.9) dans le modèle. Nous avons cherché à savoir si cette relation était vérifiée au niveau de la pêche.

³³ Cf. § 2.2.1. de ce chapitre.

³⁴ Cf § 1.1.1. de ce chapitre.

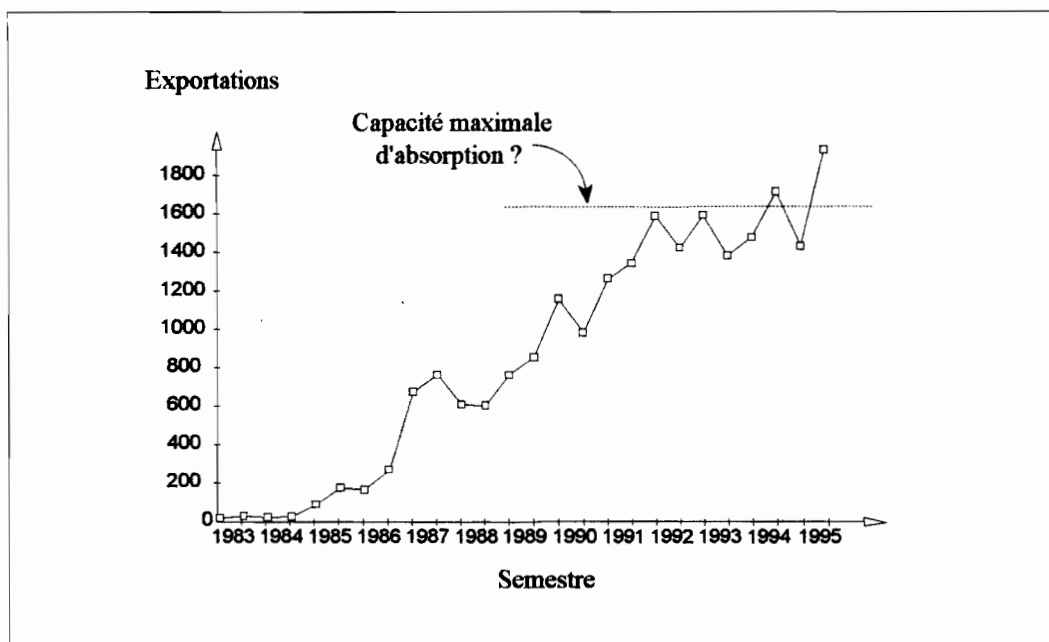


Fig.3.9. Exportations gyanaises en direction du marché français depuis les premiers envois en 1983 (données bi-annuelles en tonnes, source : CCI Guyane).

Pour cela un test statistique de corrélation entre l'investissement effectué par les armements entre 1983-1995 et quatre séries pouvant être considérés comme des indicateurs de la rentabilité économique de la pêche a été mené. Ces séries sont :

1. La production par armement (PR_{armt}) (obtenue en faisant le rapport de la production globale de la pêche par le nombre d'armements en activité),
2. Le bénéfice par armement BF_{armt} (i.e. le produit de la production par armement multiplié par le prix unitaire p des crevettes sur le marché français³⁵ ($BF_{armt} = p \cdot PR_{armt}$)),
3. Le rendement global de la pêche (RD_{glob}) (estimé par la série des CPUE),
4. Le produit de ce rendement par le prix unitaire des crevettes³⁵ ($pRD_{glob} = p \cdot CPUE$).

Ces quatre séries ont été testées en tant que variables explicatives par rapport au niveau d'investissement selon le modèle général :

$$A_t = \alpha \cdot Ind_{t-L} + \beta$$

³⁵ On ne peut en effet exclure le cas de figure où le rendement de la pêche est bon mais où la valeur commerciale des captures s'avère tellement faible (ou de façon équivalente, les coûts d'exploitation s'avèrent tellement élevés) que les pêcheurs ne retirent aucun profit de cette exploitation.

avec A_t le nombre de navire(s) acheté(s) par armement pendant l'année t (ce nombre est supposé représenter le niveau d'investissement dans la pêche) et Ind_{t-L} l'indice de rentabilité testé à l'année $t-L$. Le modèle a été testé avec plusieurs valeurs de retards L , de manière à tenir compte des délais de prise de décision et de construction des navires. Chaque variable a ainsi été testée avec trois retards possibles : $L = 0, 1$, et 2 (exprimés en année). Les résultats des régressions ainsi que la procédure du test sont indiqués dans le **Tab.3.1**.

Tab.3.1. Tests de corrélation entre l'investissement (le nombre de navires A_t acheté par armement pendant l'année t) et la rentabilité de la pêche. Les indicateurs de rentabilité testés sont la production par armement PR/armt ; le bénéfice par armement BF/armt ; le rendement global de la pêche RD_{glob} ; le rendement en valeur marchande pRD_{glob} . Chacun de ces quatre indicateurs est testé avec trois retards possibles $L = 0, 1, 2$ (en année) ; Le modèle générique de la régression est : $A_t = \alpha \cdot \text{Ind}_{t-L} + \beta$ avec A_t le nombre de navire(s) acheté(s) par armement pendant l'année t et Ind_{t-L} l'indice de rentabilité de l'année $t-L$. Procédure du test : $H_0 : \alpha = 0$; $H_1 : \alpha > 0$. Si $t_{\text{obs}} > t_{\text{théor}}$ rejet de H_0 . Les valeurs du t -Student théoriques (à 10 et 5%) en risque α sont indiqués dans la seconde colonne à gauche, avec les trois degrés de liberté (d.l.) correspondant aux trois retards testés.

retard L	(d.l.) $t_{\text{théor.}}$	Indicateur testé	α estimé	$t_{\text{obs.}}$	Test
$L = 0$	(14) $t_{0.10} = 1.345$ $t_{0.05} = 1.762$	PR/armt	4.92	0.071	ns
		BF/armt	- 5.19	-0.001	ns
		RD_{glob}	-39.32	-2.373	ns
		pRD_{glob}	-275.6	-0.171	ns
$L = 1$	(13) $t_{0.10} = 1.350$ $t_{0.05} = 1.771$	PR/armt	-20.77	-0.288	ns
		BF/armt	- 1.97	-0.183	ns
		RD_{glob}	-732.7	-0.111	ns
		pRD_{glob}	- 9.27	-0.006	ns
$L = 2$	(12) $t_{0.10} = 1.356$ $t_{0.05} = 1.783$	PR/armt	100.91	1.338	ns
		BF/armt	4496.6	0.138	ns
		RD_{glob}	3.03	1.064	ns
		pRD_{glob}	1861.6	1.073	ns

ns = non rejet de H_0 : l'investissement n'est pas corrélé à l'indicateur de rentabilité testé.

Les résultats du **Tab.3.1** indiquent que le niveau d'investissement agrégé n'est relié à aucun des quatre indicateurs testés, ceci quel que soit le retard envisagé. La dynamique standard d'investissement, qui supposait que l'investissement est une fonction positive du profit enregistré pendant les périodes antérieures, n'est par conséquent pas celle qui a été à l'origine du développement de la flotte. En d'autres termes, sur la période 1983-1994, les pêcheurs ne se sont pas basés sur la valeur de leurs profits pour décider des investissements qu'ils ont entrepris.

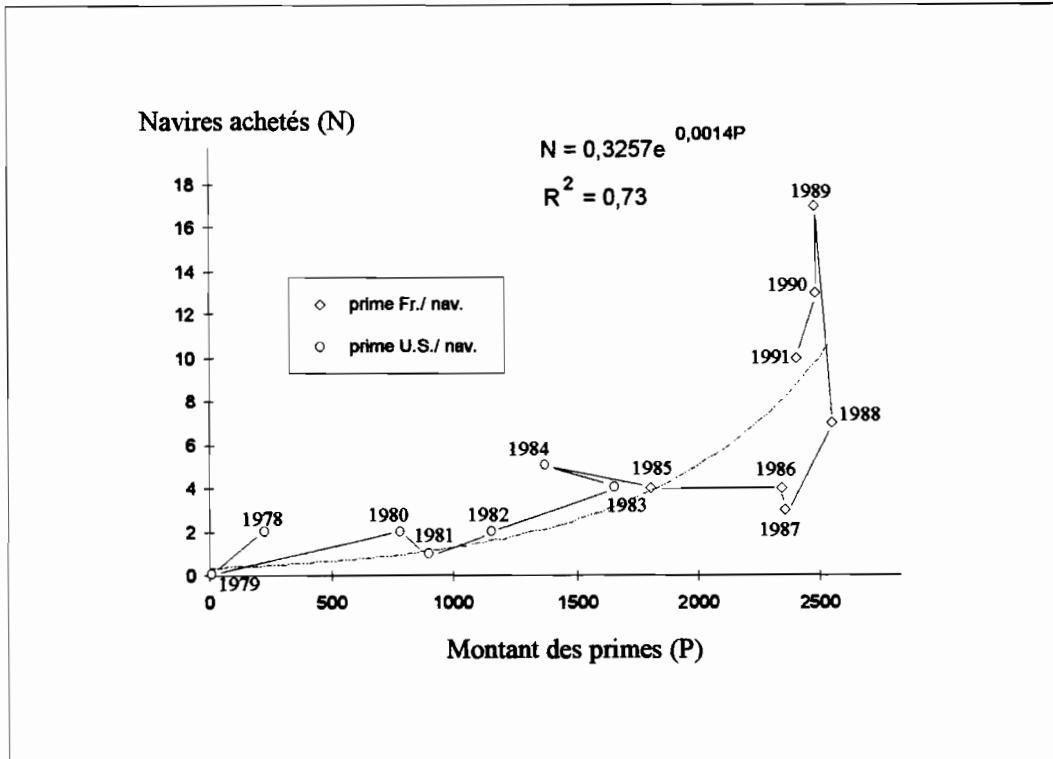


Fig.3.10. Relation entre le nombre de navires achetés par les armements français sur les chantiers navals américains (ronds) et français (losanges) en fonction des montants des aides (en milliers de FF) allouées par navire acheté. La relation est de type exponentiel : $N = 0,32e^{0,0014P}$ ($R^2 = 73\%$) (Source : IFREMER Cayenne et CCI Guyane).

Cette absence de relation entre le niveau d'investissement dans la pêche et celui des profits peut être une des raisons pour lesquelles le modèle dynamique (3.11) ne correspond pas au profil observé empiriquement. Cette remarque nous amène à la question suivante : si le profit n'a pas été le moteur de l'investissement comme le voudrait la théorie, quel a donc été le facteur qui a joué ce rôle ? En d'autres termes, quels sont les éléments qui ont supplanté les indicateurs standard d'investissement ?

3.2. Recherche sur les causes de distorsion de la dynamique d'investissement

La réponse à cette question se trouve dans l'historique de la pêche et plus particulièrement dans l'analyse de la période de francisation. Cette analyse va en effet montrer que les aides qui ont été proposées aux armateurs français dans le cadre de cette francisation ont joué un rôle prépondérant dans l'expansion de la flotte française. L'argumentation de cette hypothèse représente le sujet du reste de la section. Commençons par décrire les différents éléments qui nous ont amenés à considérer cette hypothèse.

La Fig.3.10 représente l'évolution du nombre de navires achetés par la flottille française en fonction du cumul des aides proposées pour l'achat de nouveaux navires. La relation est de type exponentiel. On retrouve en fait ici le profil exponentiel observé au niveau du plan de phase de la Fig.3.8. La Fig.3.11, quant à elle, donne quelques précisions sur la manière avec laquelle ces aides ont été allouées. Le diagramme du haut représente l'évolution des montants des primes pour les navires achetés respectivement aux États-Unis et en France. Le diagramme du bas précise la répartition de ces commandes entre les différents chantiers navals des deux pays. Les navires français dont les coûts de fabrication et de transport étaient beaucoup plus élevés que ceux des navires U.S. (de 1 à 1.5 millions de Francs) (Anon. 1991) s'avéraient de plus moins bien adaptés aux conditions de travail rencontrées dans les eaux subtropicales. On observe d'ailleurs qu'à subvention égale (1978-1984), les chalutiers américains ont été systématiquement préférés aux navires français. Le commentaire d'un responsable d'armement interrogé à ce sujet est sans équivoque : « *À équipages simples, bateaux simples ; à quoi bon toucher des subventions si les bateaux ne marchent pas* ».

La préférence des armateurs français pour les navires américains ne put être compensée que par des subventions 'gonflées' en faveur des navires français³⁶. Les chiffres indiquent que ces primes atteignirent jusqu'à 2.5 millions de Francs par navire à partir de 1986 (cf. Fig.3.12). Ceci représente environ 50% des coûts d'acquisition des navires français (Anon 1991). À ces aides importantes, il convient d'ajouter l'impact de la Loi de Défisicalisation de 1986 (loi Pons³⁷). Cette loi, votée initialement dans le cadre d'une politique d'aide au développement de l'activité industrielle en DOM-TOM, eu dans le secteur de la pêche un impact tout particulier, en Guyane mais aussi à la Réunion et en Nouvelle Calédonie (voir ci-après). Elle permit en effet à un nombre important d'investisseurs d'acquérir des bateaux à des conditions très avantageuses. Elle a, de plus, été considérée par les pouvoirs publics comme une occasion de relancer les chantiers navals français. En Guyane, les décideurs y virent par conséquent la possibilité de faire d'une pierre deux coups : (i) assurer en partie le succès de la francisation en stimulant l'achat de nouveaux navires et (ii) redonner un 'second souffle'

³⁶ De 1985 à 1987, les licences d'importations de chalutiers étrangers furent même suspendues, pour permettre aux chantiers navals français de bénéficier pleinement des retombées de la loi Pons (cf. infra). Pendant cette période, seuls des navires construits par des chantiers français purent être achetés. Cette mesure protectionniste fut cependant supprimée à la fin 87 sous la pression des professionnels.

³⁷ La loi Pons permettait de déduire l'équivalent des investissements engagés sur les Territoires et Départements d'Outre-Mer en dégrèvements sur les impôts des sociétés ou des particuliers.

aux chantiers navals français. Cependant, s'il faut en croire Le Duff (1993: 15), cette loi Pons n'eut pas que des conséquences positives. « *Le raz de marée de commande de bateaux défiscalisés est un phénomène trop important pour engendrer l'indifférence. Et les réactions que cet événement suscite ne vont pas toutes dans le sens d'une approbation* ».

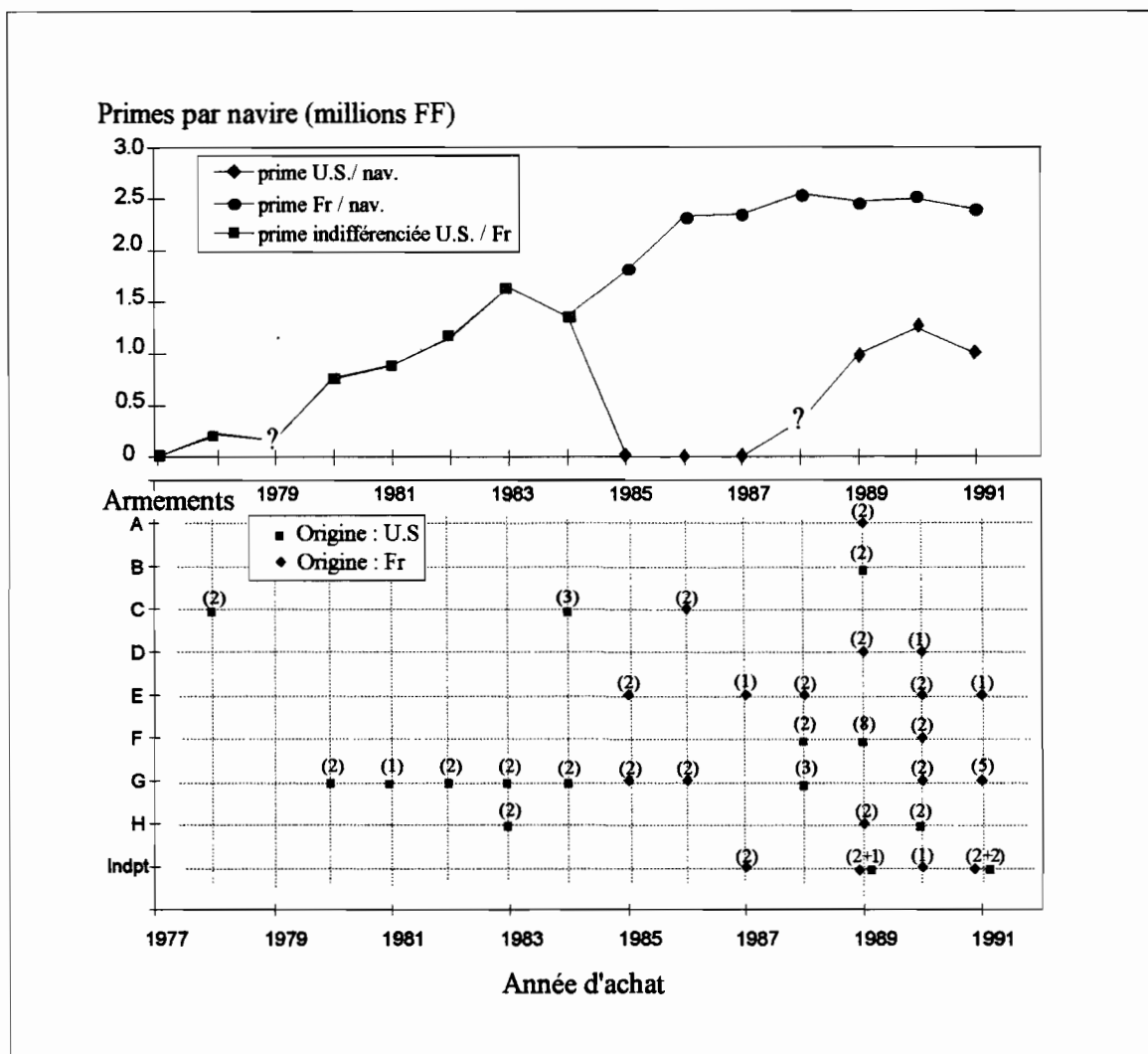


Fig.3.11. Diagramme du haut : évolution des montants des primes pour les navires achetés aux États-Unis et en France entre 1977 et 1991. Diagramme du bas : répartition de ces achats entre les chantiers navals américains (carrés) et français (losanges). Sur l'axe Y les différents armements français sont représentés par une lettre. L'ensemble des crevetiers-artisans a été regroupé sous la dénomination Indpt. Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre de navires achetés par armement. De 1985 à 1987, les licences d'importations de chalutiers étrangers furent suspendues (représenté sur le diagramme du haut par des valeurs nulles pour les primes U.S.) Pendant cette période, seuls des navires d'origine française purent être achetés par les armements guyanais. À partir de 1988, les achats se répartirent entre les chantiers navals américains et français (Source : IFREMER Cayenne et CCI Guyane).

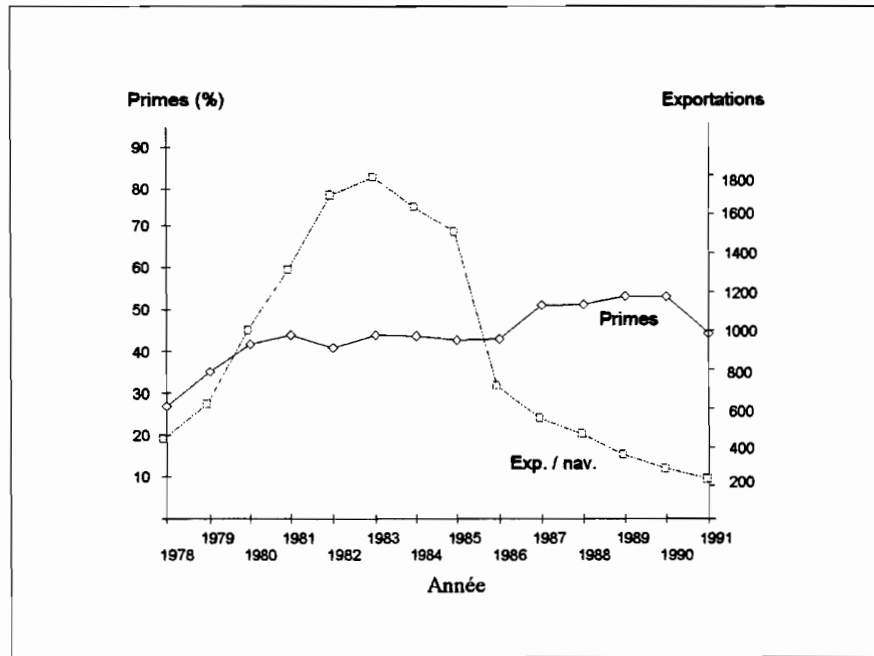


Fig.3.12. Évolutions conjointes des primes à l'achat (en pourcentages du coût total de l'investissement) et de la profitabilité de la pêche (exprimée par la valeur commerciale (en milliers de FF) des exportations par navire). (Données annuelles, sources : Primes : CCI Guyanes et Anon 1991, Exportation : CCI Guyane et IFREMER-Cayenne).

Le Duff cite ainsi un haut fonctionnaire de l'administration maritime qui (tout en souhaitant rester anonyme) s'exprime à propos des armateurs en ces termes « *On sent bien qu'ils n'évoluent pas dans une logique économique et il est notoire que certains bateaux ont manifestement été davantage construits pour faire de la défiscalisation que de la pêche* ». Le responsable des chantiers navals Vergoz (qui construit de nombreux crevettiers guyanais), interrogé sur l'impact de la Loi Pons sur l'expansion des long-liners de la Réunion et de Nouvelle-Calédonie³⁸ exprime le même type de remarques : « *Ce n'est pas possible de mettre autant de bateaux en service. Après le programme des crevettiers, voilà celui des long-liners !* »

Bien que ces opinions ne soient apparemment pas exempts de subjectivité, on ne peut rejeter le fait qu'elles représentent la vision des principaux acteurs concernés par ce problème. Compte tenu de ces éléments et des précisions sur les montants des aides allouées dans le cadre de la francisation, on peut raisonnablement penser que l'ensemble des subventions

³⁸ Les long-liners sont des bateaux de pêches équipés de palangres (des lignes de plusieurs kilomètres de long -d'où le nom des bateaux- où sont accrochés plusieurs centaines, voire plus d'un millier d'hameçons) et sont destinés à la pêche pélagique du thon, de l'espadon, ou de la dorade.

dont ont pu bénéficier les armements pendant cette période de francisation, conjuguées aux incitations de la Loi Pons, sont en grande partie à l'origine de la distorsion de la dynamique d'investissement observée au niveau de la pêche crevette guyanaise. Cette hypothèse est d'autant plus probable qu'à la même époque, l'indice normal d'investissement (représenté par les exportations par navire) chutait de façon notable (cf. **Fig.3.12**). On citera pour l'anecdote le cas de cet armement guyanais qui était déclaré en dépôt de bilan en 1993 et qui la même année commanda 5 nouveaux chalutiers à un chantier naval français (Béné and Moguedet 1994). En remplaçant les indicateurs habituels d'investissements et notamment le profit, ces aides ont en fait stimulé artificiellement l'achat de nouvelles unités, malheureusement à la période où les difficultés de commercialisation commençaient à devenir préoccupantes (cf. **Fig.2.17** et **2.18** pour mémoire).

3.3. Deux natures de surinvestissement pour une seule et même pêche

Remarquons que depuis un certain nombre de paragraphes, on associe la surcapacité de la flottille à une distorsion de l'investissement. Pourtant, nous avons suggéré lors du second chapitre que cette surcapacité était due à un tassement de la demande pour les crevettes gyanaises découlant de la libéralisation des marchés mondiaux. Alors, quelle est la véritable origine à cette surcapacité, la libéralisation des marchés ou la distorsion de l'investissement ? En fait certainement un peu des deux. Une manière de s'en convaincre est d'observer l'évolution des navires actifs et celle des navires armés³⁹ et de comparer ces deux séries au nombre total de navires présents dans la pêche. La **Fig.3.13** est obtenue en combinant ces trois séries sur l'axe Y et celle du nombre des armements français sur l'axe X (précisons encore une fois qu'il ne s'agit que des navires et des armements français).

De l'observation de cette figure ressortent plusieurs remarques. Le fait qu'à partir de 1986, le nombre de navires armés soit supérieur au nombre total de bateaux achetés neufs, peut sembler dans un premier temps surprenant. Ceci est dû au rachat, entre 1986 et 1987, de l'ensemble des 13 unités japonaises encore présentes dans la pêche par un des armements français⁴⁰.

³⁹ Dans le cas présent un navire est dit "armé" si l'armement qui le possède l'a enregistré auprès des Affaires Maritimes et qu'il est par conséquent autorisé à prendre la mer au cours de l'année civile en cours.

⁴⁰ Ces derniers n'étant pas neufs, ils ne sont pas comptabilisés dans la série des navires achetés neufs. Ils apparaissent néanmoins dans celle des navires actifs (et par conséquent armés).

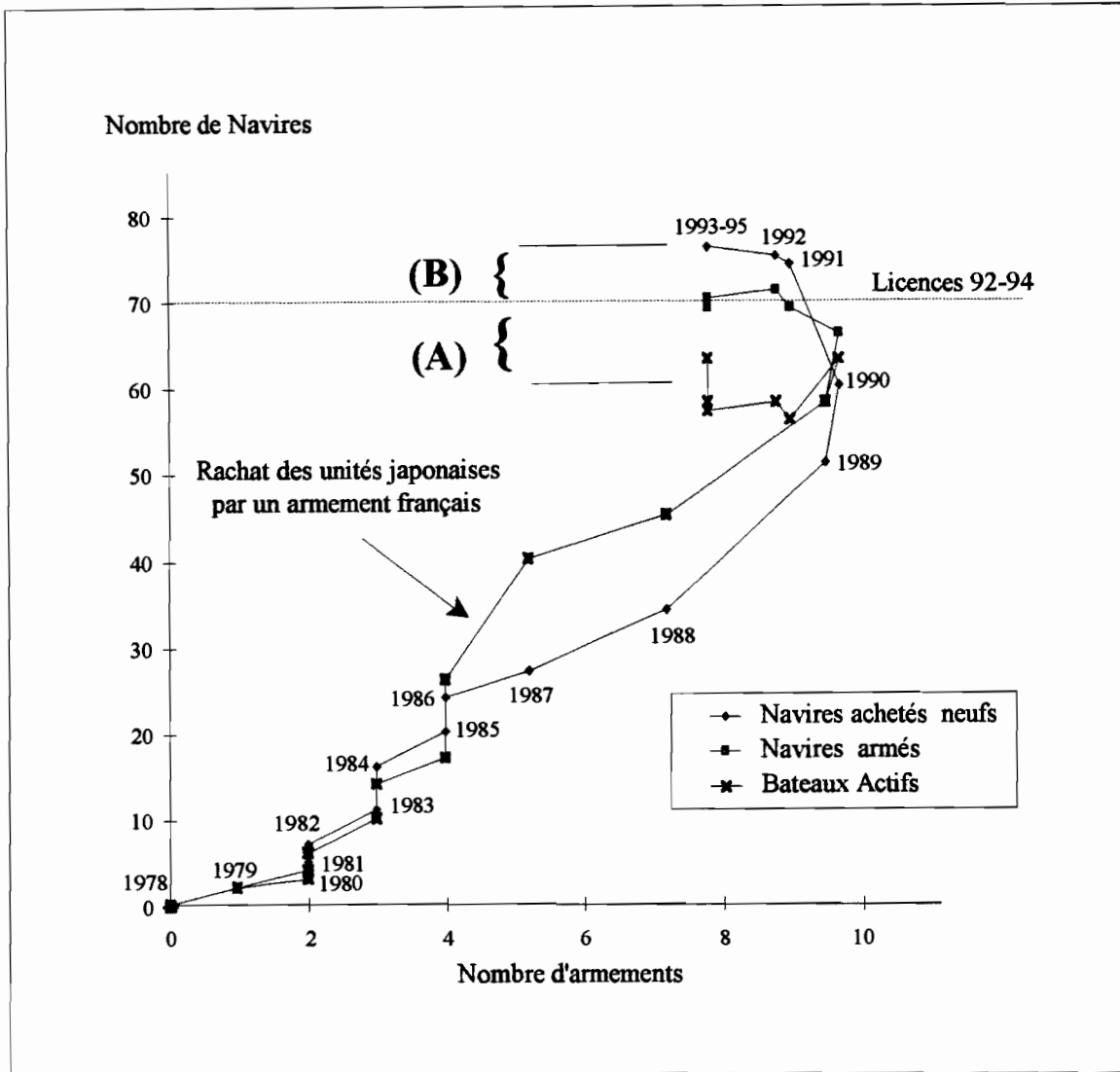


Fig.3.13. Évolution simultanée des groupes de bateaux (axe Y) correspondant à différents critères (voir légende) et du nombre d'armements français dans la pêche (axe X) sur la période 1978 -1995. L'écart (A) peut être interprété comme le symptôme d'un surinvestissement 'de conjoncture' né de la libéralisation des marchés internationaux (suite à l'arrivée des crevettes d'aquaculture). L'écart (B) quant à lui correspond à un surinvestissement stimulé par la combinaison des aides générées par le processus de francisation et la loi Pons (voir le texte pour commentaires). Les années associées à ces différentes courbes sont indiquées sur le schéma en étant accolées à la série du nombre des navires achetés neufs (Source : IFREMER Cayenne).

On retrouve d'une part ce que l'on avait observé au cours du Chap.2, à savoir que les armements ont immobilisé une partie de leurs navires à partir de 1990 (cf. Fig.2.22 pour mémoire). Ici ce phénomène est observable par le fait que la courbe des navires actifs et celle des navires armés restent confondues jusqu'en 1990 mais divergent ensuite après cette date : le nombre des navires armés continue d'augmenter, suite à de nouveaux achats, alors que celui des actifs chute (cf. écart (A) sur la Fig.3.13). Nous avons interprété ce comportement dans le Chap.2 comme étant celui d'une adaptation des armements aux problèmes de

commercialisation : les armements développèrent cette stratégie dans le but de réduire l'effort de pêche et ainsi les écarts entre leur production et la demande du marché français. Cet écart (A) est donc le symbole (ou le symptôme) d'une surcapacité de la flotte engendrée par la libéralisation des marchés et le tassement des exportations vers la France.

Cependant, un second écart est observable. Il correspond au fait qu'à partir de 1990, le cumul des navires achetés neufs dépasse celui des navires armés. Ce phénomène est représenté par l'écart (B) sur la **Fig.3.13**. Rappelons si nécessaire que le nombre de bateaux armés est limité par le quota de licences délivrées par les Affaires Maritimes⁴¹. Or ce quota a été fixé depuis 1992 à 70 pour les navires membres de l'U.E.. Le fait que le total des navires acquis par les armements dépassent ce quota dès la première année de l'instauration du système de licence (obligeant les armements à garder un certain nombre de crevettiers désarmés) est l'expression d'un surinvestissement qui n'est en rien lié aux évolutions des marchés internationaux et/ou nationaux mais bien aux aides dont les montants, incorrectement estimés, ont stimulé des investissements au-delà même des limites fixées par le système de licences.

Dans les faits, il n'est bien entendu pas possible de faire la distinction entre l'impact de l'une et de l'autre des deux sources de surinvestissement. On peut cependant s'attendre à observer une certaine hiérarchie dans les degrés de rentabilité entre les navires non armés et ceux non actifs. Les navires non actifs correspondraient aux navires les moins rentables parmi ceux qui sont susceptibles de prendre la mer alors que les navires non armés correspondraient à des navires encore moins rentables. Cette hypothèse n'a cependant pas pu être vérifiée. Il faudrait pour cela pouvoir analyser les charges d'exploitations de chacun des navires au sein de chacun des armements⁴².

3.4. Pourquoi tant d'aides ?!

Avant de clore ce chapitre, il reste à répondre à une dernière question. Si les aides nécessaires à la réussite du programme de francisation ont été surestimées, d'où vient cette surestimation ? En d'autres termes, sur quelles bases les pouvoirs publics se sont-ils appuyés pour évaluer les besoins des armements en matière de subvention ?

⁴¹ Cf. Encadré 2.2 pour mémoire.

⁴² De plus, le degré de rentabilité des navires dépend de l'armement. Un navire non-rentable pour un armement peut l'être pour un autre.

Une hypothèse possible est celle qui consiste à mettre en avant les écarts entre les coûts de construction des chantiers navals français et ceux des chantiers américains et de suggérer que les aides aient été calculées de manière à compenser ces écarts. Le fait que les aides pour l'achat de navires construits en France soient systématiquement supérieures à celles allouées pour l'achat de navires américains est un argument qui va dans ce sens (cf. **Fig.3.10** pour mémoire). Cependant, cette interprétation n'est pas suffisante. Elle n'explique pas, par exemple, pourquoi pendant les trois années où l'importation de navires américains fut interdite⁴³, les aides à l'achat de navires français continuèrent d'augmenter (cf. **Fig.3.11**) alors que rien ne justifiait apparemment cette augmentation (les chantiers navals français étant pendant cette période les seuls sur le marché). En fait, il faut rechercher les raisons de ces aides disproportionnées dans les différentes étapes de gestion qui ont constitué le processus de francisation. Il convient ainsi de rappeler que ce programme de francisation entraîna au moment de sa mise en place un certain nombre d'interrogations de la part des pouvoirs publics. Ces interrogations, légitimes, concernaient en premier lieu la quantité de crevettes qu'il était biologiquement possible d'extraire sans danger pour le stock⁴⁴ mais aussi le nombre de navires qu'il était économiquement optimal de conserver dans la flotte pour atteindre et maintenir le taux d'exploitation souhaité. En d'autres termes, il s'agissait de savoir : quelle production et avec combien de navires ?

C'est par rapport à ces interrogations que l'ISTPM, puis l'IFREMER, en collaboration avec l'ORSTOM et l'IEDOM, ont tenté de définir les potentialités de la ressource et la taille 'optimale' de la flotte, dans un premier temps en appliquant la version 'statique biologique' du modèle de Schaefer (Venailles 1979, Stevenson 1981, Garcia *et al.* 1984) puis sa version 'statique économique', i.e. le modèle de Gordon (Le Cabellec 1984, Lebrun et Lemoine 1985). Ces modèles forment la classe des "modèles classiques" (ou modèles 'en cloche') dont nous avons parlé au niveau de l'Introduction Générale et dont le formalisme est rappelé succinctement dans l'Encadré 3.2.

⁴³ Cf. note 36.

⁴⁴ Le fait qu'il n'y ait, ni de relation stock-recrutement, ni de relation de co-investissement, ne signifie pas que la ressource peut supporter des taux d'exploitation illimités (voir McGuire 1990 pour un commentaire acerbe sur ce problème et sur le risque de surexploitation qui en découle).

Encadré 3.2. Les modèles classiques.

Dans leur version "statique biologique" les modèles classiques sont en fait l'application du modèle de Schaefer (1954) déterminé à l'équilibre. C'est d'ailleurs sous cette approche qu'est connu et utilisé ce fameux modèle de Schaefer⁴⁵. La composante biologique de ce modèle repose sur l'équation logistique classique (Verhulst 1838, Pearl 1930) :

$$\frac{dx}{dt} = rx(t) \left(1 - \frac{x(t)}{K} \right)$$

avec $x(t)$ le niveau de la ressource, et K la capacité de charge (the "*carrying capacity*") du milieu, r le taux de croissance intrinsèque. À cette équation logistique, on retranche l'impact de l'exploitation, sous la forme d'un taux de capture Y , exprimé par la relation $Y(t) = qx(t)E$, avec q une constante (la capturabilité, fonction, entre autres, des facteurs éthologiques de l'espèce exploitée (voir l'article de Penn 1984 sur l'importance de ce facteur pour le *Penaeides*)), et E l'effort de pêche, supposé constant dans la version statique. On obtient alors l'équation de base du modèle :

$$\frac{dx}{dt} = rx(t) \left(1 - \frac{x(t)}{K} \right) - qx(t)E$$

La solution est déterminée pour le taux de capture $Y^* = qEX^*$ à l'équilibre (pour $\frac{dx}{dt} = 0$) par :

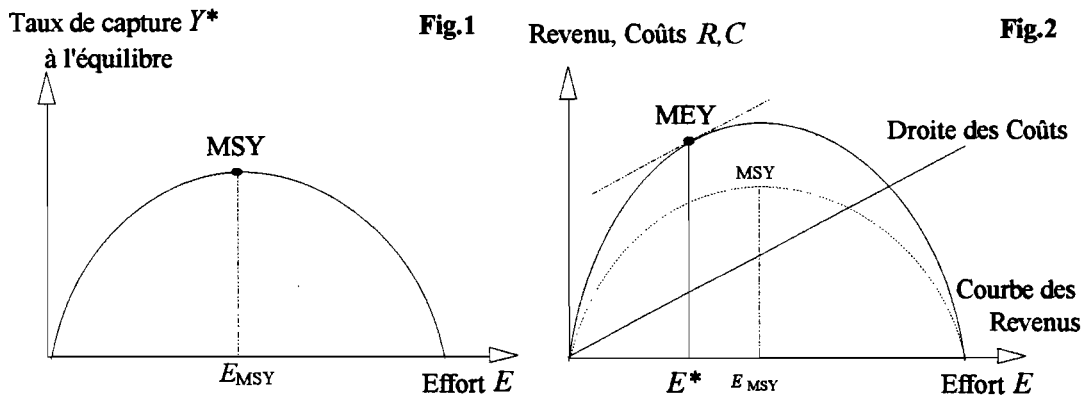
$$Y^* = qEK \left(1 - \frac{qE}{r} \right)$$

Cette dernière équation est celle d'une parabole (d'où le nom de modèles 'en cloche') reliant le niveau d'effort E au taux de capture Y^* à l'équilibre (cf. Fig.1). Son sommet correspond au taux maximum de capture à l'équilibre ou Maximum Sustainable Yield (MSY).

Gordon proposa une extension à ce modèle en intégrant deux nouvelles équations, celle du revenu R supposé proportionnel aux captures selon la relation linéaire $R = pY^*$, avec p le prix du poisson et Y^* la parabole de la Fig.1, et celle du coût d'exploitation C supposé proportionnel à l'effort : $C = cE$ générant la « droite des coûts » de la Fig.2.

continué page suivante

⁴⁵ Cf. note 19 pour commentaires.



Le Maximum Economic Yield (MEY) correspond au niveau d'effort E^* pour lequel la différence entre les coûts d'exploitation et les revenus est maximale. C'est la version "statique économique" du modèle global. Notez que E^* est inférieur au E_{MSY} de la Fig. 1.

La version dynamique du modèle (Schaefer 1954, Smith 1968) est obtenue en considérant que l'effort E n'est plus constant mais fonction de l'investissement :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = rx(t)\left(1 - \frac{x(t)}{K}\right) - qE(t)x(t) \\ \dot{E}(t) = n\pi(t) \end{cases}$$

avec le profit $\pi(t)$ défini comme résultant de la différence entre les revenus des captures et les coûts d'exploitation, i.e. $\pi(t) = pqX(t)E(t) - cE(t)$. Le prix p et le coût unitaire d'exploitation c sont supposé constants. Le paramètre n est le coefficient d'ajustement de l'investissement décrit précédemment⁴⁶. Les trajectoires de ce système sont les spirales amorties illustrées par les Fig.3.1 et 3.2.

En identifiant respectivement le MSY et MEY (cf. Encadré 3.2), ces études permirent de déterminer le nombre 'optimal' de navires (biologiquement et économiquement parlant) et ainsi répondre aux questions posées par les pouvoirs publics. En dernier lieu, un modèle de rendement par recrue (Beverton and Holt 1957) fut utilisé (Dintheer et Le Gall 1988), en complément aux études micro-économiques effectuées au niveau des armements (Gilly et Cochet 1988), pour définir la taille de la flotte franco-française qui permettrait une substi-

⁴⁶ Cf. § 1.1.2.

tution complète des dernières unités japonaises⁴⁷ et américaines encore présentes dans la pêche.

Cependant, pour être formulées, toutes ces études se basèrent implicitement sur une hypothèse importante, qui n'avait d'ailleurs à l'époque aucune raison d'être remise en question, c'était celle qui supposait que l'environnement direct de la pêche et celui plus général des marchés mondiaux n'allaient pas évoluer. C'est donc sur la base des volumes d'exportations de l'époque et pour un nombre de navires inchangé (cf. Fig.2.24) que furent calculées les estimations du programme de francisation. Dintheer et LeGall (1988: 47) parlent explicitement dans leur conclusion du « *remplacement 1 pour 1 des crevettiers américains par des crevettiers français* ». La suite des événements montra malheureusement que l'hypothèse de stabilité de l'environnement économique se révéla inexacte. Les mutations des marchés internationaux, déjà entamées à l'époque où furent menées ces études, se confirmèrent par la suite. Ainsi la fermeture des marchés japonais et américains commença dès 1985 (cf. Fig.2.2). Avec le recul, il apparaît par conséquent que les aides, calculées sur l'hypothèse d'une substitution du type « un bateau français pour un bateau étranger », furent, en définitive, déstabilisante pour la pêche, compte tenu du nouveau contexte local et international dans lequel cette pêche fut obligée d'évoluer à partir du milieu des années 80.

~ oOo ~

⁴⁷ L'étude qui amena le document de Dintheer et Cochet (1988) a été faite en 1986, à un moment où il restait encore des navires japonais dans la pêche.

CONCLUSION DU CHAPITRE 3

Au cours de ce troisième chapitre, nous avons déplacé notre centre d'intérêt des variables constituant l'environnement exogène direct de la pêche vers la dynamique interne du système-pêche. Le thème central de ce chapitre a en effet été la dynamique d'investissement de la pêche. Ce processus d'investissement s'avère extrêmement important pour les pêcheries pour deux raisons essentielles. D'abord parce que cet investissement est le phénomène par lequel les pêcheries se développent puis perdurent dans le temps. En faisant appel à une analogie en biologie, nous dirons que l'investissement est la "fonction de grossissement et de renouvellement" des pêcheries. Cette analogie, d'ailleurs, n'est pas vraiment nouvelle. Schaefer l'utilise déjà dans son article de 1954 (p.264 *in* 1991). Plus près de nous, Walters en fait aussi usage à plusieurs reprises dans son ouvrage de 1986. L'étude des processus intervenant au niveau de l'investissement est donc aussi indispensable pour l'halieute que l'est celle de la fonction de croissance des organismes vivants pour le biologiste, et la nature des questions rencontrées en halieutique est en un sens comparable à celle que soulève l'étude de la croissance des organismes en biologie : quels sont les processus qui interviennent dans cette fonction ? Existrent-ils des phénomènes moteurs ou au contraire des processus d'inhibition, de rétrocontrôle, etc. ?

La seconde raison de l'importance de l'analyse de l'investissement dans les pêcheries est liée au constat de surinvestissement dont souffre l'ensemble des pêcheries mondiales. Tous les spécialistes en halieutiques, à défaut de s'entendre sur les moyens de le réduire, s'accordent au moins pour souligner que l'immense majorité des pêcheries souffre de surinvestissement. Devant la généralisation du phénomène, on est d'ailleurs amené à se poser la question suivante : ce surinvestissement est-il le résultat d'un dysfonctionnement chronique du processus "normal" d'investissement (pour continuer l'analogie, le surinvestissement serait-il une sorte de cancer des pêcheries ?), ou bien est-ce que les normes sur lesquelles on se base pour définir le niveau "normal" (ou optimal) d'investissement ne sont-elles pas mal définies. Car enfin, si toutes les pêcheries, sans exception, présentent à un moment ou à un autre de leur évolution les mêmes symptômes, ne serait-ce pas que ces symptômes sont en fait le résultat d'un processus fonctionnant normalement (l'adverbe "normalement" étant alors pris dans le sens étymologique du terme : commun à la majorité, en définissant la normalité comme

étant la majorité) ? En d'autres termes, le surinvestissement tel qu'on le définit classiquement dans la littérature ne serait-il pas un phénomène inhérent au développement des pêcheries ? Ces questions sont quelques unes des interrogations qui ont constitué le fil conducteur de ce troisième chapitre.

La première étape de ces réflexions a donc consisté à rappeler les quelques travaux proposés dans la littérature sur le problème de l'investissement dans les pêcheries. Le point de départ de cette analyse a été la mise en évidence de l'existence de deux propriétés (ou contraintes) qui sont (i) la non-malléabilité du capital et (ii) le co-investissement des facteurs de production. Leur présence simultanée rend le processus d'investissement dans les pêcheries tout à fait particulier. Très peu d'études malheureusement ont abordé conjointement ces deux aspects dans leurs analyses.

Le premier enseignement qui ressort de ces études est que le facteur à la base du processus d'investissement "standard" est le profit. Les études théoriques qui ont été menées sur diverses pêcheries confirment en effet ce que la théorie nous enseigne, à savoir, que le niveau d'investissement est généralement proportionnel à la rentabilité des pêcheries. Le point délicat qui apparaît alors est de savoir comment évolue l'investissement lorsque le profit devient négatif. À cet égard, les études montrent que la vitesse d'ajustement de sortie est généralement moins importante que ne l'est celle d'entrée dans les pêcheries. Autrement dit, les pêcheurs rentrent plus facilement dans une pêcherie qu'ils n'en sortent. L'existence de ce phénomène sous-entend un comportement myope⁴⁸ de la part des pêcheurs, lié, soit à un problème d'information, soit à une forte préférence pour le présent (taux élevé d'actualisation). Il apparaît néanmoins que l'asymétrie des coefficients d'ajustement entrée / sortie résultant de ce comportement d'adhérence peut être atténuée, voire éliminée, si d'autres pêcheries se sont développées dans la même zone d'activité et offrent ainsi aux pêcheurs la possibilité d'adopter une stratégie de substitution.

Le second enseignement est plus ou moins relié au problème du désinvestissement puisqu'il concerne la réduction du capital et plus particulièrement l'obstacle que représente la non-malléabilité de ce capital par rapport à une diminution éventuelle des capacités de pêche⁴⁹.

⁴⁸ Cf. p.159.

⁴⁹ La non-malléabilité du travail qui est associée à celle du capital, est un facteur qui apparaît lui aussi central. La combinaison de ces deux caractéristiques entraîne des implications sociales et politiques importantes. Charles (1992: 196) nous rappelle à ce propos : « *In some fishery case, particularly those of develop-*

Il ressort à ce propos des différentes études que la combinaison de la fluctuabilité de la ressource et de la non-malléabilité du capital est à l'origine de périodes de surinvestissement. Cette combinaison donne au processus de développement des systèmes-pêche un aspect de dynamique en "crémaillère" où investissements impulsions et phases de réduction lente du capital se succèdent. Sous-jacent à cette succession se trouve l'effet du co-investissement entre le niveau d'abondance du stock et celui de l'effort. Les augmentations de la pression sur la ressource accompagnant les phases d'accroissement de la flotte se traduisent généralement au travers cette relation de co-investissement par une baisse des rendements et une augmentation des coûts d'exploitation. C'est cette augmentation des coûts d'exploitation au-delà du coût minimal qui est défini classiquement comme surinvestissement.

Cette dernière remarque nous ramène à la question posée en ce début de conclusion. Si l'on admet (i) que les profits sont générateurs d'investissement, (ii) que la fluctuabilité (positive et/ou négative) de la ressource est un phénomène naturel, (iii) que la non-malléabilité du capital est une caractéristique intrinsèque au secteur de la pêche et (iv) que le co-investissement est un phénomène lui aussi caractéristique des systèmes d'exploitation de ressources naturelles, alors il semble que le surinvestissement est une étape inhérente au développement des pêcheries. Vu sous cet angle, le surinvestissement ne découle pas d'un dysfonctionnement du processus d'investissement, il fait au contraire partie intégrante de la dynamique normale de ce processus. Les phases de surinvestissement sont alors interprétées comme des étapes obligatoires et 'naturelles' du processus de développement des pêcheries. Dès lors qu'il est accepté comme tel, le concept de surinvestissement n'est plus considéré du point de vue économique que comme une imperfection qui vient s'ajouter à celles déjà présentes dans le système.

C'est peut-être alors parce que tenter de modifier un processus normal (naturel) implique d'intervenir sur des mécanismes 'robustes', découlant de comportements individuels rationnels, que les tentatives de contrôle du processus de développement des pêcheries n'ont pas, jusqu'à présent, été couronnées de succès. Cette remarque nous amène à souligner que dans cette analyse nous avons tenté d'expliquer la dynamique d'investissement en considérant la flotte comme unité décisionnelle de base. Par conséquent, sont absentes de cette discus-

ping nations, coordinated policies of disinvestment are impossible for political reasons; since non alternative employment exists for fishermen, governments are reluctant to remove boats from the fishery, when each boat corresponds to a number of fishermen. »

sion toutes les études considérant l'investissement comme le résultat agrégé de décisions individuelles. Selon cette autre approche possible, la dynamique d'investissement observée au sein d'une flottille est vue comme la somme cumulée des décisions engagées à des niveaux individuels. Dès lors, même si chacune de ces décisions satisfait la rationalité économique (par exemple en appliquant la règle de l'investissement marginal), il est reconnu depuis longtemps que le résultat global n'est pas toujours optimal. Cette opposition, parfois dramatique entre le comportement adopté au niveau individuel et le résultat agrégé de la somme de ces comportements est connu depuis longtemps en économie politique. Rousseau y faisait déjà allusion en 1762 : « *Il y a bien de la différence entre la volonté de tous et la volonté générale; celle-ci ne regarde qu'à l'intérêt commun, l'autre regarde l'intérêt privé et n'est qu'une somme de volontés particulières* » (1762: II 3). C'est cette idée, reprise et appliquée à la pêche par Scott (1955), Crutchfield and Zellner (1962), Turvey (1964), et seulement ensuite par Hardin (1968), qui donna naissance au paradigme de l'accès libre menant au surinvestissement et à la surexploitation.

Les réflexions menées dans la seconde et la troisième section de ce Chap.3 concernent les conséquences de la "non-transférabilité" des enseignements présentés ci-dessus à la situation de la pêcherie crevette guyanaise. Pour cette pêcherie l'absence de relation entre l'effort de pêche et le niveau de la ressource mis en évidence au Chap.1 entraîne la non-validité de la propriété de co-investissement. Or les études menées dans la littérature, essentiellement à partir de modèles théoriques, soulignent le rôle d'autorégulation que joue ce co-investissement dans la dynamique normale d'investissement. Dans ces conditions, la question se déplaçait alors vers l'identification du facteur susceptible de remplacer le co-investissement dans ce rôle de régulateur.

Les problèmes de commercialisation qui frappèrent la pêcherie au début des années 90 semblent désigner les marchés comme étant le facteur limitant de substitution pour la régulation de l'investissement. Nous avons choisi de développer une hypothèse découlant de cette observation, en postulant l'existence d'une capacité maximale d'absorption des marchés. Derrière cette hypothèse se trouvait l'idée qu'il existe (spécialement pour les produits de consommation) un seuil limite au-delà duquel une quantité supplémentaire d'un produit ne peut plus être plus absorbée par le marché. Cette limite, qui est étroitement liée à la propension naturelle à consommer, dépend avant tout de facteurs culturels. Notre postulat est

donc que c'est cette capacité maximale d'absorption qui, pour les pêcheries sans relation de co-investissement, joue le rôle de facteur régulateur de leur investissement.

Un modèle dynamique a alors été construit autour de cette hypothèse. Ce système, très simple, décrit la dynamique de développement d'une pêcherie mono-espèce sous la contrainte d'une capacité limite du marché sur lequel elle exporte sa production. L'analyse du modèle amène à plusieurs remarques. Du point de vue de l'interprétation directe, retenons simplement que les trajectoires du système convergent, après un transitoire correspondant à la phase de développement, vers un point d'équilibre stable, que l'on peut assimiler à la phase mature de la pêcherie. L'analyse du système montre que ce point d'équilibre correspond au niveau d'exportation satisfaisant la capacité maximale d'absorption du marché, ceci pour un niveau d'investissement compensant exactement la dépréciation du capital (i.e. pour un investissement normal). Remarquons que tel qu'il est formalisé, le modèle ne génère pas de période de surinvestissement. On peut cependant penser que la prise en compte de délais entre la décision d'investissement et l'arrivée effective des navires dans la pêcherie ou l'introduction d'une variabilité dans la valeur de la capacité d'absorption du marché peuvent aboutir à des périodes d'ajustement et à des surinvestissements temporaires au cours de la phase de maturation.

Sous sa forme actuelle, ce modèle est certainement très peu réaliste et par conséquent critiquable à bien des égards. Il nous a cependant permis d'atteindre notre objectif, c'est-à-dire, d'identifier la dynamique d'expansion d'une pêcherie sous l'hypothèse d'un marché limité. Nous avons ensuite pu confronter ce comportement théorique avec celui de la pêcherie crevette guyanaise. La comparaison qualitative des deux plans de phase met en avant une divergence notable dans le comportement des solutions. La phase d'investissements "exponentiels" observée pour le système empirique à partir de 1986 ne peut pas être expliquée par la dynamique du modèle théorique. Cette phase d'investissements apparaît d'autant plus surprenante que ces investissements furent entrepris à un moment où la variable habituellement postulée comme étant le moteur des investissements (les profits par navires) chutait de façon substantielle. Cette observation implique l'existence d'une autre source de financement qui soit exogène au système-pêche, et qui permette d'expliquer ce dérèglement de la dynamique d'investissement menant à l'"hypertrophie" du capital.

Les éléments d'explication se trouvent dans l'historique de la pêche et plus particulièrement dans l'analyse des moyens mis en oeuvre pour assurer le succès du processus de francisation. L'analyse mit en effet en évidence l'existence de nombreuses subventions dont les montants cumulés couvraient plus de 50% des coûts d'acquisition des nouveaux navires. Mises en place dans le cadre du programme de francisation de la flotte, ces subventions représentèrent des sources de financements extérieures très importantes qui se substituèrent aux indicateurs classiques de rentabilité et entraînèrent une distorsion du processus endogène d'investissement. Remarquons cependant que ce n'est pas la substitution du processus endogène par des mécanismes exogènes qui pose problème, mais le fait que cette exogénéité (sans auto-régulation) apparaisse avoir entraîné la pêche vers des orientations en complète opposition avec celles suggérées par les indicateurs "normaux" d'investissement.

La mise en évidence de cette déconnection entre indicateurs internes et aides extérieures souleva un certain nombre d'interrogations, notamment sur la nature des éléments qui servirent d'aide à la décision pour la planification de la francisation. L'analyse a montré qu'à l'époque, les études scientifiques sur lesquelles les pouvoirs publics se basèrent pour prendre leurs décisions ne prirent pas en compte les premiers signes de transformation apparaissant dans la structure des marchés internationaux. En particulier, ces études basèrent leurs modélisations sur l'hypothèse d'un maintien des échanges entre la Guyane et les marchés américains et japonais à la hauteur de ceux qui avaient été jusque là observés. Nous avons vu au cours du second chapitre que ces hypothèses se révélèrent incorrectes.

Au moment de passer aux réflexions consacrées aux enseignements en terme de gestion, retenons une dernière remarque. L'intervention de l'État dans le secteur de la pêche est généralement présentée comme un outil stabilisateur vis-à-vis des nombreuses imperfections qui caractérisent ces systèmes d'exploitation. Dans le cas présent, il s'avère pourtant que cette intervention, animée initialement par des intentions protectionnistes, a eu dans les faits une influence des plus déstabilisatrices par rapport à la dynamique "naturelle" du système⁵⁰.

Le cas de la pêche guyanaise doit ainsi être vu comme une illustration concrète de l'un des dangers majeurs identifiés par Clark dès lors que l'intervention de l'État est envisagée dans le développement des systèmes halieutiques :

⁵⁰ Le fait que cette remarque apporte de l'eau au moulin d'une école de pensée qui ne correspond pas tout à fait à notre position ne retire rien de sa pertinence.

« Fishery development is frequently actively encouraged by means of government subsidies for vessels and plant construction. (...) such subsidies may be warranted in order to counter the risk aversion of private investors. [C'est exactement ce que le processus de francisation a tenté de faire]. However, it is not only risks, but capital costs themselves, which are reduced by capital subsidies for vessel and plant construction. Unless such programs are combined with vigorous control of the expansion of fishing capacity, severe overexpansion is virtually ensured [C'est exactement ce que le processus de francisation a finalement entraîné]. » (Clark 1985: 248).

Cette analyse est finalement révélatrice des mécanismes et surtout des conséquences que peut avoir la politique publique d'aide à l'investissement. Il faut cependant dépasser rapidement ce constat et chercher à mettre en avant les enseignements que l'on peut tirer de cette étude pour l'avenir de la pêche. La tendance "exponentielle" à l'investissement qui a caractérisé le développement de la flotte française pendant toute la seconde moitié des années 80 est de toute manière aujourd'hui stoppée. On observe même qu'un certain nombre de navires a été immobilisé, voire désarmé⁵¹. Il semble donc que la phase d'expansion de la flotte (ce que Walters (1986) dénomme du terme imagé de "bandwagon growth") soit définitivement terminée, et que l'on ait en fait assisté au cours du début des années 90 au phénomène classique d'ajustement toujours 'douloureux' ("the fallback") séparant la phase de développement d'une pêche de sa phase mature ("the evolutionary development")⁵².

Or, ce qui caractérise en premier lieu les pêcheries matures, notamment par rapport à leur phase de développement, c'est que le niveau d'investissement doit tout juste égaler celui nécessaire à remplacer le capital disparaissant par dépréciation (investissement normal). Le fait de reconnaître que la pêche guyanaise est rentrée dans sa phase mature implique donc un effort particulier par rapport aux risques de surinvestissement. Cependant, puisque ces phases de surinvestissement semblent être des périodes inhérentes au fonctionnement des pêcheries (cf. p.196), et que la dépréciation est un coefficient exogène sur lequel il n'est guère possible d'agir, la seule direction vers laquelle les pouvoirs publics peuvent désormais

⁵¹ Du fait de la non-malléabilité du capital et du caractère mono-espèce de la pêche, les immobilisations représentent la seule réponse que les armements aient pu adopter face à la situation de surcapacité qu'ils connaissent depuis le début de 1990. Il ne reste aujourd'hui comme solution aux armements qu'à attendre que la dépréciation ramène la flotte à une taille en accord avec les possibilités d'absorption du marché.

⁵² Dans ce contexte, l'ouverture ultérieure d'un nouveau marché nécessitant des investissements a-normaux sera désormais vu comme un processus d'ajustement de la pêche mature en réponse à une expansion de la capacité d'absorption du marché et non comme la poursuite de la phase de développement.

œuvrer est celle de la non-malléabilité du capital. La nature exacte des mesures à prendre pour réduire cette non-malléabilité (par exemple par l'intermédiaire de primes de rachats) dépendra ensuite de nombreux facteurs, et leur identification nécessite d'approfondir l'analyse au niveau micro-économique.

La seconde tâche des pouvoirs publics par rapport à ce problème de l'investissement sera de veiller à ne pas réitérer l'erreur faite au niveau du plan de francisation. Il semble à ce propos que la leçon ait été retenue puisque la volonté actuelle est d'aboutir à (voire d'imposer) une restructuration de la pêcherie et non plus d'en favoriser l'expansion. Ainsi, dès novembre 1992, les pouvoirs publics faisaient clairement connaître leur nouvelle position : « *Il faut reconnaître une réalité à laquelle personne ne peut se dérober : (...) Allouer des subventions, même si les finances publiques pouvaient les supporter, même si les règles communautaires de concurrence permettaient de les admettre - ce qui n'est pas le cas - reviendrait seulement à différer les difficultés de quelques mois. Il faut au contraire traiter au fond ce problème structurel* » (Debacq et Simon-Rovetto 1992: 2). Finit donc de la francisation, place à la restructuration.

À ce sujet, remarquons que ce n'est pas tant la taille des armements que la nature de leur coût d'exploitation qui a été à l'origine de l'échec de ces derniers, face à la crise de surproduction. En effet, les trois armements qui n'ont pas réussi à maintenir leur activité pendant la période 1992-1994 n'étaient pas les armements possédant le moins de navires. En d'autres termes, la capacité d'adaptation n'est en rien liée à la taille de l'armement et l'économie d'échelle n'est pas la garantie de survie pour un armement⁵³. Dans ce sens, les plans de restructuration des armements et notamment le projet de fusion proposé par les pouvoirs publics (Hamon et Moulin 1993) ne sont pas l'assurance du succès de l'opération. « *Traiter au fond ce problème structurel* », pour reprendre les termes de Debacq et Simon-Rovetto, ne revient donc pas à la simple fusion des petits armements en structures plus importantes de manière à introduire une économie d'échelle. La persistance des armements, qui est par définition une propriété de long-terme, dépend en fait en grande partie de leurs capacités à

⁵³ On aurait pu penser le contraire et en particulier qu'un certain rapport "taille-adaptabilité" devait exister dans la pêcherie. En théorie, ce rapport existe d'ailleurs certainement, mais pour des structures de coûts comparables : un armement possédant un grand nombre de navires bénéficiera certainement d'une flexibilité plus importante pour réguler son effort de pêche global qu'un armement ayant exactement la même structure de coût mais possédant moins de bateaux. Cette situation provient du fait qu'une partie des coûts fixes est indépendante du nombre de navires.

gérer les problèmes de court-terme, et en particulier ceux nés du déphasage entre la production et la demande. Par exemple, il a été montré qu'un de ces problèmes est celui du besoin de liquidité entraîné par le décalage entre les débarquements et les ventes (Béné et Mouguedet 1996), un problème qui a été confirmé par les observateurs extérieurs (Wilocquet⁵⁴, IEDOM, comm. pers., jan.94). Les coûts de production étant plus ou moins proportionnels aux débarquements (notamment au travers des salaires des marins), ces coûts sont donc plus importants en début d'années. Les rentrées d'argent se font, au contraire, essentiellement en fin d'année. Les armements ont par conséquent besoin de fonds de roulements plus importants (pour faire le lien entre la période de forts rendements et celle de fortes demandes) que pendant la période "américaine" où les captures étaient vendues avant même d'avoir été débarquées. Notons que sur les bases d'une analyse micro-économique des bilans financiers des armements, le rapport Sépia (Anon. 1991) arrive à la même conclusion. La priorité est plus à la réorganisation de l'Organisation des Producteurs Guyanais (l'OPG), seule entité qui semble encore à l'heure actuelle capable d'aider les armements à réussir une réorientation de leurs stratégies commerciales vers les grosses catégories, qu'à une restructuration des armements qui ne pourrait que nuire à l'équilibre fragile qu'il semble actuellement s'être instauré entre les armements guyanais et les importateurs français.

Quant à l'éventualité d'une ré-exportation d'une partie de la production guyanaise sur le marché américain, cette dernière suggestion mérite quelques commentaires. Il est exact qu'actuellement le seul obstacle apparent à cette ré-orientation des exportations guyanaises vers les États-Unis est de nature législatif puisqu'il s'agit de l'embargo sur les crevettes produites par des navires ne possédant pas de TED (Turtle Extruder Device). La solution au problème semble donc être à première vue d'ordre technique : il "suffirait" d'équiper les crevettiers guyanais de ces TEDs. Cependant, la situation n'est pas si simple. Des études menées au laboratoire IFREMER de Lorient ont montré que l'installation de TED sur les chaluts entraîne une baisse non-négligeable des rendements. Dans la mesure où les armements guyanais se trouvent actuellement dans une situation financière délicate, la baisse des rendements (équivalente à une augmentation des coûts de production) qu'entraînerait l'installation des TEDs n'est pas bien accueillie par les armateurs qui craignent une nouvelle chute de compétitivité par rapport aux crevettes d'aquaculture. Si l'État acceptait de se ré-engager

⁵⁴ Directeur adjoint Délégation Guyane.

dans une politique d'aide à la pêche crevettière guyanaise, il est exact qu'il serait alors bienvenu de financer une étude coûts-bénéfices pour tenter d'estimer exactement la faisabilité d'une telle proposition. Mieux encore pourquoi ne pas envisager de comparer (toujours par analyses coûts-bénéfices) les deux alternatives : (i) développement d'un Label "Crevettes de Guyane" avec un recentrage de la production sur les grosses catégories ou (ii) installation de TEDs et ré-exportation vers le marché américain ?

~ oOo ~

CONCLUSION

Chaque fois que nous tentons de donner une solution à un problème, nous devrions essayer aussi rigoureusement que possible de la dépasser plutôt que de la défendre.

K.R. Popper

Il ne peut y avoir d'œuvre achevée que dans l'art.

J. Monod.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les écosystèmes naturels et les systèmes économiques tels que les marchés, divergent sur bien des points. Identité des acteurs, nature des variables, types de flux ou d'information échangés, échelles de temps fonctionnelles, etc., tout ce qui les définit les différencie. Il y a néanmoins un point où ils se retrouvent, c'est celui de la fluctuabilité caractéristique de leur dynamique. Dans ces circonstances, et parce que les pêcheries sont à l'interface entre ces deux types de systèmes (les écosystèmes et les systèmes anthropiques), elles se retrouvent confrontées à un environnement particulièrement fluctuant. Leurs acteurs (les pêcheurs, les armateurs) doivent par conséquent être capables de s'adapter, c'est-à-dire d'intégrer cette fluctuabilité s'ils veulent "survivre" (économiquement parlant). Ce constat représente le point de départ de notre travail de thèse. L'idée directrice qui a été développée à partir de là et qui anima l'ensemble des recherches était de rechercher et d'analyser la manière avec laquelle les pêcheurs répondent et s'adaptent aux différentes perturbations auxquelles ils sont confrontés. Dans le cadre défini par cet objectif, nous nous sommes penchés plus particulièrement sur l'exemple de la pêcherie crevettière guyanaise.

Adaptabilité des acteurs du système-pêche guyanais : synthèse des résultats

Un des principaux résultats des analyses proposées au cours de ces chapitres a été de montrer que l'étude des fluctuations d'abondance d'une ressource n'a de sens que lorsque l'on combine ces fluctuations à celles qui caractérisent les marchés sur lesquels les captures sont exportées¹. Par conséquent, on peut affirmer qu'une part importante de la persistance d'un système-pêche réside dans sa capacité à s'adapter -c'est-à-dire soit à supporter soit à contrôler- les écarts entre sa production (ses captures) et la demande du marché sur lequel il propose cette production.

¹ Nous parlons ici des fluctuations intra ou inter-annuelles du type de celles rencontrées pour les *Penaeides* et pour la majorité des ressources halieutiques, c'est-à-dire, des fluctuations -ou même des variations (cf. note 10 p.7) dont les amplitudes ne prennent pas de valeurs extrêmes. Sont donc exclues de ces remarques les ressources du type ressources instables pour lesquelles les fluctuations de l'abondance peuvent représenter par leurs seules amplitudes (i.e. sans tenir compte des fluctuations des marchés), un problème pour les pêcheries qui les exploitent (cf. Béné 1992).

Plus en détail, les analyses du Chap.1 ont montré que les mouvements qui animent le stock de *P. subtilis* de Guyane s'expriment sous la forme d'une variabilité *intra-annuelle* très saisonnière et d'une fluctuabilité *inter-annuelle* plus erratique. Parallèlement, les analyses du Chap.2 ont souligné que, jusqu'à la fin des années 80, (i) les marchés américains et japonais réussissaient à absorber l'ensemble de la production annuelle guyanaise, ceci quel que soit le niveau des captures -c'est-à-dire, quel que soit le niveau *inter-annuel* de fluctuabilité de la ressource et (ii) que la demande continue de ces deux marchés permettait également d'amortir la forte oscillation saisonnière de la ressource -c'est-à-dire, d'amortir les variations *intra-annuelles* des débarquements. Par conséquent, le fonctionnement pour les armements en activité à l'époque consistait à exporter sans délais ni stockage leur production vers ces deux marchés. Ce fonctionnement, mis en place 'naturellement' au cours du développement de la pêche, a pu être maintenu pendant toute la période où les marchés américains et japonais restèrent accessibles.

En revanche, les analyses ont montré que la ré-orientation des exportations vers le marché français -suite à la fermeture de ces marchés américains et japonais- entraîna de profondes perturbations pour le système guyanais. Les événements à l'origine de ces perturbations sont (cf. Fig.2.7) (i) l'apparition d'un déphasage entre la saisonnalité de la demande sur le marché français et celle caractérisant les captures, (ii) la modification de la taille moyenne de la demande en faveur des petites crevettes, (iii) les problèmes de commercialisation liés à la forte compétitivité des crevettes d'aquaculture. Enfin, les analyses du Chap.3 permirent d'identifier une quatrième source de perturbation : celle que représentèrent les aides du plan de francisation qui par leur importance faussèrent la dynamique d'investissement de la pêche.

Rappelons maintenant la manière avec laquelle les acteurs du système ont réagi à ces différentes perturbations.

- Face à la saisonnalité de la demande, les armements ont adopté la seule alternative possible dans le cas d'une pêche mono-spécifique : développer un mécanisme de stockage, utilisé comme tampon entre la production et la demande. Par l'existence de ce tampon, localisé en partie au Havre et en partie en Guyane, ces armements furent en mesure d'amortir et de réguler le déphasage apparu entre les pics de production et ceux de la demande.
- La seconde perturbation a été l'évolution de la demande en faveur des petits calibres. Cette modification fut imposée par le marché français dont la consommation en petites ca-

tégories tranchait nettement avec celle des grosses crevettes des marchés américains et japonais. L'analyse de cette modification fut intéressante car elle permit de mettre en évidence la manière avec laquelle la perturbation, imposée initialement aux armements, fut ensuite répercutée au niveau des pêcheurs par l'intermédiaire du système de rémunération. Nous avons en effet observé que les armements modifièrent les paramètres de rémunération des capitaines (cf. **Fig.2.14** et **Tab.2.2**) de manière à réduire les écarts de rémunération entre les catégories, et ainsi encourager les capitaines à capturer des petites crevettes. La modification de la composition des captures (**Fig.2.12**) s'est faite par un déplacement de la flottille vers les zones de faible profondeur, là où se trouvent les petites crevettes² (cf. **Fig.2.11**).

□ La troisième perturbation a trait aux problèmes de commercialisation que l'expansion des crevettes d'aquaculture a entraînés pour les pêcheries de crevettes sauvages et en particulier pour la pêche guyanaise. La manière avec laquelle cette perturbation se répercuta au niveau du fonctionnement de la pêche est complexe. La première manifestation de cette évolution des marchés a été observée au travers de la relation de long terme qui s'est établie entre le prix de la crevette guyanaise et celui de certaines crevettes d'aquaculture considérées comme des espèces-indicateurs sur les marchés mondiaux (cf. **Fig.2.15**). L'analyse économétrique de ce phénomène montra d'ailleurs que cette relation introduisait une source de perturbations exogène importante pour le marché de la crevette guyanaise, du fait de la forte volatilité du prix des crevettes d'aquaculture sur les marchés internationaux (cf. **Fig.2.16**).

Les analyses du Chap.2 soulignèrent de même les problèmes de commercialisation important que la pêche connut à partir de 1990 (cf. **Fig.2.18**), problèmes que les armements tentèrent de gérer en immobilisant un certain nombre de navires à quai (cf. **Fig.2.22**). Notons cependant que l'adoption de ce mécanisme n'a été possible que parce que la pêche était structurée en armement. C'est en effet parce que chacun des armements possédait plusieurs navires qu'il put choisir de diminuer son effort de pêche par cette alternative. Il est clair que si la pêche avait été constituée d'artisans-pêcheurs possédant chacun son navire, la diminution n'aurait pu se faire qu'en réduisant la longueur des marées de chaque navire, une stratégie qui n'est pas optimale, du fait de l'existence de coûts fixes par marées.

² Béné (1996) montra par ailleurs que ce mouvement de la flottille à la côte ne pouvait pas avoir comme origine une simple modification de la répartition de la ressource.

□ La dernière perturbation pour la pêche est liée à une distorsion de la dynamique d'investissement pendant la dernière décennie. Les analyses du Chap.3 ont montré que les aides proposées dans le cadre du plan de francisation ont poussé les armements à accroître la taille de leur flottille au-delà du nombre de navires autorisé par le système de licences. Dans ces circonstances, la nature de la surcapacité qui frappa la pêche n'était plus simplement économique, et les armements n'eurent pas d'autre recours que de désarmer une partie de leurs navires. Ces navires ne réintégreront d'ailleurs certainement jamais la flottille active - sauf si le nombre de licences ré-augmente rapidement. Avec le recul, il semble donc que cette dernière perturbation (d'origine politique) représente l'altération la plus importante que le système-pêche guyanais eut à "intégrer" au cours de son évolution.

La situation spécifique des pêcheries crevettières dans les sciences halieutiques

Parallèlement à ces analyses sur l'adaptabilité des acteurs d'un système-pêche, l'étude permet de rappeler une conclusion essentielle concernant les pêcheries crevettières. On se trouve pour ce type de pêche dans une situation en opposition complète avec la vision classique développée par les sciences halieutiques. Selon cette vision classique (et initiale) des choses, c'est la ressource qui représente le facteur limitant et le marché est considéré comme une variable contingente dont l'impact principal sur l'activité de la pêche se trouve lié au caractère volatile et incertain des prix et de la demande. Tout le danger provient dans ce cas de la possibilité de surexploitation de la ressource du fait de sa capacité de régénération limitée. L'orientation donnée jusqu'à très récemment aux recherches halieutiques illustre parfaitement cette vision anthropo-phobe de la réalité. Ces recherches s'étaient concentrées essentiellement sur l'amélioration de la connaissance biologique de la ressource, et notamment sur l'identification de la relation Stock-Recrutement (en rapport direct avec ce problème de capacité limitée de régénération). Très peu d'attention avait par contre été allouée à la dynamique des marchés ou bien à celle des flottilles : « *The obvious importance of fisheries biology to conservation, (...), the precedence of biological information in the decision-making process, and the relative lack of contribution from other disciplines have allowed biology to dominate fisheries management* » (Stephenson and Lane 1995: 2052). Or nous venons de constater au travers de l'étude présente que dans le cas des pêcheries crevettières la situation est renversée : ce n'est plus la ressource mais le marché qui représente le facteur limitant pour l'expansion de la pêche, et c'est la ressource qui cette fois est considérée

comme la variable contingente. Cette affirmation, formulée et présentée de façon volontairement antinomique par rapport à la vision classique de l'halieutique, n'est bien entendu pas à prendre "au pied de la lettre". Elle illustre néanmoins une réalité difficilement contournable : dans le cas présent, les navires ne sont pas restés à quai parce qu'ils étaient trop nombreux par rapport à la ressource et à son taux de renouvellement, mais bien parce qu'ils étaient trop nombreux par rapport à la demande du marché et à son taux d'absorption. Autrement dit, dans ce cas précis, ce n'est pas la rareté de la ressource qui fut la source de la crise, mais bien l'inadéquation entre la demande des marchés et la production de la pêche.

Les limites de l'étude

Passons maintenant à un autre point important de cette conclusion : les limites de l'étude. Au cours des recherches proposées dans les trois précédents chapitres, plusieurs affirmations ont été avancées, certaines basées sur des analyses issues de techniques particulières, voire sophistiquées, d'autres sur de simples observations graphiques, quelques fois confirmées par un test statistique élémentaire. Un certain nombre de critiques ou de remarques peuvent être formulées à l'égard de chacune de ces analyses, que ce soit sur la technique utilisée, ou sur le concept qui amena à l'usage de cette technique.

Les travaux sur le déterminisme du recrutement

L'étude du recrutement de *P. subtilis* proposée dans le chap.1 (section 2) repose sur l'usage conjoint d'analyses de séries temporelles et de techniques de régressions non-linéaires. La prise en compte des deux concepts sous-jacents à ces techniques (la structure temporelle et la non-linéarité des phénomènes environnementaux et biologiques étudiés) a été largement justifiée³. Il a en particulier été souligné que ces deux concepts correspondent à des réalités empiriques incontestables. Ce n'est donc pas tant au niveau de ces concepts que les critiques doivent porter (bien que les arguments avancés puissent toujours être discutés) mais plutôt au niveau de la manière avec laquelle ces derniers ont été intégrés dans les modèles statistiques utilisés. Sur ce plan, que ce soit l'approche Box and Jenkins (1979) employée pour l'analyse des séries chronologiques (Chatfield and Prothero 1973, Maddala 1992) ou l'algorithme de Breiman and Friedman (1985) utilisé pour rendre compte de la non-linéarité

³ Cf. Chap.1- § 2.2. et § 2.3.

des processus (Hastie and Tibshirani 1990, Cury et al. 1995), ces deux méthodes sont relativement délicates à manipuler et les résultats s'avèrent sensibles à un certain nombre de détails de procédures⁴. Ces remarques, qui sont d'ailleurs généralisables pour la plupart d'entre elles aux autres techniques d'analyses de séries temporelles et aux autres algorithmes de régressions non-linéaires, nous ont obligés à nous entourer d'un certain nombre de précautions et à manipuler ces techniques avec prudence. Nous nous sommes, pour cela, appuyés sur l'expérience des Dr. P. Cury et R. Mendelssohn qui avaient utilisé ces techniques à plusieurs reprises auparavant (Mendelssohn and Cury 1987, Cury and Roy 1989).

La seconde remarque que l'on peut faire à l'égard de cette étude sur le recrutement de *P. subtilis* concerne la nature de l'indice de recrutement qui a été utilisé pour mener les analyses. En l'absence d'estimation directe du recrutement, c'est la série des captures par unité d'effort (CPUE) de la plus petite catégorie commerciale qui a été utilisée (cf. Chap.1.- § 2.7.3.). Le fait que cet indice se révèle très largement corrélé à la répartition spatiale de l'effort de pêche (cf. **Tab.1.1**) nous oblige, là aussi, à adopter un discours réservé. En particulier, on rappellera ce que nous avons déjà noté : « *Pour les ressources dont la distribution apparaît fortement structurée spatialement comme c'est le cas pour les Penaeides, l'adoption de cette approximation peut se révéler dangereuse. En effet, si les données commerciales sont utilisées comme indice de recrutement sans que la dynamique spatiale de la flottille soit elle aussi intégrée à l'analyse, alors, les estimations des stocks basées sur ces analyses seront à interpréter avec prudence* » (p.43).

Usage de la modélisation dynamique dans l'étude de l'interaction ressource-flottille

L'analyse de l'interaction ressource-flottille, menée par l'intermédiaire du système dynamique IC-SHC (cf. Chap.1 - section 3), peut amener à de nombreux commentaires en plus de ceux déjà formulés au niveau du Chap.1. Nous avons choisi de revenir dans cette discussion, non sur l'aspect technique du modèle⁵, mais plutôt sur les critiques qui peuvent être exprimées vis-à-vis de son formalisme extrêmement simple. La critique majeure formulée à l'égard des

⁴ Nous avons par exemple souligné dans le Chap.2 l'existence de "l'effet Slutsky", c'est-à-dire, le fait que les techniques de stationnarisation des séries par différenciation pouvaient entraîner l'apparition de processus MA (moyenne mobile) dans les séries transformées alors que les séries brutes n'en possédaient pas (cf. note 31 p.127).

⁵ On pourrait par exemple parler des problèmes méthodologiques que l'étude du modèle SHC forcé entraîne.

CONCLUSION

modèles analytiques "simples" peut être synthétisée par les écrits de Wang and Gutierrez (1980: 448) : « *these models are apparently unable to capture the essence of the biological interaction even over a limited interval of time. For this reason inferences about population behaviour over many generations are quite beyond the utility of these models. (...) great care should be exercised when making biological inferences based on the results of such studies.* » Conscients de ces critiques formulées essentiellement par les partisans⁶ des modèles "complexes" (ce que Holling (1966) dénomme les "*tactical models*") à l'égard des modèles "simples" (les "*strategic models*"), nous avons néanmoins choisi d'adopter un modèle au formalisme "minimal" pour représenter l'interaction ressource-flottille⁷. L'argumentation de ce choix avait été esquissée au niveau de l'Introduction Générale lorsque nous avons souligné la relative simplicité "naturelle" du système guyanais et les implications que cette simplicité induisait en terme de modélisation⁸. Ce choix peut cependant être réaffirmé selon une autre argumentation, explicitée ci-dessous.

Ce qui dessert les modèles mathématiques, c'est leur pouvoir de reproduction (dans le sens imitation) : « *There is always some model which can be constructed to mimic a given pattern of real world behavior* » (Clark et al. 1979). Dans ces conditions, le critère de validation trop souvent adopté (au travers d'indices tels que les moindres carrés) est leur capacité à reproduire *quantitativement* la réalité qu'ils sont censés synthétiser. La conséquence directe est une tendance à sacrifier la raison d'exister de ces modèles dynamiques, c'est-à-dire, leur capacité à aider à la compréhension d'un phénomène (leur rôle didactique), dans le but d'en améliorer la capacité de représentation (le réalisme). C'est ainsi que l'on observe de plus en plus dans une certaine littérature des modèles avec plusieurs dizaines, voire une centaine, de variables, proposés dans le seul but de reproduire le plus de fidèlement possible un ou plusieurs processus biologiques, physiques, anthropiques, etc.⁹.

⁶ Dans le "camp" des partisans des modèles "complexes", en plus de Wang ou Gutierrez, des chercheurs comme Den Boer (1981), Bradley (1982), Onstad (1988) ont pris le relais de Watt (1966) et d'Holling (1966). À l'autre extrémité, les précurseurs des modèles analytiques "simples" sont Levin (1966) et May (1973) relayés ensuite par Clark (1976.a, 1985) ou Beck (1981). Pour une position "intermédiaire", voir Williamson (1972) ou Caswell (1988,).

⁷ On rappelle qu'un modèle est dit "minimal" lorsqu'il possède le nombre minimal de variables permettant de formaliser la question à laquelle il tente de répondre (cf. note 34 p.47).

⁸ Cf. § "La pêche guyanaise : un système halieutique simple", p.11.

⁹ Voir la discussion "The mistaken goal of realism" p. 118 et suiv. et la Fig.5.6 p.123 de Peters (1991) sur ce sujet.

CONCLUSION

Cependant, si la reproduction quantitative des processus observés en sortie des systèmes était l'objectif unique de la modélisation, alors les modèles statistiques multi-variables seraient suffisants pour capturer et pour décrire ces processus. Les modèles mathématiques ont aussi un rôle didactique à remplir par rapport aux processus qu'ils représentent. Leur usage est en effet justifié par le fait que le cerveau humain a un pouvoir d'analyse limité. Dans ces conditions, les modèles mathématiques sont à voir comme des outils qui permettent de cristalliser un ensemble d'informations récoltées sur un phénomène complexe, voire sur un ensemble de phénomènes complexes interdépendants, le tout de manière à pouvoir analyser et mieux comprendre le comportement du système résultant de la combinaison de ces phénomènes. Or, comme Wang et Gutierrez (1980) le reconnaissent eux-mêmes : « *Rigorous mathematical analyses can only be done on relatively simple models* ». Par conséquent, la recherche de réalisme ("the goal of realism" dont nous parle Peters -cf. note 9) -jugé d'ailleurs par rapport à une réalité dont la seule image que l'on ait est de toute manière subjective...-, se fait généralement au détriment du pouvoir analytique des modèles.

De surcroît, les mathématiques nous ont appris depuis le XVII^e siècle et le problème des trois corps de Newton que certains systèmes très simples pouvaient révéler des dynamiques proprement imprévisibles. Plus près de nous, les travaux mathématiques de Li (Li and Yorke 1975) repris et vulgarisés par May (May 1975, May and Oster 1976) sur le comportement chaotique de certaines équations en différence rappellent qu'il est vain, dans certains cas, d'essayer de reproduire ou de prédire *quantitativement* ces dynamiques. C'est ce qui amène d'ailleurs certains auteurs à affirmer (un peu à l'image de Popper pour ce qui était des théories) que les modèles ne peuvent pas être validés mais seulement invalidés : « *Proper¹⁰ validation is not a matching game, but rather an effort to explore the limits of model credibility. The establishment of these limits requires invalidation and not validation* » (Clark et al. 1979).

Dans notre cas, une raison supplémentaire est venue renforcer notre choix initial pour un modèle minimal. Cette raison, c'est le fait que les informations concernant le cycle biologique de l'espèce exploitée aient été fragmentaires et ne nous permettaient pas d'envisager un modèle incluant trop de processus. Cette situation nous a donc conduits, (1) à proposer un modèle très simple où le minimum de processus et de variables nécessaires à la description

¹⁰ Et non « Popper's validation ... ».

de la dynamique du modèle ont été introduits selon un principe de parcimonie : « *La formulation de la dynamique répond d'abord à cette exigence : découvrir le bon nombre de variables qui définissent le système de manière telle que la description ait le maximum de simplicité et d'économie* » (Prigogine et Stengers 1979: 117 in 1986), et (2) à privilégier le choix d'une analyse qualitative et non quantitative du comportement du système.

L'apport de la co-intégration

L'analyse de l'impact de la compétition entre la crevette guyanaise et les crevettes d'aquaculture sur le marché français a été réalisée au travers de deux études distinctes. La première était une analyse des liens dynamiques existant entre le prix de la crevette de Guyane et celui de la crevette de Thaïlande. Cette étude a été menée en se basant sur la théorie de la co-intégration. Le cadre d'analyse offert par cette théorie est intéressant puisque cette approche ne pose aucun *a priori* sur la structure des modèles dynamiques qu'elle teste (Engle and Granger 1987, Maddala 1992). Cependant, comme la plupart des techniques statistiques faisant appel à des méthodologies complexes, la co-intégration présente certains inconvénients. Premier de ces inconvénients, les résultats des analyses se révèlent relativement sensibles à certaines caractéristiques des séries temporelles, en particulier à la présence d'instabilité structurelle ("*structural changes*"), un phénomène que l'on observe relativement souvent avec les séries temporelles. Dans ce cas, les tests de racine unité¹¹ sont biaisés en faveur du non-rejet de la racine unité¹² (Perron 1989, Hendry and Neal 1991, Campos et al. 1996). En plus de ces difficultés techniques, l'approche peut également poser des problèmes conceptuels, notamment en terme d'interprétation économique. En effet, la co-intégration n'est initialement qu'une propriété statistique possédée par les séries temporelles lorsque celles-ci sont animées de mouvements communs (Perman 1989, Maurel 1989). Cette propriété "a-théorique" ne prend une signification "théorique" que dans le cas où elle lie entre elles deux séries. Dans ce cas, le vecteur unique de co-intégration matérialise la relation d'équilibre de long-terme, existant entre les séries. En revanche, dès lors que l'étude porte sur plus de deux séries, il est possible que ces dernières soient cointégrées d'une telle manière qu'il n'existe, non pas un, mais plusieurs vecteurs de cointégration. Dans ce cas, ces vecteurs perdent alors toute signification économique (Johansen and Juselius 1990). La co-

¹¹ Cf. Encadré 2.6.

¹² On a, par conséquent, tendance à accepter plus facilement l'hypothèse de non-stationnarité des séries.

intégration ne doit donc pas être vue comme une technique permettant d'apporter systématiquement une interprétation théorique à un phénomène économique observé, même si elle apporte la solution technique à l'analyse statistique de ce phénomène. C'est enfin une technique qui, comme bien d'autres en économétrie, est relativement délicate à manipuler et nécessite une bonne expérience. En ce qui nous concerne, nous avons pu bénéficier de l'encadrement de M. Cadren et F. Lantz, tous deux économétriciens.

À propos des perturbations du marché

La seconde partie de l'analyse concernant l'impact de l'expansion des crevettes d'aquaculture sur le fonctionnement de la pêche guyanaise n'a pas été basée sur une technique particulière ou sur un ensemble de tests regroupés au sein d'une méthodologie établie. Il s'agissait plutôt de l'observation graphique de plusieurs faits que le synchronisme (la corrélation dans le temps) nous a amenés à rapprocher au sein d'un même scénario¹³. Dans un sens, cette manière de procéder se rapproche de la méthode adoptée par les "Singularistes" ("*Singularists theory*") qui s'appuient sur les analyses historiques pour invoquer des relations causales entre des événements uniques et ainsi pouvoir en expliquer l'occurrence. Cette méthode d'analyse souffre néanmoins d'une critique de base. Il est bien connu que l'observation d'une corrélation entre deux, ou plusieurs événements n'est pas obligatoirement synonyme de causalité¹⁴. Notons cependant que cette hypothèse de causalité était (et reste) falsifiable : il aurait suffi pour cela qu'un des processus qui a été modifié (cf. liste en note 13) l'ait été dans le sens contraire de celui qui a été effectivement observé (par exemple que les paramètres de rémunération aient été modifiés dans le sens d'une valorisation des grands calibres) pour que notre scénario soit alors invalidé. Dans ce sens, les hypothèses restent donc testables et notre méthode valable.

L'hypothèse d'une capacité maximale d'absorption des marchés

La dernière partie des analyses concerne l'étude de la dynamique d'investissement. Ce fut l'objet du troisième chapitre. L'outil à partir duquel cette analyse a été effectuée est un mo-

¹³ On rappelle que ces différents événements sont : (i) le changement de répartition spatiale de la flottille qui s'est rapprochée à la côte (ii) la modification de la composition en taille des captures, (iii) la perte des parts de marchés de la production guyanaise sur le marché français, (iv) l'apparition de la tendance positive dans la série des surplus de production cumulée, (v) le changement des paramètres de rémunération.

¹⁴ Voir Beauchamp (1974) pour une revue détaillée du concept de causalité.

dèle dynamique pour lequel le même type de formalisme et la même méthodologie ont été appliqués que pour le modèle d'interaction ressource-flottille, à savoir un modèle analytique simple avec peu de variables et peu de paramètres, une étude qualitative du comportement sans recherche de validation quantitative. Par conséquent, la même critique peut être avancée : un manque de réalisme dans la représentation des processus étudiés. Nous retombons sur l'éternel débat Watt (1966) - Levin (1966) et sur la question du juste compromis à trouver entre pouvoir analytique et simplicité d'un côté et réalisme et capacité descriptive de l'autre. Il est clair que dans notre cas, nous avons opté pour une position proche de celle de Clark (1985: 185) : « *General principles of resource bioeconomics seem more likely to emerge from the study of simpler analytical models which are more amenable to manipulation and study* ».

Néanmoins, la critique la plus vive que l'on puisse faire à l'égard du modèle se trouve dans l'hypothèse de l'existence d'une capacité maximale d'absorption (CMA) du marché (cf. Chap.3 - § 2.2.1.). Bien que cette hypothèse corresponde à un concept réel (le fait qu'un marché ne sera jamais capable d'absorber plus d'une certaine quantité d'un produit, fonction de la propension naturelle à consommer ce produit -nous rappelons ici l'exemple des escargots au Japon de la note 28 p.172), cette hypothèse de CMA apparaît être en opposition avec la conception Walrasienne de l'équilibre offre-demande. Une partie de la critique porte donc en premier lieu sur le bien-fondé théorique de notre modèle.

De plus, du point de vue empirique, la mise en évidence de cette CMA s'avère difficilement testable. En effet, comme pour la majorité des grandeurs macro-économiques, la CMA résulte de l'agrégation de multiples processus interdépendants. Or, il est peu probable que cette combinaison de processus reste inchangée encore longtemps et que la valeur de la CMA, telle qu'elle est mise en évidence au niveau de la Fig.3.9, ne soit pas modifiée prochainement. Par conséquent, notre hypothèse risque de rester à l'état de supposition théorique, de surcroît relativement fragile. Il suffirait par exemple que l'Équateur connaisse des problèmes de pollution ambiante de ses élevages aquacoles (comme cela arriva en Chine en 1993-1994) pour que, de nouveau, les importations de crevette guyanaise s'envoient sur le marché français. Ce qu'il faut donc retenir, c'est que cette hypothèse de capacité maximale d'absorption des marchés correspond certainement à un concept réel, mais que sa mise en évidence reste difficile, du fait de la variabilité qui affecte sa valeur.

Les sciences halieutiques au carrefour des disciplines

Pour clore cette conclusion, recentrons nos propos sur les enseignements que cette étude nous a permis de tirer d'un point de vue méthodologique.

Les sciences halieutiques ont fait un grand pas au cours des années 80 lorsqu'elles ont pris conscience de l'importance d'étudier et d'intégrer le comportement des pêcheurs et leurs capacités d'adaptation dans leurs analyses. C'est dans cet esprit qu'ont pu être développés les concepts de "*fishermen behaviour*", "*fleet dynamics*", ou de "*fishing strategies*". Le plus beau 'porte drapeau' de cette nouvelle approche est sans doute l'article d'Allen and McGlade (1986). Dans ce dernier, ses auteurs ne remettent pas simplement en question de façon magistrale les hypothèses de bases des modèles classiques et les concepts d'équilibres statiques sous-jacents à ces modèles, ils illustrent habilement l'intérêt de substituer ces approches statiques par des modèles dynamiques, du type proie-prédateur, décrivant l'interaction entre ressource et flottille.

Cependant, la remise en cause n'est pas allé assez loin. Le domaine de recherches en halieutique doit être élargi et dépasser cette approche proie-prédateur. Il faut y inclure de manière systématique la dynamique des marchés. Les pêcheries ne doivent plus être simplement perçues comme résultant des inter-relations s'établissant au sein d'un système d'exploitation entre une ressource et une flottille. Elles doivent être perçues comme des entités placées à l'interface entre deux systèmes dynamiques : le système d'exploitation et le système de production¹⁵. Dans ce cadre, le fonctionnement des systèmes-pêche résulte d'objectifs et de contraintes définis par la dynamique biologique de la ressource et celle économique des marchés (Béné 1996 Annexe 1).

Ce couplage dynamique "biologie-économie" impose donc d'évoluer dans un domaine de recherche "global", incluant les deux entités. C'est la raison pour laquelle nos investigations ont aussi bien porté sur la nature des facteurs affectant le processus de recrutement de *P. subtilis* (Béné and Moguedet Annexe 3, Béné and Lobry Annexe 4) que sur les conséquences de l'expansion des crevettes d'aquaculture sur les marchés mondiaux (Béné et Moguedet 1996, Cadren et al. 1996 Annexe 2). Néanmoins, l'objectif étant d'analyser les comportements adaptatifs des pêcheurs, une grande partie des recherches s'est concentrée sur le

¹⁵ tels que nous les avons définis pp.16-17.

système-pêche lui-même et sur ses acteurs. L'analyse du rôle des volumes de stockage dans la viabilité économique du système (Béné and Doyen Annexe 4) ou bien l'étude du système de rémunération comme contrôle du travail des membres d'équipage et des stratégies de pêche des capitaines (Béné 1997) sont deux exemples d'analyses qui ont été menées dans cette optique.

Cependant, l'étude de ce couplage biologie-économie n'impose pas uniquement des exigences sur la *nature* des analyses à engager, il entraîne avec lui des contraintes sur la *manière* de concevoir ces analyses. L'étude de ces systèmes-pêche soulève en effet des questions et fait appel à des analyses qui défient la méthodologie classique, basée sur un cloisonnement des corpus scientifiques. Les systèmes halieutiques se trouvant par les faits à *l'intersection* de plusieurs domaines, l'approche "globale" que l'étude de ces systèmes requiert ne peut plus être simplement multi-disciplinaire (au sens exact du terme, c'est-à-dire : plusieurs disciplines) et se résumer à l'addition des travaux mono-disciplinaires effectués dans chacun des domaines impliqués. La juxtaposition des conclusions proposées par différentes disciplines sur un même objet de recherche aboutit généralement à la mise en évidence des divergences et/ou des points communs dans les questions posées, les méthodologies adoptées et les solutions apportées par chacune de ces disciplines face à ce problème. Cela permet ainsi d'améliorer les connaissances sur ces disciplines et sur la vision respective qu'elles ont du problème, mais non sur le problème en lui-même. Par conséquent, et en référence à la question soulevée par Jollivet et Pavé (1992: 22) : « *les recherches sur l'environnement sont-elles le simple résultat d'une somme de recherches disciplinaires ?* », nous répondrons catégoriquement qu'en ce qui concerne les systèmes-pêche, leurs études ne peuvent se permettre l'adoption d'une méthode d'analyse séquentielle du type : identification du problème, découpage disciplinaire, recherches et résultats disciplinaires puis mise en commun des résultats et synthèse. La mise en évidence ou l'explication de certains phénomènes, processus, ou comportements ne sont en effet quelques fois possibles qu'en *combinant* les savoirs spécifiques et non en les *additionnants*. Cette approche "globale" se doit, par conséquent, d'être inter-disciplinaire (au sens exact du terme, c'est-à-dire : *entre* les disciplines). Ceci signifie combiner les connaissances au niveau des recherches et non simplement au niveau de leur synthèse. Cette combinaison inter-disciplinaire implique donc un échange quasi-permanent, voire quotidien, à deux niveaux : (i) *entre* les disciplines concernées et (ii) *entre* les chercheurs impliqués. La question centrale qui se pose est alors de savoir (i) au niveau

des disciplines, sur quel support cet échange inter-disciplinaire va pouvoir se faire, et (ii) au niveau des chercheurs, sous quelle forme cette inter-disciplinarité va se réaliser.

(i) En ce qui concerne le support de cet échange, l'idée générale qui ressort de façon assez nette des réflexions sur l'inter-disciplinarité présente la modélisation mathématique comme une base possible pour assurer ce besoin : « *la modélisation peut faciliter le dialogue inter-disciplinaire* » (Jollivet et Pavé 1992: 21). Précisons cependant tout de suite que, bien qu'elle remplisse parfaitement ce rôle de *langage commun* entre les diverses disciplines, il est important de veiller à ne pas l'enfermer dans cette unique fonction. La modélisation mathématique a aussi un rôle de "clarification des pensées" au travers d'un aller-retour continu entre le modèle mathématique et le système qu'il est censé représenter. La modélisation induit en effet une étape de formalisation (la "traduction" en termes mathématiques rigoureux d'énoncés ou d'hypothèses explicités initialement de façon plus "informelle") qui, elle-même, renvoie à la phase d'analyse descriptive du système. Cette étape de formalisation mathématique contraint donc celui qui s'engage dans un projet de modélisation à formuler exhaustivement les concepts sur lesquels il bâtit son modèle, à en préciser les processus explicites mais aussi à en identifier les hypothèses implicites, autrement dit, à 'revisiter' plus rigoureusement l'image qu'il se fait du processus ou du système empirique qu'il étudie. « *Tout modèle est un outil d'approfondissement de nos connaissances* » (Tomassone 1992: 437). L'outil mathématique est donc plus qu'un simple support permettant à l'inter-disciplinarité de prendre corps.

(ii) Par rapport à la forme sous laquelle cette inter-disciplinarité peut s'observer au niveau des chercheurs, on trouve deux possibilités. La première solution est celle que l'on a adoptée au niveau de cette thèse : celle d'un 'chercheur généraliste' (i.e. de formation pluridisciplinaire), qui s'appuie sur des connaissances minimales dans chacun des domaines pertinents pour aborder les recherches de manière inter-disciplinaire. Dans ce cas, l'échange inter-disciplinaire est 'intrinsèque'. L'autre solution est celle qui consiste à réunir au sein d'une même équipe des chercheurs de disciplines différentes. C'est par exemple ce qui a été fait dans le cadre du programme d'étude halieutique du Delta Central du Niger entre l'ORSTOM et l'IER (Institut Malien d'Économie Rurale), où une dizaine de spécialistes en anthropologie, économie, démographie, géographie, biologie des pêches, écologie, biométrie et modélisation s'est regroupée pour travailler sur l'étude de ce système halieutique (Quensièrre 1993). Dans ce cas, l'inter-disciplinarité s'effectue entre les membres de l'équipe et l'échange

CONCLUSION

est assuré au prix d'un effort supplémentaire, celui nécessaire à s'élever au-dessus des cloisonnements disciplinaires établis par les cursus respectifs de ces spécialistes. « *L'approche inter-disciplinaire nécessite non seulement la collaboration étroite des différents spécialistes mais aussi d'élaborer au cours du travail un point de vue commun permettant d'intégrer les différentes contributions.* » (Pavé 1994: 356). La réussite du programme dépend donc non seulement des compétences mono-disciplinaires des chercheurs, mais aussi de leurs capacités à communiquer avec les spécialistes des autres disciplines travaillant sur le projet.

Cette deuxième approche de l'inter-disciplinarité, qui nécessite donc « *un travail en équipe pour lequel les chercheurs sont souvent mal aguerris* » (Quensièrre 1993: 217) semble cependant supérieure à la première basée sur le travail d'un généraliste. En effet, bien que résultant d'une définition *commune* des questions de recherche et bien que mettant *en commun* une part des connaissances de chaque discipline, au prix souvent d'une sous-valorisation de chaque discipline (Weber 1993), l'inter-disciplinarité n'en tente pas moins de répondre à des questions *précises*. Or, pour pouvoir répondre de façon satisfaisante à ces questions, le support mono-disciplinaire est désormais indispensable, tant aux niveaux des techniques et des méthodes d'analyses que des théories et des concepts auxquelles elles font référence. Le concept du savant omniscient, valable et possible il y a quelques siècles, voire quelques décennies, ne l'est plus aujourd'hui. Même avec l'accès à une base bibliographique importante pour confirmer et approfondir ses connaissances de base, le chercheur généraliste travaillant seul a quelques fois du mal, pour répondre de façon pertinente aux questions qu'il se pose, à atteindre le niveau de connaissances considéré comme nécessaire (voire minimum) par les spécialistes de chacune des disciplines qu'il côtoie. L'apport de compétences extérieures est par conséquent indispensable pour pallier ces carences méthodologiques et techniques. La teneur de cette thèse en est un parfait exemple. Une partie importante des recherches qui y ont été menées sont le résultat de collaborations étroites avec des spécialistes.

~ o0o ~

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Parce que citer les pensées des autres c'est souvent regretter de ne pas les avoir eues soi-même, et c'est en prendre un peu la responsabilité.

S. Guitry.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ackroyd P., R.P. Hide and B. Sharp, 1990. New-Zealand ITQ system: prospect for the evolution of the sole ownership corporations. Report to MAFF, Wellington, 86 p.
- Adams C.M., F.J. Prochaska, and T.H. Spreen, 1987. Price determination in the U.S. shrimp market. *Southern J. Agr. Econ. Dec.*: 103-111.
- Allen P., 1991. Fisheries: models of learning and uncertainty. In *Pêcheries ouest-africaines, variabilité, instabilité et changement*. P. Cury et C. Roy (eds.), ORSTOM, Paris: 377-389.
- Allen P.M. and J.M. McGlade, 1986. Dynamics of discovery and exploitation: the case of the scotian shelf groundfish fisheries. *Can J. Fish. Aquat. Sci.* 43: 1187-1200.
- Allen P. and J.M. McGlade, 1987. The modelling of human systems: a fisheries example. *Eur. J. Op. Resear.* 30: 147-167.
- Allen T.H. and T.B. Starr, 1982. Hierarchy: perspectives for ecological complexity. Univ. Chicago Press, 310 p.
- Anderson L.G., 1977. The economics of fisheries management. John Hopkins Univ. Press, Baltimore.
- Anderson L.G., 1982. The share system in open-access and optimally regulated fisheries. *Land Econ.* 58(4): 435-449.
- Anon., 1991. Audit de la filière crevette guyanaise. Rapport SEPIA International, Préfecture de Guyane, Cayenne, 176 p. + ann.
- Anon., 1993. L'offre stimule les appétits. *Produits de la mer* 17, janv.-fév.: 42-44.
- Anon. 1994. Compte-rendu de la réunion du Comité de Programme du département Ressources Halieutiques, IFREMER, Nantes 11-12 oct. 1994.
- Arrow K.J., 1968. Optimal capital policy with irreversible investment. In *Value, capital and growth: paper in honour of Sir John Hicks*. J.N. Wolfe (ed.), Edinburgh Univ. Press., Edinburgh. Scotland.
- Aubin J.-P., 1991. Viability theory. Birkhäuser, Berlin.
- Aubin J.-P., 1993. Une métaphore mathématique de l'évolution économique : la théorie de la Viabilité. *Cahiers de mathématiques de la Décision n°9360*. CEREMADE, Université de Paris-Dauphine, 29 p.
- Badouin R., 1987. L'analyse économique du système productif en agriculture. *Cah. Sci. Hum.* 23(3-4): 357-375.
- Bakun A., 1990. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science* 247: 198-201.
- Barber W.B., 1988. Maximum Sustainable Yield lives on. *North Am. J. Fish. Manag.* 8: 153-157.
- Barrett B. and M.C. Gillespie, 1973. Primary factors which influence commercial shrimp production in coastal Louisiana. *Louisiana Wildl. and Fish. Comm. Tech. Bull.* 9: 1-28.
- Barrett B. and M.C. Gillespie, 1975. Environmental conditions relative to shrimp production in coastal Louisiana. *Louisiana Wildl. and Fish. Comm. Tech. Bull.* 15: 1-22.
- Bauer R.T, 1989. Continuous reproduction and episodic recruitment in nine shrimp species inhabiting a tropical seagrass meadow. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 127: 175-187.
- Bayley G.V. and J. M. Hammersley, 1946. The effective number of independent observations in an auto-correlated series. *J. R. Stat. Soc. Ser. B8*: 184-187.
- Beauchamp T.L., 1974. Philosophical problems of causation. Dickenson Publ. Comp., Encino (USA). In C. Walters, 1986 (*op. cit.*).
- Beck M.B., 1981. Hard or soft environmental systems. *Ecol. Modelling* 11: 233-251.

- Beddington J.R., C.M. Watts, and W. Wright, 1975. Optimal cropping of self-reproducible natural resources. *Econometrica* 43: 789-802.
- Bell C., 1977. Alternative theories of share-cropping: some tests using evidence from northeast India. *J. Dev. Stud.* 13: 317-346.
- Belsey D.A., E. Kun, and R.E. Welsch, 1980. Regressing diagnostics: identifying influential data and source of collinearity. John Wiley, New-York.
- Béné C., 1992. La Gestion des ressources instables : le cas des anchois dans le golfe du Lion. Mémoire de DEA de l'Université d'Aix-Marseille II (sous la direction de J. Weber, IFREMER-SEM), 49 p.
- Béné C., 1996. Effects of market constraints, the remuneration system, and resource dynamics on the spatial distribution of fishing effort. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53: 563-571.
- Béné C., 1997. Control of skippers' fishing strategies and crew labour by companies: role of the remuneration system. *Aquat. Living Resour.* 10: 127-136.
- Béné C. (a), Gestion et développement des pêches: l'halieutique entre recherche et contraintes d'expertise. (en révision à *Nature, Sciences et Sociétés*.).
- Béné C. and L. Doyen, Storage and viability of a fishery with resource and market dephased seasonalities. (soumis à *Env. Res. Econ.*).
- Béné C. and C. Lobry, Modelling the fishermen's decision making process: Accounting for the discrete dynamics of the process may change the outcome. (en révision à *J. Biol. Sys.*).
- Béné C. and P. Moguedet, 1994. Technical consultation on sustainable fisheries development in the WECAFC area, a theoretical contribution: the French Guyana shrimp fishery. Caraballeda, Venezuela, 18-22 October 1993, FAO Fish. Tech. Pap. R503.
- Béné C. and P. Moguedet, Global combined to local changes: The case of the French Guyana Penaeid stocks. In Global versus Local Changes in Upwellings Systems. M.-H. Durand, R. Mendelssohn, P. Cury, C. Roy, and D. Pauly (eds.), Édition ORSTOM, Paris. (sous presse).
- Béné C. et P. Moguedet, 1996. Analyse dynamique de la crise dans la filière de production crevettière guyanaise. Contrat CORDET - Ministère des Départements et Territoires d'Outre-Mer n°93 D 001, IFREMER DRV-RH, février, 66 p.
- Berck P., 1979. Open access and extinction. *Econometrica* 47(4): 877-882.
- Bernard O., and S. Souissi, Qualitative behavior of stage-structured populations: application to structural validation. (soumis au *J. Math. Biol.*)
- Berry R. and K. Baxter, 1969. Predicting brown shrimp abundance in the Northwestern Gulf of Mexico. In Proceedings of the World Scientific Conference on the biology and culture of shrimps and prawns. M.N. Mistakadis (ed.), FAO Fish. Rep. 57: 775-798.
- Beverton R.J. and S.J. Holt, 1957. On the dynamics of exploited fish populations. *Fish. Invest. Series* 2(19), Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, London.
- Bjørndal T. and J.M. Conrad. 1987.a. Capital dynamics in the North Sea herring fishery. *Mar. Resour. Econ.* 4: 63-74.
- Bjørndal T. and J.M. Conrad. 1987.b. The dynamics of an open access fishery. *Can. J. Econ.* 20(1): 74-85.
- Blomo V., K. Stockes, W. Griffin, W. Grant, and J. Nichols, 1978. Bioeconomic modelling of the Gulf shrimp fishery: an application to Galveston Bay and adjacent offshore areas. *South J. Agric. Econ.* July: 119-125
- Bockstael N.E. and J. Opaluch, 1983. Discrete modelling of behavioural response under uncertainty: the case of the fishery. *J. Environ. Econ. Manag.* 10: 125-137.
- Bodenheimer F.S., 1930. Studien zur Epidemiologie, Ökologie, und Physiologie der afrikanischen Wanderheuschrecke (*Schistocerca gregaria*). *Z. angew. Ent.* 15: 1-125.
- Bodenheimer F.S., 1938. Problems of animal ecology. Oxford Univ. Press.

- Boesh D.F., 1974. Diversity, stability and response to human disturbance in estuarine ecosystems. *In* Structure, functioning and management of ecosystems. Proceedings of the First Int. Congr. Ecol. PUDDOC, Wageningen: 109-114.
- Bonneuil N., 1994.a. Malthus, Boserup and viability population. *Math. Pop. Studies* 5(1): 107-119.
- Bonneuil N., 1994.b. Capital accumulation, consumption inertia and norm of reproduction. *J. Pop. Econ.* 7: 49-62.
- Bonneuil N. and C. Müllers, 1994. Viable population in a prey-predator system. *J. Math. Biol.* 35: 261-193
- Bostford L., R. Methot, and W. Johnson, 1983. Effort dynamics of the northern California dungeness crab (*Cancer magister*) fishery. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40: 337-346.
- Bousquet F., 1993. Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents. Thèse Univ. Claude Bernard-Lyon 1, 218 p.
- Bousquet F., and C. Cambier, 1994. Simulating the interaction between ecological dynamics and the decision making-process. *In* Proceedings of the Sociological World Congress, Bielefeld, FRG, April.
- Bowen B.K. and D.A. Hancock, 1985. Review of penaeid prawn fishery management regimes in Australia. *In* Second Australian national prawn seminar. P.C. Rothlisberg, B.J. Hill, and D.J. Staples (eds.), Cleveland: 247-265.
- Box G.E. and G.M. Jenkins, 1979. Time series analysis: forecasting and control. Revised edition, Prentice Hall, 575 p.
- Bradley D.J., 1982. Epidemiological models - theory and reality. *In* The population dynamics of infectious diseases: theory and application. R.M. Anderson (ed.), Chapman and Hall, London:
- Braverman A., and J.E. Stiglitz, 1982. Sharecropping and the interlinking of agrarian markets. *Am. Econ. Rev.* 72(4): 695-715.
- Breiman L. and J.H. Friedman, 1985. Estimating optimal transformations for multiple regression and correlation. *J. Am. Stat. Assoc.* 74: 829-836.
- Brewer G., 1979. Managing fisheries, some design considerations. *FAO Fish. Circ.* 718: 85-104.
- Browder J.A., 1985. Relationship between pink shrimp production on the Turtugas grounds and water flow patterns in the Florida Everglades. *Bull. Mar. Sci.* 37(3): 839-856.
- Brunenmeister S., 1984. Standardisation of fishing effort and production models for brown, white and pink shrimp stocks fished in US waters of the Gulf of Mexico. *In* Penaeid shrimps: their biology and management. J.A. Gulland and B.J. Rothschild (eds.), Fishing News Books Ltd.: 187-211.
- Burel F., J. Baudry, P. Clergeau, P. Constant, et M.-C. Eybert, 1992. Approche spatiale des phénomènes écologiques : échelles et hiérarchie. *Bull. Ecol.* 23(1-2): 93-101.
- Burkenroad M.D., 1948. Fluctuation in abundance of Pacific halibut. *Bull. Bingham Oceanogr. Coll.* 11(4): 81-129.
- Burkenroad M.D., 1951. Population dynamics in a regulated marine fishery. [Book review of Thompson 1950] *Texas Inst. Mar. Sci.* 2: 177-212.
- Burkenroad M.D., 1953. Theory and practice of marine fishery management. *J. Cons. Int. Explor. Mer* 18: 300-310.
- Caddy J.F. (ed.), 1989. Marine invertebrate fisheries, their assessment and management. John Wiley & Sons, 752 p.
- Cadren M., C. Béné and F. Lantz, 1996. Investigating the dynamic relationships between wild shrimp and cultured shrimp prices. *In* Proceedings of the VIIIth International IIFET Conference on Fisheries Economics, 01-04 Jul., Marrakech (sous presse).
- Campos J., N. R. Ericsson, and D. F. Hendry, 1996. Cointegration tests in the présence of structural breaks. *J. Econometrics* 70: 187-220.

- Carothers P.E. and W.E. Grant, 1987. Fishery management implications of recruitment seasonality: simulation of the Texas fishery for the brown shrimp *Penaeus aztecus*. *Ecol. Modelling* 36: 239-268.
- Cartelier J. and C. Müllers, 1993. Viability in a Keynesian model. International Institute for Applied System Analysis Working Paper 9495.
- Caswell H., 1978. Theory and models in ecology: a different perspective. *Ecol. Modelling* 43: 33-44.
- Catanzano J. and B. Mesnil, 1995. Economics and biology used in fisheries research or when social and natural sciences try to depict together the object of their research. *Aquat. Living Resour.* 8: 223-232.
- Chalmond B., 1981. Détection d'une rupture de moyenne en un point inconnu d'un processus ARMA. *Rev. Stat. Appl.* 29(1): 7-20.
- Charles A.T., 1982. Optimal fisheries investment. Ph.D. dissertation, Univ. British Columbia, Vancouver, B.C., 183 p.
- Charles A.T., 1983.a. Optimal fisheries investment: comparative dynamics for a deterministic seasonal fishery. *Can J. Fish. Aquat. Sci.* 40: 2069-2079.
- Charles A.T., 1983.b. Optimal fisheries investment under uncertainty. *Can J. Fish. Aquat. Sci.* 40: 2080-2091.
- Charles A.T., 1989. Bio-socio-economic fishery models: labour dynamics and multi-objective management. *Can J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 1313-1322.
- Charles A.T., 1992. Uncertainty and information in fishery management models: a bayesian updating algorithm. *Am. J. Math. Manag. Sci.* 12: 191-225.
- Charles A.T., 1995. Fisheries sciences: the study of fishery systems. *Aquat. Living Resour.* 8: 233-239.
- Chatfield C., and D.L. Prothero, 1973. Box-Jenkins seasonal forecasting: problems in a case study. *J. Royal Stat. Soc.* 136: 295-336.
- Chauvin W.D., 1992. Traditional shrimp harvest: supply overview. In Proceedings of the 3rd global Conference on the shrimp industry. H. de Saram and T. Singh (eds), Hong Kong, 14-12 Sept., INFOFISH: 54-72.
- Cheung S.N., 1969. The theory of share tenancy. Press Univ. Chicago, Chicago.
- Christy F.R., 1996. The death rattle of open access and the advent of property rights regimes in fisheries. In Proceedings of the VIIIth International IIFET Conference on Fisheries Economics, 01-04 Jul., Marrakech (sous presse).
- Christy F.R., and A.D. Scott, 1965. The common wealth in ocean fisheries. John Hopkins Univ. Press, Baltimore.
- Clark C.W., 1976.a. Mathematical bioeconomics, Wiley-Intersciences, New-York, 352 p.
- Clark C.W., 1976.b. A delay-recruitment model of population dynamics, with application to baleen whale populations. *J. Math. Biol.* 31: 381-391.
- Clark C.W., 1985. Bioeconomic modelling and the fisheries management. Wiley-Intersciences, New-York, 292 p.
- Clark C.W., 1990. Mathematical bioeconomics, the optimal management of renewable resources. 2nd ed., Wiley-Intersciences, New-York, 386 p.
- Clark C.W. and G.P. Kirkwood, 1979. Bioeconomic model of the Gulf of Carpentaria prawn fishery. *J. Fish. Res. Board Can.* 36: 1304-1312.
- Clark C.W., F.H. Clarke, and G.R. Munro, 1979. The optimal exploitation of renewable resource stock: problem of irreversible investment. *Econometrica* 47(1): 25-47.
- Clay P.M., and J.R. McGoodwin, 1995. Utilizing social sciences in fisheries management. *Aquat. Living Ressour.* 8: 203-207.
- Cohen Y., 1987. A review of harvest theory and applications of optimal control theory in fisheries management. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 44 (suppl.): 75-83.

- Connell J.H. and W.P. Sousa, 1983. On the evidence needed to judge ecological stability or persistence. *Am. Nat.* 121: 789-824.
- Conrad J.M. and C.W. Clark, 1987. Natural resource economics, Cambridge Univ. Press.
- Copes P., 1972. Factor rents, sole ownership, and the optimum level of fisheries exploitation. *Manchester School of Soc. and Econ. Stud.* 48: 335-351.
- Copes P., 1986. A critical review of the individual quota as a device in fisheries management. *Lands Econ.* 62: 278-291.
- Copes P., 1996. Adverse impacts of ITQ system on conservation and fish harvest productivity. In *Proceedings of the VIIIth International IIFET Conference on Fisheries Economics*, 01-04 Jul. 1996, Marrakech (sous presse).
- Cove J.J., 1973. Hunters, trappers, and Gatherers of the sea: a comparative study of fishing strategies. *J. Fish. Res. Board Can.* 30: 249-259.
- Crutchfield J.A. and A. Zellner, 1962. Economic aspect of the Pacific halibut fishery. *Fish. Indus. Resear.* 1(1): Depart. of the Interior, Washington DC.
- Csavas I., 1992. Impact of aquaculture on the shrimp industry. In *Proceedings of the 3rd global Conference on the shrimp industry*. H. de Saram and T. Singh (eds.), Hong Kong, 14-12 Sept., INFOFISH: 6-18.
- Csirke J., 1983. Report on the working group on fisheries management, implications and interactions. In *Proceeding of the expert consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish resources*. G.D. Sharp and J. Csirke (eds.), San José, Costa Rica, 18-29 April, FAO Fisheries Report No.291: 67-90.
- Cunningham S., M.R. Dunn and D. Whitmarsh, 1985. Fisheries Economics, an introduction, Mansell Publishing Limited, London.
- Cury P. and C. Roy, 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 670-680.
- Cury P. et C. Roy, 1991. Pêcheries ouest-africaines, variabilité, instabilité et changement. Édition ORS-TOM, Paris, 525 p.
- Cury P., C. Roy, R. Mendelssohn, A. Bakun, D. Husby, and R. Parrish, 1995. Moderate is better: exploring nonlinear climatic effect on the Californian northern anchovy (*Engraulis mordax*). In *Climate change and northern fish population*. R.J. Beamish (ed.), *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 121: 417-424.
- Cushing D.H., 1973. The natural regulation of fish population. In *Sea fisheries research*. F.R. Harden-Jones (ed.), Elek Science, London: 399-411.
- d'Andréa S., 1989. Importation et valeur ajoutée de la crevette en France. Rapp. Agro Service Étude, I.N.A. Paris Grignon, Paris.
- Dall W., B.J. Hill, P.C. Rothlisberg, and D.J. Staples, 1990. The biology of the *Penaeidae*. In *Advances in Marine Biology*. J.H.S. Blaxter and A.J. Southward (eds.) 27, 488 p.
- Deaton A. and G. Laroque, 1992. On the behavior of commodities price. *Rev. Econ. Stud.* 59: 1-23.
- Debacq J.-J., et M.-F. Simon-Rovetto, 1992. Courrier adressé à Monsieur le Préfet de la Guyane. Ministère des DOM-TOM et Secrétariat d'État à la Mer, Paris, 10 nov. 4 p.
- Den Boer P.J., 1981. On the survival of populations in a heterogeneous and variable environment. *Oecologia Berlin* 50: 39-53.
- Dewess C.M., 1989. Assessment of the implementation of individual transferable quotas in New Zealand's inshore fishery. *North Am. J. Fish. Manag.* 9: 131-139.
- Dickey T.D., 1990. Physical-optical-biological scales relevant to recruitment in large marine ecosystems. In *Large marine ecosystems: pattern, processes, and yields*. K. Sherman, L.M. Alexander, and B.D. Gold. AAAS ed., Washington: 82-99.
- Die D.J., and R.A. Watson, 1992. A pre-recruit simulation model for evaluating spatial closures in an Australian penaeid fishery. *Aquat. living Resour.* 5: 145-153.

- Dintheer C., 1986. Conséquences de la création de la Z.E.E. sur les résultats d'exploitation et le recrutement de la pêcherie crevettière de la Guyane française. First Workshop on the Shrimp Fisheries of the Guyana-Brazil shelf, WECAFC/COPACO, FAO Fisheries Report Miami, 24-26 June 1986.
- Dintheer C. et J.-Y. LeGall, 1998. Analyse et modélisation des composantes biologiques de la pêcherie crevettière de Guyane française. Doc. int. DRV-RH 88.026, Cayenne, 50 p.
- Dintheer C., et J. Rosé, 1989. Distribution spatio-temporelle de *Penaeus subtilis* au large de la Guyane française. Bien fondé de l'interdiction de pêche dans les 30 mètres et proposition d'aménagement. Rapp. IFREMER DRV/RH 1/87, Cayenne. 88 p.
- Dintheer, C., B. Gilly, J.-Y. Le Gall, M. Lemoine, et J. Rosé. 1991. La recherche et la gestion de la pêcherie de crevettes Pénéides en Guyane française de 1958 à 1988 : trente années de surf. In La recherche face à la pêche artisanale. J.-R. Durand, J. Lemoalle, et J. Weber (eds.), Symp. Int. ORSTOM-IFREMER, Montpellier, 3-7 Juillet: 859-870.
- Doyen L., D. Gabay, et J.-C. Hourcade, 1996. Risque climatique, technologie et viabilité. In Actes des Journées du Programme Environnement, Vie, Société. Session B, Paris, Jan., 129-134.
- Drinkwater K.F. and R.A. Myers, 1987. Testing predictions of marine fish and shellfish landings from environmental variables. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 44: 1568-1573.
- Dudley N. and G. Waught, 1980. Exploitation of a single-cohort fishery under risk: a simulation-optimization approach. *J. Environ. Econ. Manag.* 7: 234-255.
- Durand J.-R., J. Lemoalle, et J. Weber, 1991. La recherche face à la pêche artisanale. Symp. Int. ORSTOM-IFREMER, Montpellier, 3-7 Juillet 1989.
- Durand M.-H., F. Lantz, and J.-F. Mittaine, 1995. An econometric study of the long-term relationship between fish meal and soyabean meal prices. In Proceedings of the VIIth International IIFET Conference on Fisheries Economics, Taiwan, vol.2: 212-217.
- Durand M.-H., R. Mendelssohn, P. Cury, C. Roy, and D. Pauly, 1997. Global versus Local Changes in Upwelling Ecosystems édition ORSTOM, Paris (sous presse).
- Durbin J., 1970. Testing for serial correlation in least squares regression when some of the regressors are lagged dependent variable. *Econometrica* 38: 410-421.
- Efron B. and R. Tibshirani, 1991. Statistical data analysis in the computer age. *Science* 253: 390-395.
- Engle R.F. and C.W. Granger, 1987. Co-integration and error correction: representation, estimation and testing. *Econometrica* 55: 251-276.
- Food and Agriculture Organisation (FAO) 1962. Economics aspects of fisheries regulations. Rome, FAO Fisheries Report 5.
- Ferdouse, F. 1992. International market prospects for fishery product from Vietnam. Vietnam Fisheries Development Workshop 5-7 May, Hanoi. In I. Csavas, 1992. Impact of aquaculture on the shrimp industry. In Proceedings of the 3rd global Conference on the shrimp industry. H. de Saram and T. Singh (eds.), Hong Kong, 14-12 Sept., INFOFISH: 6-18.
- Filippov A., 1964. Differential equations with discontinuous right-hand sides. *Trans A.M.S.* 42(2): 199-231.
- Francis, R.C., 1990. Climate change and marine fisheries. *Fisheries* 15(6): 7-9.
- Fromentin J.-M. and B. Planque, 1996. *Calanus* and environment in the eastern North Atlantic II. Influence of the North Atlantic Oscillation on *C. finmarchicus* and *C. helgolandicus*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 134: 111-118.
- Fullenbaum R., E.W. Carlson, and F.W. Bell, 1971. Economics of production from natural resources: comments. *Am. Rev. Econ.* 61: 483-487.
- Garcia S., 1977. Biologie et dynamique des populations de crevette rose, *Penaeus duorarum notialis*, en Côte d'Ivoire. Trav. Doc. ORSTOM, Paris.

- Garcia S., 1978. Bilan des recherches sur la crevette rose, *Penaeus duorarum notialis*, en Côte d'Ivoire et conséquence en matière d'aménagement. Doc. Sci. Centre Rech. Océanogr. Abidjan 9: 1-41.
- Garcia S., 1983. The stock-recruitment relationship in shrimps: reality or artefacts and misinterpretation ? *Oceanogr. Trop.* 18(1): 25-48.
- Garcia S., 1984. Les problèmes posés par l'aménagement des ressources instables, CECAF Series 84/28: 1-34.
- Garcia S., 1985. Reproduction, stock assessment models and population parameters in exploited penaeid shrimp populations. In Second Australian national prawn seminar. P.C. Rothlisberg, B.J. Hill, and D.J. Staples (eds.), Cleveland: 139-158.
- Garcia S., 1988. Tropical penaeid prawns. In Fish population dynamics. J. Gulland (ed.), John Wiley & Sons: 219-249.
- Garcia S., 1989. The management of coastal penaeid shrimp fisheries. In Marine invertebrate fisheries; their assessment and management. J.F. Caddy (ed.), John Wiley & Sons: 281-306.
- Garcia S., E. Le Brun and M. Lemoine, 1984. Le recrutement de la crevette *Penaeus subtilis* en Guyane française. Rapp. Tech. ISTPM 9, 43 p.
- Garcia S., M. Lemoine, and E. Le Brun, 1985. Seasonal and long term variability of recruitment in French Guyana shrimp fishery of *Penaeus subtilis*. FAO Fish. Report 327. Suppl.
- Garcia S. and L. Le Reste, 1981. Life cycles, dynamics, exploitation and management of coastal penaeid shrimp stocks. FAO Fish. Tech. Pap. 203.
- Gardner M.R. and W.R. Ashby, 1970. Connectance of large dynamic (cybernetic) systems: critical values for stability. *Nature* 228: 784.
- Garrett C. and B. Toulany, 1981. Variability of the flow through the strait of Belle Isle. *J. Mar. Resear.* 39: 163-189.
- Gigon A., 1983. Typology and principles of ecological stability and instability. *Mountain Resear. Dev.* 3(2): 95-102.
- Gilpin M.F., 1975. Stability of feasible predator-prey systems. *Nature* 254: 137-138.
- Gilly B. et Y. Cochet, 1988. Analyse économique de la pêche crevette de Guyane française. Rapp. int. IFREMER, DRV-88.023-SDA, Paris. 47 p.
- Glantz M.H., 1983. Man, state, and fisheries. In Proceeding of the expert consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish resources. G.D. Sharp and J. Csirke (eds.), San José, Costa Rica, 18-29 April, FAO Fisheries Report 291: 871-917.
- Glantz M.H., 1990. Does history have a future; forecasting climate change effects on fisheries by analogy. *Fisheries* 15: 39-44.
- Glantz M.H. and J.D. Thompson, 1981. Resource management and environmental uncertainty: lessons from coastal upwelling fisheries, Wiley, New-York, 491 pp.
- Goh B.S., 1979. The usefulness of optimal control theory to biological problems. In Theoretical systems ecology; advances and case studies. E. Halfon (ed.) Academic Press, New-York: 385-399.
- Golley F.D., 1974. Structural and functioning properties as they influence ecosystem stability. In Structure, functioning and management of ecosystems. Proceedings of the First Int. Congr. Ecol. PUDOC, Wageningen: 97-102.
- Goodwin B.K. and T.C. Schroeder, 1991. Co-integration tests and spatial price linkages in regional cattle markets. *Am. J. Agric. Econ.* 28: 452-464.
- Gordon H.S., 1954. The economic theory of a common property resource: the fishery. *J. Pol. Econ.* 62: 124-142.
- Gordon D.V., K.G. Salvanes, and F. Atkins, 1993.a. A fish is a fish ? Testing for market linkages on the Paris fish market. *Mar. Res. Econ.* 8: 331-343.
- Gordon D.V., J.E. Hobbs, and W.A. Kerr, 1993.b. A test for price integration in the EC lamb market. *J. Agric. Econ.* 44(1): 126-134.

- Gould J.R., 1972. Externalities, factor proportions, and the level of exploitation of free access resources. *Economica* Nov.: 383-402.
- Gracia A.G., 1989. Relationship between environmental factors and white shrimp abundance in the southwestern Gulf of Mexico. *An. Inst. Ciec. Mary Limnol. Univ. Autom. Mexico* 16(1): 171-182.
- Gracia A.G., 1991. Spawning stock recruitment relationship of white shrimp abundance in the southwestern Gulf of Mexico. *Trans Am. Fish Soc.* 120: 519-527.
- Grant W. and W. Griffin, 1979. Bioeconomic model of the Gulf of Mexico shrimp resources. *Trans. Am. Fish. Soc.* 108: 1-13.
- Griffiths K.J., and C.S. Holling, 1969. A competition submodel for parasites and predators. *Can. Entomol.* 101: 785-818.
- Gulf of Mexico Shrimp Fishery Management Council, 1981. Fishery management plan for the shrimp fishery of the Gulf of Mexico. Fed. Regist. 45(218): 74190-74308.
- Gulland J.A., 1969. Manuel of method for fish assessment, Part I, Fish population analysis. FAO Man. Fish. Sci. 4: 1-154.
- Gulland J.A., 1971. Preface. The fish resource of the ocean. London, Fishing News.
- Gulland J.A., 1972. Some introductory guidelines to management of shrimp fisheries. IOFC/DEV 72-24: 1-12.
- Gulland J.A., 1984. Introductory guidelines to shrimp management: further thoughts. In Penaeid shrimps: their biology and management. J.A. Gulland and B.J. Rothschild (eds.), Fishing New Books: 290-299.
- Gulland J.A. and B.J. Rothschild (eds.), 1984. Penaeid shrimps: their biology and management. Fishing New Books, 308 p.
- Gunter G. and H. Hildebrand, 1954. The relation of total rainfall of the state and catch of the marine shrimp (*Penaeus setiferus*) in the Texas waters. *Bull. Mar. Sci. Gulf Caribb.* 4: 95-102.
- Gunter G. and J.C. Edwards, 1969. The relation of rainfall and freshwater drainage to the production of penaeid shrimp (*Penaeus fluviatilis* and *Penaeus aztecus*) in the Texas and Louisiana waters. FAO Fish. Report 57: 875-892.
- Hall D., 1962. Observations on the taxonomy and biology of some Indo-West-Pacific Penaeids (Crustacea, decapoda). *Coll. Office Fish. Publ.* 17: 1-229.
- Hamon J.-Y., et H. Moulin, 1993. Pêche ; une mission interministérielle propose un regroupement d'entreprises de pêche en Guyane. France Guyane, 07 sept. Cayenne,
- Hannah R.W., 1993. Influence of environmental variation and spawning stock levels on recruitment of ocean shrimp (*Pandalus jordani*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 50:612-622.
- Hannesson R., 1975. Fishery dynamics: a North Atlantic cod fishery. *Can. J. Econ.* 8: 151-173.
- Hardin G., 1968. The tragedy of the commons. *Science* 162: 1243-1248.
- Harvey A.C., 1984. A unified view of statistical forecasting procedure. *J. Forecast.* 3: 245-275.
- Hartwick J.M., 1982. Free access and the dynamics of the fishery. In Essays in the economics of renewable resources. L.J. Mirman and D.F. Spulber, North-Holland Publ. Comp.: 159-174.
- Hastie T. and R. Tibshirani, 1990. Generalized additive models. Chapman and Hall, London.
- Haury L.R., J.A. McGowan, and P.H. Wiebe, 1978. Patterns and processes in the time-space scales of plankton distributions. In Spatial patterns in plankton communities. J.H. Steele (ed.) Plenum, New-York: 277-327.
- Hendry D.F and A.J. Neale, 1991. A Monte Carlo study of the effects of structural breaks on tests for unit roots. In Economic structural change: analysis and forecasting. P. Hackl and A.H. Westlund (eds.), Springer-Verlag, Berlin: 95-119.
- Henry C., 1974. Investment decision under uncertainty: the irreversibility effect. *Am. Econ. Rev.* 64: 1006-1012.

- Hettler W.F., 1992. Correlation of winter temperature and landings of pink shrimp, *Penaeus duarorum*, in North Carolina. *Fish. Bull. U.S.* 90: 405-406.
- Hettler W.F. and A.J. Chester, 1982. The relationship of winter and spring landings of pink shrimp *Penaeus duorarum* in North Carolina. *Fish. Bull. U.S.* 80: 761-768.
- Healey M.C., 1984. Multi-attribute analysis and the concept of optimal yield. *Can J. Fish. Aquat. Sci.* 41: 1393-1406.
- Hilborn R., 1985. Fleet dynamics and individual variation: why some people catch more fish than others. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 42: 2-13.
- Hilborn R. and M. Ledbetter, 1979. Analysis of the British Columbia salmon purse-seine fleet: dynamics of movement. *J. Res. Board Can.* 36: 384-391.
- Hilborn R. and C.J. Walters, 1992. Quantitative fisheries stock assessment: choice dynamics and uncertainty. Chapman & Hall, New-York, 570 p.
- Hildebrand H. and G. Gunter, 1952. Correlation of the rainfall with the Texas catch of white shrimp *Penaeus setiferus*. *Trans. Am. Fish. Soc.* 82: 151-155.
- Holling C.S., 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitismes. *Can. Entomol.* 91: 385-398.
- Holling C.S., 1965. The functional responses of predators to prey density and its role in mimicry and population regulation. *Mem. Entomol. Soc. Can.* 48: 1-48.
- Holling C.S., 1966. The strategy of building models of complex ecological systemes. In *Systems analysis in ecology*. K.E. Watt (ed.) Academic Press, New-York.
- Holling C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 4: 1-23.
- Holling C.S., 1978. Adaptive environmental assessment and management. Wiley International Series on Applied Systems, Analysis Vol.3.
- Holling C.S., 1995. What Barriers ? What Bridges ? In *Barriers and bridges to renewal of ecosystems and institutions*. L.H. Gunderson, C.S. Holling and S. Light (eds.): 3-34.
- Hottlet O., 1992. The European market for frozen shrimp. INFOFISH International, 5/92: 16-20.
- Hunt J.H., R.J. Carroll, V. Chinchilli, and D. Frankengerg, 1980. Relationship between environmental factors and brown shrimp production. Pamlico-Sound, North Carolina. N.C. Dep. Natural Resource Community Devel., Div. Mar. Fish. Rep. 33: 1-29.
- Institut d'Émission des Départements d'Outre-Mer, 1993. IEDOM Rapport annuel Guyane, Cayenne, 182 p.
- Johansen S. and Juselius, 1990. Maximum likelihood estimation and inference on Cointegration with application to the demand for money. *Oxford Bull. Econ. Stat.* 52: 169-210.
- Jollivet M. et A. Pavé, 1992. L'environnement : questions et perspectives pour la recherche. *Envir.* 6: 6-29.
- Josupeit H., 1992. Single market in the EEC, good or bad news for traders? In *Proceedings of the 3rd global Conference on the shrimp industry*. H. de Saram and T. Singh (eds). Hong Kong, 14-12 September, INFOFISH: 54-72.
- Keeney R.L., and H. Raiffa, 1976. Decisions with Multiples objectives. Wiley, New-York.
- Keithly W., K. Roberts, and J. Ward, 1993. Effects of the shrimp aquaculture on the U.S. market: an econometric Analysis. In *Aquaculture: Models and economics*. U. Hatch and H. Kinnucan (eds.), Westview Press, Boulder, U.S.A.: 125-156.
- Kirby M., 1982. Navigating in trouble waters: a new policy for Atlantic fisheries. Report of the tasks force on Atlantic fisheries, Ministry of Supply and Service, Ottawa, Canada.
- Knox J.C., 1993. Large increase in flood magnitude in response to modest change in climate. *Nature* 361: 430-432.

- Kondo K., 1980. The discovery of the Japanese sardine: the biological basis of stock-size fluctuations. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer* 177: 332-354.
- Koslow J.A., K. R. Thompson, and W. Silvert. 1987. Recruitment to northwest Atlantic cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) stocks: influence of stock size and climate. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 44: 26-39
- Kope R.G. and L.W. Botsford, 1990. Determination of factors affecting recruitment of chinook salmon, *Oncorhynchus tshawytscha*, in central California. *Fish. Bull. U.S.* 88: 257-269.
- Kot M. and W.M. Schaffer, 1984. The effects of seasonality on discrete models of population growth. *Theor. Pop. Biol.* 26: 340-360.
- Lam C.F., J.D. Whitaker, and F.S. Lee, 1989. Model for white shrimp landings for the Central Coast of South Carolina. *North Am. J. Fish. Manag.* 9: 12-22.
- Lane D.E., 1988. Investment decision making by fishermen. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 45: 782-796.
- Lane D.E., and R.L. Stephenson, 1995. Fisheries management science: the framework to link biological, economic and social objectives in fisheries management. *Aquat. Living Resour.* 8: 215-221.
- Larkin P.A., 1977. An epitaph for the concept of maximum sustainable yield. *Trans. Am. Fish. Soc.* 106(1): 1-11.
- Lawton J.H., and S.L. Pimm, 1978. Population dynamics and the length of food chains. *Nature* 272: 189-190.
- Leary T.R., 1985. Review of the Gulf of Mexico management plans for shrimps. In Second Australian national prawn seminar. P.C. Rothlisberg, B.J. Hill, and D.J. Staples (eds.), Cleveland: 267-274.
- Lebrun E. et M. Lemoine, 1985. Approche bioéconomique de la pêche de crevette Pénéide de Guyane française, en vue de son aménagement. Doc. int. IFREMER-Cayenne, miméo, 60 p.
- Le Cabellec J., 1984. Analyse économique de la pêche crevettière en Guyane française. Doc. int. IEDOM, Cayenne, 63 p.
- Le Duff A., 1993. Une prolifération de bateaux qui inquiète; vers un permis d'exploitation outre-mer ? Enquête long-liners. *Le Marin* 30 juil.: 15-19.
- Le Fur J., 1995. Modelling adaptive fishery activities facing fluctuating environment: an artificial intelligence approach. *Nat. Res. Agr. Envir. Sci.* 9(1): 85-97.
- Le Fur J., 1996. Simulating a fishery exploitation: application the small-scale fishery in Senegal. In Proceedings of the VIIIth International IIFET Conference on Fisheries Economics, 01-04 Jul., Marrakech (sous presse).
- Leung A., and A. Wang, 1976. Analysis of models for commercial fishing: mathematical and econometrical aspects. *Econometrica* 44: 295-303.
- Levin S.A., 1966. The strategy of model building in population biology. *Am. Sci.* 54: 421-431.
- Lhomme F., 1991. Étude du recrutement de la crevette *Penaeus subtilis* dans deux estuaires de Guyane française. Rapp. prélim. ORSTOM, Cayenne.
- Lhomme F., 1992. Le recrutement des postlarves de la crevette *Penaeus subtilis* dans deux estuaires de Guyane française. *Ann. Inst. Océanogr.*, Paris 68 (1-2) : 169-178.
- Li T.Y. and J.A. Yorke, 1975. Period three implies chaos. *Amer. Math. Monthly* 82: 985-992.
- Liao D.S., 1979. An economic analysis of mobility of shrimp vessels in the south atlantic states. South Carolina Mar. Res. Center Tech. Rep. 35, 37 p.
- Lotka A.J., 1923. Contribution to quantitative parasitology. *J. Wash. Acad. Sci.* 13: 152-158.
- Lotka J.A., 1925. Elements of physical biology. Williams & Wilkins, Baltimore.
- Lord M.J., 1991. Price formation in commodity markets. *J. Appl. Econometrics* 6: 1173-1189.
- Lucas C., G. Kirkwood, and I. Somers, 1979. An assessment of the stocks of the banana prawn, *Penaeus merguensis*, in the Gulf of Carpentaria. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.* 30: 639-652.

- Lucas R.E., 1976. Econometric Policy Evaluation: A critique. In *The Philipps Curve and labor markets*. K.L. Brunner (ed.), *Supplements to the J. Monetary Econ.*: 19-46.
- Maddala G.S., 1992. *Introduction to Econometrics*. 2nd ed. MacMillan Publishing Company, New-York, 631 p.
- Maloney D.G. and P.H. Pearse, 1979. Quantitative rights as an instrument for regulating commercial fisheries. *J. Fish. Res. Board Can.* 36: 859-866.
- Maran M., 1974. The decline of American whaling, Ph.D. Diss., University of Pennsylvania. In J.D. Reid, 1976. Sharecropping and agricultural uncertainty. *Econ. Dev. Cult. Change* 24: 549-576.
- Margaleff R., 1969. Diversity and stability: a practical proposal and a model of interdependence. In *Diversity and stability in ecological systems*. Brookhaven Symp. Biol. 22: 25-37.
- Maucorps A., 1994. De la recherche halieutique. *Equinoxe* 51: 39-40.
- Maurel F., 1989. Modèles à correction d'erreur : l'apport de la théorie de la cointégration. *Économie et prévision* 88-89: 105-125.
- May R.M., 1972. Will a large complex system be stable, *Nature* 238: 413-414.
- May R.M., 1973. *Stability and complexity in model of ecosystems*. Monographs in population biology 6, Princeton Univ. Press, Princeton, 235 p.
- May R.M., 1974. *Stability and complexity in model ecosystems*, 2nd ed., Princeton, Princeton Univ. Press., 265 p.
- May R.M., 1975. Biological populations obeying difference equations: stable points, stable cycles, and chaos. *Theor. Biol.* 51: 511-524.
- May R.M., 1976. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature* 261: 459-467.
- May R.M., 1989. Levels of organization in Ecology. In *Ecological concepts*. J.M. Cherrett (ed.), Blackwell Sci. Publ.: 339-363.
- May R. and G.H. Oster, 1976. Bifurcation and dynamic complexity in simple ecological models. *Amer. Natur.* 110: 573-599.
- McFadden J.T., 1969. Trends in freshwater sport fisheries of North American. *Trans Am. Fish. Soc.* 98: 136-150.
- McGowan J.A., 1990. Climate and change in oceanic ecosystems: the value of time-series data. *Tree* 5(9): 293-299.
- McGuire T.M., 1990. Science and the destruction of a shrimp fleet. *Marit. Anthropol. Stud.* 4(1): 32-55.
- McKelvey R., 1983. The fishery in a fluctuating environment: coexistence of specialist and generalist fishing vessels in a multipurpose fleet. *J. Envir. Econ. Manag.* 10: 287-309.
- McKelvey R., 1985. Decentralized regulation of a common property renewable resource industry with irreversible investment. *J. Envir. Econ. Manag.* 12: 287-307.
- McKendrick A.G., 1926. Application of mathematics to medical problems. *Proc. Edin. Math. Soc.* 44: 98-130.
- McKenzie W.C., 1983. *Introduction to the economics of fisheries management*. FAO Fish. Tech. pap. 226, Roma.
- Mendelssohn R., 1991. Relating fisheries to the environment in the Gulf of Guinea: information, causality and long-term memory. In *Pêcheerie ouest-Africaines: variabilité, instabilité et changement*. P. Cury and C. Roy (eds.), ORSTOM: 446-465.
- Mendelssohn R. and P. Cury, 1987. Forecasting a fortnightly abundance index of the ivoirien coastal pelagic species and associated environmental conditions. *Can. J. Fish. Aqua. Sci.* 44: 408-428.
- Mickwitz P., 1996. Price relationship between domestic wild salmon, aquacultured rainbow trout and norwegian farmed salmon in finland. In *Proceedings of the VIIIth International IIFET Conference on Fisheries Economics*, 01-04 Jul., Marrakech (sous presse).

- Millington P., 1984. The fishermen as a predator: numerical response of British Columbia gillnet fishermen to Salmon abundance. MS Thesis, Depart. Zool. Univ. British Columbia, Vancouver. In R. Hilborn and C.J. Walters, 1992.
- Moguedet P., 1993. Diagnostic sur l'état des ressources de crevettes Penaeides exploitées dans la Z.E.E. de la Guyane Française. Doc. int. DRV-RH-Cayenne, 30 p.
- Moguedet P., C. Béné et D. Nérini, 1995. Étude des ressources en crevettes du plateau guyano-brésilien, étude de la variabilité du recrutement de la crevette *Penaeus subtilis*. Rapport FEDER Guyane n°90.03.09.004, IFREMER DRV-RH Cayenne, 164 p.
- Müller F., 1992. Hierarchical approaches to ecosystem theory. *Ecol. Model.* 63: 215-242.
- Muller-Krager F.E., C.R. McCain, and P.L. Richardson, 1988. The dispersal of the Amazon's water. *Nature* 333: 56-59.
- Müllers C., 1995. Régulation de systèmes dynamiques de l'économie et de l'écologie sous contrainte de viabilité. Thèse de l'Université de Paris-Dauphine, UFR Mathématique de la Décision, 179 p.
- Mullin M., 1986. Spatial and temporal scales and patterns. In *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*. M.J. Bowman, R.T. Barber, and C.N. Mooers (eds.), Springer-Verlag, Berlin: 216-254.
- Neher P.A., R. Arnason and N. Mollet (eds.) 1989. Rights based fishing. Kluwer, Dordrecht.
- Newbery D.M.G., 1977. Risk-sharing, sharecropping and uncertain labour-market. *Rev. Econ. Stud.* XLIV(3): 584-594.
- Nicholson A.J., 1933. The balance of animal populations. *J. Anim. Ecol.* 2 (Suppl.): 132-178.
- Nicholson A.J., 1954. An outline of the dynamics of animal populations. *Austr. J. Zool.* 2: 9-65.
- Nicholson A.J. and V.A. Bailey, 1935. The balance of animal population. *Proc. Zool. Soc. London* 551-598.
- Odum E.P., 1953. Fundamentals in Ecology. Sauders Ed., Philadelphia.
- O'Neill R.V., D.L. De Angelis, D.L. Walde, and T.H. Allen, 1986. A hierarchical concept of ecosystem. Princeton Univ., 253 p.
- Onstad D.W., 1988. Population-dynamics theory: the role of analytical, simulation, and supercomputer models. *Ecol. Modelling*: 111-124.
- Oltman R.E., 1967. Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon river. U.S. Geol. Survey. Circ. 552, Washington D.C. In *Les côtes de Guyane*. M.T. Prost, 1990. Prog. Env. côtier. ORSTOM Cayenne, French Guyana.
- Opaluch J.J. and N.E. Bockstael, 1984. Behavioral modeling and fisheries management. *Mar. Resour. Econ.* 1(1): 105-115.
- Orians G.H., 1975. Diversity, stability and maturity in natural ecosystems. In *Unified concepts in Ecology*. W.H. Van Dobben and R.H. Lowe-McConnell (eds.), Junk, the Hague, Holland: 139-150.
- Pavé A., 1994. Modélisation en biologie et en écologie. Aléas Édition, Lyon, 559 p.
- Pearl R., 1930. The biology of population growth. Knopf, New-York.
- Pearse P.H., 1980. Property rights and the regulation of commercial fisheries. *J. Busin. Adm.* 11: 185-209.
- Pearse P.H. and C.J. Walters, 1992. Harvesting regulation under quota management systems for ocean fisheries. *Mar. Policy* May: 167-182.
- Pella J.J., and P.K. Tomlinson, 1969. A generalized stock production model. *Bull Inter-Am. Trop. Tuna Comm.* 13: 419-496.
- Penn J.W., 1976. Tagging experiments with western king prawns, *Penaeus latisulcatus*; estimation of population parameters. *Australia J. Mar. Freshwater Resear.* 31: 21-35.

- Penn J.W., 1984. The behaviour and catchability of some commercially exploited penaeids and their relationship to stock and recruitment. In *Penaeid shrimps: their biology and management*. J.A. Gulland and B.J. Rothschild (eds.), Fishing News Books: 173-186.
- Penn J.W. and N. Caputi, 1986. Spawning-stock recruitment relationships and environmental influences on the tiger prawn (*Penaeus esculentus*) fishery in Exmouth Gulf, Western Australia. *Austr. J. Mar. Freshwater Resear.* 37: 491-505.
- Penson J., Tetley E., and Griffin W., 1988. An econometric analysis of net investment in Gulf shrimp fishing vessels. *Fish. Bull* 86(1): 151-155.
- Perman R., 1989. Co-integration: an introduction to the literature. *Strathclyde papers in Economics*, Strathclyde University, 57 p.
- Perron P., 1989. The great crash, the oil price shock, and the unit root hypothesis. *Econometrica* 57: 1361-1401.
- Peters R.H., 1991. A critique for ecology. Cambridge Univ. Press., Cambridge, 349 p.
- Pimm S.L., 1974. The complexity and stability of ecosystems. *Nature* 307: 321-326.
- Pindyck R.S. and J.J. Rotemberg, 1990. The excess co-movement of commodity prices. *Econ. J.* 100: 1173-1189.
- Plourde C., and J.B. Smith, 1989. Crop sharing in fishery and industry equilibrium. *Mar. Resour. Econ.* 6(3): 179-193.
- Poffenberger R.J., 1984. An economic perspective of problems in the management of Penaeid shrimp fisheries. In *Penaeid shrimps: their biology and management*. J.A. Gulland and B.J. Rothschild (eds.), Fishing News Books: 299-306.
- Prigogine I. et I. Stengers, 1979. La nouvelle alliance: métamorphose de la science. 2nd ed. 1986 Gallimard, coll. Essais, Paris, 439 p.
- Pringle J.D., 1985. The human factor in fishery resource management. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 42: 389-392.
- Quensière J., 1993. De la modélisation halieutique à la gestion systémique des pêches. *Nature, Sciences et Société* 1(3): 211-220.
- Radovich J., 1975. Application of optimum sustainable yield theory to marine fisheries. *Am. Fish. Soc. Spec. publ.* 9: 19-28.
- Reid J., 1976. Sharecropping and agricultural uncertainty. *Econ. Dev. Cult. Change* 24: 549-576.
- Rettig R.B., 1989. L'allocation des privilège d'usage. In Troadec J.-P. (ed.) *L'Homme et les ressources halieutiques ; essai sur l'usage d'une ressource renouvelable*. IFREMER, Paris: 525-556.
- Ricker W.E., 1954. Stock and recruitment. *J. Fish. Board Can.* 11: 559-623.
- Roberts A.P., 1974. The stability of a feasible random ecosystem. *Nature* 251: 607-608.
- Roedel P., 1975. A summary and critique of the symposium on optimum sustainable yield. *Am. Fish. Soc. Spec. publ.* 9: 79-89.
- Rossignol M., 1972. Étude d'un marais de la Guyane française: le marais de Sarcelle; biologie des crevettes *Penaeus aztecus subtilis* (forme juveniles). Rapp. prélim. ORSTOM, Cayenne, 39 p.
- Rothlisberg P.C., D.J. Staples, and P. Crocos, 1985. A review of the life history of the banana prawn, *Penaeus merguensis*, in the Gulf of Carpentaria. In *Second Australian national prawn seminar*. P.C. Rothlisberg, B.J. Hill, and D.J. Staples (eds.), Cleveland: 125-136.
- Roumasset J. and M. Uy, 1980. Piece rates, time rates and teams; explaining patterns in the employment relation. *J. Econ. Behav. Organ.* 1: 343-360.
- Rounsefell G.A., 1975. Management of bankruptcy in the Gulf shrimp fishery. *Proc. Annu. Gulf Caribb. Fish. Inst.* 27: 111-124.
- Rousseau J.-J., 1762. Du contrat social ou principes du droit politique. Collection Univers des Lettres Bordas 2nd éd. 1985, Paris.

- Royce W.E., 1975. Use of yield models in fishery management. *Am. Fish. Soc. Spec. Publ.* 9: 9-12.
- Rozanski, K., L. Araguas-Araguas, and R. Gonfiantini, 1992. Relation between long-term trends of Oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate. *Science* 258: 981-985.
- Ruello N.V., 1973. The influence of rainfall on the distribution and abundance of the school prawn, *Metapenaeus macleayi*, in the Hunter river region (Australia). *Mar. Biol.* 23: 221-228.
- Saint-Pierre P., 1993. Approximation of viability kernel. *App. Math. Optim.* 29: 187-209.
- Saint-Pierre P., 1996. Le calcul des noyaux de viabilité; outil d'analyse des modèles dynamiques de systèmes contraints. In *Actes des Journées du Programme Environnement, Vie, Société. Session B*, Paris, Jan., 146-151.
- Scott A., 1955. The fishery: the objectives of sole ownership. *J. Pol. Econ.* 65: 116-124.
- Scott A., 1979. Development of economic theory on fisheries regulation. *J. Fish. Res. Board Can.* 36: 725-741.
- Scott A., 1988. Development of property in the fishery. *Mar. Econ. Rev.* 5: 298-311.
- Scott A., 1993. Obstacle to fishery self-government. *Mar. Res. Econ.* 8: 187-199.
- Schaefer M.B., 1954. Some aspect of the dynamics of population important to the management of commercial fisheries. *Bull. Inter-Am. Trop. Tuna Comm.* 1: 25-56.
- Sims C.A., 1980. Macroeconomics and reality. *Econometrica* 48: 1-48.
- Sissenwise M.P., 1978. Is MSY an adequate foundation for optimum yield. *Fisheries* 3(6): 22-42.
- Sissenwise M.P., 1984. Why do fish population vary? In *Exploitation of marine communities*. R.M. May (ed.) Dahlem Konferenzen, Springer-Verlag, Berlin.
- Sissenwise M.P., M.J. Forgarty, and W.J. Overholtz, 1988. Some fisheries management implications of recruitment variability. In *Fish population dynamics*. J.A. Gulland (ed.), Wiley, New-York: 129-152.
- Sluczanowski P.R., 1984. Modelling and optimum control: a case study based on the Spencer Gulf prawn fishery for *Penaeus latisulcatus*. *J. Cons. Int. Explor. Mer* 41: 211-225.
- Smith J.B., 1990. From global to regional climate change: relative knowns and unknowns about global warming. *Fisheries* 15(6): 2-6.
- Smith M.E., 1988. Fisheries risk in the modern context. *Marit. Anthropol. Stud.* 1(1): 29-48.
- Smith M.E., 1995. The nature of Nature: conflict and consensus in fisheries management. *Aquat. Living Resour.* 8: 209-213.
- Smith V.L., 1968. Economics of production from natural resources. *Am. Econ. Rev.* 58: 409-431.
- Smith V.L., 1969. On models of commercial fishing. *J. Polit. Econ.* 77: 181-198.
- Somers I.F., 1985. Maximising value per recruit in the fishery for banana prawns, *Penaeus merguensis*, in the Gulf of Carpentaria. In *Second Australian national prawn seminar*. P.C. Rothlisberg, B.J. Hill, and D.J. Staples (eds.), Cleveland: 185-191.
- Somers I.F., P.J. Crocos, and B.J. Hill, 1987. Distribution and abundance of tiger prawns, *Penaeus esculentus*, and *P. semisulcatus* in the north western Gulf of Carpentaria, Australia. *Austr. J. Mar. Freshwater Res.* 38: 63-78.
- Staples D.J., W. Dall, and D.J. Vance, 1984. Catch prediction of the banana prawn, *Penaeus merguensis*, in the south-eastern Gulf of Carpentaria. In *Penaeid shrimps: their biology and management*. J.A. Gulland and B.J. Rothschild (eds.), Fishing News Books Ltd.: 259-267.
- Stephenson R.L. and D.E. Lane, 1995. Fisheries management science: a plea for conceptual change. *Can. J. Fish. Aquat. Fish. Sci.* 52: 2051-2056.
- Stevenson D.K., 1981. A review of the marine resources of the Western Central Atlantic Fisheries Commission (WECAFC) region. *FAO Fish. Tech. Pap.* 211, 132 p.

- Stewart I., 1992. Dieu joue-t-il aux dés? Les nouvelles mathématiques du Chaos. Flammarion, Paris, 441 p.
- Stiglitz J.E., 1974. Incentive and risk sharing in sharecropping. *Rev. Econ. Stud.* 41: 219-256.
- Stiglitz J.E., 1975. Incentives, risk and information: Notes toward a theory of hierarchy. *Bell J. Econ.* 7: 552-579.
- Sutinen J.G., 1979. Fishermen remuneration systems and implications for fisheries development. *Scott. J. Pol. Econ.* 26(2): 147-162.
- Suther F.C. and J.Y. Christmas, 1983. Multilinear models in the predictions of brown shrimp harvest in Mississippi waters. *Gulf Res. Rep.* 7: 205-210.
- Terkla D.G., P.B. Doeringer, and P. Moss, 1985. Common property resource management with sticky labor: the effect of job attachment on fisheries management. Discussion Pap. 108, Dept. Econ., Boston University.
- Tettey E.O., W.L. Griffin, 1984. Investment in Gulf of Mexico shrimp. *Mar. Fish Rev.* 46: 49-52.
- Tettey E.O., C. Pardy, W.L. Griffin, and A. Swartz., 1984. Implications of investment under different economic conditions on the profitability of Gulf of Mexico shrimp vessels operating out of Texas. *Fish Bull.* 82(2): 145-153.
- Thompson W.F., 1950. The effect of fishing on stocks of halibut in the Pacific. Univ. of Washington Press, Seattle.
- Thompson W.F., H.A. Dunlop, and F.H. Bell, 1931. Biological statistic of the Pacific halibut fishery. (1) Change in yield of a standartized unit gear. *Int. Fish. Comm. Rep.* 6, 119 p.
- Tibshirani R., 1988. Estimating transformations for regression via additivity and variance stabilization. *J. Am. Stat. Assoc.* 83: 394-405.
- Tiao G.C. and G.E. Box, 1981. Modelling multiple time series with applications. *J. Am. Stat. Assoc.* 76: 802-816.
- Tomassone R., 1992. Les outils de la recherche : modélisation, simulation, moyens informatiques. Rapport de conjoncture du CNRS 22: 421-437.
- Troadec J.-P., 1989. L'homme et les ressources halieutiques: essai sur l'usage d'une ressource renouvelable. Introduction. Edition IFREMER: 21-66.
- Troadec J.-P., 1994. Le nouvel enjeu de la pêche : l'ajustement des institutions aux nouvelles conditions de rareté de la ressource. *C. R. Acad. Agric. Fr.* 80(3): 41-60.
- Troadec J.-P., W.G. Clark and J.A., Gulland 1980. A review of some pelagic fish stocks in other areas. In The assessment and management of pelagic fish stocks. A. Saville (ed.), *Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer* 177: 252-277.
- Turvey R., 1964. Optimizaton in fishery regulation. *Am. Econ. Rev.* 54: 64-76.
- Tyler A.V., 1992. A context for recruitment correlations: why marine biologists should still look for them. *Fish Oceanogr.* 1(1): 97-107.
- Uvarov B.P., 1931. Insects and climate. *Trans. R. ent. Soc. London* 79: 1-247.
- Venaille L., 1979. La pêche de crevettes Pénéides du plateau guyano-brésilien. *Bull. Inst. Pêches Marit.* 297: 1-15.
- Vendeville P., 1992. La question des nurseries de crevettes en Guyane française ; du mythe à la réalité ou du concept d'intrusion estuarienne de postlarves à l'hypothèse de nurseries littorales. Rap. prov. ORSTOM, Cayenne.
- Verhulst P.F., 1838. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. *Corresp. Math. Phys.* 10: 113-121.
- Volterra V., 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. *Mem. R. Acad. Naz. dei. Lincei. Ser. VI* 2.

- Von Foester J., 1959. Some remarks on changing populations. In The kinetics of cell proliferation. F. Stohlmán (ed.), Grune & Stratton, New-York: 382-407.
- Walters C.J., 1986. Adaptive management of renewable resources. McMillan, New-York, 374 p.
- Walters C.J., 1989. Value of short-term forecast of recruitment variation for harvest management. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 1969-1976.
- Walters C.J. and J.S. Collie., 1988. Is research on environmental factors usefull to fisheries management? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 45: 1848-1854.
- Wang Y.H. and A.P. Gutierrez, 1980. An assessment of the use of stability analyses in population ecology. *J. Anim. Ecol.* 49: 435-452.
- Watt K.E., 1966. The nature of systems analysis. In Systems analysis in ecology. K.E. Watt (ed.), Academic Press., New-York.
- Weber J., 1993. Document de recherche : Unité commune de recherche; gestion des ressources naturelles renouvelables, environnement (G.RE.EN). CIRAD, URPA/Ress. Ren., Paris, 25 p.
- Weber J. Gestion des ressources renouvelables : fondements théoriques. en préparation.
- Weber J. et D. Bailly, 1993. Prévoir, c'est gouverner. *Nature, Sciences et Société* 1(1): 59-64.
- Western Central Atlantic Fishery Commission (WECAFC/COPACO) 1991. Report of the third Workshop on the Biological and Economic Modelling of the Shrimp Ressource of the Guyana-Brazil Shelf, FAO Fisheries Report.
- Wiens J.A., 1989. Spatial scaling in Ecology. *Functional Ecol.* 3: 385-397.
- Wilén J.E., 1976. Common property resource and the dynamics of over-exploitation: the case of the North Pacific fur seal. Resear. Pap. 3, Univ. Brit. Colum., Vancouver. In C.W. Clark, 1985 (*op. cit.*).
- Williamson M., 1972. The analysis of biological populations. Arnold, London.
- Willmann R., 1996. A valued-based individual transferable quota scheme - a preliminary examination of its suitability as a fisheries management technique. In Proceedings of the VIIIth International IIFET Conference on Fisheries Economics, 01-04 Jul., Marrakech (sous presse).
- Willmann R. and S. Garcia, 1985. A bio-economic model for the analysis of sequential artisanal and industrial fisheries for tropical shrimp (with a case study of Suriname shrimp fisheries). FAO Tech. Pap. 270, 49 p.
- Whittaker R.H., 1974. "Stability" in plant communities. In Structure, functioning and management of ecosystems. Proceedings of the First Int. Congr. Ecol. PUDOC, Wageningen: 68.
- World Meteorological Organisation (WMO), 1986. Report of the International Conference on the assessment of the role of carbon-dioxide and other greenhouse gases in climatic variations and associated impacts. Vill, 9-15 Oct. 1985, WMO-661, Paris, Int. Council of Scientific Union, 78 p.
- Yokel B.I., E.S. Iversen and C.P. Idylly, 1969. Prediction of the success of commercial shrimp fishing on the Tortugas grounds, based on enumeration of emigrants from the Everglades National Park estuary. In Proceedings of the World Scientific Conference on the biology and culture of shrimps and prawns. M.N. Mistakadis (ed.), FAO Fish. Rep. 57: 27-40.
- Zoetewij, H. 1956. Fishermen's remuneration. In The economics of fisheries. R. Turvey and J. Wiseman (eds.), FAO, Rome: 18-41.

ANNEXES

Les cinq annexes qui suivent regroupent une partie des travaux qui ont été publiés (ou soumis) pendant la période de recherche de la thèse. Plus particulièrement, il s'agit d'articles dont certains détails ou analyses ne sont pas reportés intégralement dans le manuscrit de thèse mais qui s'avèrent cependant importants, soit d'un point de vue analytique (détail méthodologique, démonstration mathématique, etc.), soit d'un point de vue de l'argumentation (analyse complémentaire, figure supplémentaire, données chiffrées, etc.).

ANNEXE I

Béné C., 1996. Effects of market constraints, the remuneration system, and resource dynamics on the spatial distribution of fishing effort. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 56: 563-571

Effects of market constraints, the remuneration system, and resource dynamics on the spatial distribution of fishing effort

Christophe Béné

Abstract: This paper is an attempt to identify the decision criteria that lead the fishermen of the French Guyana shrimp fishery to adopt given fishing behaviours. These decision criteria and the subsequent fishing behaviours are then connected to the space-time dynamics of the fleet. The spatial distribution of fleet effort is analyzed at both intra- and inter-annual time scales and compared with the space-time distribution of the resource biomass. It appears that the seasonal movement of the fleet did not follow the oscillations of the resource biomass. This absence of a relationship is explained through analysis of the remuneration system of the fishery. This remuneration contract provides incentives to fishermen to search preferentially for large shrimp during periods of high resource levels and to reorientate their efforts toward smaller shrimp during months of lower catch levels. Furthermore, the fleet exhibits an interannual drift from offshore to inshore fishing zones. A series of tests suggests that this interannual shift might not be a response to long-term resource migration but rather to changes in the market's constraints. However, this long-term shift does not seem to alter the seasonal movement of the fleet.

Résumé : Dans ce papier, l'auteur tente d'analyser la procédure de décision à partir de laquelle les pêcheurs de la pêcherie crevettière de Guyane française établissent leur stratégie de pêche. Pour cela, la distribution spatiale de l'effort de pêche de la flottille est identifiée à l'échelle intra-et inter-annuelle. Elle est ensuite comparée à la distribution spatio-temporelle de la ressource. À l'échelle intraannuelle, il apparaît que le mouvement saisonnier qui caractérise la répartition spatiale des navires n'est pas en phase avec les oscillations observées dans les indices d'abondance de la ressource. Ce déphasage peut être expliqué grâce à l'analyse du système de rémunération. Le système de rémunération pousse en effet les pêcheurs à rechercher préférentiellement les grosses crevettes pendant la saison de hauts rendements puis à réorienter leur effort vers les petites crevettes pendant les périodes de bas rendements. Par ailleurs, un rapprochement de la flottille à la côte est observé à l'échelle interannuelle. Une série de tests est utilisée pour montrer que ce mouvement n'est pas une réponse à un changement dans la distribution de la ressource mais une adaptation à la nouvelle demande des marchés. Ce déplacement vers la côte n'altère cependant pas le mouvement saisonnier des navires.

Introduction

The idea that fishing strategies reflect compromises between two constraints, resource dynamics and market demands, and one objective, maximization of income, is commonplace. It is an illustration of the widely accepted view that taking fishermen's behaviour into account involves the analysis of the interaction between natural and social systems (Rey 1993). Such an idea raises several questions: (i) What exactly is meant by the concept of fishing strategy? (ii) Does this notion differ from that of either fishermen's behaviour or fleet dynamics, and if so, in what aspects? (iii) Which indicators help to identify and analyze the adoption of a given fishing strategy? (iv) Can we identify or perhaps even quantify the respective effects of each of the constraints and objectives on this adop-

tion process? This series of questions forms the background of the present study.

The basis of this investigation is the French Guyana shrimp fishery. This fishery has been thoroughly studied and described since the beginning of its exploitation in the early 1960s (Dintheer et al. 1991). However, very little has been written about the relationship between fleet dynamics and fishing strategies within this fishery. The objective of the present study is to determine whether a pattern in fleet dynamics can be detected and if so, whether or not we can link fleet dynamics to particular fishing strategies.

Notion of fishing strategy and fleet dynamics indicators

The first important step is to define precisely the following three terms: fishing strategy, fishermen's behaviour, and fleet dynamics. Hilborn (1985) defines fleet dynamics as the global combination of four elements: investments, effort allocation, catching power, and discarding. Fleet dynamics is also generally related to effort allocation (Liao 1979; Hilborn and Ledbetter 1979; Millington 1984). It is also common to relate the notion of fishing strategy to shifts in target species and (or) gear choice. For instance, Laloë and Samba (1991) define a strategy as the probability of choosing among a given combination of gear, target species, and geographic location.

A slightly different point of view is adopted here. We argue

Received January 7, 1994. Accepted September 12, 1995.
J12220

C. Béné.¹ Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER), Station IFREMER, B.P. 477, 97331 Cayenne, French Guyana, France.

¹ Present address: Centre IFREMER, rue de l'Île d'Yeu, B.P. 1105, 44311 Nantes, France. e-mail: cbene@ifremer.fr

that the observation of a switch between two combinations of gear, target species, and geographic locations is simply the observation of a change in fishing behaviour (when this shift concerns only one fisherman) and in fleet dynamics (when this change involves a large number of ships), but that this switch is not equivalent to the identification of a fishing strategy. We define a given fishing strategy as the set of decision criteria that link a given fishing behaviour with the objective(s) and constraint(s) that have stimulated such behaviour. From this standpoint, the fishing strategy is seen as the internal decision-making process used by the fisherman with respect to his constraint(s) and his objective(s) and the fisherman's behaviour as the observable reflection of this strategy. Likewise, the fleet dynamics is the result, at the fishery level, of each fisherman's individual behaviour. Note here that fleet dynamics thus appears to be the observable global result of an invisible individual decision-making process. This may be the reason why the two notions have sometimes been confused.

A fisherman's behaviour may be described by a large number of factors ranging from the simple choice of equipment to the spatial and temporal distribution of effort. It may also include shifts in the preference for targeted species, and (or) even changes in the duration of a trip. Characterizing a given fleet dynamics therefore requires the collection of quite a lot of information of both a technical and sociological nature. One rarely collects all the information required. However, in the present case study, the task is made easier by three circumstances: (i) this fishery is centered on one species (*Penaeus subtilis*); (ii) only trawlers are used; and (iii) as is generally observed for shrimp (Dall et al. 1990), the size of the shrimp of the French Guyana stock is depth dependent (Venaille 1979). The largest shrimp are found in the deepest waters of the fishing area, whereas smaller shrimp are observed inshore. These three characteristics determine the dynamics of the fishery. Two potential indicators of fleet dynamics were chosen: (i) the spatial distribution of effort, and (ii) the relative proportions of each commercial category in the catches. We shall start by focussing on the first of these two fleet indicators, the spatial distribution of fishing effort, and compare its pattern with the resource space-time distribution.

Methods and results

Nature of the data

The data used in this study consist of captains' logbook reports for the period 1984–1990. The fishing area is the exclusive economic zone off the coast of French Guyana. The entire fishing area was divided into 15 subsectors and covered an area of three latitude sectors (55–54, 54–53, and 53–52°W, respectively) and five previously defined depth zones (<30, 30–40, 40–50, 50–60, and 60–70 m). For each of the 15 subsectors, two types of information were recorded. Firstly, the spatial attendance of the fleet was worked out for each subsector. The attendance index was measured in days of presence per month in each sector. It was obtained by counting the number of ships present during a given month within each sector. This attendance index was then adapted to calculate a rate of attendance (as a percentage) because the absolute number of logbooks correctly filled in and returned by the captains varied over a given time. Secondly, a catch per unit

effort (CPUE) series (in kilograms per hour of trawling) was calculated for each subsector.

Two of the (<30 m) subsectors lacked data, because the fishing zone had not been uniformly visited by the ships for which logbooks were filled in. Consequently, these missing values have been substituted by zero values in the series of attendance index. In contrast, missing values for the CPUE series are the result of the nonattendance periods. The actual values that would have been recorded if at least one ship had entered these subsectors are likely to have been greater than zero. Consequently, the (<30 m) subsectors were disregarded for the analysis of the CPUE series. The remaining 12 series were assumed to reflect the level of the resource biomass within each corresponding subsector, whereas the complete 15 series of rates of attendance were assumed to reflect the fleet effort within each of the corresponding subsectors.

Fleet dynamics: an apparent lack of correlation between intraannual resource dynamics and spatial effort distribution

Analysis of the spatio-temporal distribution of the resource biomass and fleet effort

Garcia et al. (1985) and Dintheer and Rosé (1989) have already shown with a global CPUE series obtained for the entire fishing area that the resource biomass is characterized by an annual cycle. This seasonal pattern consists of 6 months of high biomass levels during the first half of the year (January–June) and 6 months of lower biomass during the second half of the year (July–December). To determine whether this global pattern is also observed within the different depth zones, the seasonal-spatial indices ($I_{CPUE,j,z}$) were calculated for each of four depth zones (z): 30–40, 40–50, 50–60, and 60–70 m, on the basis of the following formula:

$$I_{CPUE,j,z} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} CPUE_{j+12k,z}$$

where $j = \{1, \dots, 12\}$ is the month of the year, K is the number of years of the series, $k = \{0, \dots, K-1\}$, and $CPUE_{j+12k,z}$ is the average value of the CPUE series obtained for the three sectors (s_i) belonging to the same depth zone (z) when $K = 7$.

The results obtained with these seasonal-spatial indices of biomass confirm the analyses made for the entire fishing area by Garcia et al. (1985) and Dintheer and Rosé (1989). They emphasize a cosine-like intraannual oscillation of the CPUE series in each of the four depth zones. In fact, a clear-cut seasonal pattern is observable within the whole of the fishing zone regardless of the depth (Fig. 1a). The shrimp seem to disappear from July to December. In addition, the shallow-water zones (30–40 m) always provide higher levels of biomass than the deep-water zones (50–60 and 60–70 m). This suggests that the biomass level of the largest shrimp (present in deep-water zones) is always lower than that of the small shrimp usually observed near the coast. All of these results are in accordance with descriptions given by fishermen.

Using a similar procedure for the attendance rate, seasonal indices were calculated for five depth zones (z): <30, 30–40, 40–50, 50–60, and 60–70 m, on the basis of the following formula:

Fig. 1. (a) Distribution of resource biomass (z axis), related to depth (y axis) and time (x axis). A seasonal pattern in the biomass distribution is observable over the entire fishing area, regardless of depth. (b) Distribution of fleet effort (z axis) measured by the fleet attendance index in relation to depth (y axis) and time (x axis). The fleet dynamics displays a seasonal shift from the deep zones (50–60 and 60–70 m) to the shallow zones (<30 and 30–40 m) throughout the year. On both graphs, curves separating each major scale unit curves (i.e., curves between <30 m, 30–40 m, . . . , 60–70 m) have been extrapolated for visualization purposes.

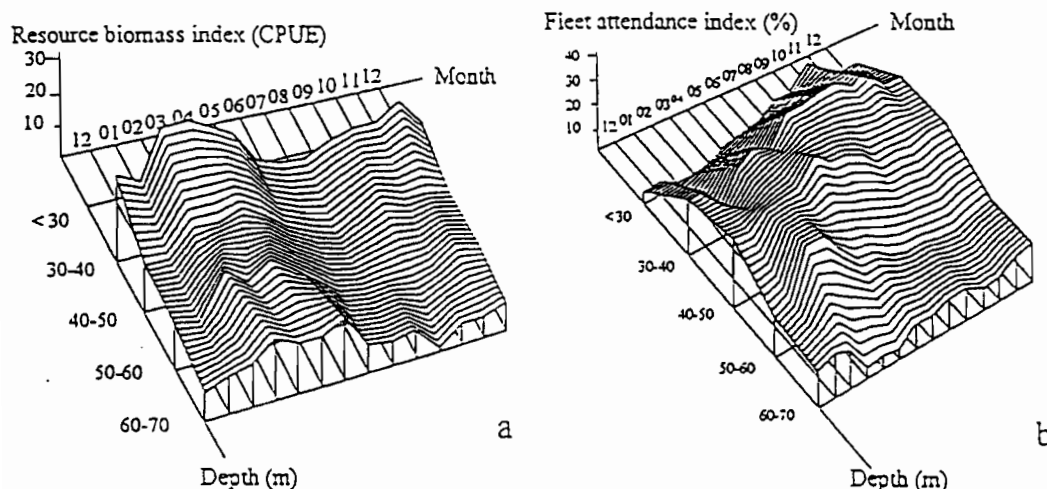
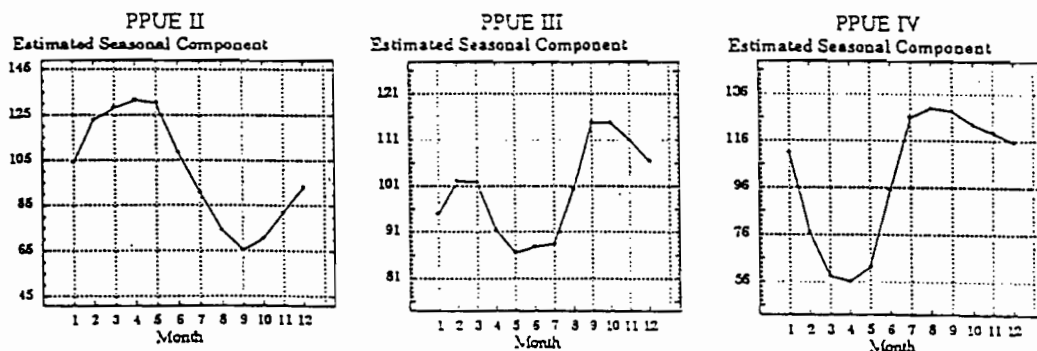


Fig. 2. Estimated seasonal components for the PPUE series of categories II, III, and IV. The gradual waving in the peaks of the seasonal components when passing from the PPUE II to the PPUE IV series illustrates the shift in landings composition. The catches are mainly composed of large individuals in the first part of the year (January–June) and small shrimp over the rest of the year (July–December).



$$I_{ATTN_{j,z}} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} ATTN_{j+12k,z}$$

where $j = \{1, \dots, 12\}$, $k = \{0, \dots, K-1\}$, and $ATTN_{j+12k,z}$ is the average value of the ship attendance obtained for the three sectors (s_z) of each depth zone (z) when $K = 7$.

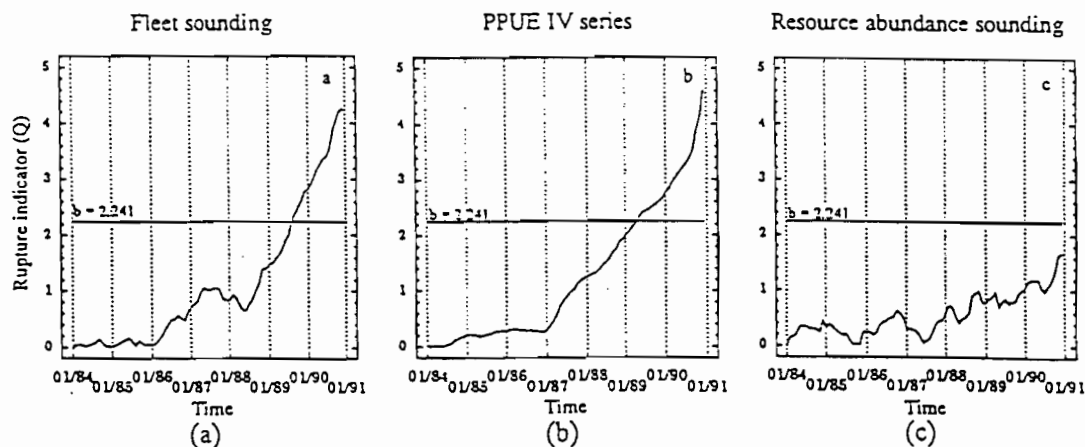
We thus obtained the intraannual spatial distribution of the fleet effort (Fig. 1b). Two points have to be emphasized. (i) Although the general pattern does not appear to be as simple as that of the resource distribution, a pattern can be detected in the fleet attendance index. The fleet moves gradually from offshore zones toward inshore zones throughout the year. (ii) This spatial effort distribution does not seem to correlate at first with the pattern displayed by the resource oscillations.

Although the biomass indices show that the more abundant zones are located inshore, a large number of fishermen neglect these high levels of biomass during the first part of the year and concentrate effort in deeper zones.

Analysis of catch composition throughout the year

Next, we attempted to determine whether the analysis of the composition of the catch confirmed the previous results. If the fishermen's behaviours are correctly described above, one would expect the catch to consist mainly of large shrimp during the first part of the year and of smaller shrimp during the second half of the year. The statistics recorded by the laboratory of the Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer in Cayenne from the processing factories for the period 1979–1992 were split into four categories (i) and the

Fig. 5. Test of detection of deviation from mean in the three following series: (a) fleet sounding, (b) landings composition index (here the PPUE IV series), and (c) resource biomass sounding. The computed deviation indicators (Q) for both fleet sounding and landings composition series exceed the threshold rupture $b = 2.241$. This shows that significant deviations occur at 5%. The test fails to identify deviation in the series for resource biomass sounding (see text for comments).



during these so-called good months. To answer this question, a numerical simulation was run where the fishermen's MI was calculated in relation to γ and Q_m for a given set of p_i , the parameter ib being fixed. Q_m ranged from 1000 to 12 000 kg. These values are approximately at the limits of the monthly catch volumes per boat observed during the 1980s. γ was set to vary from 0 to 35%.

Figure 3 illustrates the results of the simulation. As expected, we observed that $dMI/d\gamma < 0$ and $dMI/dQ_m > 0$. The gamma elasticity of income γE_{MI} was not constant with respect to Q_m . The increase in $dMI/d\gamma$ along the Q_m axis shows that the elasticity value increased with Q_m .

The rise in the value of γE_{MI} with respect to Q_m has important consequences for the fishermen's behaviour. Imagine cases in which two fishermen, α and β , adopt two opposite behaviours, A and B, where behaviour A consists of staying inshore and concentrating on smaller shrimp and behaviour B consists of systematically looking for larger shrimp when the latter are abundant. The simulation suggests that when the two fishermen compare their respective incomes for a given volume of catch, Q_m , the difference in these incomes will be nearly nil for low values of Q_m , but much more significant in favour of fishermen β for high values of Q_m . The fishermen's incomes are thus more sensitive to the composition of the landings during the months of high levels of Q_m than during periods of low Q_m . The fishermen therefore have incentives to look for large shrimp during good months. In contrast, during the rest of the year, when the global resource biomass is low within the entire fishing zone, fishermen redistribute their efforts to the inshore zones. By so doing, they expect to find levels of small shrimp biomass high enough to ensure a minimal catch volume. This inshore fleet movement may be viewed as an adaptive behaviour during bad months. This behaviour relies on the idea that during the second half of the year, catching a large quantity of small, poorly remunerated shrimp is better than concentrating fishing effort on large, scarce shrimp.

Analysis of the long-term spatial distribution of effort

The annual trend of the curve of the fleet sounding shows a residual long-term decrease over the period 1982–1990 that seems to start during 1987 (Fig. 4). This interannual inshore movement suggests that in addition to its seasonal dynamics, the fleet has gradually moved inshore after 1987. We can hypothesize that this interannual trend can be a reflection of three situations: (i) companies asked the fishermen for a shift in the size of shrimp targeted to respond to changes in market demands, i.e., an anthropically induced change, or (ii) a response to a change in shrimp distribution, i.e., a biologically induced change, or (iii) a combination of the two.

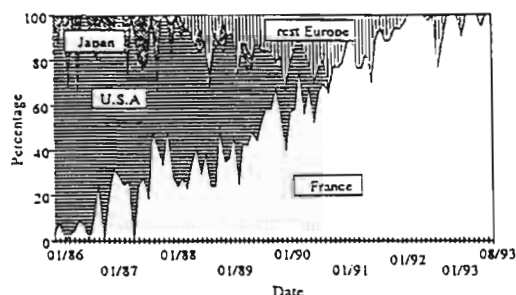
We conducted a series of tests to identify the origin of this interannual fleet movement. We assumed that if a change in the resource spatial distribution occurs, it should also entail shifts in the subsectors' biomass series. For instance, if the resource gradually moves inshore, the biomass in the different depth zones should also change, with the biomass indices of the inshore zones increasing and those of the deeper zones decreasing. A curve of the sounding of the resource biomass, $SndRe_m$, was therefore built up for the period 1984–1990. This index indicates the zone of location of the resource. It was obtained by weighting the resource biomass series of each depth zone, expressed as percentages of the global biomass in the month concerned, by the median depth value of the zone (z):

$$SndRe_m = \sum_{z=med} \frac{CPUE_{m,z}}{CPUE_{m,t}} \times z_{med}$$

where $CPUE_{m,z}$ is the resource biomass value of month m for the three subsectors of depth zone z , z_{med} is the median value equal to {25, 35, ..., 65} (in metres), and $CPUE_{m,t}$ is the value of the total biomass index for the entire fishing zone for month m .

The three series of the fleet sounding, the catch composition (here the PPUE IV series), and the depth of the resource

Fig. 6. Exports for the French Guyana shrimp fishery over the period 1986–1993. Starting from zero in 1986, the proportion of the French market rises to represent more than 95% of exports for the fishery after 1991. (Source: Direction nationale des statistiques du commerce extérieur, Toulouse, France.)

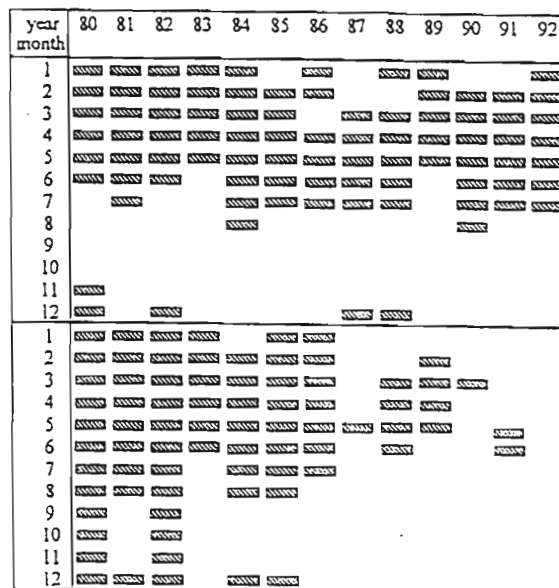


biomass were then tested to determine whether or not these series display deviation from their respective means. The following four situations are possible. In case 1, the decrease observed in the fleet sounding (Fig. 4) after 1987 is not a significant deviation: the fleet has not actually changed its interannual distribution of effort. In case 2, both the resource biomass sounding and the fleet sounding but not the PPUE IV series deviate from the mean: the resource has changed its spatial distribution and fishermen have responded to this biological change by a shift in their spatial distribution of effort. By so doing they have managed to prevent the composition of their landings from being disturbed by the resource shift. In case 3, both the fleet sounding curve and the composition index deviate from their respective means but the resource sounding index does not: the fishermen have redistributed their effort to change the composition of landings. This fleet movement is not induced by a change in the spatial distribution of the resource. In case 4, the three series display deviations: both the resource and the fishermen have changed their spatial distributions. The catch composition has been modified.

Tests for detecting deviation in the means of time series are well documented. However, most of these test procedures concern series of independent data. Here, the dependence of the data induced by seasonality does not allow the use of such tests. For cases where the date of rupture is known, Tiao et al. (1975) proposed exogenous autoregressive moving-average (ARMA) models with impulse functions and response variables to indicate the deviation. In our case, taking the deviation date as known would imply an *a priori* statement. Chalmond (1981) proposed a test procedure to detect a deviation from the mean of an ARMA model when the deviation date is unknown (see the Appendix for calculations and details of the procedure). If the computed deviation indicator, Q , goes beyond a given threshold value, this implies the occurrence of a significant deviation.

Chalmond's (1981) test was applied to the three series. The results are displayed in Fig. 5. A statistically significant deviation occurs for both the fleet sounding and the landings composition indices at 5% but not for the series on resource biomass sounding. This situation corresponds to case 3. The spatial distribution of resource biomass does not appear to have changed. The shift in fishermen's effort was thus a deliberate action implemented to change the composition of land-

Fig. 7. Evolution of landings composition on intraannual (vertical) and interannual (horizontal) time scales. The months in which the proportion of category II exceeds the proportion of category III in catches are indicated by hatched blocks, while the absence of blocks indicates the reverse case. Top diagram: series with trend removed (using the procedure of Makridakis et al. (1983)); bottom diagram: raw series (see text for comments).



ings. However, the factors leading fishermen to change their catch composition still need to be identified. What drives fishermen to concentrate efforts toward smaller shrimp when the commercial categories of these small shrimp are less profitable than those of large shrimp? Our suggestion is market constraints.

Effects of markets on composition of landings

From 1980 to 1990, the fleet of the French Guyana fishery was made up of three different components (subfleets). The American subfleet has been present since the beginning of the fishery in the early 1960s; Japanese investors entered the fishery at the end of the 1970s. In 1981, the French government launched a programme with the objective to take back control of the fishery. This programme offered very large subsidies and financial incentives to French investors willing to enter the fishery and it put constraints on companies of the other subfleets. In fact, it led to the forced substitution of the two foreign fleets by French ships. This fleet substitution process has been thoroughly described (Gilly and Cochet 1988a, 1988b; Dintheer et al. 1991).

However, the substitution of the American and Japanese fleets simultaneously closed market opportunities offered by these two countries, both of which have a very high shrimp consumption. The French market, and to a lesser degree the European market, thus became the sole export outlet for the fishery (Béné and Moguedet 1993). The changes in direction of fishery exports are shown in Fig. 6. A direct consequence of this export reorientation was that French companies had to

change their commercial strategies. They had to produce and export smaller shrimp for French and European markets, in contrast to the former export of large shrimp to Japan. It is interesting to note that this shift occurred during the same period in which the deviation in both the sounding curve for the fleet and the curve for catch composition occurred (cf. Figs. 5a, 5b). This synchronicity between the two independent events argues for a cause-effect relationship. Market reorientation imposed a change in the composition of the landings, which was achieved through a redistribution of global fishing effort toward shallower zones.

Impact of long-term fleet movement on seasonal fleet dynamics

The long-term shift of the fleet was apparently the result of market constraints. We may now wonder to what extent this shift has affected the seasonal distribution of effort determined by the dynamics of the resource. If we accept the idea that the trends in the spatial distribution of effort and in the subsequent landings composition series are determined by market changes, then it should be sufficient to remove the trend in the series of landings composition to observe the seasonal effect of the resource on the landings composition series. We applied this simplistic hypothesis to the series of landings to analyze the simultaneous evolution of the two series of PPUE II and PPUE III over the period 1980–1992 (recall that category II contains the largest shrimp). The results are displayed in Fig. 7.

The top section of Fig. 7 shows the trend-adjusted series, i.e., trend removed. The bottom section shows the same analysis with the raw series, i.e., with trend. The raw series displays a gradual shift of the predominant category from PPUE II to PPUE III. For all months of 1980, the percentage of category II that was landed was greater than that of category III, whereas the situation was reversed in 1992. In contrast, once the long-term shift is removed (adjusted trend series of the top section), the seasonal pattern in the landings composition appears unmodified throughout the 13 years. Catches are constantly made up of large shrimp during the first 6 months of all years and small shrimp during the rest of the year. This is indicated in the top section by the recurrence of the hatched blocks from January to June, followed by the absence of blocks for the rest of the year. In other words, the long-term shift in the spatial distribution of effort did not modify the seasonal evolution of catch composition. The ships gradually moved closer to the coast over a 13-year period but they still maintained their seasonal strategy within each fishing season.

Discussion and conclusions

A fishing strategy is the combination of various decision criteria that lead fishermen to adopt a given fishing behaviour. When dealing with the problem of fishing strategy, the question we have to answer is therefore not "How do the fishermen behave?" but "Why do they behave the way they do?" The answer to this question requires firstly the identification of the fishermen's behaviour and secondly the search for potential factors whose effects may explain the fishermen's choices. The decisions taken at the individual level are then identified at the global level by studying fleet dynamics. Fleet dynamics

analysis is therefore the first step toward identifying fishing strategies (see Hilborn 1985).

Usually, a given fleet dynamics may involve a large number of parameters such as indices of spatial and temporal allocation of effort, the number and type of species targeted, and the various combinations of gear chosen. Consequently, analysis of fleet dynamics requires careful choice of indicators whose variations, even if they do not explain the origins of the behaviour, follow it very closely. In the case of a fishery in which only one species is exploited with one type of equipment, these indicators may be variations in spatial and temporal distribution of fishing effort. This is the case with the French Guyana shrimp fishery.

In the present study, the investigation was restricted to the analysis of the spatial distribution of effort. On a seasonal scale, this spatial distribution follows a cyclic offshore to inshore movement. This seasonal movement is complicated over the long term by a gradual shift of the fleet effort toward the shallow subsectors of the fishing area. Such spatial fleet dynamics does not seem to fit with the spatial distribution of the resource. Indeed, comparative analysis of the distributions of both fishing effort and resource biomass highlights two paradoxes: (i) on a seasonal scale, there is an apparent lack of correlation between the allocation of fleet effort and resource distribution during the months with high biomass (January–June); (ii) the long-term inshore shift does not seem to be caused by a change in the spatial distribution of the resource.

The fact that fishermen concentrate a large part of their effort on deep-water zones despite the fact that the maximal resource biomass is known to occur in the shallow areas may be due to the form of the remuneration contract. The contract provides incentives for captains to pay particular attention to the composition of their landings during months of high levels of resource biomass. The present analysis suggests, in particular, that the fishermen's incomes become more sensitive to the composition of the catches when the total catch volumes increase.

On the other hand, the gradual interannual movement of the fleet toward shallower zones may be the result of the impact of market constraints. Movement of the fleet inshore results in an overall increase in the proportion of the small categories in the catch. This change satisfies the requirements of the European, especially the French, markets, which are characterized by large demands for small shrimp. This analysis shows, however, that the long-term spatial shift has not altered the seasonal distribution of effort.

In this attempt to characterize the fleet dynamics of the French Guyana shrimp fishery, two facts were neglected: (i) the daily spatial allocation of effort and (ii) the difference in the distribution of effort for the different subfleets concerned. Regarding the first of these, it is likely that resource dynamic and especially circadian cycles that occur in Penaeidea (Dall et al. 1990) result in some adaptation of fishing patterns on a daily scale. Regarding the second point, Dinther and LeGall (1988) and Dinther and Rosé (1989) noticed a difference in the effort allocation of the respective subfleets. For instance, they emphasized that French ships were preferentially allocated to inshore sectors whereas Japanese ships were generally observed in deeper waters.

Nevertheless, if we confine the analysis to a global level, i.e., regardless of the nationalities of ships, and if we choose

to disregard daily dynamics, it seems possible to propose an explanation for the seasonal pattern and interannual trend observed in the shrimp fleet. The fishing strategy to be related to such fleet dynamics is defined by the combination of different decision-making processes: (i) the decision to favour fishing zones where large and expensive shrimp are expected to be found during good months of the year (January–June); (ii) the principle of catching small shrimp even if they are less profitable, rather than continuing to concentrate on large shrimp when the total biomass of the stock is low (July–December) (the subsequent redistribution of effort is made toward inshore zones, where resource is known to be more abundant, to ensure minimal landings volumes); and (iii) the choice of an appropriate long-term allocation of global effort that ensures an adequate fit between the global landings composition and the size requirements of the market supplied. This analysis thus offers a possible reason why the fishermen do not always fish where the biomass is maximal. It also helps to explain why the fleet has undergone a gradual inshore shift over a 13-year period while the resource does not seem to have changed its spatial distribution.

Acknowledgements

I thank Drs. Carl Walters and Antony T. Charles for their constructive comments on a previous version of this paper, Dr. P. Moguedet for his helpful remarks and advice during the initial research, and Natalie Moir for her patience and support during the whole editorial process.

References

- Béné, C., and Moguedet, P. 1993. Sustainable fishery development, a theoretical contribution through the French Guyana lorgnette. Technical consultation on sustainable fisheries development in the WECAFC area, FAO, Caracas, 15–24 October 1993.
- Chalmond, B. 1981. Détection d'une rupture de moyenne en un point inconnu d'un processus ARMA. *Rev. Stat. Appl.* 29: 7–20.
- Dall, W., Hill, B.J., Rothlisberg, P.C., and Staples, D.J. 1990. The biology of the *Penaeidae*. In *Advances in marine biology*. Vol. 27. Edited by J.H.S. Blaxter and A.J. Southward. Academic Press, London.
- Dintheer, C., and Le Gall, J.-Y. 1988. Analyse et modélisation des composantes biologiques de la pêche crevettière de Guyane française. Int. Rep. No. DRV-88.026-RH. Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, Cayenne, France.
- Dintheer, C., and Rosé, J. 1989. Distribution spatio-temporelle de *Penaeus subtilis* au large de la Guyane française. Bien fondé de l'interdiction de pêche dans les 30 mètres et proposition d'aménagement. Rep. No. 1/87 DRV/RH. Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, Cayenne, France.
- Dintheer, C., Gilly, B., Le Gall, J.-Y., Lemoine, M., and Rosé, J. 1991. La recherche et la gestion de la pêche crevettière Pénéides en Guyane française de 1958 à 1988: trente années de surf. In *La Recherche Face à la Pêche Artisanale: Symposium International ORSTOM-IFREMER*, Montpellier, France, 3–7 July 1989. Edited by J.-R. Durand, J. Lemoalle, and J. Weber. Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, Paris, France. pp. 859–870.
- Garcia, S., Lemoine, M., and Le Brun, E. 1985. Seasonal and long term variability of recruitment in French Guyana shrimp fishery of *Penaeus subtilis*. FAO Fish. Rep. (Suppl.) No. 327.
- Gilly, B., and Cochet, Y. 1988a. Analyse économique de la pêche crevettière de Guyane française. Int. Rep. No. DRV-88.023-SDA. Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, Paris.
- Gilly, B., and Cochet, Y. 1988b. Analyse bio-économique de l'exploitation des crevettes en Guyane française. Int. Doc. No. SDA/87-12. Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, Paris.
- Hilborn, R. 1985. Fleet dynamics and individual variation: why some people catch more fish than others. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 42: 2–13.
- Hilborn, R., and Ledbetter, M. 1979. Analysis of the British Columbia salmon purse-seine fleet: dynamics of movement. *J. Fish. Res. Board Can.* 36: 384–391.
- Laloe, F., and Samba, A. 1991. A simulation model of artisanal fisheries of Senegal. ICES Mar. Sci. Symp. 193: 281–286.
- Liao, D.S. 1979. An economic analysis of mobility of shrimp vessels in the South Atlantic states. S. C. Mar. Resour. Cent. Tech. Rep. No. 35.
- Makridakis, W., Wheelwright, S.C., and McGee, U.E. 1983. Forecasting: methods and applications. 2nd ed. Wiley & Sons, New York.
- Millington, P. 1984. The fishermen as a predator: numerical responses of British Columbia gillnet fishermen to salmon abundance. M.Sc. thesis, Department of Zoology, University of British Columbia, Vancouver, B.C.
- Moguedet, P., Nerini, D., and Gueguen, F. 1994. Évaluation du volume et cartographie des captures accessoires de la pêche de crevettes Pénéides en Guyane française. Contrat d'étude CEE-DG XIV 92-3504, IFREMER final report.
- Rey, H. 1993. Quelques repères et remarques concernant l'approche système et son application à l'halieutique. Document de travail. Groupe de travail Dynamique des systèmes de production, IFREMER, Nantes, 10–12 mai 1993.
- Tiao, G.C., Box, G.E.P., and Hamming, W.J. 1975. Analysis of photochemical smog data: a statistic overview. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 25: 260–270.
- Venaille, L. 1979. La pêche crevettière Pénéides du plateau guyano-brésilien. *Bull. Inst. Pêches Marit. Maroc*, 297: 1–15.

Appendix

Test procedure to detect a deviation from the mean of an ARMA model

We start from the model:

$$X_t = E(X_t) + u_t$$

where u_t is an ARMA model. Under the H_0 hypothesis (no occurrence of deviation), the mean is constant over time, i.e., $E(X_t) = \mu$. On the other hand, if a deviation occurs (H_1 hypothesis) at an undetermined date t_0 , we have

$$E(X_t) = \mu \text{ for } t < t_0 \text{ and } E(X_t) = \mu + \delta_t \text{ for } t > t_0$$

The mean on the first r data is estimated by

$$\bar{X}_r = \frac{1}{r} \times \sum_{i=1}^r X_i$$

The deviation terms and their cumulative sum are defined by

$$d_r = X_r - \bar{X}_{r-1} \text{ and } S_r = \sum_{i=k+1}^r d_i$$

where k is taken as the starting date of the substitution of foreign ships by French ships, i.e., January 1984.

The general variance of the deviation terms series σ^2 is approximated by the formula

$$\hat{\sigma}^2 = \hat{\gamma}_0 + 2 \times \sum_{h=1}^Q \hat{\gamma}_h$$

where $\hat{\gamma}_0$ is the variance estimator and

$$\hat{\gamma}_h = \frac{1}{r} \times \sum_{i=1}^{n-h} (X_i - \bar{X})(X_{i+h} - \bar{X}).$$

As far as Q is concerned, Chalmond (1981, p. 11) recalled that when

$$\hat{\rho}_{h+1} \leq \frac{2}{n^{1/2}} \times \left(1 + 2 \times \sum_{i=1}^h \hat{\rho}_i \right)$$

we have $Q = h$ with ρ_h being the autocorrelation function at lag h .

We define the function

$$R = \text{Max} \left\{ \frac{1}{\sigma(n-k)^{1/2}} \times |S_n|, k \leq r \leq n \right\}.$$

Under H_0 , Chalmond (1981, p. 10) proved that R converges toward the function

$$\text{Sup}\{|W(t)|, 0 \leq t \leq 1\}$$

with $W(t)$ being a Brownian series such that

$$W_t = \{W_s, 0 \leq t \leq 1\} \text{ with } E(W_t) = 0 \text{ and } \text{cov}(W_s, W_t) = \min(t, s)$$

The probability law α_W of $\text{Sup}\{|W(t)|, 0 \leq t \leq 1\}$ is known:

$$\begin{aligned} \alpha_W &= \text{Prob}\{\text{Sup}|W(t)| > b, 0 \leq t \leq 1\} \\ &= 1 - \frac{4}{\pi} \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{2k+1} \exp\left(-\frac{\pi^2(2k+1)^2}{8b^2}\right) \end{aligned}$$

Chalmond calculated the b values for threshold values of α_W . For $b = 2.807$, $\alpha_W = 0.01$, for $b = 2.24$, $\alpha_W = 0.05$, and for $b = 1.960$, $\alpha_W = 0.1$. Choosing an α type error = 0.05, we thus run the deviation occurrence test. If

$$\text{Max} \left\{ \frac{1}{\sigma(n-k)^{1/2}} \times |S_n|, k \leq r \leq n \right\} > 2.241$$

then we can reject the H_0 hypothesis at the risk level $\alpha = 5\%$; this is to say, a significant mean deviation occurs in the temporal series tested.

ANNEXE 2

Cadren M., C. Béné and F. Lantz, 1996. Investigating the dynamic relationships between wild shrimp and cultured shrimp prices. In Proceedings of the VIIIth IIFET Conference on Fisheries Economics, 01-04 Jul., Marrakech, Maroc. (sous presse)

Sous le Haut Patronage de Sa Majesté Le Roi Hassan II



1-4 juillet 1996

VIII ème CONFERENCE INTERNATIONALE SUR L'ECONOMIE DES PECHEES
"Pêche, échanges et développement"

Les partenaires
de l'IIFET 96

Académie
du Royaume
du Maroc

 **CREDIT
AGRICOLE**
SPONSOR OFFICIEL



by

Muriel Cadren, Chrisophe Béné & Frédéric Lantz



SOMMET MONDIAL
DE L'ALIMENTATION
Rome
13-17 novembre 1996



Cette conférence est organisée par

Ministère des Pêches Maritimes
et de la Marine Marchande



Secrétariat permanent IIFET 96
BP 12518 - Casablanca - Maroc

Tél (212 2) 99 32 36
Fax (212 2) 98 17 24

Abstract:

The arrival in the 1980s of cultured shrimp has induced large changes on the World shrimp market. In this new environment, the French Guyana fishery production now competes strongly with some of these farm-produced shrimp. Consequently this fishery has experienced serious export problems during the last decade. This paper is an attempt to analyse the specific impact of the arrival of cultured shrimp to the World markets on the French Guyana domestic market price and on the fleet activity. More particularly, we analyse the relationship between this market and one cultured shrimp market usually considered as benchmark, the Thai market. We use econometric techniques to test whether these two markets are cointegrated and whether causalities exist between them. For these tests, we rely on the two monthly price series recorded over the period 1986-93. The tests indicate that the two series are non-stationary and cointegrated. Therefore, a long-term relationship exists between the two markets, and the identification of the valid dynamic model requires a two-dimension error correcting model. The analysis of the impulse responses derived from the model indicates that the French Guyana market responds significantly to shocks on the Thai market. In other respects, a significant causality from the Thai market to the French Guyana market has been identified. Finally, we discuss these results by briefly analysis the main consequences they induced for the fishery's dynamics.

Introduction

The French Guyana shrimp fishery is a trawl fishery that has been exploiting the stock of two Penaeid shrimp species (*Penaeus brasiliensis* and *Penaeus subtilis*) off the coast of the French Guyana¹ since the early 1960s (see Dintheer et al. (1991) for the fishery's history review). The fishery is organised like an industrial fishery. The fleet which is made up of about 70 vessels owned by several companies, lands annually around 4000 tons of shrimp to the port of Cayenne (the main town of the French Guyana). The fishing season covers the whole year with no seasonal closure and is characterised by a six-month period of high catch rate (from January to June) and a six-month period of lower catch rate (from July to December). The fishery can be considered as a single-species fishery since *Penaeus subtilis* represents now about 95 % of the catches. Since the mid 80s, the global resource access and the fleet effort are limited by a licence system combined to an annual TAC. The production that used to be exported to the Japanese and US markets is now exported toward the European market and mainly purchased by French processors. This market re-orientation is an indirect result of the « francisation » program through which, from 1985 onwards, the French government substituted the American and Japanese companies present in the fishery by French companies (Béné 1996). The French Guyana shrimp used to enjoy very high commercial values that compensated the small catches volumes and induced that Cayenne was the 5th French fishing port (in value terms) at the end of the eighties. However, important financial and commercial difficulties have entailed a 28% decrease (in value terms) between 1990 and 1993 (IEDOM 1993).

During the same period, the world shrimp market has been experiencing very important qualitative and quantitative modifications due to the massive arrival of farm-produced shrimp, essentially from Asia and South-America. One major change was the new influence that the price of these cultured shrimp impose on the world market. It is indeed now widely-admitted that large part of the price fluctuations on Tokyo and New-York shrimp marketplaces is closely related to some cultured species considered since few years as market indicators. Amongst these cultured species that largely influence the world shrimp marketplaces, there are the « Black Tiger » *Penaeus monodon* from Thailand and the Ecuadorian *Penaeus vannamei*.

¹ The French Guyana is a French over-seas department located at the north-eastern border of Brazil.

These species are precisely the two species against which the French Guyana's species *Penaeus subtilis* competes on the French market (Anon 1991).

It appears therefore interesting to try to analyse the effect of the recent expansion of the cultured shrimp on the world shrimp markets. More precisely, and with specific regard to the French Guyana fishery, one may wonder whether the prices of this small shrimp fishery is actually influenced by the dynamics of one of the cultured shrimp considered as world-market price indicator. The plan of the paper is therefore organised to investigate this question. Firstly, a description of the cultured shrimp arrival on the world market is proposed, and we review the main commonly-admitted reasons of their commercial predominance on the wild shrimp species. We then rely on the cointegration approach to test whether there exist a relation between the price of the French Guyana shrimp and that of the Thai Black Tiger. The econometric procedures of the time series analyses are then presented and the results are detailed. Finally, we discuss these results by briefly analysis the main consequences they induced for the fishery's dynamics.

Impact of the cultured shrimp on the markets

Arrival of the cultured shrimp on the world markets

Between 1980 and 1990, the world total shrimp production increased from about 1.6 millions tons to more than 2.6 millions tons. Shrimp represents now more than 30% (in value terms) of the total sea products traded over the world (Anon 1993). This significant growth of shrimp on the sea products markets has been resulting from a simultaneous increase of the demand and the supply. However, the volume of wild captured shrimp remained constant during this period (Fig. 1).

FIG. 1 here

This suggests that the increased demand was thus met with the addition of the cultured shrimp (Csavas 1992). It is for instance estimated that the shares of cultured shrimp on the two main markets (the Japanese and US markets) represent now more than 46 % and 50% of their respective shrimp imports (Ferdouse 1992).

The European market, which is the third world market, was reached by cultured shrimp somewhat later than the US and Japanese markets. The European demand however seems to accelerate and E.U. imports expanded from about 132 000 t in 1981 to 365 000 t in 1991 (Anon 1993). Historically, the cold species has dominated in most of the European countries before 1980. Nevertheless, the tropical shrimp species have made significant inroads into some of the E.U. countries during the last decade, essentially through the arrival of new cultured shrimp species. It is admitted that the most significant change in E.U. shrimp imports and consumption is precisely the emergence of cultured shrimp (Hottlet 1992).

With respect to shrimp consumption, one can divide Europe into two parts: Mediterranean countries and Northern countries. Mediterranean countries prefer larger-sized warm-water shrimp which are generally cooked or grilled, shell-on and head-on. In contrary, cold-water species have always and continue to be the preferred species in Northern European countries (Josupeit 1992).

The production and commercial advantages of the cultured shrimp

The predominance of the cultured shrimp on the wild shrimp may be explained by the following reasons (Csavas 1992):

- The year-round production of cultured shrimp.

Shrimp catch is usually seasonal and especially unreliable, even in tropical waters. This high variability is due to the fact that for most species, the larvae and post-larvae stages growth in inshore nurseries which appear to be under large influence of continental climatic factors. Consequently, the catches volumes may fluctuate considerably from one year to the other and entails idle processing capacities over extended periods. Conversely, cultured shrimp production can be planned, and may even be continuous in the tropics. This improves the efficiency of the processors and reduces global storage costs.

- The flexibility of the farm production.

Farm offers a better opportunity for the industry to adapt to the consumers' demand regarding species and sizes. Shrimp catch is usually determined in this respect by geography and season. Shrimp farmers can select more flexibly from a wide range of cultivable species and produce the sizes required.

- The autolysis problem.

Because of the rapid autolysis that starts in crustaceans immediately after their death, prompt icing is pursued on shrimp trawlers. However, during each trip, in addition to gear manipulating, the main task for the crew consists of separating the shrimp from the by-catch - that usually represent more than 90% of the total trawler catch -, and of sorting the shrimp into different commercial categories before the icing procedure. As a consequence, it is not rare to observe wild shrimp catches affected by commercial devaluation following autolysis problems.

All these reasons may explain why, even if cultured shrimp is known to offer relatively poorer culinary qualities than wild shrimp, it is systematically preferred by processors. This preference is particularly obvious in the French market. Asia expanded its cultured shrimp imports from 17% in 1981 to 38% in 1993, and Latin America from 8 to 25.6% (Anon 1993). In the same time the West-African captured shrimp, that used to be the main supplying region to the French market with more than 35% of the French imports in 1981, saw its share declined to 10% in 1992. The most impressive growth in exports of shrimp to the French market was enjoyed by Ecuador (from nil in 1986 to about 6000 t in 1993) but Thailand's exports also grew significantly (1700 t in 1986 to 6800 t in 1991) (Josupeit 1992).

Econometrics method

The cointegration techniques are an econometric « package » which is now classically used to analyse simultaneously the long-run and short-term interrelations that are thought to exist between several time series. We therefore apply these techniques to analyse and quantify the dynamic relationships that might appear to link the French Guyana shrimp market to the Thai shrimp market. The estimation method comprises four successive steps that are (1) the stationary analysis, (2) the cointegration analysis, (3) the measure of causalities and estimation of the impulse response functions, and (4) the estimation of the Error Correction Model (ECM).

Stationary analysis

The first step consists in determining the integration orders of the series through unit root tests. One most commonly used test is the Dickey-Fuller (DF) test and its extension, the Augmented Dickey-Fuller (ADF) test (Dickey and Fuller 1981). The autoregressive order is determined by minimising the Akaike (AIC) and Hannan-Quinn (HQ) criteria. Three situations

have to be considered, regarding to the possible presence of an intercept and a time trend in the process. This amounts of considering successively the three following cases (where ε_t is assumed to be a white noise for the DF test):

case (1): True model (H_0): $y_t = \alpha + y_{t-1} + \varepsilon_t$ Estimated model (H_1): $y_t = \alpha + \rho y_{t-1} + \beta t + \varepsilon_t$

H_0 : joint hypotheses: ($\rho = 1, \beta = 0$). If H_0 is not rejected then we consider the case (2)

case (2): True model (H_0): $y_t = y_{t-1} + \varepsilon_t$ Estimated model (H_1): $y_t = \alpha + \rho y_{t-1} + \varepsilon_t$

H_0 : joint hypotheses: ($\rho = 1, \alpha = 0$). If H_0 is not rejected then we consider the case (3)

case (3): True model (H_0): $y_t = y_{t-1} + \varepsilon_t$ Estimated model (H_1): $y_t = \rho y_{t-1} + \varepsilon_t$

H_0 : joint hypotheses: ($\rho = 1$). If H_0 is not rejected, the series is non-stationary.

If a series is found to be non-stationary (occurrence of a unit root), the test is then re-applied to the series in first-difference. The differencing procedure is then pursued as long as the series is non-stationary. The number of differencing procedures necessary to stationarise the series indicates the integration order of the series.

Cointegration analysis

Testing for cointegration between integrated series can be performed through the Johansen's approach (Johansen 1988, 1989). This technique infers the statistical properties of the cointegration vector by linking this vectors to the canonical correlation between the levels and first differences of the process. This process which is adjusted with lagged differentials may furthermore include deterministic components (a drift μ and several possible exogenous variables D_t). The Johansen's procedure, which is based on Maximum Likelihood (ML) approach, is now widely adopted. We thus merely recall its theoretical background:

Consider the K -dimensional VAR(p) in levels with a drift μ in the process:

$$(1) \quad Y_t = \sum_{i=1}^p \Pi_i Y_{t-i} + \mu + \varepsilon_t$$

where $Y_t = (y_{1t}, y_{2t}, \dots, y_{Kt})'$ is assume to possess no more than one unit root in each of its component series y_{it} . (1) can be rewritten in first differences:

$$(2) \quad \Delta Y_t = \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta Y_{t-i} - \Pi Y_{t-p} + \mu + \varepsilon_t$$

where $\Gamma_i = -I_K + \Pi_1 + \dots + \Pi_i$ for $i = 1, \dots, p-1$ and $\Pi = I_K - \Pi_1 - \dots - \Pi_p$. Since ΔY_t is stationary, the stationarity of the right-hand side of (2) will depend on ΠY_{t-p} and on the rank of Π . If Π is a full-rank matrix, then k linear independent combinations of ΠY_{t-p} must be stationary. This implies that the components of Y_t can not be cointegrated since no more than $K-1$ independent cointegrated relations have to be observed in the process. On the other hand, if ΠY_{t-p} is stationary, each component of Y_t must be stationary around a trend. The VAR model can therefore be written in levels but must include a trend. In turn, if the rank of Π is zero, no linear combination of Y_t is stationary. A VAR model in differences has thus to be estimated.

The last case corresponds to the situation when the rank of Π is equal to r , with $1 < r < K-1$. In this case, the matrix Π can be decomposed as $\Pi = \alpha\beta'$ where α and β' are two $(K \times r)$ matrixes. α is termed the loading matrix and β is the cointegrated matrix. The basic idea of the Johansen's approach is to determine the rank of Π by estimating its $p-r$ smallest eigenvalues and testing whether the latter are significantly different from zero. It is possible to derive the Likelihood Ratio (LR) statistics for testing a specific cointegration rank $r = r_0$ of a VAR(p) process against a larger rank, say $r = r_1$. The general test is:

$$H_0: r = r_0 \quad \text{against} \quad H_1: r_0 < r \leq r_1$$

More precisely, Johansen (1988) and Johansen and Juselius (1990) propose the two following tests:

- the Trace test: $H_0: r = r_0$ against $H_1: r_0 < r \leq K$
- the λ -max test: $H_0: r = r_0$ against $H_1: r = r_0 + 1$

Johansen (1988) has shown that the asymptotic distribution of the LR statistic is not a χ^2 -distribution and that it depends on the difference $K-r$ between the dimension of the process and its cointegration rank. This distribution also depends on the value of the intercept μ in the model (2). The asymptotic percentage points have been tabulated for model with no intercept ($\mu = 0$) for r from 0 to 5 by Johansen (1988) and for r from 0 to 10 by Hall et al. (1989). Johansen and Juselius (1990) tabulated the critical values for intercept in the VAR process ($\mu \neq 0$). The case where the intercept term is contained in the cointegration relation also requires specific critical values (Johansen and Juselius 1990). An analysis of this case is proposed in Johansen (1991).

Measure of causalities and identification of the impulse response functions

The fact that a cointegration relation is shown to exist between two series allows us to study the causality, in the Granger sense, between these two series. The classical Granger causality (GC) test is performed on a VAR model with stationarised series. However, it can be shown (Lütkepohl (1993: 378-379) that GC tests on integrated and cointegrated systems may be conducted like on stable systems, i.e. performed on VAR models in levels.

The impulse functions, which are derived from the MA form of the VAR model, turn out to be useful tools to describe the short-run adjustment dynamics of the system. Indeed, impulse responses show the current and lagged effects on the variables of changes in the innovations. For stable processes, the response coefficients converge asymptotically towards zero. In turn, for integrated or cointegrated VAR processes, the existence of one or more unit root entails that, the responses do not converge systematically to zero. Their use as descriptive tool of the short-run adjustment is in this case somewhat more puzzling. Nevertheless, the impulse response functions and the associated variance decomposition, are still available for the unstable systems.

Error Correction Model estimation

If the series have been shown to be cointegrated $C(1,1)$, this means that there exists an effective long-run equilibrium relation from which the variables can not move away for too long. It thus become interesting to try to identify the adjustment process by which these variables come back to this equilibrium relation. This can be done through the estimation of Error Correction Models (ECM). ECM models appear to be closely related to the cointegration concept and to VAR models through the *Granger representation theorem* (Engle and Granger 1987). When ECM are represented by VAR models, they are termed VEC (Vector Error Correction) models, the general structure of which reads in first-differences:

$$(3) \quad \Delta Y_t = \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta Y_{t-i} - \Pi Y_{t-1} + \mu + \varepsilon_t$$

with $\Gamma_i = -I_K + \Pi_1 + \dots + \Pi_i$ for $i = 1, \dots, p-1$ and $\Pi = I_K - \Pi_1 - \dots - \Pi_p$.

Empirical results

The data series

The French Guyana data were obtained from the Cayenne's port authorities (CCI French Guyana). The price series was derived from the monthly total values (in French Francs FF) declared by the companies, divided by the total exports volumes (in kg):

$$\text{Raw Unit Price} = \text{exports in value} / \text{exports in volume}$$

for the period during which these series were available, that is, from January 1986 to August 1993. However, the export commercial value depends on the size of the shrimp exported. The size index of the landed shrimp, estimated from the landings, was used as a proxy for the average size of the shrimp exports. The raw series was thus weighted by this size index according to the correcting formula:

$$\text{Corrected Unit Price} = (\text{Raw Unit Price} \times 100) / \text{size index}$$

We obtain the final French Guyana monthly price series used in the rest of the analyses. This series is noted *FGP* (for French Guyana Price) from now henceforth and represented on Fig.2.

FIG. 2 here

As far as the cultured shrimp series is concerned, we used the data series of the French shrimp imports recorded by the Food and Agriculture Organisation (FAO-Globefish) in \$US, weighted by the FF/\$ exchange rate. As indicated in the introduction, both the Ecuadorian and Thai shrimp are now regarded as price indicators on most marketplaces. We might therefore have chosen indifferently one or the other species' prices. However, the Ecuadorian *P. vannamei* has arrived more recently on the French market and the series of its price is only available since January 1991. In turn, the price series of the Thai shrimp *P. monodon* covers the whole period 1986-1993. This is the reason why we used the Thai shrimp price *TP* in the rest of the analysis. Note however that the Ecuadorian and Thai prices display very closed movements, at least for the period where both series were available (cf. Fig.3).

FIG. 3 here

The *TP* series is plotted on Fig.2 with the *FGP* series. The graphical observation is in agreement with the expectation: the two prices show a common long-run trend. In the short-term, however, the two series display separate dynamics that can diverge from one another, but only for short periods.

Stationarity analysis

The visual analysis of the correlograms indicates the probable nonstationary of the two series (details on the data and complementary statistics results are available from the authors). The (AIC) and (HQ) criteria were used to determine the autoregressive order of the two series. They both indicate that *TP* is AR(1) while *FGP* is AR(11). We therefore performed a simple DF unit root test on *TP* but an ADF test on *FGP* to account for the serial correlation. The DF test confirms the non-stationarity of the *TP* series in levels and the stationarity in first difference (Table 1). The *TP* series is therefore I(1). The test on series in levels also indicates that a constant α has to be included in the process.

Table 1. Unit root test (DF test) on the *TP* series. If $t_\alpha < t_{tab}$ H_0 rejected.

Cases	<i>TP</i> in levels	<i>TP</i> in differences	Dickey-Fuller (5%)
(1)	$t_\alpha = -2.944$	$t_\alpha = -10.78$	$t_{tab} = -3.46$
(2)	$t_\alpha = -2.812, \alpha \neq 0$	$t_\alpha = -10.84$	$t_{tab} = -2.89$
(3)		$t_\alpha = -10.90$	$t_{tab} = -1.94$

For the *FGP* series, the ADF test confirms the non-stationarity of the series in levels and the stationarity in first difference (Table 2). The series is thus I(1).

Table 2. ADF test on *FGP* series. If $t_\alpha < t_{tab}$ H_0 rejected.

Cases	<i>FGP</i> in levels	<i>FGP</i> in difference	Dickey-Fuller (5%)
(1)	$t_\alpha = -1.60$	$t_\alpha = -5.26$	$t_{0.05} = -3.46$
(2)	$t_\alpha = 0.49$	$t_\alpha = -4.97$	$t_{0.05} = -2.89$
(3)	$t_\alpha = -1.34$	$t_\alpha = -4.75$	$t_{0.05} = -1.94$

Both series are integrated I(1). However, the shrimp consumption on French market being strongly seasonal, we might wonder whether the seasonal demand pattern does not induce a

seasonal component in the price dynamics. From Fig.3, it seems that if a price seasonality exists, it is relatively weak. We applied a 12-terms moving average procedure to decompose the two series in trend and seasonal components and test for seasonality in the detrended series. It emerges that the two price series display slight seasonalities. Having established that the series are $I(1)$, we thus had to test for the possible presence of seasonal unit roots. For this purpose, we applied the test proposed by Dickey, Hasza and Fuller (1984). The results indicate that the data does not exhibit non-stationary seasonality. So in the rest of the paper, we use seasonal-unadjusted data, as suggested by Wallis (1974), in order to avoid distorting the dynamics of the estimated models.

Cointegration analysis

The monthly series were analysed after log-transformation of the two raw series. They are noted *LTP* and *LFGP*. The (HQ) criterion indicates an autoregressive order $p = 9$. As the data have been shown not to exhibit non-stationarity seasonalities, we can ignore the seasonal integration problem and apply the standard Johansen's procedure on *LTP* and *LFGP*. In this case, the basic model accounts for deterministic seasonality through seasonal dummies in the VAR(9) model. The seasonal coefficients were centred with respect to the mean in order to maintain the asymptotic distribution in the rank cointegration tests. The model in differences then reads as follows:

$$(4) \quad \begin{pmatrix} \Delta LTP_t \\ \Delta LFGP_t \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^9 \Gamma_i \begin{pmatrix} \Delta LTP_{t-i} \\ \Delta LFGP_{t-i} \end{pmatrix} - \alpha \beta \begin{pmatrix} LTP_{t-1} \\ LFGP_{t-1} \end{pmatrix} + \mu + \Psi D_t + \varepsilon_t$$

where D_t is the matrix which embodies the deterministic dummy (seasonal and outlier) variables. A preliminary test indicates that the model must include a intercept μ in the cointegration relation. The Trace and λ -max tests were performed on the model (4). They both indicate the existence of one cointegration relation (cf. Table 3).

Table 3. Results of the LR Trace and λ -max tests for the model (4).
If $\lambda_{LR} > \lambda_{tab}$ H_0 rejected.

Eigenvalues	$H_0: r$	Trace	Trace_90	λ -max	λ -max_90
0.2273	0	25.37	17.79	21.41	10.29
0.1297	1	3.96	7.50	3.96	7.50

Critical values: Johansen and Juselius (1990)

The statistics of the matrix $\Pi = \alpha\beta$ are given in Table 4. The estimated cointegration relation is:

$$(5) \quad LFGP_t = -4.86 + 1.809LTP_t$$

The ADF tests conducted on the residuals of the cointegration relation (5) indicates that the residuals are stationary. The DF statistic $t_\alpha = -3.88$ is smaller than the critical value $t_{tab} = -3.37$ at 5% tabulated by Engle and Yoo (1987).

Table 4. Estimation of the long run equilibrium relationship.
(normalisation with respect to $LFGP$)

Matrix Π			
	LTP	$LFGP$	constant
ΔLTP	-0.271 (-4.248)	0.150 (4.248)	0.729 (4.248)
$\Delta LFGP$	0.177 (2.236)	-0.098 (-2.236)	-0.477 (-2.236)
Loading matrix α			
ΔLTP	0.150 (4.248)		
$\Delta LFGP$	-0.098 (-2.236)		
Cointegration vector β			
	LTP	$LFGP$	constant
	-1.809	1	4.861

() : t -statistics

Measure of Causality and impulse response functions identification

Recall that GC tests can be conducted on VAR in levels even for cointegrated systems. Given that the autoregressive order $p = 9$, the final estimated VAR(9) model is:

$$(6.1) \quad LFGP_t = \sum_{i=1}^9 \alpha_i LTP_{t-i} + \sum_{j=1}^9 \alpha_j LFGP_{t-j} + \Psi D_t$$

$$(6.2) \quad LTP_t = 0.624 + \sum_{i=1}^9 \alpha_i LTP_{t-i} + \sum_{j=1}^9 \alpha_j LFGP_{t-j} + \Psi D_t$$

(1.94)

(t -values in brackets). Note that the constant is not significant in (6.1). GC tests and instantaneous causalities tests were then performed based on (6.1 - 6.2). The Thai market

appears to Granger cause the French Guyana market (Table 5) while the reverse is not verified. This result indicates that the Thai market precedes the French Guyana market. In turn, no instantaneous causality is significative, whatever the sense of the causality.

Table 5. Results of causality tests.
If $F < F_{\alpha} = 2.04$, H_0 rejected; if $t < 1.96$, H_0 rejected.

Granger causality		Instantaneous causality	
H_0	F-statistics	H_0	t-statistics
$LTP \rightarrow LFGP$	2.39	$LTP \Rightarrow LFGP$	-0.27
$LFGP \rightarrow LTP$	1.12	$LFGP \Rightarrow LTP$	-0.27

The responses of LTP and $LFGP$ series to one-time unit impulse (forecast error) in variable were estimated from the VAR model (6.1 - 6.2). The response functions and their associated two-standard error bounds are displayed on Fig.4.

FIG. 4 here

The top right diagram depicts the response of $LFGP$ produced by a shock to LTP . The diagram shows that the deviation on $LFGP$ occurs 1 month after the shock to LTP . The impact then continues to increase during the 3 following months (i.e. 4 lags after the initial impulse). We furthermore observe that the function does not return to zero (due to the presence of the unit root). However, under the two-standard error criterion, only the coefficients of the lags 2, 3, and 4 appear to be significantly different from zero. As far as the response function of LTP to a one-time unit $LFGP$ impulse is concerned (bottom left diagram), none of the response coefficients is significant. These results are in line with the GC analysis. This was also confirmed by analysing the forecast error variance components, which were also estimated from the VAR(9). The analysis indicates that after 9 lags, more than 95% of the forecast error of LTP is still explained by the series itself, while at the same lag 25% of the error of $LFGP$ is already explained by the LTP series (cf. Appendix). All theses elements allow us to conclude that the Thai market is a leader market with respect to the French Guyana market.

Error correction model estimation

Recall that the Hannan-Quinn criterion indicates a VAR(9) in levels. Under the constraint of one cointegration relation, the ECM, in its Johansen's formulation, is therefore a VEC(8) in

differences where the outliers and the dummy variables accounting for the seasonality of the series are also introduced. The estimated model is:

$$(7) \quad \begin{pmatrix} \Delta LTP_t \\ \Delta LFGP_t \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^8 \Gamma_i \begin{pmatrix} \Delta LTP_{t-i} \\ \Delta LFGP_{t-i} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -0.271^* & 0.150^* & 0.729^* \\ 0.177^* & -0.098^* & -0.477 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} LTP_{t-1} \\ LFGP_{t-1} \\ 1 \end{pmatrix} +$$

$$\begin{pmatrix} 0.143^* \\ 0.039 \end{pmatrix} D_{9103} + \begin{pmatrix} 0.151^* \\ 0.042 \end{pmatrix} D_{8909} + \begin{pmatrix} -0.104^* \\ -0.122^* \end{pmatrix} D_{9206} + \begin{pmatrix} -0.018 \\ -0.093^* \end{pmatrix} D_{9008} + \begin{pmatrix} -0.031 \\ -0.111^* \end{pmatrix} D_{9111} + \psi D^{\#}$$

where (*) denotes significant coefficients with respect to *t*-statistics (5%) and the matrix $D^{\#}$ accounts for the seasonality of the series (cf. Table 7 below). The coefficients of the matrix Γ_i are detailed in appendix. The analysis of these Γ_i coefficients indicates that the monthly change in the cultured shrimp price only depends on its own past changes (considered at lags 2, 3 and 5). In turn, the monthly change in the French Guyana's shrimp price depends on its own past changes (at lags 1, 4 and 5) but also on past changes of the cultured shrimp price (at lags 5 and 6).

The five deterministic outliers $\{D_{9103}, \dots, D_{9111}\}$ included in the VEC model (7) permit to obtain the normality. Table 6 indicates the events associated to these outliers.

Table 6. The outliers introduced in the VEC model.

Dummy variable	period	series	Events	Reference
D_{8909}	Sept. 1989	ΔLTP	Black Tiger price bottoms out.	Globefish (1990)
D_{9008}	Aug. 1990	$\Delta LFGP$	First signs of overproduction in the French Guyana fishery	-
D_{9103}	March 1991	ΔLTP	Drug residue scandal in the Thai production	Csavas (1992)
D_{9111}	Nov. 1991	$\Delta LFGP$	Social movements (strike) of the French Guyana fishermen	Béné and Mogueudet (1993)
D_{9206}	June 1992	ΔLTP & $\Delta LFGP$	Virus epidemic affects the Ecuadorian production	Globefish (1992)

The LTP and $LFGP$ series display slight significant seasonalities (Table 7). The positive seasonal coefficient observed in December, April and June for the LTP series correspond to the

consumption peaks that are known to occur for Christmas and New-Year's Eves, Easter and summer start periods (Anon 1991, Josupeit 1992). On the contrary, the negative seasonal coefficients observed in the *LFGP* series in March and April correspond to the storage problems seasonably encountered by the French Guyana fishery during this period. Indeed, recall that these months coincide to its highest landings volumes period.

Table 7. The seasonal coefficients. Only 11 dummy variables were included into the model because of algorithm procedure limitation (Sept. coefficient not included). Significance tested by *t*-statistics.

Month	Jan.	Feb.	March	Apr.	May	June
ΔLTP	0.062*	0.036*	0.031	0.056*	-0.011	0.044*
$\Delta LFGP$	-0.020	-0.013	-0.054*	-0.041**	-0.010	-0.002
Month	July	Aug.	Oct.	Nov.	Dec.	
ΔLTP	0.047*	0.030**	-0.028	0.016	0.032*	
$\Delta LFGP$	0.017	-0.001	-0.019	-0.052*	0.003	

* : significative at 5% ** : significative at 10%

Table 8. Results of Ljung-Box (L-B) and Lagrange Multiplier (LM) tests on the VEC model (7).

Tests	d.f.	χ^2 estimated	<i>p</i> -values
χ^2 normality		2.841	0.58
L-B	44	79.316	0.00
LM(1)	4	9.328	0.05
LM(4)	4	1.855	0.76

The goodness of fit of the estimated VEC model (7) was tested through the Ljung-Box and Lagrange Multiplier tests (Table 8). The χ^2 value of the Ljung-Box test is superior to the χ^2 tabulated, indicating an autocorrelation of the residuals at 5%. In turn, the Lagrange multiplier (LM) tests indicate that this autocorrelation is neither of order 1 nor 4. The 20 first autocorrelation coefficients confirm the occurrence of some significative autocorrelations of higher order.

Discussion

The development in the 1980s of farm-produced shrimp, essentially in Asia and South-America, has induced dramatic changes on the world shrimp market. The commercial success that follows this development was so important that the price of some of these cultured shrimp has rapidly become reference on the different shrimp world marketplaces.

In this context, the analysis of the autoregressive processes that characterise the price time series of the French Guyana and Thai shrimp puts forward some worth-noticing points. As the cultured shrimp price series is integrated of order one without any remaining autoregressive process, we deduce that the monthly variations of this price follows a random walk. We can also conclude that the price determination comes from the instantaneous market clearing. This result is in accordance with a very competitive world-wide market hypothesis. On the other hand, the French Guyana's price is also integrated of order one but with a eleven-months lag for the autoregressive process. The French Guyana's price however, does not display any seasonal pattern. Thus, this may be interpreted as a small and specific market behaviour where the few buyers and sellers involved keep in mind the price value over approximately one year.

The existence of the cointegration relation corroborates the hypothesis of a common long-run equilibrium relationship between the two shrimp markets. Furthermore, the rejection of a trend coefficient in this cointegration regression signifies that the two markets can be considered as fully integrated without any drift. However, the fact that the coefficient of the cointegration vector is greater than one clearly indicates that the French Guyana's price is characterised by a more important variability along this long-run equilibrium. This result can be explained by the respective sizes of the two markets and by the difference between the production procedures involved (year-planned production for the cultured shrimp versus fluctuating and uncontrolled catches for the wild shrimp).

The analysis of the error correction model offers a good insight on the short-run dynamics that links the two prices within their common relation. The monthly changes in the cultured shrimp price appears to only depend on its own past variations, whereas the monthly changes in the French Guyana's shrimp price turns out to depend on its own past deviations but also on past deviations of the Thai price.

Finally, the analyses of causalities, impulse response functions and forecast error variance decomposition all indicate that the Thai price is a leader for the French Guyana price on French markets. More precisely, the causality tests show that the Thai market price Granger-causes the French Guyana market price, or, in usual term, that the Thai market precedes the French Guyana market in their joint dynamics. The impulse responses functions show that a shock on *TP* induces a deviation in *FGP* that remains significant for the three following months, while a shock on *FGP* has no impact on *TP*. The error variance decomposition indicates that globally one fourth of the French Guyana price variation can be attributed to the Thai market variations.

These results induces important consequences for the fishery dynamics. This means that the local price fluctuations are largely dependent to events exogenous to the fishery, and that the companies have not the entire control of the price of the product they supply to the markets. The fluctuations of this price turn out to be essentially induced by cultured shrimp prices variations. Nevertheless, the high culinary qualities and taste specificity of this species involves that its price behaviour is mainly depending on its own market conditions.

References

- Anon., 1991. Audit de la filière crevette guyanaise. Rapport SEPIA, Préfecture de Guyane, 176 p. + ann.
- Anon., 1993. L'offre stimule les appétits. Produits de la mer 17, janv.-fév.: 42-44.
- Béné Ch., 1996. Effects of market constraints, the remuneration system, and resource dynamics on the spatial distribution of fishing effort, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* (in press).
- Béné Ch. and P. Moguedet. 1993. Sustainable fisheries development, a theoretical contribution: the French Guyana shrimp fishery, Caraballeda, Venezuela, 18-22 October 1993, FAO Fish. Tech. Pap. 1994.
- Csavas, I. 1992. Impact of aquaculture on the shrimp industry. In H. de Saram and T. Singh (ed.) Proceedings of the 3rd Global Conference on the shrimp industry, Hong Kong, 14-12 Sept., INFOFISH: 6-18.
- Dickey D.A. and W.A. Fuller, 1981. Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica* 49: 1057-1072.
- Dickey D.A. Hasza D., and W.A. Fuller, 1984. Testing for Unit roots in seasonal time-series: test and implications. *J. Am. Stat. Ass.* 79: 355-367
- Dintheer C., B. Gilly, J.-Y. Le Gall, M. Lemoine and J. Rosé, 1991. La recherche et la gestion de la pêche de crevettes *péneïdes* en Guyane française de 1958 à 1988. In J.R. Durand, J. Lemoalle, et J. Weber (ed.) La recherche face à la pêche artisanale. Symp. Int. Montpellier, 3-7 Juil. 1989, ORSTOM: 859-870.
- Engle R.F. and C.W. Granger, 1987. Co-integration and error correction: representation, estimation and testing. *Econometrica* 55(2): 251-276.
- Engle R.F. and B.S. Yoo, 1987. Forecasting and testing in cointegrated systems. *J. Econom.* 35: 143-159.
- Ferdouse, F. 1992. International market prospects for fishery product from Vietnam. Vietnam Fisheries Development Workshop 5-7 May, Hanoi. In Csavas, I. 1992. (op. cit.).
- Globefish. Shrimp quarterly highlights 1/90 + 3/92. Globefish, FAO Fisheries Industries Division, Roma.
- Granger C.W., 1988. Some recent developments in a concept of causality. *J. Econom.* 39: 199-211.
- Hall S.G., S.G.B., Henry, and J. Wilcox, 1989. The long-run determination of the U.K. monetary aggregates. in Henry S.G.B. and K.D. Patterson (ed.), Economic modelling at the Bank of England. Chapman & Hall.
- Hottlet, O. 1992. The European Market for frozen shrimp. INFOFISH 92(5): 16-20.
- IEDOM, 1993. Rapport Annuel Guyane 1993. Institut d'Émission des Départements d'Outre-Mer, Paris, 182 p.
- Johansen S., 1988. Statistical analysis of cointegration vectors. *J. Econ. Dyn. Contr.* 12: 231-254.
- Johansen S., 1989. The power function of the Likelihood Ratio test for cointegration. Institut of Mathematical statistics, University of Copenhagen, working paper.
- Johansen S., 1991. Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in gaussian vector autoregressive models. *Econometrica* 59(6): 1551-1580.
- Johansen S. and K. Juselius, 1990. Maximum likelihood estimation and inference on cointegration with application to the demand for money. *Oxf. Bull. Econ. Stat.* 52: 169-210.
- Josuweit, H. 1992. Single market in the EEC, good or bad news for traders? In H. de Saram and T. Singh (ed.) (op. cit.): 19-29.
- Klock T. and H.K. van Dijk, 1978. Bayesian estimates of equation system parameters: an application of integration by Monte Carlo. *Econometrica* 48: 1-20.
- Lütkepohl H., 1993. Introduction to multiple time series analysis. 2nd ed. Springer Verlag, Berlin.
- Wallis K.F., 1974. Seasonal adjustment and relations between variables. *J. Am. Stat. Ass.* 69(6): 18-31.

Appendix

Forecast error variance decomposition of *LTP* and *LFGP* series (in percent)
(S.E.: standard error coefficients).

Variance decomposition of <i>LTP</i>				Variance decomposition of <i>LFGP</i>			
Lags	S.E.	<i>LTP</i>	<i>LFGP</i>	Lags	S.E.	<i>LTP</i>	<i>LFGP</i>
1	0.04095	100.00	0.00	1	0.09862	75.50	24.50
2	0.05375	99.00	1.00	2	0.10098	73.10	26.90
3	0.06522	98.00	2.00	3	0.10529	71.20	28.80
4	0.07481	98.40	1.60	4	0.32829	96.80	03.20
5	0.08034	98.00	2.00	5	0.06549	24.20	75.80
6	0.08307	97.70	2.30	6	0.65721	24.20	75.80
7	0.08469	97.50	2.50	7	0.65762	24.20	75.80
8	0.08617	97.40	2.60	8	0.06578	24.30	75.70
9	0.08725	95.70	4.30	9	0.65793	24.30	75.70
10	0.08735	95.60	4.40	10	0.06040	24.30	75.70
11	0.08898	94.10	5.90	11	0.06187	24.30	75.70
12	0.08972	91.00	9.00	12	0.65846	24.30	75.70

Coefficients of the Γ_i matrix of the VEC model (7) where (*) denotes significant coefficients with respect to *t*-statistics (5%).

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^8 \Gamma_i \begin{pmatrix} \Delta LTP_{t-i} \\ \Delta LFGP_{t-i} \end{pmatrix} = & \begin{pmatrix} 0.069 & -0.040 \\ 0.020 & -0.443* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta LTP \\ \Delta LFGP \end{pmatrix}_{t-1} + \begin{pmatrix} 0.349* & 0.072 \\ 0.122 & -0.191 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta LTP \\ \Delta LFGP \end{pmatrix}_{t-2} \\
 & + \begin{pmatrix} 0.214* & -0.099 \\ 0.190 & -0.077 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta LTP \\ \Delta LFGP \end{pmatrix}_{t-3} + \begin{pmatrix} 0.051 & 0.025 \\ 0.106 & -0.214* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta LTP \\ \Delta LFGP \end{pmatrix}_{t-4} \\
 & + \begin{pmatrix} -0.199* & 0.081 \\ -0.211* & -0.248* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta LTP \\ \Delta LFGP \end{pmatrix}_{t-5} + \begin{pmatrix} 0.098 & -0.154 \\ -0.351* & -0.121 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta LTP \\ \Delta LFGP \end{pmatrix}_{t-6} \\
 & + \begin{pmatrix} 0.296 & -0.083 \\ 0.096 & -0.051 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta LTP \\ \Delta LFGP \end{pmatrix}_{t-7} + \begin{pmatrix} 0.031 & 0.145 \\ -0.015 & -0.062 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta LTP \\ \Delta LFGP \end{pmatrix}_{t-8}
 \end{aligned}$$

Captions of the figures

FIG.1. Volumes of the world total cultured and captured shrimp production, over the period 1980-1990 (source: Chauvin 1992, Traditional shrimp harvest: supply overview. *In* H. de Saram and T. Singh (op. cit.): 54-72.).

FIG.2. French Guyana price (*FGP*) and Thai price (*TP*) time-series over the period Jan.86 - Aug.93 (source: *FGP* series: CCI French Guyana., *TP* series: FAO-Globefish).

FIG.3. Simultaneous variations in the prices (in French Francs) of the Thai shrimp *Penaeus monodon* (*TP* series) and the Ecuadorian cultured shrimp *Penaeus vannamei*, on the French market, over the period Jan.91 - Jul.93 (source: FAO-Globefish).

FIG.4. Impulse response functions estimated from the VAR(9) model using the Klock and Van Dijk's procedure (1978).

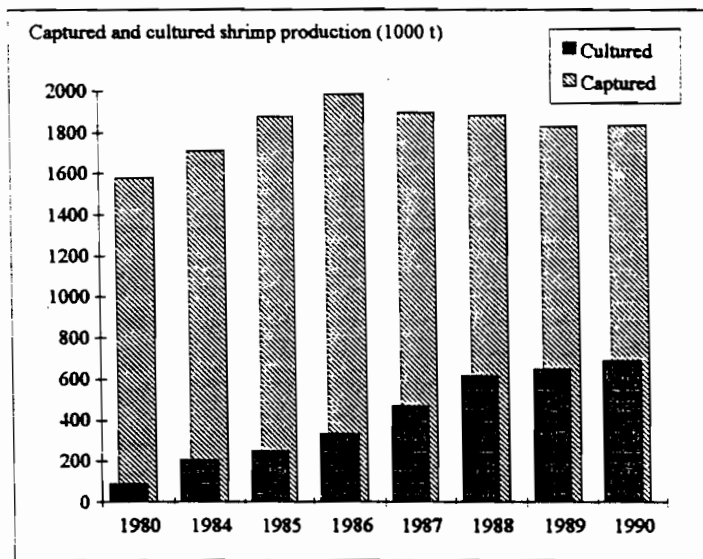


FIGURE 1

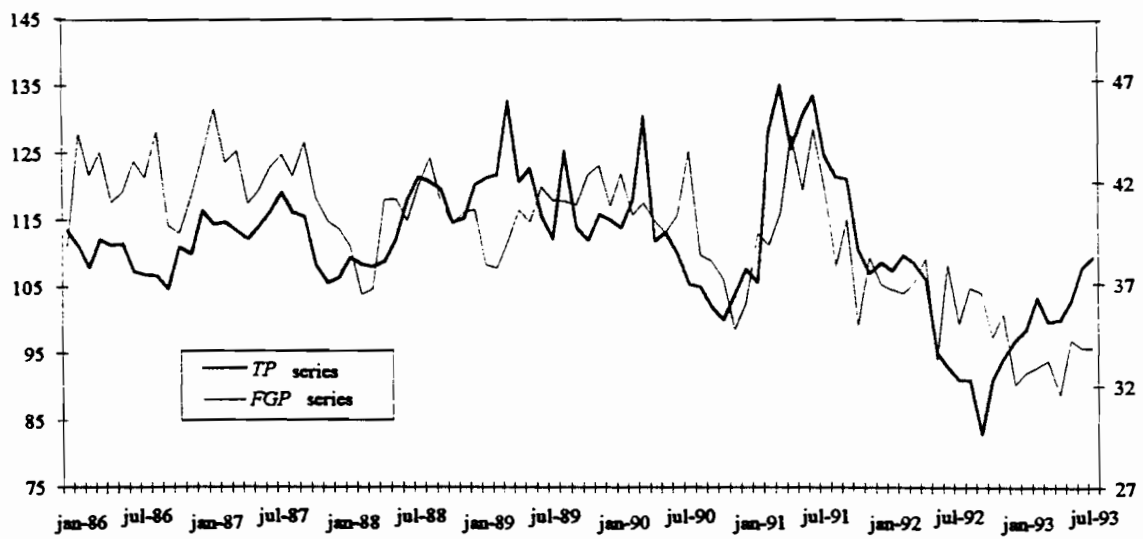


FIGURE 2

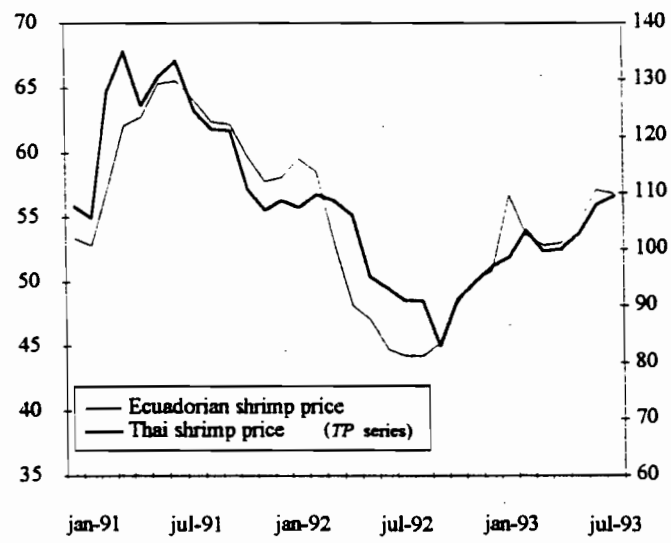


FIGURE 3

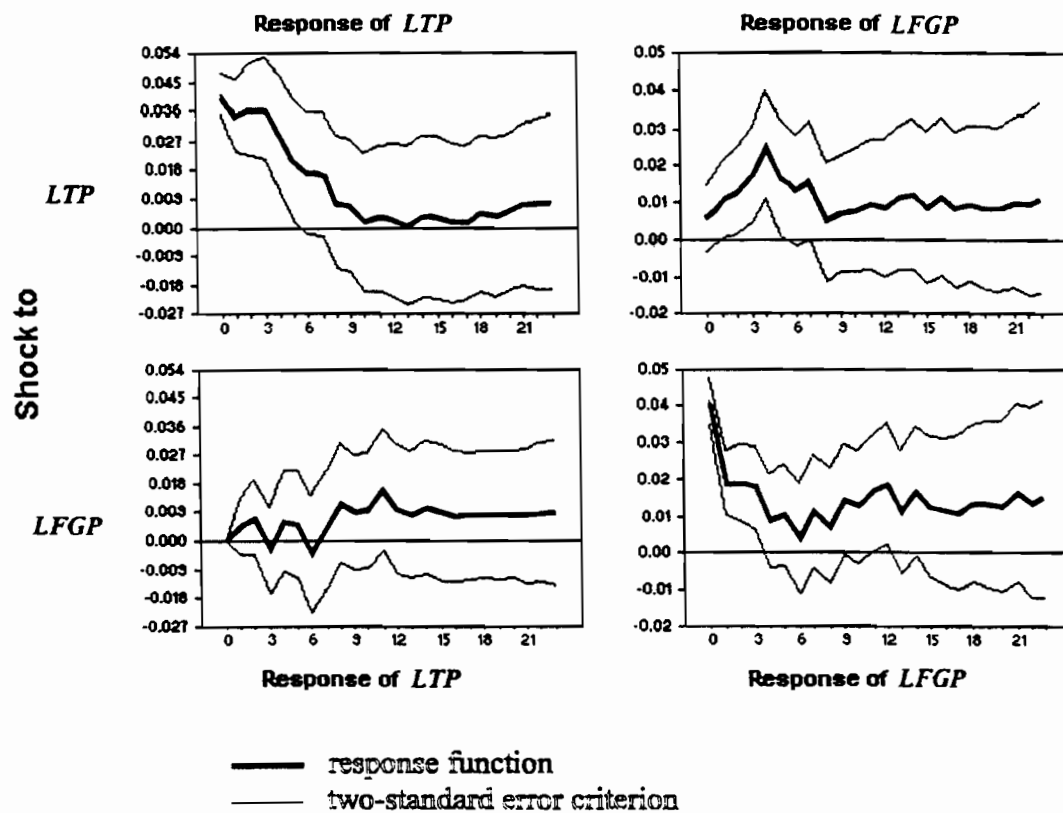


FIGURE 4

ANNEXE 3

Béné C. and P. Moguedet. Global combined to local changes, the case of the French Guyana Penaeid stock. *In* Global versus Local Changes in Upwelling Ecosystems, M.-H. Durand, R. Mendelssohn, P. Cury, C. Roy, and D. Pauly (eds.), édition ORSTOM. (*sous presse*)

Erratum

p.7, 1^{ère} ligne après formule (1); lire: where $f()$ is... au lieu de where $f()$ is...

p.7, Table 2, 5^{ème} ligne; lire : Selection: Forward au lieu de Selection Backward

p.8, 1^{ère} ligne après formule (3); lire: ϕ and ϕ' au lieu de ' and ' TM et ϕ and ϕ' au lieu de i and i'

p.10, formule (4); lire: $0.18 \text{ LogRec}_{m-1}$ au lieu de 0.18 LogRec_m-1

p.15, Paragraphe 6.6, 5^{ème} ligne; lire : Fig. 6 au lieu de Fig. 5.b

Global combined with local changes : the case of the French Guyana penaeid stocks

CHRISTOPHE BÉNE

PHILIPPE MOGUEDET

IFREMER

Institut Français de Recherche

pour l'Exploitation de la Mer

B.P. 477

97331 Cayenne

FRANCE

ABSTRACT

This study is an attempt to estimate the impacts of the Amazon River, regarded as a global change indicator, and different French Guyana's local environmental factors, on the recruitment of the French Guyana Penaeids stock. In particular, the authors try to determine whether the impacts of these global and local environmental factors overlap on temporal scales, or whether they intervene at distinguishable (preferential) time scales. For this purpose, two different time-scales were considered, the biannual and monthly scales. Estimation of the adult stock abundance was also included in the analyses through the commercial CPUE (Catch per Unit of Effort) time series. Multiple time series models were estimated on the monthly series and stepwise regressions on the biannual series. The two linear models obtained were then re-estimated using non-linear algorithms. The results indicate that the Amazon river and the adult stock abundance have both significant impacts on the stock recruitment at the biannual time scale. On the contrary, at the monthly time scale, these two impacts vanish and the local river's influence appears predominant. These results are consistent with the general hypotheses proposed in the Theory of Hierarchy, and more precisely with the concept of scale dependence usually associated with the multiple functional scales hypothesis.

RÉSUMÉ

Cette étude analyse l'impact du fleuve Amazone combiné à celui de facteurs climatiques locaux de Guyane française sur le recrutement du stock de *Penaeides* présent au large des côtes guyanaises. Il s'agit plus précisément de déterminer si l'impact de l'Amazone, reconnu comme un indice de changement global, agit aux mêmes échelles de temps que les facteurs locaux, ou si, au contraire, chacun de ces deux types de facteurs agissent à des échelles temporelles distinctes. Pour cela, l'échelle mensuelle et l'échelle bi-annuelle sont considérées. L'influence de l'abondance du stock des adultes matures est elle aussi testée par l'introduction de la série des Captures Par Unité d'Effort (CPUE). Les séries mensuelles sont étudiées par les techniques d'analyse de séries temporelles multivariées alors que les séries bi-annuelles sont analysées par régressions multiples pas à pas (stepwise). Les deux modèles linéaires obtenus sont ensuite réestimés par un algorithme d'analyse non-linéaire. Les résultats indiquent que les impacts de l'Amazone et de l'abondance des adultes sont significatifs à l'échelle bi-annuelle. À l'inverse, ces impacts disparaissent à l'échelle mensuelle, et l'influence du débit des fleuves locaux apparaît cette fois prépondérante. L'ensemble de ces résultats est à rapprocher des concepts développés par la Théorie de la Hiérarchie et en particulier de celui de dépendance d'échelle généralement associé à l'hypothèse d'échelles fonctionnelles multiples.

“ L'interaction entre phénomènes d'échelles distinctes reste une des questions scientifiques les plus épineuses posées aux spécialistes de toutes les disciplines: on peut dire qu'elle est l'un des problèmes scientifiques les plus fondamentaux (...). Elle féconde aujourd'hui la réflexion dans tous les domaines scientifiques. ” Frontier 1990.

INTRODUCTION: GENERAL CONCEPTS AND METHODOLOGICAL APPROACH ADOPTING AND APPLYING THE ESSENCE OF “ GLOBAL VERSUS LOCAL CHANGES ”

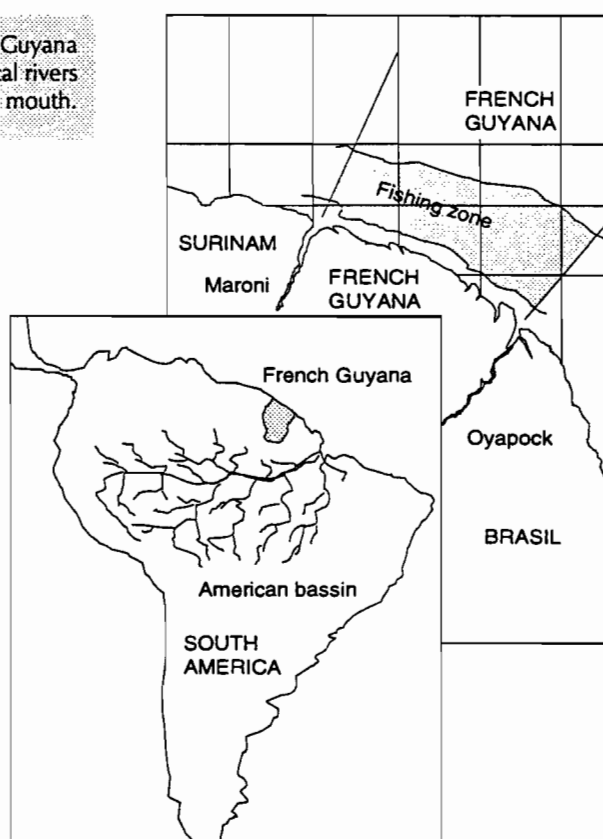
In Ecology, every ecosystem analysis points out the complexity and multiplicity of Nature's spatial evolution (spatial heterogeneity), and dynamics (temporal variability) and shows that the biotic and abiotic processes generally take place over overlapping spatial and temporal scales. The acknowledgment of multiple spatial and temporal scales is the essence of the approach “ Global versus Local Changes in Marine Ecosystems ”: it recalls that marine resources evolve within and because of global and local changes.

With respect to this reality, shrimp species do not appear to be an exception: shrimp life-cycles are known to be highly environmentally-dependent (Garcia and Le Reste 1981, Dall 1981, Staples and Vance 1986, Gracia 1989, Hettler 1992). No consensus, however, seems to loom out from the abundant literature to identify the factor acting on it (Dall *et al.*, 1990). For illustration, the climatic factors generally assumed to have impact on shrimp recruitment includes rainfall, river flow, water temperature, sea level, salinity, turbidity, even upwelling index or solar and moon cycles (Staples *et al.*, 1984, Lam *et al.*, 1989).

This non-exhaustive list not only emphasizes the complexity of recruitment processes in marine ecosystems in general and in shrimp species in particular, it also shows that only impact of locally-recorded factors have been analyzed (local rivers, local rainfall, temperature of the shrimp living area, etc.). It seems interesting to make an attempt to revisit this issue from the simultaneous local and global points of view.

The French Guyana shrimp stock may represent a pertinent choice to lead this kind of investigation. Indeed, the southern limit of the area is located 450 km northwest from the Amazon River's mouth (Fig. 1) that is usually regarded as a global climatic index. The immediate question which arises is to know whether it would be possible to estimate the impact of the Amazon River on the dynamics of a locally-delimited process such as the recruitment of the shrimp stock off the French Guyana and how this global factor interacts with other, locally-generated, environmental factors? In other words, do the global and local impacts overlap on temporal and spatial scales, i.e. do they intervene in the same spatial scale with the same temporal frequency on the dynamics of the recruitment or conversely do they have their specific impact scales?

Fig. 1 - Geographical localisation of the French Guyana shrimp fishery with respect to the local rivers (Maroni and Oyapock) and the Amazon river mouth.



1. DEPTH-DEPENDENT DISTRIBUTION OF THE RESOURCE, IMPLICATION FOR THE RECRUITMENT INDICATOR

When no direct estimations of recruitment are available, commercial fishery data are used. Generally, the cpue (Catch per Unit of Effort) series of the smallest commercial category is asserted to represent a proxy for recruitment. However, the analysis may be affected if the resource distribution is depth-dependent. If it is so and the fleet shifts its spatial distribution of effort, this inshore (or offshore) effort re-location induces a change in the pattern of the catch composition. This change introduces a subsequent modification in the cpue and especially in the series that is used as a surrogate for recruitment index. This shift does not correspond to any variation in the actual recruitment level but only reflects change in the fleet fishing strategy.

Shrimp spatial distributions are depth-dependent. It is widely observed that for a given species, largest individuals are generally found in deep-water zones while smallest individuals live in shallow-water zones (Dall *et al.*, 1990). This is a consequence of the general life-cycle where juveniles develop inshore, generally in estuarine nursery ground, and adult migrate offshore when growing. The occurrence of such a depth-dependent distribution has been empirically confirmed in the case of the French Guyana shrimp *Penaeus subtilis* (Venaille 1979).

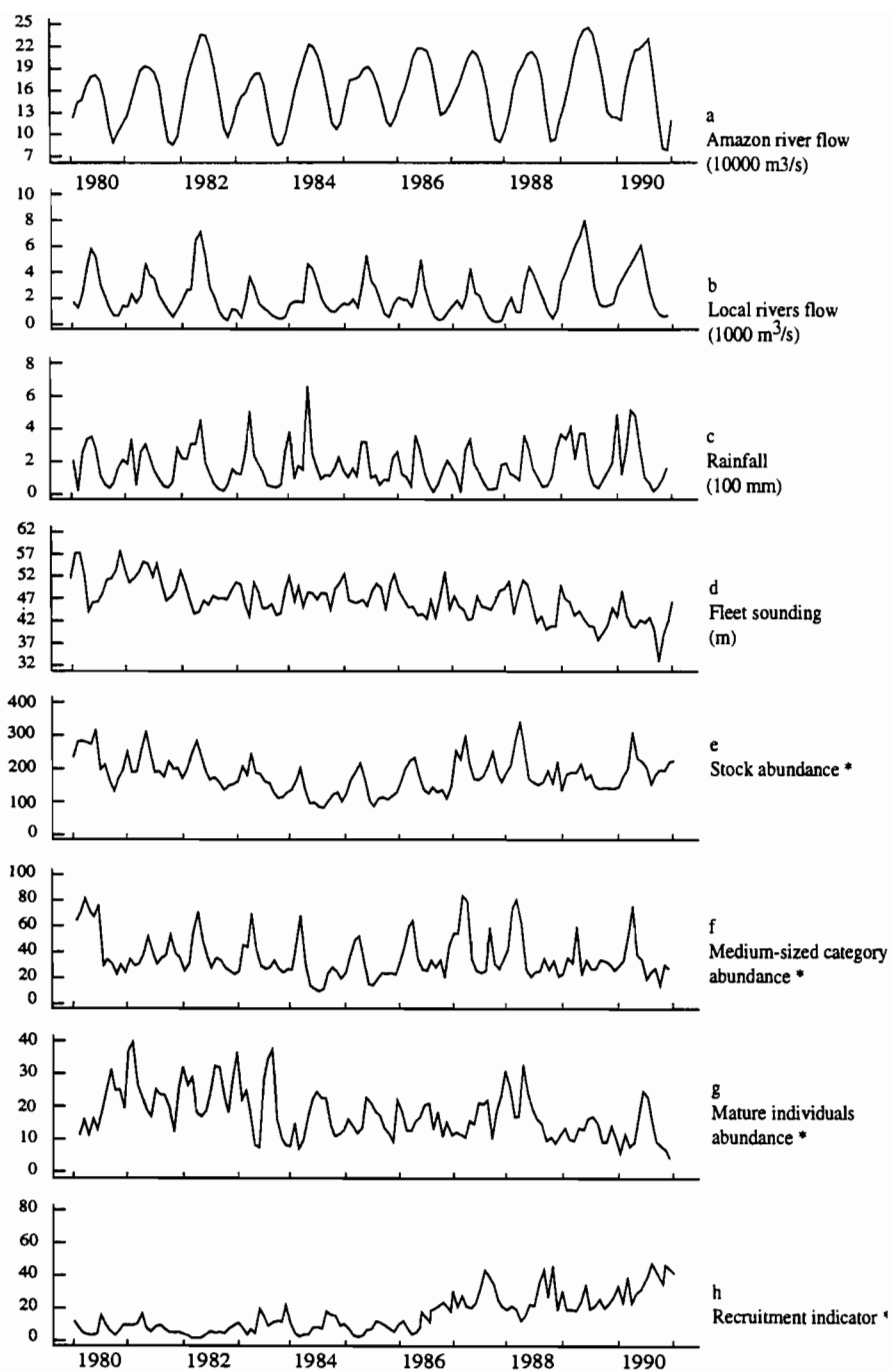
The bias in recruitment indicator induced by the depth-dependency of the resource combined with the spatial modification of the commercial fleet effort may be partially circumvented by taking into account the fleet distribution. In our case, this was done by introducing an indicator related to the spatial distribution of the fishing effort.

2. CHOICES OF TEMPORAL SCALES AND STATISTICAL TECHNIQUES

For the French Guyana, all climatic and/or environmental factors generally assumed to have an impact on shrimp life cycle (c.f. the listed variable above) display clear-cut seasonal patterns (Fig. 2.a-c). From this, it ensues that a six-month scale might be appropriate to identify climatic inducing changes and/or biological induced responses involved at the medium-term in the recruitment process.

However, the equatorial penaeids spawn throughout the year, although it may not be uniform during all the months (Crococ 1985, Dall *et al.*, 1990). This more or less constancy in the spawning cycle suggests a dynamics characterized by a relatively high frequency. This high frequency might be mismatched by considering a bi-annual time scale. A shorter temporal scale (of the order of monthly scale) is therefore also required. We thus adopted these two perception scales: the biannual and the monthly scales. From these two different temporal scales, two different analyses were conducted, a short-term recruitment variability analysis (applied to the raw 1979-1990 monthly recorded series), and a medium-term analysis applied to the bi-annually re-scaled series. These bi-annual series were obtained by a 6-months moving average procedure applied to the monthly series. Two different descriptive statistical techniques were adopted to conduct these analyses. We used multiple time series models for the monthly analysis and stepwise regressions for the bi-annual analysis.

Fig. 2 : Monthly 1980-1990 time series of the variable used in the analyses
 * cpue (kg/day at sea) see table 1 for series nature, sources : a-b : ORSTOM, c : Meteo France, e-g : IFREMER.



3. CHOICES OF DEPENDENT AND EXPLICATIVE DATA SERIES

The shrimp stock data was provided by (i) data sets recorded by the ifremer station in Cayenne and (ii) captains' Log-Book analysis. The Amazon river discharge and series of environmental local factors (discharge of the French Guyana rivers and rainfall) were respectively provided by the stations of orstom and Météo-France in Cayenne. Table 1 gives the nature of the explanatory variables included in the bi-annual model and table 4 those of the monthly analysis. The series are displayed in Figures 2.e-h. As mentioned above, in the absence of any direct estimation, the recruitment indicator is the cpue of the smallest commercial categories of shrimps caught by the commercial fleet (i.e. the categories 61/70 + 71/80).

The presence amongst the explanatory variables of the cpue of a medium-sized category (indicated as LogMed in Tables 1 and 4) calls for explanations. Since the fleet dynamics is likely to have an impact on the catch composition (c.f. section above depth-dependent distribution...), one may assume that the catch of mature individuals (the largest shrimp are mainly distributed at the offshore limits of the fishing zone) to be particularly sensible to changes in the fleet's spatial distribution. Conversely, the cpue of a medium-sized category, distributed in middle depth-water zones, is expected to be less biased by the fleet movements.

Table 1 - Stepwise regression analysis. Set of biological and environmental (climatic) variables tested at the seasonal (bi-annual) scale. The third column noted (Lags) indicates the different lags at which the variables were tested in the model.

Indicators of	Notation	Lags	Nature
Stock	LogStock	t-2, t-1	total CPUE
Mature individuals	LogLarge	t-2, t-1	CPUE of categories U10 + 11/15
Mature individuals	LogMed	t-3, t-2	CPUE of categories 31/35 + 36/40
Rainfall	LogRain	t-2, t-1	French Guyana coastal rainfall
Local Rivers Flow	LogRiver	t-2, t-1	Cumulated Maroni and Oyapock flows
Amazone River Flow	LogAmaz	t-2, t-1	Amazone Flow
Fleet Sounding	Sound	t	Averaged Fleet Sounding values

The other factors included in the model (Fig. 2.a-c) are the rainfall of the French Guyana coastal zone, the flow of the two main local rivers (the Maroni and the Oyapock rivers) (see Fig. 1 for location) and the discharge of the Amazon river. Furthermore, the fleet sounding series was also included as indicator of the spatial distribution of the fishing effort. All variables but the fleet sounding were log-transformed for variance-stabilizing purpose.

4. MODEL IMPROVEMENT: INTEGRATING NON-LINEARITY

The estimation procedures for both time series analyses and stepwise regression are based on linear procedures. We complemented the analyses by re-estimating the models through the use of non-linear regressions. Several algorithms

[Alternative Conditional Expectations (ace) (Breiman and Friedman 1985), Additivity and Variance Stabilization (avas) (Tibshirani 1988), or Generalized Additive Interactive Modeling (gaim) (Hastie and Tibshirani 1990)] offer the possibility of this non-linear re-estimation. We adopted the Breiman and Friedman's ace algorithm.

5. RECRUITMENT VARIABILITY ANALYSIS

5.1. Medium term (bi-annual) variability analysis

5.1.1- Linear approach

The explanatory variables were included in the model at the different lags indicated in Table 1. Since results obtained by backward and forward stepwise multiple regressions are usually unstable when the variables are correlated (Belsey et al. 1980, Koslow *et al.*, 1987), the only variables which appear stable in both types of regression were maintained in the model.

The final models obtained by backward and forward regression ($F_{\text{remove}} = F_{\text{enter}} = 4.41$, $v_1 = 1$, $v_2 = n-p$, $n = 24$) are similar (see Tab. 2). They both indicate that, relying on linear estimations, only the fleet sounding series (Sound) lagged at 0 has a significant impact on the recruitment indicator (Rec). The final linear model is thus:

$$(1) \text{LogRec}_t = f(\text{Sound}_t)$$

where $f()$ is a linear function. $R^2 = 41\%$

Table 2 - Final linear models after stepwise (forward and backward) regression analysis.

Selection:	Backward	Dependent Variable: (LogRec)		
$R^2 = 0.409$	$R^2 \text{ adj.} = 0.378$	M.S.E. = 0.3762	d.f. = 19	F remove = 4.41
Variables in Model	Estim. Coef.	F variables (1)		
(1) (Sound _t)	-0.1572	13.1682		
Selection:	Backward	Dependent Variable: (LogRec)		
$R^2 = 0.409$	$R^2 \text{ adj.} = 0.378$	M.S.E. = 0.3762	d.f. = 19	F enter = 4.41
Variables in Model	Estim. Coef.	F variables (1)		
(1) (Sound _t)	-0.1572	13.1682		

These results emphasize the impact of the fleet effort distribution on the recruitment indicator. Note that in other respects, the environmental factors which were tested have non-significant linear impact on the recruitment indicator.

5.1.2- Non-linear approach

Releasing the linear constraint implies re-testing all the potential explanatory variables and to identify the form of their optimal transformations using the ace algorithm. The bias introduced in the recruitment series by the fleet spatial

distribution can be partially removed by detrending the recruitment series. The recruitment series was thus detrended with the procedure described in Makridakis *et al.*, (1983). Two non-linear analyses were then conducted simultaneously, one with the log-transformed recruitment indicator and one with the detrended series. They are noted as log-analysis and detrended analysis respectively (see Table 3 for details).

Table 3 -Structure of the two analyses conducted for the non-linear approach.

Analysis	Log analysis	Detrend analysis
Log-transformation of the dep. variable	Yes	No
Detrending of the dep. variable: remove of the fleet dynamics induced bias	No	Yes
dependent variable:	Recruitment (LogRec)	Recruitment (RecDtrd)
(Sound) variable included	Yes	No
explanatory variables:	Sound, LogAmaz, LogMed	LogAmaz, LogMed

Results of the analysis are displayed in Figure 3. For the log-analysis, the impact of the (Sound) series on the (LogRec) variable is still significant. Amongst the other variables which appear to have non-linear simultaneous impacts on both (LogRec) and (RecDtrd) variables, only two offer transformations which were qualitatively similar. They are the flow of the Amazon (LogAmaz) lagged at 1 (i.e 6 months) and the cpue of the medium-sized category (LogMed) lagged at 2 (one year). The others were thus removed and the final non-linear models for the log-analysis and the detrended-analysis are of the respective forms (2) and (3):

$$(2) \quad \varphi(\text{LogRec}_t) = \phi_1(\text{Sound}_t) + \phi_2(\text{LogAmaz}_{t-1}) + \phi_3(\text{LogMed}_{t-2}) \quad (\text{log-analysis})$$

$$(3) \quad \varphi'(\text{RecDtrd}_t) = \phi_2'(\text{LogAmaz}_{t-1}) + \phi_3'(\text{LogMed}_{t-2}) \quad (\text{detrended-analysis})$$

where φ and φ' are the optimal linear transformations of the dependent variable, and ϕ_1 and ϕ_1' are the optimal non-linear transformations of the explanatory variables. The R^2 are 73 % and 48 % for the form (2) and (3), respectively. The difference in these R^2 values is due to the presence of the (Sound) series in model (2) which explains a great part of the LogRec variance.

It has to be emphasized that the release of the linearity allows the identification of two climatic factors (the Amazon flow and the medium-sized category). The magnitude of the non-linearity of their optimal transformation (i.e. the fact that a straight line would fit poorly with the optimal transformations (see Fig. 3)) offers an explanation to the fact that linear-based estimations proposed in the previous section failed to identify these factors.

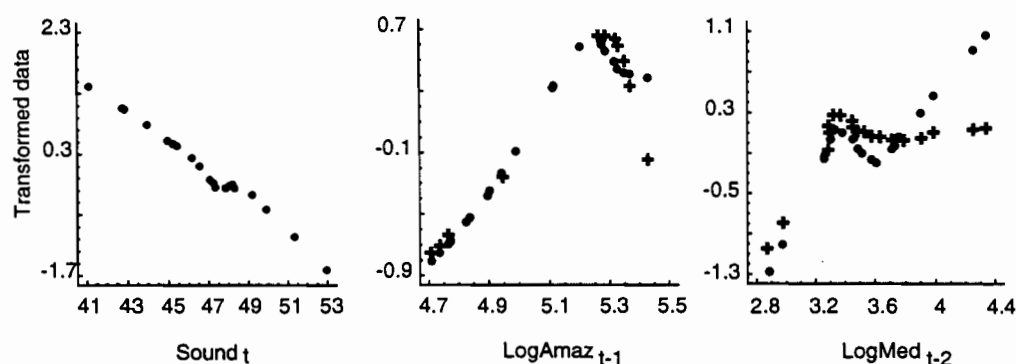


Figure 3 : Non-linear bi-annual analyses : optimal transformations of the explanatory variables for both log-analysis and detrend-analysis. (see table 3 for details). curve (°) : log-analysis ($R^2 = 73.8\%$)
curve (+) : detrend-analysis ($R^2 = 48.5\%$)

5.2. Short term (monthly) variability analysis

5.2.1- Linear approach

The multiple time series procedure was similar to the one described in Tiao and Box (1981). We used the Wisconsin Multiple Time Series program (wmts-1) developed by Tiao *et al.*, (1980). Table 4 indicates the series tested and the transformation adopted. All climatic variables (i.e. rainfall and river flow) were deseasonalized by a $(1-B)^{12}$ backward shift operator for stationary purpose. The partial auto and cross-correlation analyses over 16 lags indicate that positive auto-correlation of the dependent variable (Rec) occurs at lag 1, 5, 9, 11, and 12 while negative cross-correlations with the sounding (Sound) and the local rivers flow (RiverDiff) are significant at lags 1 and 11, and 6, respectively (see Table 5). The model parameters were then estimated using WMTS-1. The series parameter which was included in the range 2S.E. , (S.E. standard error) were removed from the model (see Tiao and Box (1981) for methodological procedure details). Table 6 shows the variables and their estimated parameters for the final linear model such as identified following the Tiao and

Table 4. Multiple time series analysis. Set of explanatory variables tested at monthly scale. The third row (Transf.) indicates the transformation applied to the variable. $(1-B)^{12}$: backward shift operator. (1): indicator of

Variable	LogStock	LogLarge	LogMed	RainDiff	RiverDiff	AmazDiff	Sound
Indic.(1)	Stock	Mature	Mature	Rainfall	Local rivers	Amazon	Fleet Sound
Transf.	Loge	Loge	Loge	$(1-B)^{12}$	$(1-B)^{12}$	$(1-B)^{12}$	-

Box's method. The R^2 coefficient reaches 75 %. The analysis of the residuals cross-correlation matrix indicates no lack of fit. The final linear model is:

$$(4) \text{LogRec}_m = 0.78 \text{LogRec}_{m-1} + 0.23 \text{LogRec}_{m-12} - 0.62\text{E-}04 \text{RiverDiff}_{m-6}$$

Table 5. Sample Partial Auto and Crosscorrelation matrices $\gamma\gamma(l)$ and $\gamma x_i(l)$. The matrix is given in term of indicator symbols such as defined in Tiao and Box (1981) (a sign (+) denotes a partial coefficient value greater than $2n^{1/2}$, a sign (-) denotes a value less than $-2n^{1/2}$, a sign (.) denotes non-significant value with respect to the above criterion). y: Rec, x_1 : Sound, x_2 : RiverDiff, (l): lag being tested.

	(l)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\gamma\gamma(l)$		+				+				+		+	+				
$\gamma x_1(l)$		-										-					
$\gamma x_2(l)$							-										

Table 6. Final multiple time series model identified by the WMTS-1 program. $R^2 = 75.5$ %. The variables Rec, Sound, and RiverDiff are coded 1, 2, and 3, respectively in the model specification (l, i, j) (l) indicates the lag, (i) the series being regressed, and (j) the predictor series. All parameter estimates are greater than 2S.E..

Predictor series	Model specification	Parameter estimates	Estimated S.E
Rec	(1,1,1)	0.787	0.495E-01
Sound	(1,2,2)	0.573	0.731E-01
RiverDiff	(1,3,3)	0.723	0.673E-01
RiverDiff	(6,1,3)	-0.628E-04	0.285E-04
Rec	(12,1,1)	0.237	0.534E-01
Sound	(12,2,2)	0.414	0.714E-01

5.2.2- Non-linear approach

The linear model (4) was then re-estimated using the ACE algorithm (Fig. 4). The non-linear transformation procedure resulted in an increase of the R^2 from 75 to 81 %. The forced addition of the sounding series into the model (curves (°) in Figure 4) only improves the R^2 value by a 2 % increase. This indicates that, at the monthly scale, the impact of this variable on the recruitment indicator vanishes. Therefore it was not maintained in the final form of the monthly model (5). All the other climatic variables were also systematically tested in the non-linear model. None of them, however, displays a satisfactory optimal transformation. The final non-linear form of the model (curves (+) in Fig. 4) is therefore:

$$(5) \quad \varphi(\text{LogRec}_m) = \phi_1(\text{LogRec}_{m-1}) + \phi_2(\text{LogRec}_{m-12}) + \phi_3(\text{RiverDiff}_{m-6})$$

Note that, in (5), the release of the linearity improves the coefficient of correlation with respect to (4) but does not change the structure of the predictor function which remains $\{\text{LogRec}_{m-1} : \text{LogRec}_{m-12} : \text{RiverDiff}_{m-6}\}$. Inversely, it may be recalled that the Amazon flow and the medium-sized category were included in the non-linear model for the bi-annual analysis.

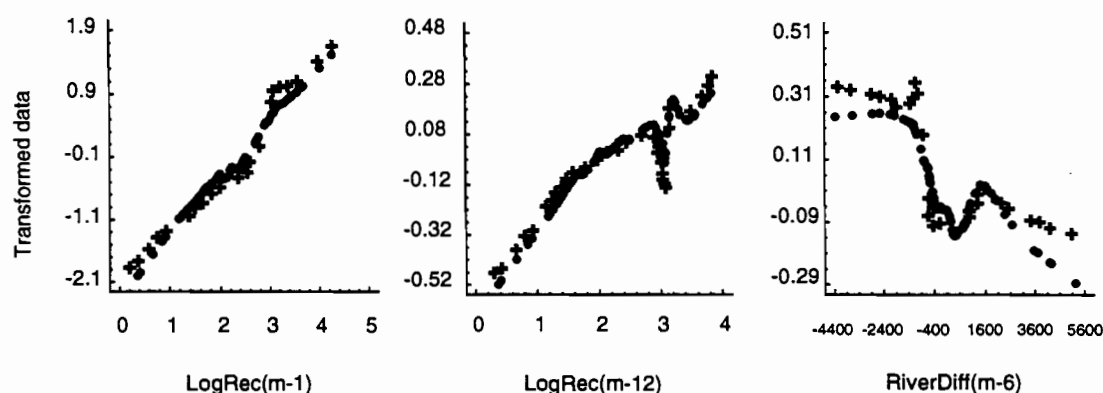


Fig. 4 : Non-linear monthly analyses : optimal transformations of the explanatory variables common to the two models : curve (*) : model with forced adding of (Sound), indep.var. = (LogRecm), predictor function = {(LogRecm-1), (LogRecm-12), (Soundm), (River Diffm-6)}, $R^2=83.1\%$ (the (Sound) transformed curve is not displayed). curve (+) : model without (Sound) : final model of the form (5) : indep.var. = (LogRecm), predictor function {(LogRecm-1), (LogRecm-12), (Soundm), (River Diffm-6)}, $R^2=81.7\%$.

5.2.3- Discussion: preliminary remarks

Impact of the fleet dynamics on the recruitment indicator: consequences

In the case of the French Guyana fishery, it appears that the spatial distribution of the fishing effort has an impact on the composition of the landings, and therefore on the recruitment indicator. This result suggests that studies which do not take into account the fleet dynamics dimension when the resource is known to have spatially-structured distributions may miss the actual causes of long-term changes in the recruitment series. In this case, the bias might even have generated misleading conclusions concerning the long term environmental and/or climatic impacts on recruitment fluctuations. Removal of this bias may be done by removing the trend in the series. In the present case, the transformation shape of the two climatic explanatory variables (LogAmaz_{t-1}) and (LogMed_{t-2}) with or without the detrending procedure are similar (Fig. 3). One may therefore assume that those environmental factors actually intervene in the long term dynamics of recruitment whereas the fleet distribution of effort intervenes in the long term indicator of this recruitment. The difference is slight but important.

5.3. Limits of the interpretations

Biologically speaking, these results appear to be interpretable with respect to the life cycle of *P. subtilis*. The (LogMed) variable lagged at 2 in models (2) and (3) represents the abundance of the individuals which were about to mature 9 to 15 months before recruitment. This one year delay corresponds to the time required to pass through the different life cycle steps separating the two stages concerned. On the other hand, the presence of (LogAmaz_{t-1}) in models (2) and (3) and (RiverDiff_{m-6}) series in model (5) are also biologically explainable. These series represent respectively the discharge flows of the Amazon and the local rivers 6 months ahead of the recruitment. This corresponds to the periods of eggs spawning and inshore migration of the larvae. Both Amazon and local rivers seem therefore to have impacts on the first stages of the cycle which are usually assumed to be the major critical stages in Penaeids life cycle. More particularly, for the Amazon river case, this impact appears to be dome-shaped. This recalls the theoretical pattern already suggested by other studies especially on pelagics (Cury and Roy, 1989).

We will however stay careful and not go any further in this biological interpretation. Several previous studies have already stressed the apparent non-linear relationship between river discharge and recruitment abundance (Garcia and LeReste 1981, Garcia *et al.*, 1985, Staples *et al.*, 1984., Browder 1985, Gracia 1989, Dall *et al.*, 1990). These studies thus agree with the shape of the relationship identified between recruitment and the Amazon river. Some other papers propose linear negative relationship between river flow and recruitment (Barrett and Gillespie 1975, Lhomme and Garcia 1984, etc.) while a large number of studies suggest opposite results (i.e. linear positive relationship) (Racek 1959, LeReste 1978, Vances *et al.*, 1985). What is therefore needed is now to lead other analyses based on similar methodologies (non-linearity combined with time series techniques, introduction of fleet effort distribution and simultaneous use of two distinct time scales) in order to discuss the present results.

6. GLOBAL VERSUS LOCAL CHANGES: A STIMULATING CONCEPT

6.1. About the non-linear techniques

In shrimp literature, classical linear regressions have been useful to draw attention to potential impacts of environmentally-induced factors. However, a large number of articles has already stressed the empirical non-linear (or even more non-monotonous) nature of the relationships between environmental variables and resource biological states. It is time now to move beyond this linear domain. Critics of linear techniques are not new and certainly not restricted to biological domains (Prigogine and Stengers 1979, Stewart 1992). In the present case, the changes in predictor function and the subsequent improvement of the model following the use of the non-linear transformations highlight the methodological importance of these techniques. It is admitted that present non-linear algorithms (ACE, AVAS, GAIM) have still to be improved and must be considered and used with caution (Cury *et al.*, 1995). These algorithms however enjoy the credit to exist and to be available to biologists. They have been used by pelagic specialists for several years (Mendelssohn and Cury 1987, 1989). A step has however still to be taken in shrimp research domain. It is time now to

adopt non-linear techniques, even if this implies a re-questioning of the conclusions asserted until now on the bases of classical techniques.

6.2. Beyond the classical problem of pertinent observation scales

For phenomena characterized by several perception scales, these scales generally correspond to the main functional scales (Wiens *et al.*, 1986, Rahel 1990, Frontier 1990). Consequently there are usually as many models and explanatory theories as perception scales. In the case where global and local factors are involved, this remark becomes central for the methodological approach (Turner *et al.*, 1989). Furthermore, when the environmental and climatic factors apparently influencing the system are multiple, complex, and diversified as it is the case for penaeid stocks, thinking in terms of global versus local functional dynamics drive necessarily the investigations to the classical question: "What are the pertinent observation scales?" There are however not a priori defined answers. The pertinent scales can only be identified a posteriori by the natural frequencies of the phenomena studied (Urban *et al.*, 1987, Burel *et al.*, 1992). In those circumstances, ecological processes, whose variability mechanisms are unknown or only partially understood, raise additional methodological difficulties. Some ad hoc solutions may be available. In the case where a seasonal pattern is known to characterize a large number of the factors assumed to enter the dynamics -as it is usually the case for Penaeid stock (Dall *et al.*, 1990)-, this seasonality may indicate a potential optimal scale to adopt. In our case, this natural temporal time scale (frequency) allowed us to propose two different time scales susceptible to "catch", at least partially, the natural external variability.

6.3. The Amazon river, a global factor

The Amazon river can be viewed as an indicator of global change for two reasons. A factor should be defined as being global (or local), not intrinsically, but rather with respect (i.e. relatively) to the other factors also included in the analysis. The Amazon river mouth is located 450 km southward from the French Guyana - Brazil frontier. In this respect, it can be considered as a non-local factor vis à vis the other explanatory variables which all integrate locally generated (geographically speaking) variables.

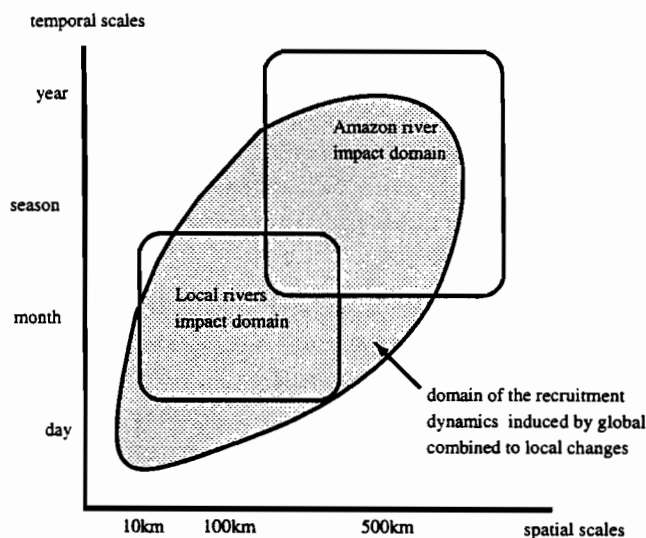
However, the Amazon river comes up to the general expectations when talking about global factors for a second reason. A global factor should provide or contain information relevant to the Earth's global climatic evolution. With an annual discharge volume of 5.2×10^{12} cubic meters per year (m^3/y), the Amazon represents about 20 % of the annual World continental water discharge in ocean (Oltman, In Prost 1990). The flow ratio Amazon/local rivers moreover indicates that, on average over the period 1979-1990, the Amazon annual discharge was 65 times the discharge of the cumulated local rivers. This magnitude in the ratio thus justifies the fact that the Amazon was qualified as a global factor with respect to the other variables, which should conversely be considered as indicators of local changes.

6.4. Concept of scale dependence: the coherence of the space-time scales

The fact that a river considered as global factor appears to have a significant impact at the bi-annual but not at the monthly temporal scale, may indicate a possible space-time (de)limitation of its acting domain. Whereas the bi-annual level of the recruitment dynamics is influenced by the Amazon, its impact vanishes out at shorter scale levels. On the other hand, local rivers discharge does not seem to yield impact on the long term dynamics but is significant at the monthly scale. The recruitment dynamics seems thus to be identifiable and characterized by several functional scales.

This notion of multiple functional scale is quite usual in Ecology and was particularly developed in Theory of Hierarchy through the concept of scale dependence (Wiens 1989, Burel *et al.*, 1992, Müller 1992). This concept asserts that impacts of phenomena that spreads over large spatial scales are observed to be much more slower than those acting on smallest spatial scales. Instead of this expression of scale dependence, one may be tempted to refer to the concept of coherence of scales. The term dependence when used in "dependence of scales" implies the notion of causality and of formal relationship between space and time. More safely, the term coherence merely refers to a logical but not proven relationship existing between the temporal and spatial dimensions of the factors. The observations made about the *P. subtilis* off French Guyana seem to be in agreement with these expectations of coherence of scales (Fig. 5). The Amazon river turns out to imprint an impact at a relatively long-term scale (the bi-annual scale) according to a seasonal frequency, while local rivers impact is effective at higher frequencies and observable at monthly scales.

Fig. 5 : Coherence of scale (scale dependence) in the case of the French Guyana shrimp recruitment dynamic : the Amazon river has been shown to imprint effects on the system dynamics at a large temporal scale (the bi-annual scale), while more local factors appears to generate impacts at a smaller scale (the monthly scale). This creates a virtual relationship between spatial and temporal scales in accordance with the classical concept of scale dependence.



6.5. Global versus local: let's avoid some misleading simplifications

Thinking in terms of global versus local changes is not merely tantamount to comparing or even to opposing two different spatial or temporal scaled impacts. First of all, the two notions (local and global) have not absolute but relative dimensions. They are only defined one with respect to the other. You will consider a factor as being global, not intrinsically with respect to its own nature and/or action domain -a river flow may be considered as a local factor as well as a global factor-, but rather with respect to the nature and/or action domain of the other factors involved in the analysis.

Nevertheless, it is on a more fundamental field that the view which tend to "squeeze" this concept to this over-simplistic opposition between two scales, would miss the core of the problem. Not only do the two notions appear to be relative and not absolute, but also the arbitrariness of the antinomy asserted to exist between them is disputable. They are not two opposite polar extrema excluding one another, as sometime asserted, but rather a continuum along the scales. Furthermore, the different levels are not independent from one another. The same environmental factor may not restrict its impact to one given level but "spread out" on several levels. One may expect, for instance, to observe that the local rivers appear to have a temporal impact domain which covers a larger scale than merely the monthly scale, probably up to the quarterly or even larger scale domain. An analysis based on quarterly recorded data would permit us to determine the pertinence of such an assertion.

6.6. Bartering the "Global versus Local Changes" approach for a "Global combined with Local Dynamics" approach

Therefore, the whole dynamics of the recruitment such as we finally observe it, is the emergent result of a simultaneous combination of interacting dynamics characterizing different hierarchical (space-time scaled) levels, and not merely the result of addition (superposition) of these dynamics. One should discard the idea that the variability and the dynamics of a biological system, whatever the latter, are viewed as simple "up-pilings" at diverse scales of responses to different factors (Fig. 5.b). Biological systems are not those "mille feuilles" that react at given scales only to given factors whose impacts are specific to these scales (Burel *et al.*, 1992). The shift from the idea of additional (superimposed in time) impacts to the notion of combined (simultaneous, interacting and emergent) impacts is necessary if we want to better understand the problem of environmental impacts on natural and even anthropic systems.

The conclusion is therefore that one can not assert any longer to "integrate", in the sense of identifying and understanding, the dynamics of a given level by "simplistically" analyzing the variability of this unique level. We have to widen the space-time dimension of our investigation to the direct and not direct-surrounding levels in order to identify the specific but also interlevel mechanisms acting within and between the system levels. Within this conceptual framework, we now must not think in terms of "Global versus Local Changes". The two notions are in fact inseparable. We should rather think in terms of "Global combined with Local Changes". A better understanding of the climatic-induced changes and of their effects on exploited systems passes by the integrating new methodological approaches and by the integration of new approaches combining different scales.

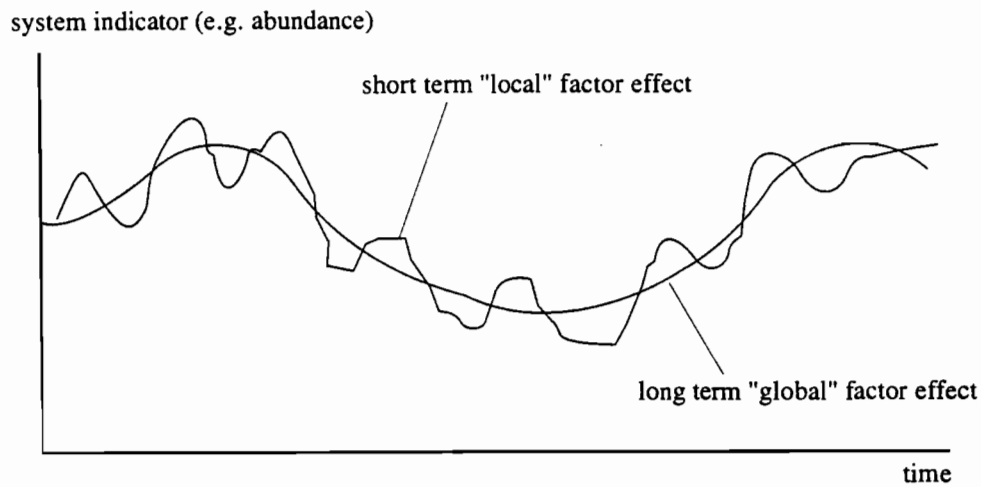


Figure 6 : Misleading diagram which conveys the concept of addition of effects instead of combination of effects. This oversimplistic approach leaves out the concept of emergence property. We should consider systems as emergent responses to combined effects acting within and between the functional levels rather than as simple adding of "compartmentalized" responses specific to partitioned functional level.

Acknowledgments

The authors would like to thank Ph. Cury, Cl. Roy (ORSTOM), and R. Mendelssohn (PFEG) for the welcome and the technical advises the latter generously offered during authors' two-weeks visit to the Pacific Fisheries Environmental Group (PFEG), Monterey, California. The authors are also indebted to A. Ducouret (Météo France, Cayenne) and Ph. Vauchel (ORSTOM Cayenne) for providing rainfall and rivers flow data, respectively.

REFERENCES

- Barrett B. and M.C. Gillespie. 1975. Environmental conditions relative to shrimp production in coastal Louisiana. Louisiana Wildlife and Fisheries Commission Technical Bulletin 15: 1-22.
- Belsey D.A., E. Kun and R.E. Welsch. 1980. Regressing diagnostics: identifying influential data and source of collinearity. John Wiley, New-York.
- Breiman L. and J.H. Friedman. 1985. Estimating optimal transformations for multiple regression and correlation. J. Am. Stat. Assoc. 74: 829-836.
- Browder J.A. 1985. Relationship between pink shrimp production on the Turtugas grounds and water flow patterns in the Florida Everglades. Bull. Mar. Sci. 37(3): 839-856.
- Burel F., J. Baudry, P. Clergeau, P. Constant, M.-C. Eybert. 1992. Approche spatiale des phénomènes écologiques: échelles et hiérarchie. Bull. Ecol. 23(1-2): 93-101.
- Crocos P.J. 1985. Appraisal of some factors relevant to the development of penaeid prawn population reproductive models. In Second Australian National Prawn Seminar. Rothlisberg P.C., B.J. Hill and D.J. Staples (eds.), Cleveland, Australia: 159-164.
- Cury Ph. and C. Roy. 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 46: 670-680.
- Cury Ph., C. Roy, R. Mendelssohn, A. Bakun, D. Husby and R. Parrish. 1995. Moderate is better: exploring nonlinear climatic effects on the California northern anchovy (*Engraulis mordax*), p. 417-424. In R.J. Beamish (ed.) Climate and northern fish populations. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 121.
- Dall W. 1981. Osmoregulation ability and juvenile habitat preference in some penaeid prawns. J. Exper. Mar. Biol. Ecol. 54: 55-64.
- Dall W., B.J. Hill, P.C. Rothlisberg and D.J. Staples. 1990. The biology of the Penaeidae. In Advances in Marine Biology 27. Blaxter J.H. and A.J. Southward (eds.). Acad. Press, 489 p.
- Frontier S. 1990. Les outils mathématiques nouveaux du transfert d'échelle. In Le transfert d'échelle. Mullon C. (ed.) Séminar 4., ORSTOM: 379-403.
- Garcia S. and L. Le Reste. 1981. Cycles vitaux, dynamique, exploitation et aménagement des stocks de crevettes penaeides côtières. FAO Fish. Doc. Tech. 203, FAO Roma, 210 p.
- Garcia S., M. Lemoine and E. LeBrun. 1985. Seasonal and long-term variability of recruitment in French Guyana shrimp fishery on *Penaeus subtilis*. FAO Fish. Rep. 327, Suppl., FAO, Roma.
- Gracia A.G. 1989. Relationship between environmental factors and white shrimp abundance in the southwestern Gulf of Mexico. An. Inst. Ciec. Mary Limnol. Univ. Autom. Mexico 16(1): 171-182.
- Hastie T. and R. Tibshirani. 1990. Generalized additive models. Chapman and Hall, London.
- Hettler W.F. 1992. Correlation of winter temperature and landings of pink shrimp, *Penaeus duarorum*, in North Carolina. Fish. Bull., U.S. 90: 405-406.
- Koslow J.A., K. R. Thompson and W. Silvert. 1987. Recruitment to northwest Atlantic cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) stocks: influence of stock size and climate. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 44: 26-39.
- Lam C.F., J.D. Whitaker and F.S. Lee. 1989. Model for white shrimp landings for the Central Coast of South Carolina. North Am. J. Fish. Manag. 9: 12-22.
- Le Reste L. 1978. Biologie d'une population de crevettes, *Penaeus indicus*, sur la côte nord-ouest de Madagascar. Trav. Doc. ORSTOM 99: 1-291.
- Lhomme F. and S. Garcia. 1984. Biologie et exploitation de la crevette pénaeide au Sénégal. In Penaeid Shrimp, their biology and Management. Gulland J.A. and B.J. Rothschild (eds.), Fishing News Books, Farnham: 111-114.
- Makridakis W., S.C. Wheelwright and U.E. McGee. 1983. Forecasting: methods and applications. 2nd edition, John Wiley, New-York.
- Mendelssohn R. and Ph. Cury. 1987. Fluctuations of a fortnightly abundance index of the Ivorian coastal pelagic species and associated environmental conditions. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 44: 408-421.
- Mendelssohn R. and Ph. Cury. 1989. Temporal and spatial dynamics of a coastal pelagic species, *Sardinella maderensis* off the Ivory Coast. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 46: 1686-1697.
- Mendelssohn R. and J. Mendo. 1987. Exploratory analysis of anchoveta recruitment off Peru and related environmental series. In The peruvian anchoveta and its upwelling ecosystem: three decade of change. Pauly D. and I. Tsukayama (eds.). ICLARM Studies and Reviews: 294-306.

- Müller F. 1992. Hierarchical approaches to ecosystem theory. *Ecol. Model.* 63: 215-242.
- Oltman R.E. 1968. Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon river. U.S. Geol. Survey. Circ. 552, Washington D.C. *In* Les côtes de Guyane. Prost M.T. 1990. *Prog. Env. côtier.* ORSTOM Cayenne, French Guyana.
- Prigogine I. and I. Stengers. 1979. *La nouvelle alliance.* Gallimard, Paris, 439 p.
- Racek A.A. 1959. Prawn investigations in eastern Australia. *Res. Bull. State Fish., New South Wales* 6: 1-57.
- Rahel F. 1990. The hierarchical nature of community persistence: a problem of scale. *Am. Nat.* 136: 328-344.
- Staples D.J., W. Dall and D.J. Vance. 1984. Catch prediction of the banana prawn, *Penaeus merguensis*, in the south-eastern Gulf of Carpentaria. *In* Penaeid shrimps: their biology and management. Gulland J.A. and B.J. Rothschild (eds.), Fishing News Books Ltd.: 259-267.
- Staples D.J. and D.J. Vance. 1986. Emigration of juvenile Banana prawns *Penaeus merguensis* from a mangrove estuary and recruitment to offshore areas in the wet-dry tropics of the Gulf of Carpentaria, Australia. *Mar. Ecol. Prog. series* 27: 239-252.
- Stewart I. 1992. *Dieu joue-t-il aux dés? Les nouvelles mathématiques du Chaos.* Flammarion, Paris, 441 p.
- Tiao G.C., G.E. Box, M.R. Grupe, G.B. Hudak, W.R. Bell and I. Chang. 1980. The Wisconsin Multiple Time Series (WMTS-1) program. A preliminary guide. *Dep. Stat. Univ. Wisconsin*, 75 p.
- Tibshirani R. 1988. Estimating transformations for regression via additivity and variance stabilization. *J. Am. Stat. Assoc.* 83: 394-405.
- Turner M.G., V.H. Dale and R.H. Gardner. 1989. Predicting across scale: theory development and testing. *Landscape Ecol.* 3: 245-252.
- Urban D.L., R.V. O'Neill, and H.H. Jr Shugart. 1987. Landscape ecology. *Biosci.* 37: 119-127.
- Vances D.J., D.J. Staples and J. Kerr. 1985. Factors affecting year-to-year variation in the catch of banana prawn (*Penaeus merguensis*) in the Gulf of Carpentaria, Australia. *J. Cons. Expl. mer* 42: 83-97.
- Venaille L. 1979. La pêcherie de crevettes Pénéides du plateau guyano-brésilien. *Bull. Inst. Pêches Marit.* 297: 1-18.
- Wiens J.A. 1989. Spatial scaling in Ecology. *Functional Ecology* 3: 385-397.
- Wiens J.A., J.F. Addicott, T.J. Case and J. Diamond, 1986. Overview: the importance of spatial and temporal scale in ecological investigations. *In* J. Diamond and T.J. Case (eds.) *Community Ecology.* Harper & Row, New-York: 145-153.

ANNEXE 4

*Béné C. and L. Doyen, Storage and viability of a fishery with resource and market dephased seasonalities. (soumis à *Environmental and Resource Economics*)*

Storage and Viability of a Fishery
with Resource and Market dephased Seasonalities

Christophe Béné^{**} and Luc Doyen^{**}

* IFREMER Station Zoologique Université Paris VI, B.P. 28

F-06230 Villefranche sur mer, France

cbene@ifremer.fr

** CNRS Ceremade Université Paris Dauphine Place de Lattre de Tassigny

F-75775 Paris cedex 16, France

doyen@ceremade.dauphine.fr

° corresponding author

Abstract

In this study we analyse the role of the storage regulation in a fishery's production process when the resource exploited and the market to which the production is exported are characterized by seasonal dephased oscillations. For this purpose we built up a dynamic model drawn from the French Guyana shrimp fishery example. The underlying objective of the model is not the maximisation of a given criterion (as would be in the optimal control approach), but merely the maintenance of the fishery's economical viability. The fundamental principle is here to try to preserve as many as possible viable control options. The conditions to achieve and maintain this viability are captured in a certain number of constraints. The analysis points out periods and situations within the season where the fishermen must anticipate the evolution of their storage to avoid violating those viability constraints. The study also indicates how the fishery's viability can be ensured even if the exploitation costs exceed the commercial value of the landings for a finite part of the year. However, when the resource's and/or market's oscillations are too large, the fishery may be not viable any longer and it appears that the crisis can not be removed by investing in larger storage capacities.

Key words

Fisheries economics, Dynamic model, Viability analysis, Storage regulation

Introduction

From the early fifties to the end of the seventies, the management of exploited marine resources had been mainly based on the concept of Maximum Sustainable Yield. The scientific reject of this concept as an appropriate management tool was sounded by the famous Larkin's article [1]. This period also corresponds to the appearance of the optimal control theory in fisheries management models. This theory, directly issued from engineers' sciences, rose large interest in several scientific domains and a substantial number of papers in fisheries sciences has been based on this concept since the last twenty years. It is recognised that Clark's pioneer works have largely contributed to this orientation [2,3,4]. See [5] for a commented review of the first articles in fisheries.

The success of the optimal control theory in fisheries literature may be explained by two facts. Firstly, optimal control theory is part of the dynamical systems theory. Using this approach thus allows to analyse the relationship which links the fishermen to the exploited resource from a dynamical point of view. Consequently, the resources have no longer to be considered at their equilibria as it was the case in the classical models of Schaefer or Beverton and Holt's types, and the transitory states and adjustments processes which are thought to characterise the dynamics of natural systems can then be accounted [6]. This was furthermore in line with the studies which pointed out the importance of taking into account fluctuations of natural systems [7]. Emphasising the dynamical nature of the fisheries-derived processes represents certainly the main improvement with respect to the classical static models.

The second concept that ensured the optimal control theory's success is the concept of optimality. This concept (which was already present in the classic models) does indeed correspond to the representation that people had in Western Countries about the manner with

which management problems should be addressed. The more illustrative example is certainly the widely adoption during the last 20 years of the expected discounted revenue maximisation principle as the reference objective in most of the analyses.

However, several studies have suggested that the revenue maximisation may differ from the actual fishermen' objective [8,9,10]. Furthermore it is recognised for long that various objectives (economic, social, biological) have to be taken into account when dealing with renewable resources management and especially with fisheries management [11,12,13,14,15]. In addition to the fact that optimal control problems having more than one single state variable are difficult to solve [16], the manner the multi-objectives optimisation is usually tackled induces a major drawback. The multi-objective approach requires the identification of the functions which embody all the different criteria to optimise. The usual way to do so is to weight the criteria in order to materialise the trade-offs between the conflicting and competitive objectives (biomass, yield, revenues, employment, etc.). See [12,17,18] for examples in fisheries. However the use of this multi-criteria approach implies « political » choices on the weights to attribute to the different objectives. One may be reluctant to carry out such political arbitrary choices because the relative importance of these objectives will obviously depend on subjective factors and will be modified according to the point of view from which the problem is tackled. Furthermore, identification of objective functions drives to evaluate in quantitative terms all the externalities that have to be accounted, in monetary values for example. This quantitative evaluation therefore rises numerous technical, political and sometimes ethics problems, especially when dealing with environmental question and natural systems. The role of scientists is not to implement such choices. Indeed, as Hilborn and Walters noticed [17]: « The choice of policy option is normally and rightfully a political, social, and economic decision. » In line with this approach, the role of scientists should merely be to

indicate the different control options that can be adopted at the present time and that will still preserve the viability of the system in the future, or in a "dual" way, that reveal the irreversible situations. Society will then choose amongst these identified control options the one(s) which respond(s) to its present political objective (knowing that this choice is likely to change before the objective is actually achieved).

These remarks point out the need to address management problems from a new framework where scientists, when analysing resource management problems, would not be required to impose definitively the priority order of the various objectives to be accounted for but instead would have merely to identify the set of control solutions which offer as many management options as possible in terms of system viability. In other words this approach should allow to refrain from imposing any unique political choice which might thereafter turn out to be questionable and irreversible. What we look for is thus a qualitative tool where the management is still analysed from the dynamical point of view but where one pays more attention to the very first objective which is to identify the « map » of controls and situations that preserve the perennality of the systems in the future, instead of longing to study these control values with respect to optimality. This amounts of dealing directly with the constraints that the systems must satisfy rather than to handle multi-objective functions.

Viability theory [20] is an analytical framework which allows to tackle mathematically this problem. The aim of this approach is indeed to analyse the compatibility between the dynamics (eventually uncertain) and the constraints of dynamical systems and to determine the set of controls (or actions) that pertain these systems from entering crises (i.e. from violating their viability constraints). We adopt this approach in the present study and we apply it to a very

simple example drawn from the fishery field. Refer to [21,22,23,24,25,26] for other applications in ecology and economics.

Motivations of the study

In Economics, it is convenient (essentially for econometrics analysis purpose) to represent the firm's production rate $Q = f(K, L)$ by a Cobb-Douglas function $Q = AK^\alpha L^\beta$ where Q is the output rate, K and L are the production factors, respectively the capital and the labour and A , α , and β are parameters. This Cobb-Douglas function allows a straightforward comparison with the fisheries' harvesting rate when formulated in the classical schaeferian form $h = f(E, X) = qEX$ where E and X are the production factors, respectively the fishing effort and the resource level, and q the catchability coefficient. This formalism presents however a second interest. It emphasises what has doubtless to be considered as one of the main differences between the production process of classical firms and that of renewable resource exploiting systems. It is indeed usually assumed that classical firms adjust their productions to the market demand by modifying their input factor rates, either the capital K , or the labour L and that only the market demand dynamics is exogenous. The underlying assumption is thus both K and L to be endogenous to the firms' production process. In renewable resource exploitation, the market dynamics is still exogenous but the resource level is also clearly exogenous for the fisheries at their individual levels. This difference implies an important consequence, literally that fisheries have to adjust their production rates to the market demand, constrained by the fact that one of their production factors is also exogenous. Under such a constraint, the production rate is imperfectly controlled. The storage will thus hold a central place in the production process in the sense that it plays the role of a buffer between the partially uncontrolled catch volumes and the totally uncontrolled market demand. Hilborn and Walters [19] even talk about « a *squeeze* between biological and economic forces. » (our italic).

It is surprising however to note that this storage problem, which has been greatly investigated in Economics literature, has virtually never been arisen in fisheries while, it certainly represents a key-factor of production dynamics and consequently of fisheries management. The problem addressed in this paper is motivated by these remarks. The question is to determine how a fishery can ensure its viability when the dynamics of the resource and that of the market are seasonal and furthermore that these two dynamics oscillate with a time-dephasing between their respective seasonalities. The fishery which motivated this investigation and that we use as empirical background is the French Guyana shrimp fishery.

The model

Usually, when a fishery is regarded from the dynamical point of view, the most commonly suggested analogy is that of a prey-predator relationship [6,13]. Here we adopt a more widen approach in the sense that we do not merely consider the relationship that links the fishermen to the resource, but also the relationship that links these fishermen to the market to which they export their production. The fisheries are indeed economic micro-entities evolving at the interface between the resources that they exploit and the markets that they supply.

Accordingly, fisheries don't have merely to adapt to the resource fluctuations but must also cope with the market dynamics (**Fig.1**).

One direct consequence of this 'squeeze' is that the fishery's storage volume (S) results from the difference between the cumulated catch volumes (H) (i.e. the cumulated landings) of the fleet over a given period (T) and the total catch quantity (Γ) which is injected into the market over the same period. This can be written:

$$(1) \quad S = H - \Gamma$$

or in instantaneous terms:

$$(2) \quad \dot{S}(t) = h(t) - \tau(t)$$

where $\dot{H}(t) = h(t) = qe(t)X(t)$ is the catch flow, q the catchability coefficient, $e(t)$ the instantaneous fishing effort, and $X(t)$ the resource abundance. The catchability coefficient q is assumed here to be constant. The quantity $\dot{\Gamma}(t) = \tau(t)$ represents the exportation flow. The system considered is then the dynamical non autonomous controlled system:

$$(3) \quad \dot{S}(t) = qe(t)X(t) - \tau(t)$$

where $S(t)$ is the state variable and $\tau(t)$ the control variable.

In the case of the French Guyana fishery, the exploited resource is the stock of a sub-equatorial shrimp species, *Penaeus subtilis*, which evolves off the French Guyana's coast. Like for most *Penaeids*, the life cycle of this species is very short, i.e. about 18 months [27,28]. The recruitment is highly variable and not significantly related to the spawning stock size [29]. Consequently, the stock can be considered as exogenous for the fishery. This decoupling assumption, which is not unrealistic for this type of species (provided that escapement never falls to extremely low levels) has already been adopted by numerous authors working on shrimp fisheries [30,31,32].

The resource abundance was estimated through the catch per unit of effort (CPUE) series. The analysis of this series shows that the resource oscillates seasonally, with a period of high abundance during the first six months of the year (from January to June) followed by a period of lower abundance during the second half of the year (from July to December) (cf. **Fig.2.a**). The existence of this seasonality is confirmed by calculating the seasonal indexes of the series estimated through a classical ratio-to-moving average method [33] (cf. **Fig.2.b**). We set $T = 1$ as the period and we represent this seasonal oscillating pattern by a sine function:

$$(4) \quad X(t) = \bar{X} + \sigma_X \sin(2\pi(t + \alpha)) \quad \text{with } \bar{X} > \sigma_X > 0 \text{ and } 0 < \alpha < \frac{1}{4}$$

where $\bar{X}$ is the average yearly resource abundance and $\sigma_X \sin(2\pi(t + \alpha))$ stands for the seasonal component oscillating around $\bar{X}$. The fishing effort over the same time period is visualised on Fig.3. This effort series was measured in number of operating days per month per active boat. As confirmed by the seasonal indexes, the series does not display any seasonal pattern. Each active vessel has been fishing around 24 days per month during the 13 years of the period investigated. We then assume that $e(t) = e = \text{constant}$. Consequently the catch rate is given by

$$h(t) = qe\bar{X} + qe\sigma_X \sin(2\pi(t + \alpha))$$

where q , e , and $\bar{X}$ are constants. We end up with a catch rate of the following form:

$$(5) \quad h(t) = \bar{h} + a_h \sin(2\pi(t + \alpha)) \quad 0 < \alpha < \frac{1}{4}.$$

The constant $\bar{h} = qe\bar{X}$ is then the average yearly catch flow and $a_h \sin(2\pi(t + \alpha))$ stands for the seasonal component oscillating around $\bar{h}$, with $a_h = qe\sigma_X$ (we then have $\bar{h} > a_h > 0$).

Since the end of the eighties, the French Guyana fishery exports more than 95% of its production to the French market [34]. We can therefore assume that the French consumption of tropical shrimp is a good indicator of the dynamics of the market's demand faced by this fishery. Several analyses indicate that the tropical shrimp is still considered by French consumers as a somewhat luxurious product which is essentially consumed during Christmas and New-Year's Eves periods [35,36]. The consumption is thus likely to be seasonal. The series is visualised on Fig.4. The data clearly confirm the seasonal pattern of the consumption. Market analyses also indicate that the French Guyana's production, which varies around 4000 tons per year, represents less than 10% of the total French importation of tropical shrimp. We therefore assume that the fishery is small enough to be price-taker and has no impact whatsoever, on the French market demand. This corresponds to the classical 'smallness

hypothesis' embodied in the perfect market approach. The demand function is thus considered as exogenous and we formalise its dynamics through a cosine function:

$$(6) \quad D(t) = \bar{D} + a_D \cos(2\pi(t + \alpha)), \quad \text{with } \bar{D} > a_D > 0 \text{ and } 0 < \alpha < \frac{1}{4}$$

where $a_D \cos(2\pi(t + \alpha))$ stands for the seasonal oscillation of the demand and $\bar{D}$ for the average propensity to consume shrimp during the year. Since the shrimp processors anticipate the consumption peak of December by purchasing the shrimp production one or two months ahead, the dephasing of $3/4$ between the cosine and sine functions (**Fig.5**) appears to fit qualitatively the 6 months time delay that is empirically observed between the high catch period and the processors' preferential purchase period. In the rest of the analysis, the time origin $t_0 = 0$ will be chosen such that $q_e X(t_0) = D(t_0)$. We further assume that the fishery is neither in monopolistic situation (i.e. $\bar{D}$ is not greater than $\bar{h}$) nor in overproduction situation (i.e. $\bar{h}$ is not greater than $\bar{D}$) over one season, then $\bar{D} = \bar{h}$. All the hypotheses adopted in the model can thus be summarised as read :

$$\begin{cases} \bar{D} = \bar{h} \\ h(t) \text{ and } D(t) \text{ of period } 1 \text{ s.t. } \begin{cases} h(t) = \bar{h} + a_h \sin(2\pi(t + \alpha)) \\ D(t) = \bar{D} + a_D \cos(2\pi(t + \alpha)) \end{cases} \\ D(0) = h(0) \end{cases}$$

which implies: $\tan(2\pi\alpha) = \frac{a_D}{a_h}$ and $0 < \alpha < \frac{1}{4}$.

The viability constraints

The first step in a viability analysis is to identify the different constraints which have to be met in order to preserve the system's viability. For instance if the resource had not been treated as exogenous, an obvious constraint would be to ensure a non-negative resource abundance. As far as the present system is concerned, the first constraint for this economic micro-entity is to guarantee a positive profit (before trying to maximise it). Let note p the price and assume it

constant over the season. Even if this hypothesis may appear debatable with respect to the volatility which usually affects commodity prices [37], Cadren et al. [38] show that the French Guyana shrimp price is characterised by a 11 months autoregressive process and does not display any seasonal pattern. Recall that $\tau(t)$ is the flow of local shrimp injected into the market, the profit constraint is thus:

$$(7) \quad p\tau(t) \geq c_e \cdot e + C_F + c_S \cdot S(t) \quad \forall t \geq 0,$$

where c_e is the unit fishing cost, C_F the fixed cost (which includes for instance crew members' salaries) and c_S the unit storage cost. The fishing and storage costs are assumed to be linear, i.e. c_S and c_e are constant. The profit constraint (7) can then be rewritten as:

$$(8) \quad \tau(t) \geq \frac{C + c_S S(t)}{p} \quad \forall t \geq 0$$

where

$$(9) \quad C = c_e \cdot e + C_F$$

stands for the 'exploiting' cost, this is to say, the cost of exploitation per se, i.e. without the storage costs.

The second constraint derives from the supply-demand relationship. This constraint states that the fishery's exportation flow should never exceed the demand rate. If it was the case, this would implies some wasted quantities of unsold shrimp. We have therefore:

$$(10) \quad \tau(t) \leq D(t) \quad \forall t \geq 0.$$

The next constraint concerns the storage volume where $S_{\max}$ is the limit storage capacity.

$$(11) \quad 0 \leq S(t) \leq S_{\max} \quad \forall t \geq 0.$$

The last constraint is an 'implicit' constraint. From (8) and (10) it follows:

$$D(t) \geq \frac{C + c_s S(t)}{p} \quad \forall t \geq 0.$$

This implies the following constraint on $S(t)$:

$$(12) \quad S(t) \leq \frac{pD(t) - C}{c_s} \quad \forall t \geq 0.$$

If we define the function $\underline{S}$ by

$$(13) \quad \underline{S}(t) = \frac{pD(t) - C}{c_s} \quad \forall t \geq 0,$$

the constraint (12) can be rewritten

$$(14) \quad S(t) \leq \underline{S}(t) \quad \forall t \geq 0.$$

Note that (8) and (10) concern the control variable $\tau(t)$ whereas (11) and (14) concern the state variable $S(t)$. In fact (8) and (10) lead to the control maximum and minimum values:

$$(15) \quad \tau_{\min}(t) = \frac{C + c_s S(t)}{p}$$

$$(16) \quad \tau_{\max}(t) = D(t)$$

while the state constraints (11) and (14) define the viability of the system. Let us denote by $K \subset \mathbb{R}^2$ the domain defined by:

$$(17) \quad K = \{(S, t) \text{ s.t. } 0 \leq S \leq \min\{\underline{S}(t), S_{\max}\}\}$$

K is the constraint domain of the system. It is portrayed on **Fig.6**.

Qualitative analysis of the system

Recall that $qeX(t)$ is the catch rate and from (9) that C represents the exploiting costs. If we assume that

$$(18) \quad pqeX(t) \leq C \quad \text{for } t \in [t_1; t_2] \text{ with } 0 < t_1 < t_2 < 1,$$

this is equivalent to assume the existence of a period $[t_1 ; t_2]$ within the season during which the resource level is so low that the commercial value of the landings does not cover the exploitation costs. Let $\underline{S}$ be the function defined by

$$(19) \quad \underline{S}(t) = \frac{pqeX(t) - C}{c_s}$$

Note that because of (18), $\underline{S}(t) \leq 0$ for $t \in [t_1 ; t_2]$. The function $\underline{S}(t)$ is represented on Fig.7 below. From (15) we have

$$(20) \quad qeX(t) < \frac{C + c_s S(t)}{p} \Rightarrow \dot{S}(t) < 0 \quad \forall \tau \in [\tau_{\min}(t) ; \tau_{\max}(t)].$$

Substituting (19) in (20) we obtain:

$$(21) \quad S(t) > \underline{S}(t) \Rightarrow \dot{S}(t) < 0 \quad \forall \tau \in [\tau_{\min}(t) ; \tau_{\max}(t)].$$

Such a situation occurs when the catch rate $h(t) = qeX(t)$ is lower than the minimum exportation rate $\tau_{\min}(t)$. In this case, whatever the exportation flow $\tau(t)$ adopted by the fishermen, the storage volume $S(t)$ will decrease. In other terms, this situation corresponds to the part of the constraint domain K where $\dot{S}(t) < 0$ whatever the control value. Let's term $C(-+)$ this qualitative cell of K . $C(-+)$ is located above $\underline{S}(t)$ and below $\underline{S}(t)$ (cf. Fig.7).

On the other hand, from (16) we have

$$(22) \quad qeX(t) > D(t) \Rightarrow \dot{S}(t) > 0 \quad \forall \tau \in [\tau_{\min}(t) ; \tau_{\max}(t)].$$

This situation corresponds the period where $h(t)$ is greater than the maximal exportation rate $\tau_{\max}(t)$. In this case, the fishery's store will increase whatever the exportation rate. From (4) and (5) we know that $qeX(t) > D(t)$ for $t \in]0 ; t_3[$, where t_3 such that $h(t_3) = D(t_3)$ (i.e. $t_3 = 1/2$) (cf. Fig.5) or equivalently $\underline{S}(t_3) = \underline{S}(t_3)$ (cf. Fig.7). Thus, situation (22) concerns the couples $(S, t) \in K$ such that $t \in]0 ; t_3[$. This defines a second qualitative cell, denoted $C(++)$ which also displayed on Fig.7. The remaining part of K below $\underline{S}(t)$ with $t \in [t_3 ; 1]$ defines a

third cell noted $C(+)$ where the system's trajectories $\dot{S}(t)$ will depend on the control values.

In particular, we have $\dot{S}(t) \geq 0$ for $\tau(t) = \tau_{\min}(t)$ and $\dot{S}(t) \leq 0$ for $\tau(t) = \tau_{\max}(t)$.

Regulation of the storage volume and viability kernel

Viability kernel identification

What we are interested in is to determine whether the evolution (the dynamics) of the system is compatible with the constraint domain K . In other terms we wish to identify the subset of states (S, t) located in the domain K which generate trajectories that will always stay inside K .

The part of K which verify this condition is called the Viability kernel, and denoted $\text{Viab}(K)$ [20]. In our case, given K identified in (17), the viability kernel of the system (3) is defined by:

$$(23) \quad \text{Viab}(K) = \{(S(t_0), t_0) \text{ s.t. } \exists S(\cdot) \text{ solution of (3) s.t. } \forall t \geq t_0, (S(t), t) \in K\}$$

Usually, the identification of the kernel's boundaries requires partial differential equations which may be solved analytically in some cases or using numerical schemes [39]. In our case, the system is a one-variable non-autonomous system and the kernel identification comes to ordinary differential equations, the solutions of which are analytically identifiable. If we assume that the maximum storage capacity is such that

$$(24) \quad S_{\max} > S_1(t) \quad \forall 0 \leq t \leq 1$$

where S_1 is the 1-periodic function defined by:

$$(25) \quad S_1(t) = -\frac{a_h}{2\pi} \cos(2\pi(t + \alpha)) - \frac{a_D}{2\pi} \sin(2\pi(t + \alpha)) + s_1$$

with s_1 constant such that $\{S_1(t) = \underline{S}(t), t \in [0, 1]\}$ has one unique solution $t^\#$ defined by

$$\tan(2\pi(t^\# + \alpha)) = \frac{a_D}{a_h + p a_D / c_s},$$

it can then be shown (cf. Appendix A.1) that S_1 is the upper boundary of $\text{Viab}(K)$. It is visualised on **Fig.8**.

Likewise the lower boundary of $\text{Viab}(K)$ is the function S_2 defined by (cf. Appendix A.2)

$$(26) \quad \begin{cases} S_2(t) = -\frac{k}{k''} - \frac{S_1}{4\pi^2 + k''^2} (k'' \sin(2\pi(t+\alpha)) + 2\pi \cos(2\pi(t+\alpha))) + s_2 e^{k''t} & \text{for } t_4 \leq t \leq t_2 \\ S_2(t) = 0 & \text{for } \begin{cases} 0 \leq t < t_4 \\ t_2 < t \leq 1 \end{cases} \end{cases}$$

where $k = \bar{h} - (C/p)$, $k'' = -(c_s/p)$, $t_4 = \min\{t \in [0,1] \text{ s.t. } S_2(t) = 0\}$ and s_2 a constant such that $S_2(t_2) = 0$ (we recall that $t_2 = \max\{t \in [0,1] \text{ s.t. } \underline{S}(t) = 0\}$ under the hypothesis $pqeX(t) \leq C$, i.e. t_2 exists). The lower boundary of $\text{Viab}(K)$ is also visualised on **Fig.8**. To sum up, the viability kernel $\text{Viab}(K)$ of the system is defined by

$$\text{Viab}(K) = \{(S, t) \text{ s.t. } S_2(t) \leq S \leq S_1(t), t \in [0,1]\}$$

with $S_1(t)$ defined by (25) and $S_2(t)$ by (26).

Viability of the fishery

The fishery is viable if there is non vacuity of $\text{Viab}(K)$. It can be shown (cf. Appendix A.3) that there is no vacuity of $\text{Viab}(K)$ if :

$$(27) \quad \frac{p\bar{D} - C}{c_s} \geq \frac{a_h}{\pi} + \frac{pa_D}{c_s} + \frac{a_D^2}{2\pi(a_h + pa_D/c_s)} + \frac{a_D^2}{2\pi a_h}$$

Note from (27) that the viability of the fishery does not depend on the maximum stockage capacity $S_{\max}$ (provided (24)) but in turn on the amplitudes of the resource and market oscillations (through $a_h = qe\sigma_X$ and a_D). **Fig.9** represents $\text{Viab}(K)$ for different resource amplitudes σ_X .

From the previous analyses, we work out the regulation map $\mathfrak{R}(S,t)$ that maintains the viability of the fishery over an infinite time horizon, whatever the initial conditions $(S(t_0), t_0)$, provided that (24) is met. For any (S,t) in $\text{Viab}(K)$, this map is

$$(28) \quad \mathfrak{R}(S,t) = \begin{cases} \tau_{\max}(t) & \text{if } S = S_1(t) \\ \tau_{\min}(t) & \text{if } S = S_2(t), t_4 \leq t \leq t_2 \\ [C/p, \tau_{\max}(t)] & \text{if } S = 0, t < t_4 \\ [C/p, qeX(t)] & \text{if } S = 0, t > t_2 \\ [\tau_{\min}(t), \tau_{\max}(t)] & \text{otherwise} \end{cases}$$

The formulation of $\mathfrak{R}(S,t)$ points out the fact that several regulations (i.e. control values) can ensure the viability of the system when the latter is located within its viability kernel or when $S = 0$. In fact the control values are deterministically defined only when the system is located on the upper boundary of the viability kernel, i.e. when $S = S_1(t)$ with $t \in [0, 1]$ or when it is located on the lower boundary, i.e. when $S = S_2(t)$ with $t \in [t_4, t_2]$.

Interpretation of the results and conclusion

One major difference between fisheries and classical firms is that fisheries do not control entirely the levels of input factors which are introduced in their production processes. Indeed, in fisheries one production factor is the resource which is exploited. However, this resource has to be considered as partially (if not wholly) exogenous. As a consequence one critical aspect of the fisheries activity pertains on the storage volumes, which can be regarded as a buffer through which the fishermen then try to damp the dynamical gap which continuously occurs between their landings and the processors' or market's demand.

In the present study, we addressed this problem by investigating the behaviour of a shrimp fishery when the dynamics of both the resource and the market to which the fishery is related are seasonal and oscillate with dephased patterns. More precisely the objective of the study

was to analyse the effect of these dephased seasonalities on the fishery's economical viability and to determine whether this viability could be maintained through the regulation of the storage volumes. For this purpose, we built up a 'stylised' dynamical model drawn from the empirical resource's and market's seasonalities which characterise the French Guyana shrimp fishery dynamics. We then analysed the viability of the model using analytical tools developed in the Viability framework.

Although the model is quite simple, it displays some interesting behaviours. For instance, we might have expected at first that the dynamics of the exportation flow $\tau(t)$ would appear to be positively related to the storage volume $S(t)$ according to a broad rule of the type: « the higher storage volume the fishery enjoys, the larger the exportation flow ». We discovered that the 'theoretical reality' described by the viability analysis is radically different. The study shows that the exportation flow can fluctuate within a whole range of values, without following any direct relationship with the storage volume $S(t)$. The identification of the regulation map completes these first results derived from the viability kernel analysis and confirms that within the viability kernel many exportation rates (i.e. control values) and consequently many storage volumes (i.e. state variable evolution) space can ensure the perennality of the system over the season.

Simultaneously, the limit exportation rates $\tau_{\max}(t)$ and $\tau_{\min}(t)$ appear to be constrained by the exogenous dynamics of both the market and the resource but not by the maximum storage volume $S_{\max}$. Thus, the maximum rate $\tau_{\max}(t)$ is bound to the demand dynamics through the direct relation $\tau_{\max}(t) = D(t)$. This result is in fact sensible. The fishery would indeed never be able to sell more than the market's demand. Likewise, the minimum exportation rate $\tau_{\min}(t)$ is determined by a combination of the various costs borne by the fishery, according to the relation $\tau_{\min}(t) = \underline{S}(t) = (pD(t) - C)/c_S$. This result is also tangible since, from a pure economical point

of view, the fishery is expected to try to export at each instant the fraction of its production which at least covers its functioning costs.

Secondly, the analysis of the viability kernel points out the existence of two critical periods during which the fishery must anticipate the evolution of the storage volume in order to avoid violating its viability constraints. The first of these periods is the one preceding $t^\#$. If the fishermen do not pay attention, the storage volumes may increase to a level where the total functioning cost will exceed the profit derived from the exportation flow. This situation follows the high catch rate period, when the storage volumes are important but the demand is low. The second critical period corresponds to the period which precedes t_2 , when the fishery must have accumulated a minimum storage volume greater than $S_2(t^\#)$ in order to avoid falling short in supply, as the demand rises and the catch rate remains low.

In fact those results are in agreement with the 'intuitive behaviour' that one may adopt when faced with situations of either high catch / low demand or high demand / low catch combinations. The viability analysis allows merely to reach these conclusions within a rigorous mathematical framework. It furthermore permits to identify the situation where the maximal storage capacity $S_{\max}$ becomes the limiting constraint. According to (24) and remark (A.1.4) this limit threshold is $S_1(t_3)$. If $S_{\max}$ is smaller than $S_1(t_3)$, then the limiting factor is of physical nature: it is the maximum storage capacity $S_{\max}$. On the reverse case, i.e. if $S_{\max} > S_1(t_3)$, the limiting factor is no longer the maximum capacity $S_{\max}$ but a monetary threshold directly related to the activities costs. Therefore, a judicious strategy would be to invest in a storage capacity which is at least as big as $S_1(t_3)$.

The study points out another interesting result which was not initially straightforward and certainly not tractable without a dynamic mathematical analysis. Under the assumption that $S_{\max} \geq S_1(t_3)$, the viability analysis shows that if condition (27) is met, the viability of the fishery can be preserved, even if for a finite part of the season the exploiting costs exceed the commercial value of the catch. This economical viability can be achieved provided that the fishery regulates efficiently its storage volume and notably anticipates the critical period associated to t_2 . The set of control values which ensures this viability is identified through the regulation map (28).

In fact, this last property is in agreement with the empirical knowledge that one has of economic activities. It is indeed widely known that firms will not cease their activities as soon as their production costs are higher than their production's commercial value. Likewise, in fisheries, fishermen do not exit the fishery merely if for a part of the season the fishing cost exceeds the landings value. This empirical reality, which is sometimes termed the stickiness of the economic actors, is observed here theoretically through the viability analysis. Nevertheless, it seems to us important to notice that this behaviour was obtained without intentionally imposing any assumption with this aim.

On the other hand it may happen that the viability kernel turns out to be empty and thereby the fishery not to be viable. This situation can occur even if the fishery had invested in large storage capacity such that $S_{\max} > S_1(t_3)$. This would then correspond to the case where (27) is not verified (a situation which may occur for large amplitudes of resource or market oscillations). In that case, the analysis shows that the non-viability condition does not depend on the maximum storage capacity $S_{\max}$ but mainly on the amplitudes of the resource and the market oscillations. This implies that the non-viability condition will persist, whatever the

maximum storage capacity $S_{\max}$ above $S_1(t_3)$. With the hypotheses adopted in this model, it is then not possible to recover the viability of the fishery - when (27) is not met - or to try to 'extend' this viability - when (27) is about to be violated - by increasing the maximum storage capacity $S_{\max}$. In such circumstances investments in storage capacities are worthless. This last result was not trivial initially and may even seem counterintuitive.

Going furthermore in the interpretation of these results would overcome our initial objective. Our aim was merely to address one problem which is usually neglected in fisheries studies, that of the importance of the storage volumes as a control in the fisheries' dynamics. This question was tackled through the French Guyana shrimp fishery example which presents the interest to be a very simple mono-species mono-market fishery. These characteristics allowed to easily identify both the resource and the market dynamics, and thereby to emphasise the respective periodicities and the dephasing that follows from these dynamics. This work was thus an analysis treated from the theoretical point of view but motivated and derived from a pure empirical problem.

Appendix

A.1 Identification of the upper boundary of the viability kernel

In cell $C(+ +)$, the upper boundary of $\text{Viab}(K)$ is defined by the function $S_1(t)$ with $S_1(\cdot)$ solution of the ordinary differential equation (ODE)

$$(A.1.1) \quad \begin{cases} \frac{dS_1(t)}{dt} = \dot{S}(t) = qeX(t) - \tau(t) \\ S_1(t^\#) = S^\# \end{cases}$$

where $\tau(t) = \tau_{\max}(t) = D(t)$ and $t^\#$ s.t. $S^\# = S_1(t^\#) = \underline{S}(t^\#)$.

The general solution of (A.1.1) turns out to be:

$$S_1(t) = (\bar{h} - \bar{D})t - \frac{a_h}{2\pi} \cos(2\pi(t + \alpha)) - \frac{a_D}{2\pi} \sin(2\pi(t + \alpha)) + s_1$$

with $s_1 = \text{constant}$. Since $\bar{D} = \bar{h}$, we end up with

$$(A.1.2) \quad S_1(t) = -\frac{a_h}{2\pi} \cos(2\pi(t + \alpha)) - \frac{a_D}{2\pi} \sin(2\pi(t + \alpha)) + s_1$$

The constant s_1 is such that $\{S_1(t) = \underline{S}(t), t \in [0, 1]\}$ has one unique solution $t^\#$ as defined above, i.e. $t^\#$ s.t. $S^\# = S_1(t^\#) = \underline{S}(t^\#)$. Thus

$$s_1 = \underline{S}(t^\#) + \frac{a_h}{2\pi} \cos(2\pi(t^\# + \alpha)) + \frac{a_D}{2\pi} \sin(2\pi(t^\# + \alpha)).$$

Note now from (A.1.2) that the function S_1 is a continuous 1-periodic function. Thus, $S_1(0) = S_1(1)$. Note also that for $\tau(t) = \tau_{\max}(t) = D(t)$, $\dot{S}_1(t) < 0$ in both cells $C(- +)$ and $C(? +)$. Let S_1^b be the upper boundary in cell $C(? +)$. Since we wish to identify the subset of K which ensures the viability for any initial conditions within each season but also from one season to the other, we must have $S_1^b(1) = S_1(0)$. Therefore the upper boundary of $\text{Viab}(K)$ in cell $C(? +)$ [and subsequently in cell $C(- +)$] is solution of the following ODE

$$(A.1.3) \quad \begin{cases} \frac{dS_1^b(t)}{dt} = \dot{S}(t) = qeX(t) - D(t) \\ S_1^b(1) = S_1(0) \end{cases}$$

Comparing (A.1.1) with (A.1.3) indicates that

$$\frac{dS_1^b(t)}{dt} = \frac{dS_1(t)}{dt}.$$

Thus the general solution of (A.1.3) is the same than the general solution of (A.1.1).

Furthermore, since $S_1^b(1) = S_1(0)$ and $S_1(0) = S_1(1)$, we have $S_1^b(t) = S_1(t) \forall t \in [0,1]$. The upper boundary of the $\text{Viab}(K)$ in cell $C(?+)$ [and subsequently in $C(-+)$] is thus defined by the same function than in $C(++)$. Consequently the upper boundary of $\text{Viab}(K)$ over the entire period $[0,1]$ is the 1-periodic function

$$S_1(t) = -\frac{a_h}{2\pi} \cos(2\pi(t+\alpha)) - \frac{a_D}{2\pi} \sin(2\pi(t+\alpha)) + s_1$$

$$\text{with } s_1 = \underline{S}(t^\#) + \frac{a_h}{2\pi} \cos(2\pi(t^\# + \alpha)) + \frac{a_D}{2\pi} \sin(2\pi(t^\# + \alpha)). \quad \square.$$

Remark: For $\tau(t) = \tau_{\max}(t)$, we have

$$\begin{cases} \frac{dS_1(t)}{dt} = \dot{S}(t) \geq 0 & \text{for } 0 \leq t \leq t_3 \\ \frac{dS_1(t)}{dt} = \dot{S}(t) \leq 0 & \text{for } t_3 \leq t \leq 1 \end{cases}$$

Since $S_1(0) = S_1(1)$ and S_1 is continuous of period 1, we have

$$(A.1.4) \quad \begin{cases} S_1(0) = S_1(1) = \min\{S_1(t), t \in [0,1]\} \\ S_1(t_3) = \max\{S_1(t), t \in [0,1]\} \end{cases} \quad (\text{cf. Fig.8}).$$

A.2. Identification of the lower boundary of $\text{Viab}(K)$

The lower boundary of $\text{Viab}(K)$ in cell $C(-+)$ is defined by $S_2(t)$, with $S_2(\cdot)$ solution of the ODE

$$(A.2.1) \quad \begin{cases} \frac{dS_2(t)}{dt} = \dot{S}(t) = qeX(t) - \tau(t) \\ S_2(t_2) = 0 \end{cases}$$

where $\tau(t) = \tau_{\min}(t) = \frac{C + c_s S(t)}{p}$. After integration and simplification, the solution of (A.2.1)

turns out to be

$$(A.2.2) \quad S_2(t) = -\frac{k}{k''} - \frac{s_1}{4\pi^2 + k''^2} (k'' \sin(2\pi(t + \alpha)) + 2\pi \cos(2\pi(t + \alpha))) + s_2 e^{k'' t}$$

with $k = \bar{h} - (C/p)$, $k'' = -(c_s/p)$, s_1 defined in (A.1.2) and s_2 constant s.t. $S_2(t_2) = 0$, i.e.

$$s_2 = e^{-k'' t_2} \left(\frac{k}{k''} + \frac{s_1}{4\pi^2 + k''^2} (k'' \sin(2\pi(t_2 + \alpha)) + 2\pi \cos(2\pi(t_2 + \alpha))) \right).$$

From (A.2.1) it follows that the lower boundary in $C(?)$ [and subsequently in $C(+)$] is

$$(A.2.3) \quad \begin{cases} \text{solution of the ODE} & \begin{cases} \frac{dS_2(t)}{dt} = \dot{S}(t) = qeX(t) - \frac{C + c_s S(t)}{p} \\ S_2(t_2) = 0 \end{cases} & \text{for } t_4 \leq t \leq t_2 \\ 0 & \text{for } \begin{cases} 0 \leq t < t_4 \\ t_2 < t \leq 1 \end{cases} \end{cases}$$

with $t_4 = \min\{t \in [0, 1] \text{ s.t. } S_2(t) = 0\}$ (cf. Fig.8). Thus the lower boundary of $\text{Viab}(K)$ over the whole period $[0, 1]$ is:

(A.2.4)

$$\begin{cases} S_2(t) = -\frac{k}{k''} - \frac{s_1}{4\pi^2 + k''^2} (k'' \sin(2\pi(t + \alpha)) + 2\pi \cos(2\pi(t + \alpha))) + s_2 e^{k'' t} & \text{for } t_4 \leq t \leq t_2 \\ S_2(t) = 0 & \text{for } \begin{cases} 0 \leq t < t_4 \\ t_2 < t \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad \square.$$

Remark: For $\tau(t) = \tau_{\min}(t)$, we have

$$\begin{cases} \dot{S}_2(t) \geq 0 & \text{for } t_4 \leq t \leq t^* \\ \dot{S}_2(t) \leq 0 & \text{for } t^* \leq t \leq t_2 \end{cases},$$

with $t^* = \min\{t \in [0, 1] \text{ s.t. } S_2(t) = \underline{S}(t)\}$. The function S_2 being continuous, this implies :

$$(A.2.5) \quad S_2(t^*) = \max \{S_2(t), t_4 \leq t \leq t_2\} \quad (\text{cf. Fig.8}).$$

Appendix A.3.

From remark (A.1.4) a first condition for the non vacuity of $\text{Viab}(K)$ is :

$$(A.3.1) \quad S_1(0) = S_1(1) \geq 0.$$

We can then rewrite (A.3.1) as

$$\begin{aligned} S_1(0) &= S_1(t^\#) + \int_0^{t^\#} (D(t) - X(t))dt \\ &= \underline{S}(t^\#) + \frac{a_D}{2\pi} [\sin(2\pi(t^\# + \alpha)) - \sin(2\pi\alpha)] + \frac{a_h}{2\pi} [\cos(2\pi(t^\# + \alpha)) - \cos(2\pi\alpha)]. \end{aligned}$$

We have by hypothesis

$$\begin{cases} \tan(2\pi\alpha) = \frac{a_D}{a_h} \\ \tan(2\pi(t^\# + \alpha)) = \frac{a_D}{a_h + pa_D/c_S} \end{cases}$$

thus

$$\begin{cases} \sin(2\pi\alpha) = \frac{a_D}{a_h} \cos(2\pi\alpha) \\ \sin(2\pi(t^\# + \alpha)) = \frac{a_D}{a_h + pa_D/c_S} \cos(2\pi(t^\# + \alpha)) \end{cases}$$

Hence $S_1(0) = \underline{S}(t^\#) + \cos(2\pi(t^\# + \alpha)) \left(\frac{a_D}{2\pi} + \frac{a_D^2}{2\pi(a_h + pa_D/c_S)} \right) - \cos(2\pi\alpha) \left(\frac{a_h}{2\pi} + \frac{a_D^2}{2\pi a_h} \right)$

Moreover

$$\underline{S}(t^\#) = \frac{pD(t^\#) - C}{c_S} \geq \frac{p(\bar{D} - a_D) - C}{c_S}$$

We have then

$$S_1(0) \geq \frac{p(\bar{D} - a_D) - C}{c_S} - \left(\frac{a_D}{2\pi} + \frac{a_D^2}{2\pi(a_h + pa_D/c_S)} \right) - \left(\frac{a_h}{2\pi} + \frac{a_D^2}{2\pi a_h} \right)$$

Therefore if

$$\frac{p\bar{D} - C}{c_S} \geq \frac{a_h}{\pi} + \frac{a_D^2}{2\pi(a_h + pa_D/c_S)} + \frac{pa_D}{c_S} + \frac{a_D^2}{2\pi a_h}$$

then $S_1(0) \geq 0$, which means that the condition (A.3.1) is met. $\square$

On the other hand, since $S_2(t^\#) = \max\{S_2(t), t \in [t_1, t_2]\}$ (cf. Remark (A.2.5)), and since S_2 is continuous, a second condition for the non vacuity of $\text{Viab}(K)$ is :

$$(A.3.2) \quad S_2(t) \leq S_1(t) \quad \forall 0 \leq t \leq t_2.$$

However under (A.3.1) the condition (A.3.2) is always satisfied $\forall 0 \leq t \leq t_2$.

Proof:

Consider

$$y(t) = S_1(s) - S_2(s) \quad \text{with } s = t_2 - t$$

Then we have

$$y(0) = S_1(t_2) - S_2(t_2) = S_1(t_2) \geq 0$$

since from (A.3.1) and (A.1.4) we have respectively $S_1(0) \geq 0$ and $S_1(0) = S_1(1) = \min\{S_1(t), t \in [0,1]\}$. We now have to prove that $\forall 0 \leq t \leq t_2, y(t) \geq 0$.

If we assume $y(t) = 0$, then $S_1(s) = S_2(s)$ and

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= -qeX(s) + D(s) + qeX(s) - \frac{C + c_s S_2(s)}{p} \\ &= -\frac{c_s}{p} \left(S_2(s) - \frac{pD(s) - C}{c_s} \right) = -\frac{c_s}{p} \left(S_1(s) - \frac{pD(s) - C}{c_s} \right). \end{aligned}$$

Since $S_1(s)$ is viable, from (12) we have $S_1(s) \leq \frac{pD(s) - C}{c_s}$.

Hence $\dot{y}(t) \geq 0 \quad \forall 0 \leq t \leq t_2$ and from the viability theorem (see [20])

$$y(t) \geq 0, \quad \forall 0 \leq t \leq t_2.$$

This implies that

$$S_2(s) \leq S_1(s) \quad \forall 0 \leq t \leq t_2$$

which means that (A.3.2) is met $\square$.

References

1. P.A. Larkin, An epitaph for the concept of Maximum Sustainable Yield. *Trans. Am. Fish. Soc.* **106**(1), 1-11 (1977).
2. C.W. Clark, "Mathematical Bioeconomics, the optimal management of renewable resources", Wiley-Interscience Publication, New-York (1976).
3. C.W. Clark, "Bioeconomic modelling and fisheries management", Wiley-Interscience Publication, New-York (1985).
4. J.M. Conrad and C.W. Clark, "Natural resource economics", Cambridge Univ. Press. (1987).
5. Y. Cohen, A review of harvest theory and applications of optimal control theory in fisheries management. *Can J. Fish. Aquat. Sci.* **44** (suppl. 2) 75-83 (1987).
6. P. Allen and J.M. McGlade, Dynamics of discovery and exploitation: the case of the scotian shelf fisheries. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **43**, 1187-1200 (1986).
7. P. Nisbey and W. Gurney, "Modelling fluctuating population", Wiley, New-York (1982).
8. R. Hilborn and M. Ledbetter, Analysis of the British Columbia salmon purse-seine fleet: dynamics of movement. *J. Res. Board Can.* **36**, 384-391 (1979).
9. J.E. Swierzbinski, "Bioeconomic models of the effects of uncertainty on the economic behavior, performance and management of marine fisheries", Ph. D. Thesis in applied mathematics, Harvard. Univ. (1981).
10. N.E. Bockstael and J. Opaluch, Discrete modelling of behavioural response under uncertainty: the case of the fishery. *J. Environ. Econ. Manag.* **10**, 125-137 (1983).
11. R.C. Bishop, D.W. Browley and S. Langdon, Implementing multi-objective management of commercial fisheries: a strategy for policy-relevant research, in "Economic analysis for fisheries management plans" (L.G. Anderson, Ed.), Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI (1981).
12. M.C. Healey, Multi-attribute analysis and the concept of optimal yield. *Can J. Fish. Aquat. Sci.* **41**, 1393-1406 (1984).
13. C.J. Walters, "Adaptive management of renewable resources", McMillan, New-York (1986).
14. A.T. Charles, Fisheries sciences: the study of fishery systems. *Aquat. Living Resour.* **8** 233-239 (1995).

15. R.L. Stephenson and D. Lane, Fisheries Management Science: a plea for conceptual change. *Can J. Fish. Aquat. Sci.* **52**, 2051-12056 (1995).
16. H.T. Bank, Computational difficulties in the identification and control of systems, in "Renewable resource management" (T. Vincent and J. Skowronski, Eds.), Lecture notes in Biomathematics, Springer-Verlag, Berlin **40**, 79-94 (1980).
17. A.T. Charles, Bio-socio-economic fishery models: labour dynamics and multi-objective management. *Can J. Fish. Aquat. Sci.* **46**, 1313-1322 (1989).
18. A. Diaz-de-Leon and J.C. Seijo, A multi-criteria non-linear optimisation model for the control and management of a tropical fishery. *Mar. Resour. Econ.* **7**, 23-40 (1992).
19. R. Hilborn and C. Walters, "Quantitative fisheries stock assessment; choice, dynamics and uncertainty", Chapman and Hall, New-York (1992).
20. J.-P. Aubin, "Viability theory", Birkhäuser, Berlin (1991).
21. J. Cartelier and C. Müllers, Viability in a Keynesian model. IIASA Working Paper 9495 (1993).
22. N. Bonneuil, Malthus, Boserup and viability population. *Math. Pop. Studies* **5**(1), 107-119 (1994).
23. N. Bonneuil, Capital accumulation, consumption inertia and norm of reproduction. *J. Pop. Econ.* **7**, 49-62 (1994).
24. N. Bonneuil and C. Müllers, Viable population in a prey-predator system (1994). To appear in *J. Math. Biol.*
25. L. Doyen, D. Gabay, and J.-C. Hourcade, Risque climatique, technologie et viabilité. in Actes des Journées du Programme Environnement, Vie, Société. Session B, Paris, Jan., 1996, 129-134.
26. P. Saint-Pierre, Le calcul des noyaux de viabilité; outil d'analyse des modèles dynamiques de systèmes contraints. in Actes des Journées du Programme Environnement, Vie, Société. Session B, Paris, Jan., 1996, 146-151.
27. W. Dall, B.J. Hill, P.C. Rothlisberg, and D.J. Staples. The biology of the Penaeidae, in "Advances in Marine Biology" **27** (J.H. Blaxter and A.J. Southward, Eds.), Acad. Press, (1990).
28. F. Lhomme, Le recrutement des postlarves de la crevette *Penaeus subtilis* dans deux estuaires de Guyane française. *Ann. Inst. océanogr.* **68**(1-2) 169-178. (1992).
29. C. Béné and P. Moguedet, Global combined to local changes: The case of the French Guyana Penaeid stocks(1996). To appear in "Global versus Local Changes in

- Upwellings Systems" (M.-H. Durand, R. Mendelssohn, P. Cury, C. Roy, and D. Pauly, Eds.), Édition ORSTOM, Paris.
30. C.W. Clark and G.P. Kirkwood, Bioeconomic model of the Gulf of Capentaria prawn fishery. *J. Fish. Res. Board Can.* **36**, 1304-1312 (1979).
 31. S. Garcia, The stock-recruitment relationship in shrimp: reality or artefact and misinterpretations? *Oceanogr. Trop.* **18**(1), 25-48 (1983).
 32. R. McKelvey, The fishery in a fluctuating environment: coexistence of specialist and generalist fishing vessels in a multipurpose fleet. *J. Envir. Econ. Manag.* **10**, 287-309 (1983).
 33. W. Makridakis, S.C. Wheelwright, and U.E. McGee, "Forecasting: methods and applications" 2nd edition, John Wiley, New-York (1983).
 34. C. Béné, Effects of market constraints, the remuneration system, and resource dynamics on the spatial distribution of fishing effort. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **53**, 563-571 (1996).
 35. Anon., "Audit de la filière crevette guyanaise. Rapport SEPIA International", Préfecture de Guyane, Cayenne (1991).
 36. H. Josupeit, Single market in the EEC, good or bad news for traders? Paper presented at a workshop on The Shrimp Industry, INFOFISH, Hong Kong, Sept., 1992. *in* Conference Proceedings, (H. de Saram and T. Singh, Eds.) 19-29.
 37. A. Deaton and G. Laroque, On the behaviour of commodity prices. *Rev. Econ. Stud.* **59**, 1-23 (1992).
 38. M. Cadren, C. Béné and F. Lantz, Investigating the dynamic relationships between wild shrimp and cultured shrimp prices. Paper presented at the VIIIth International IIFET Conference on Fisheries Economics, Marrakech, Jul., 1996. (to be published in the Conference Proceedings).
 39. P. Saint-Pierre, Approximation of viability kernel. *App. Math. Optim.* **29**, 187-209 (1993).

Captions of the figures

Fig.1. Fisheries are micro-entities located at the interface between two decoupled systems: the resource that they exploit and the market to which they supply their production.

Fig.2. (a) The resource abundance over the period 1981-93 estimated through the corresponding catch per unit of effort (CPUE) series (measured in kg day^{-1}) (source: IFREMER Cayenne). (b) Seasonal indexes of the series.

Fig.3. (a) The fishing effort $e(t)$ over the period 1982-93 (measured in number of operating days per active boat per month) (source: IFREMER Cayenne). (b) Seasonal indexes of the series (the Y-axis scale is similar to that of Fig.2.b)

Fig.4. Consumption of tropical shrimp in France (monthly data in tons) over the period 1989-93 (source: FIOM Paris).

Fig.5. Dynamics of the catch rate and the market demand as they have been formalised in the model, and the subsequent decoupling of 3/4 imposed on the fishery.

Fig.6. The constraint domain K of the system.

Fig.7. Qualitative characterisation of the domain K . The sign of $\dot{S}(t)$ is constant in cell $C(+ +)$ and $C(- +)$ whatever the control $\tau(t)$. In turn, $\dot{S}(t) \geq 0$ for $\tau(t) = \tau_{\min}(t)$ and $\dot{S}(t) \leq 0$ for $\tau(t) = \tau_{\max}(t)$ in cell $C(? +)$.

Fig.8. The viability kernel $\text{Viab}(K)$.

Fig.9. $\text{Viab}(K)$ for increasing resource amplitude (ceteris paribus) and $S_{\max} > \underline{S}(t) \forall 0 \leq t \leq 1$.
In case $\sigma_X = 1.0$ (bottom right) condition (27) is no longer satisfied : there is vacuity of $\text{Viab}(K)$ and the fishery is not viable any more.

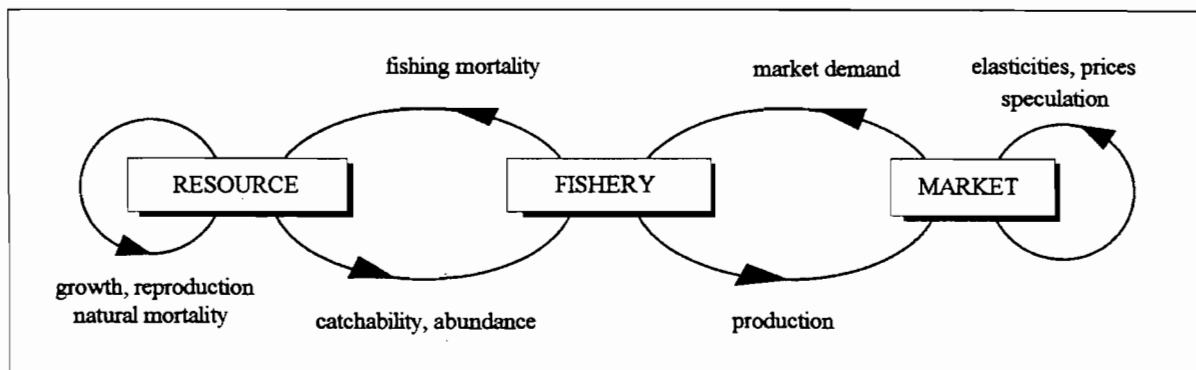


Fig.1.

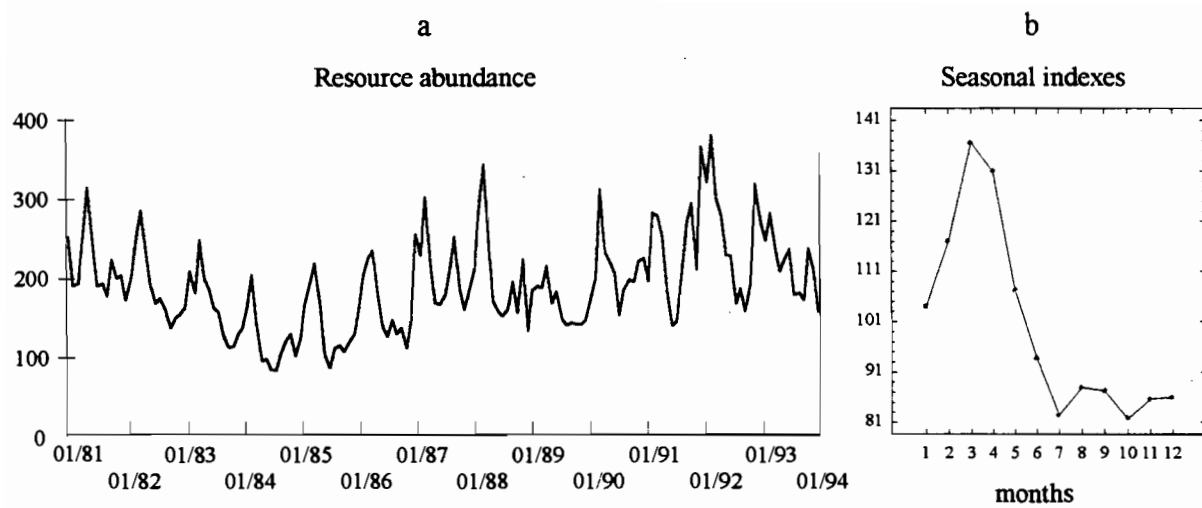


Fig.2.

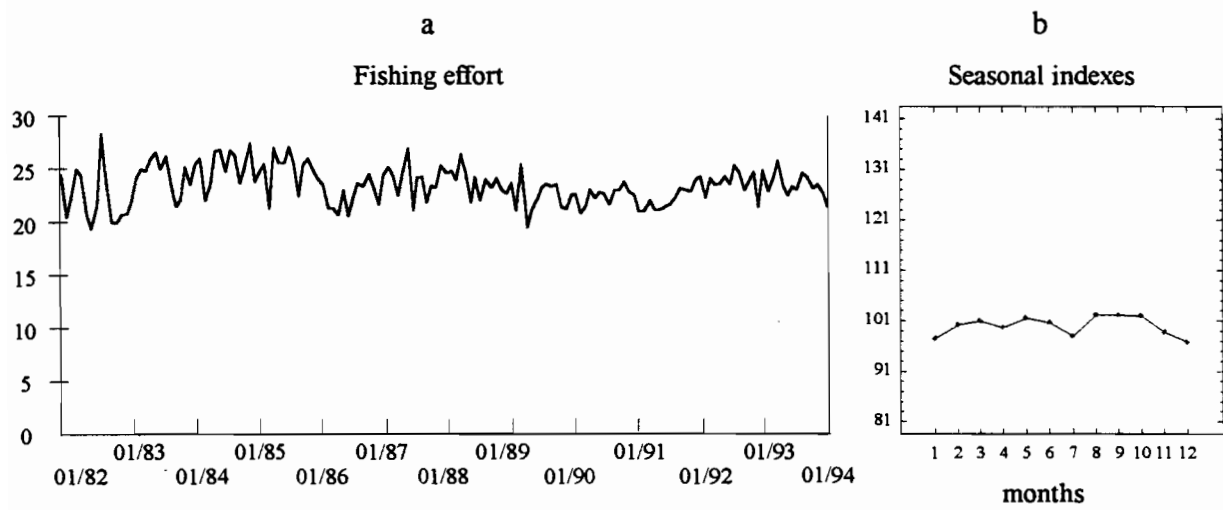


Fig.3.

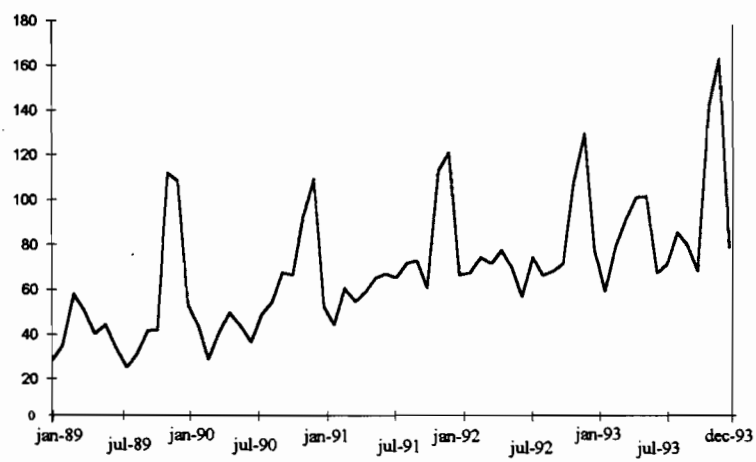


Fig.4.

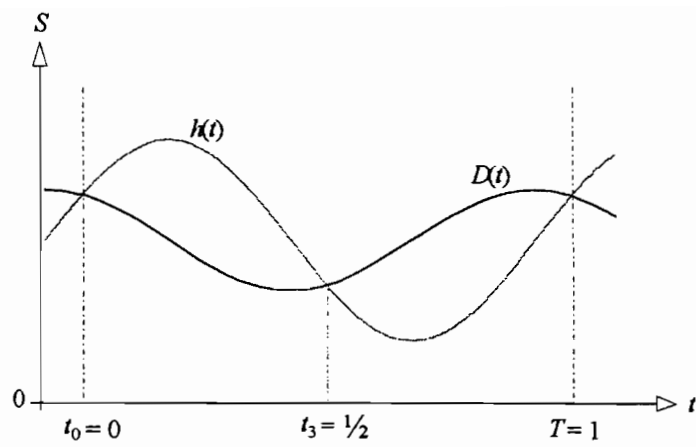


Fig.5.

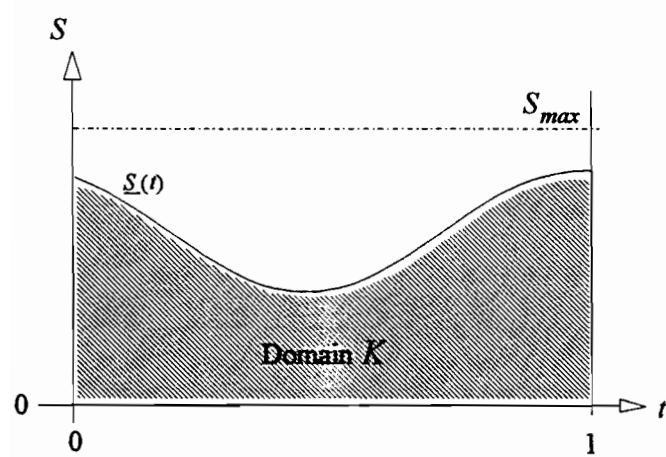


Fig.6.

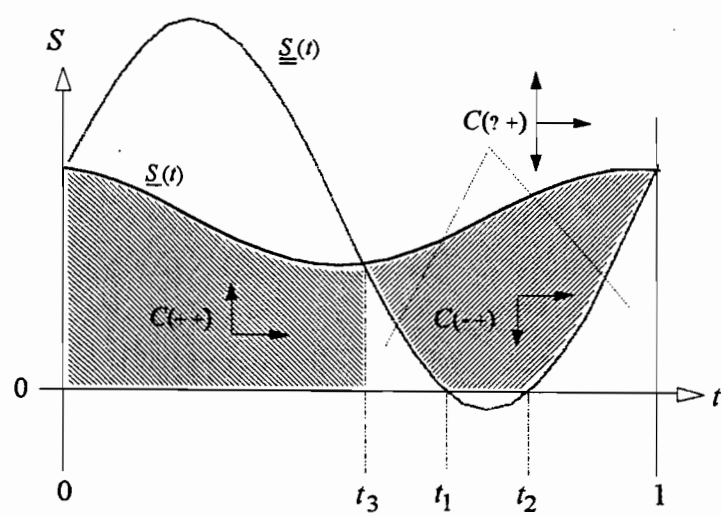


Fig.7.

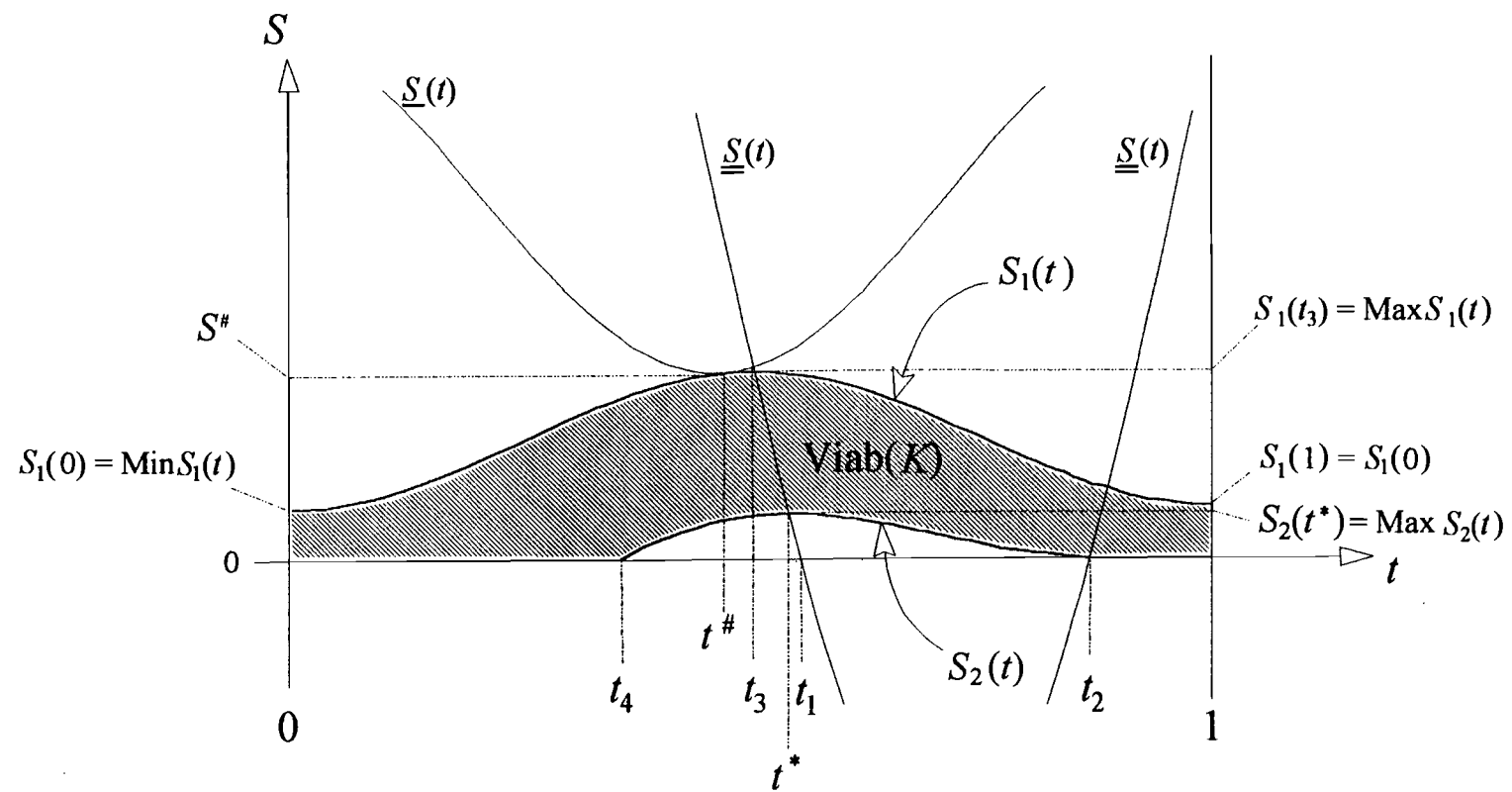


Fig.8.

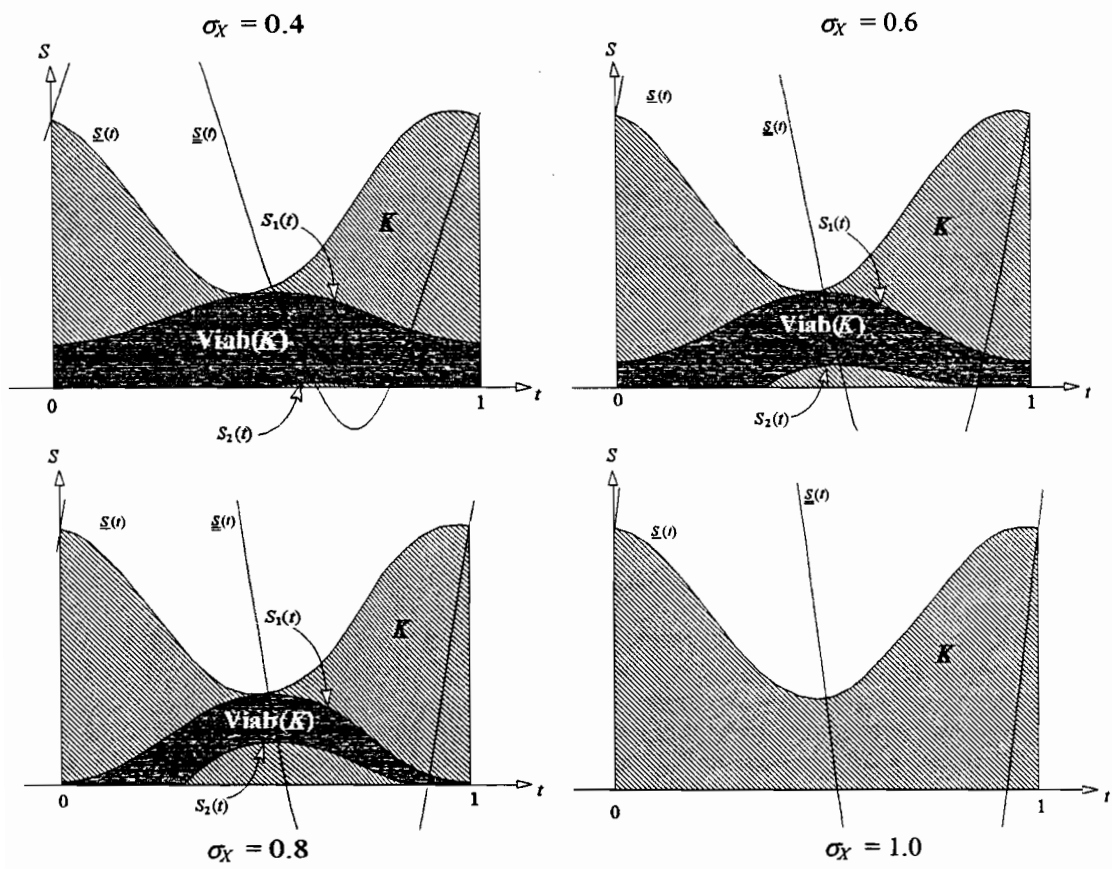


Fig.9

ANNEXE 5

*Béné C. and C. Lobry, Modelling the fishermen's decision making process:
Accounting for the discrete dynamics of the process may change the outcome.
(en révision au *Journal of Biological Systems*).*

**MODELLING THE FISHERMEN'S DECISION MAKING PROCESS:
ACCOUNTING FOR THE DISCRETE DYNAMICS OF THE PROCESS
MAY CHANGE THE OUTCOME**

Christophe Béné * ° and Claude Lobry **

*** IFREMER Station Zoologique Paris VI B.P.28 06230 Villefranche sur Mer France**

E-Mail: cbene@ifremer.fr

**** Centre International de Mathématique Pure et Appliquée A^{ve} Cavell 06000 Nice France**

E-Mail: clobry@robur.inria.fr

° corresponding author

Condensed title: Discrete-time vs instantaneous fishermen's decision making process

Abstract:

Because decision making processes involve costly mechanisms, they are barely implemented continuously and instead take place at discrete time intervals. The objective of this study is to analyse the impact of accounting for this discretisation when modelling the dynamics of systems including anthropic activities. For this purpose, we considered a fishery model representing the interaction between a shrimp stock and the exploiting fleet. The decision process relates to the allocation of the fishing effort between the young adults and the mature adults of the stock. We first analysed the behaviour of the system when the discretisation is not accounted. In that case the system turned out to be globally stable. We then analysed the behaviour of the system when the decision making process is discretised. The appropriate formalism to account for this discretisation is to use sample-and-hold control systems. In that case the solutions of the system turned out to be sustained periodic oscillations. The conclusion is therefore that the discretisation which characterises the decision making processes of most of the anthropic systems has to be taken into account, especially in studies the aim of which is precisely to investigate the dynamics of such systems.

Keywords:

Decision making process, fishery modelling, sample and hold control system, discontinuous differential system.

1. Introduction

In most of the theoretical discussions on single or multi-species populations without age-structure, the choice between discrete and continuous models, which is often portrayed as an either-or choice [1], is usually warranted by the nature of the biological processes involved in the life cycle or by the type of environment experienced by the population [2,3,4]. If the biological processes considered take place at specific periods of the season or of the life cycle, like for instance breeding or metamorphosis, or if the species has non-overlapping generations (i.e. synchronised), discrete models are required [5,6,7,8]. In turn, if the species is characterised by a life cycle with overlapping generations or if all the processes which affect the individual's dynamics are thought to occur continuously in time, continuous models are chosen [9,10,11]. Wang and Guttierrez [12] point however out that continuous models may also appear appropriate when one is interested in within-season dynamics for species with synchronised generations.

When the system includes impacts of human activities on wild populations, like for instance fishing activities, the rule still holds. For these renewable resource exploitation systems, except if fishing closures or other management techniques such as annual catch quotas exist, the fishing mortality imposed by the fleet's activity on the exploited stock has a continuous impact. Consequently, continuous models are the models which are usually adopted when one investigates the issue of anthropic predation on fish stocks [13,14,15]. Unfortunately, if considered from the dynamic decision analysis framework, this choice is clearly questionable. According to this approach the classical way to represent decision making processes is through what one terms the 'decision trees' [16,17]. In these decision trees the decision processes are decomposed in two distinguished steps: First the information gathering, which is necessary to make the choice, is done through an "assessment" (i.e. a sampling) which may be costless but usually involves costly procedures. Then takes place the "control action" per se, implemented such as to meet a criteria or an objective defined in advance. Like the information gathering, the control action is usually considered as being costly (in time or money terms). Accordingly these two steps are not continuously implemented but rather take place at discrete periods in time (hence the representation through a tree). In this dynamics, the control which follows one sampling procedure is thus held constant until the next sampling. In mathematical terms, the appropriate formalism to represent this particular dynamic procedure is to use Sample-and-Hold Control (SHC) models. In these SHC models, which were initially developed in Control

Theory, the processes which generate continuous impacts are introduced through differential equations but the control is included through a discrete mechanism such that the control value is held constant for a given time interval and re-estimated (i.e. sampled) only periodically.

In fishery modelling this approach should also be adopted. Indeed, even if the biological processes (growth, natural mortality, migration, etc.) and the anthropic activities (fishing) are considered as to generate continuous impact on the stock, the decision making processes which lead to this anthropic impact are discrete in time. Nevertheless, a very large number of theoretical studies, the objective of which was precisely to analyse the dynamics of resource-human activities inter-relationship, used continuous systems [13,14,18,19]. It is not clear whether the analyses would not end up to somewhat different conclusions if the sampling procedure which characterises almost every decision process involved in these activities was accounted. The objective of this study is to analyse the effect of this "sampling" on the dynamics of anthropic systems.

2. Modelling the resource-fleet interaction

2.1. The conceptual scheme and the model hypotheses

The investigation will be conducted through a very simple fishery model. In fisheries, one main decision making process concerns the choice of the targeted species. In the present case, this choice will not relate to different species but merely to distinct stages of the same species. We shall further consider the simplest case with only two stages: (1) the young adults (x) assumed to live and grow in shallow-water zones near the coast and (2) the mature adults (y) found offshore in deeper-water zones. This situation may very well represent the case of numerous Penaeids shrimp fisheries, where young adults just arrived from the nursery live close to the coast while mature adults migrate to deeper waters when growing [20]. By choosing their fishing areas inshore or offshore, fishermen orient their fishing effort either towards the young abundant adults (x) or towards the larger but less abundant mature adults (y). The conceptual scheme of this resource-fleet interaction is represented on **Fig.1** with the corresponding biological and anthropic processes that are included in the system.

In order to build up a mathematical model, we must adopt some simplifying hypotheses. In the present case, we have three important assumptions.

(i) The recruitment migration (R) is considered as an exogenous variable. This formulation is equivalent to assume the non-existence of an effective stock-recruitment relationship. This means that the recruits' abundance (the new individuals arriving in the young adults' fraction) does not depend on the abundance of the mature adults from which they were issued. Provided that the escapement (i.e. the part of the mature adults that survive the fishing activity and reproduce) never falls to extremely low levels, this assumption is not unrealistic for this specific type of species [21]. It has already been adopted in several shrimp fisheries models [22,23].

(ii) The switch of the fleet's activity from one fishing area to the other is assumed to be instantaneous. This assumption is certainly the strongest one for this model. The reason of this assumption is that taking into account a travel delay would imply to introduce a time delay in the model. The introduction of such a delay would have made the system behaviour more difficult to analyse with respect to our objective. Indeed, the effect of this delay would likely combine to (or even mask) the sampling effect and makes thereafter arduous to distinguish between the two phenomena.

(iii) Although several studies have suggested that the fishermen's decision processes are complex and rely on multiple criteria [24,25], the decision process which governs the fleet's effort allocation in this study is based on the simple profit-maximising law. This effort allocation is furthermore assumed to be exclusive, that is to say, the fleet allocates the totality of its effort in the area which ensures the highest profit and nothing in the other one.

2.2. Formalisation of the decision making process

If we note E the total fishing effort (assumed constant) and ϕ and φ the efforts allocated respectively to the inshore and offshore areas, assumption (iii) means that the effort allocation is defined by the following bang-bang decision process:

$$\begin{cases} \phi = \begin{cases} E & \text{if } \delta \leq \frac{x(t)}{y(t)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ \varphi = E - \phi \end{cases} \quad \text{with} \quad \delta = \frac{w_y}{w_x} \cdot \frac{p_y}{p_x} \quad (1)$$

where w_x and w_y are the individuals' average weights (with $w_x < w_y$) and p_x and p_y are the respective unity prices (with $p_x < p_y$). It seems reasonable to assumed that the weight ratio (w_y / w_x) does not evolve significantly over time. Therefore δ will essentially reflect the price ratio variations. Since the system's behaviour will turn out to be independent of the recruitment

R level, it will then only depend on four parameters amongst which two are of ‘biological nature’: the offshore migration rate m and the natural mortality rate μ , and two others are of ‘economics nature’: the total fishing effort E and the price ratio δ . We propose to analyse the behaviour of the system from the "economic variability point of view", that is to say, fixing m and μ , and letting E and δ varying.

We now focus on the core of the analysis, that is to say the discretisation of the decision making process. For this purpose, we consider the two following distinct procedures:

(i) The instantaneous decision procedure: this corresponds to the case where the discretisation of the decision making process is not accounted. The fishermen adapt their effort allocation instantaneously with respect to the changes in the exploited fractions of the stock. The mathematical formulation of this is procedure is:

$$\begin{cases} \phi(x, y) = \begin{cases} E & \text{if } \delta \leq \frac{x(t)}{y(t)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ \varphi(x, y) = E - \phi(x, y) \end{cases} \quad (2)$$

The combination of (2) with the resource-fleet interaction portrayed in Fig.1 will generate what we will call an Instantaneous Control (IC) system.

(ii) The sampling procedure: the fishermen compare the resource ratio $x(t) / y(t)$ to δ only at fixed time interval $n\tau$. The effort allocation issued from this sampling is then maintained unchanged during the time interval τ . The formalisation of this procedure is:

$$n\tau \leq t < (n+1)\tau \Rightarrow \begin{cases} \phi = \begin{cases} E & \text{if } \delta \leq \frac{x(n\tau)}{y(n\tau)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ \varphi = E - \phi \end{cases} \quad n \in \mathbb{N} \quad (3)$$

When (3) is combined to the resource-fleet interaction portrayed in Fig.1 it will generate a SHC system.

3. The instantaneous-control model

The objective of this part is to show that the instantaneous control (IC) system is globally asymptotically stable, whatever the values of the parameters δ and E .

3.1. Formalisation of the IC system

In absence of fishing activity, the model is a classical Leslie-type model, with constant parameters:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -mx(t) + R \\ \dot{y}(t) = mx(t) - \mu y(t) \end{cases}$$

When adding the fishing mortality resulting from (2) we get the following IC system:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -(m + \phi(x, y))x(t) + R \\ \dot{y}(t) = mx(t) - (\mu + \phi(x, y))y(t) \\ X(0) = X_0 \end{cases} \quad \text{with} \quad \begin{cases} \phi(x, y) = \begin{cases} E & \text{if } \delta \leq \frac{x(t)}{y(t)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ \phi(x, y) = E - \phi(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

or in matrix form:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = B(X)X(t) + v \\ X(0) = X_0 \end{cases} \quad v = \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{with} \quad B(X) = B_1 = \begin{bmatrix} -(m+E) & 0 \\ m & -\mu \end{bmatrix} \quad \text{if } \delta \leq \frac{x(t)}{y(t)} \quad (4.1)$$

$$B(X) = B_2 = \begin{bmatrix} -m & 0 \\ m & -(\mu+E) \end{bmatrix} \quad \text{otherwise} \quad (4.2)$$

This IC system is an non-homogeneous density-dependent system where the diagonal coefficients of the transformation matrix $B(X)$ are discontinuous functions of $X(t)$. It is known that the integration of differential equations with discontinuous right hand sides is not a matter of routine. Even the definition of what a solution is may raise difficulties for this type of integration. The most widely accepted concept of solutions for discontinuous functions is the « Filippov solutions » [26] (see Appendix 1). Usually the general definition of a Filippov solution turns out to be rather technical. However, for elementary discontinuities such as those involved in the present model, this definition becomes much more simple. We shall adopt the Filippov concept to analyse system (4).

3.2. Preliminary analyses

In fact, the IC system (4) can be regarded as a 'density-dependent switching' between two subsystems T_1 and T_2 defined by

$$T_i: \quad \dot{X}(t) = B_i X(t) + v \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

where B_i is the matrix defined in (4.1) and (4.2). Since m , E , and μ are real positive, the eigenvalues of the matrix B_i are all real negative. Therefore, the subsystem T_i converges monotonically to one stable equilibrium $Xe_i = -B_i^{-1}v$, $i = 1, 2$. In the present case, the two equilibria are:

$$Xe_1 = (x_1; y_1) \text{ where } x_1 = \frac{R}{m+E} \quad y_1 = \frac{Rm}{\mu(m+E)} \quad (6.1)$$

$$Xe_2 = (x_2; y_2) \text{ where } x_2 = \frac{R}{m} \quad y_2 = \frac{R}{\mu+E} \quad (6.2)$$

Note that these equilibria are located in the phase-space such that $y_1/x_1 > y_2/x_2$.

It is worth recalling at that stage that there may exist discontinuous vector fields built on two stable linear systems which turn out not to be stable [27]. It is therefore necessary to prove that the system (4) is globally stable even if the two subsystems T_1 and T_2 are globally asymptotically stable when considered separately.

Let us thus characterise the behaviour of the IC system.

Lemma (1):

For any set of parameters (E, δ) [m and μ being fixed], the IC system is bounded.

Proof of Lemma (1) see Appendix (2).

Consider now the straight line Δ defined by $y = x/\delta$. According to (1), Δ divides the phase space in two regions R_1 and R_2 . These regions are associated to the two submodels T_1 and T_2 according to the following rules:

In R_2 (i.e. above Δ) the fishing effort is exclusively allocated offshore on the mature shrimp (y) and the behaviour of the system is then described by the family of trajectories $X_{T_2}(\cdot)$ associated to T_2 . (7.1)

In R_1 (i.e. below Δ), (and also on Δ because of the inequality sign in (1)), the fishing effort is exclusively allocated inshore on the young shrimp (x) and the behaviour of the system is then given by the family of trajectories $X_{T_1}(\cdot)$ associated to T_1 . (7.2)

The two equilibria Xe_1 and Xe_2 can be located with respect to Δ according to three generic cases (recall that they satisfy $y_1/x_1 > y_2/x_2$) (we do not consider here the particular cases where the equalities occur).

- (a): if $\delta m > (\mu + E)$, X_{e1} and X_{e2} are both located in region R_2 .
- (b): if $\mu < \delta m < (\mu + E)$, X_{e1} is located in R_2 and X_{e2} in R_1 .
- (c): if $\delta m < \mu$, X_{e1} and X_{e2} are both located in region R_1 .

These cases are represented on **Fig.2**.

Lemma (2)

Each subsystem T_i has only one trajectory $T_{xi}(\cdot)$ which is tangent to Δ at one unique point denoted Π_i $i = 1, 2$.

Proof of Lemma (2): (this ensues from a trivial computation which is done because the coordinates of the tangent point Π_i is needed in the rest of the analysis). First consider a vector $\nabla (-b, a)$ (cf. Fig.3 below) such that ∇ is perpendicular to Δ and pointed from R_1 to R_2 (symbolised $R_1 \rightarrow R_2$). The straight line Δ can therefore be reparametrised as follows:

$$\begin{cases} x = a\rho \\ y = b\rho \end{cases} \quad (9)$$

where $a > 0$, $b > 0$, and $\rho \in \mathbb{R}$. The scalar product of the vector ∇ with the trajectories $X_{Ti}(\cdot)$ is defined by $\langle \nabla, X_{Ti}(\cdot) \rangle = -b\dot{x} + a\dot{y}$ $i = 1, 2$. This product yields the scalar

$$\pi_i = \rho H_i - bR \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

$$\text{where } H_i = H_1 = ab(m+E-\mu) + a^2m \quad \text{for } X_{Ti}(\cdot) = X_{T1}(\cdot) \quad (11.1)$$

$$H_i = H_2 = ab(m-E-\mu) + a^2m \quad \text{for } X_{Ti}(\cdot) = X_{T2}(\cdot). \quad (11.2)$$

The points on Δ at which $\pi_i = 0$ correspond to the points where the trajectories $X_{Ti}(\cdot)$ are tangent to Δ . Since (10) is linear with respect to ρ , there is only one solution to $\pi_i = 0$. Therefore there exists only one point Π_i where the trajectory $X_{Ti}(\cdot)$ is tangent to Δ . This point is defined by the single solution of $\pi_i = 0$, this is to say

$$\pi_i = 0 \Rightarrow \rho(\Pi_i) = \frac{bR}{H_i} \quad i = 1, 2. \quad \square \quad (12)$$

Lemma (3):

Any trajectory $X_{Ti}(\cdot)$ associated to the subsystem T_i $i = 1$ or 2 , that crosses the straight line Δ does it at most twice.

Proof: Solutions of linear systems with no complex eigenvalues cross straight lines at most twice. $\square$

The parameter values determine three cases for the sign of H_i . From (11.1) and (11.2) these three cases (i), (ii), (iii) are:

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} \quad & \mu > m\delta + m + E & \Rightarrow H_1 < 0 \text{ and hence } H_2 < 0 \text{ (since } H_1 > H_2) \\
 \text{(ii)} \quad & m\delta + m - E < \mu < m\delta + m + E & \Rightarrow H_1 > 0 \text{ and } H_2 < 0. \\
 \text{(iii)} \quad & \mu < m\delta + m - E & \Rightarrow \text{both } H_2 > 0 \text{ and } H_1 > 0.
 \end{aligned} \tag{13}$$

From (12) the scalar π_i is positive above (on the right of) Π_i and negative below (on the left of) Π_i . The sign of π_i characterises locally the orientation of the trajectory $X_{T_i}(\cdot)$ when crossing Δ (recall that ∇ is $R_1 \rightarrow R_2$). On the points along Δ where $\pi_i > 0$, $X_{T_i}(\cdot)$ passes through Δ from R_1 to R_2 . Conversely, where $\pi_i < 0$, $X_{T_i}(\cdot)$ passes through Δ from R_2 to R_1 . The trajectories are thus $R_2 \rightarrow R_1$ on the left of Π_i along Δ , and $R_1 \rightarrow R_2$ on the right of Π_i along Δ .

The three locations of Π_i associated to cases (i), (ii), (iii) are portrayed on **Fig.3**. Note that for case (iii) Π_1 is closer to the origin (0,0) along Δ than Π_2 (since $H_1 > H_2$). For the three cases the behaviour of the trajectories after having reached the three segments depends on the relative positions of the two equilibria X_{e_1} and X_{e_2} with respect to Δ .

3.3. Behaviour of the IC system

Case (i): Since $H_1 < 0$, from (13.i) this implies $\mu > m + E + \delta m$. Since $E > 0$ and $m > 0$, then $m + E + \delta m > \delta m$ and therefore $\mu > \delta m$. From (8.c) this means that both X_{e_1} and X_{e_2} are in R_1 . Since in case (i) any trajectories $X_{T_i}(\cdot)$ is $R_2 \rightarrow R_1 \forall i$, the solutions all converge toward X_{e_1} whatever the initial conditions. The system is thus globally asymptotically stable.

For the two other cases (ii) and (iii) we need to consider the function $\psi : IR \rightarrow IR$ defined by:

$$\Psi(x) = \frac{mx^2}{x(\mu + m + E) - R} \quad \text{for } x \neq R/(\mu + m + E) \tag{14}$$

This function corresponds to the points of the phase-space for which the trajectories associated to T_1 and T_2 are collinear, that is, the points which satisfy $\dot{x}_{T_1} / \dot{y}_{T_1} = \dot{x}_{T_2} / \dot{y}_{T_2}$. The graph of the function ψ is represented on **Fig.4**.

The behaviour of the trajectories in case (ii) turns out to be similar to that of one subcase of case (iii) (the subcases (iii-b)). Consequently, we will describe case (ii) through case (iii-b). In

that case the crossing point E between Δ and the graph of ψ turns out to be a stable equilibrium point.

In case (iii) the generic inequality (13.iii) : $\mu < m\delta + m - E$ does not permit to exclude *a priori* any of the cases (8.a-b-c) of Fig.2. Therefore the three cases have to be treated alternatively.

Recall that the three cases correspond to the following locations of the equilibrium points:

- (a): $\delta m > (\mu + E)$, Xe_1 and Xe_2 both in R_2 .
- (b): $\mu < \delta m < (\mu + E)$, Xe_1 in R_2 and Xe_2 in R_1 . (8)
- (c): $\delta m < \mu$, Xe_1 and Xe_2 both in R_1 .

It is then very convenient for the analysis to notice the following

Lemma (4) (cf. Fig.5)

In case (iii), the two points Π_1 and Π_2 are located in the first orthant such that if:

- (a) $\delta m > \mu + E$, $\Rightarrow$ both points Π_1 and Π_2 are below the graph of ψ .
- (b) $\mu < \delta m < \mu + E$, $\Rightarrow \Pi_1$ is below the graph of ψ and Π_2 above.
- (c) $\delta m < \mu$, $\Rightarrow$ both Π_1 and Π_2 are above the graph of ψ .

Proof of the Lemma (4): cf. Appendix (3).

In fact, Lemma (4) points out that the constraints defined by the different locations of Xe_i with respect to Δ are equivalent to those imposed by the locations of Π_i with respect to the graph of ψ . The three combinations of locations for the points (Xe_i, Π_i) are portrayed on Fig.6. The behaviour of the system will change according to the case considered.

Case (a): (cf. Fig.6.a) On the left of Π_1 , the trajectories $X_{T_i}(\cdot)$ are $R_2 \rightarrow R_1 \forall i$. When in R_1 , they must cross again Δ (since Xe_1 is in R_2) either between Π_1 and Π_2 or on the right of Π_2 . In the first case, the trajectories then stay on Δ and move up to Π_2 (cf. Appendix 1; this case is similar to case 4 (Fig.A.7) of Appendix 1, with $g(x,0,2)$ vanishing instead of $g(x,0,1)$). The trajectories coming from R_2 and reaching Δ between Π_1 and Π_2 behave similarly. When at Π_2 the trajectories separate again from Δ , rejoin the family of trajectories $X_{T_i}(\cdot)$ associated to R_2 and then converges towards Xe_2 . We further know that they converge directly to Xe_2 since if they were doing otherwise, they would have to cross Δ more than twice to converge to Xe_2 . This is not allowed by Lemma (3). This remark is also true for any trajectory reaching Δ above

E. Therefore, in case (a) all trajectories of the IC system converge to Xe_2 , whatever the initial conditions.

We do not detail case (c) since it is symmetrical to case (a). This scenario is illustrated in Fig.6.c. In that case all trajectories converge to Xe_1 whatever the initial conditions.

Case (b) differs from the two previous cases, in that the graph of ψ now crosses Δ between Π_1 and Π_2 (cf. Fig.6.b). Therefore, below this graph of ψ , the trajectories that reach Δ above Π_1 stay on Δ and move toward E. When reaching E they stop since at that point the trajectory T_{X1} is aligned with the trajectory T_{X2} (cf. Fig.A.6 and comments in Appendix 1). Likewise, on the left of Π_2 and above the graph of ψ the trajectories stay on Δ and move down to E where they stop. Note that from Lemma (4) we know that case (b) corresponds to the situation where Δ crosses ψ between Π_1 and Π_2 . Therefore the crossing point E always exists in case (b). It is thus a stable equilibrium towards which all trajectories of the IC system converge whatever their initial conditions.

These different scenarii based on the analytical approach have been tested by numerical simulations. **Fig.7** displays the simulations obtained for cases (a), (b), and (c). Compare with Fig.6.

To sum up, the behaviour of the IC system is determined by the parameters values according to the following cases :

- (i) if $\mu > \delta m + m + E$, the trajectories converge towards the stable equilibrium Xe_1 located in R_2 whatever the initial conditions,
- (ii) if $\delta m + m - E < \mu < \delta m + m + E$, the trajectories converge towards E the crossing point of the graph of ψ and Δ whatever the initial conditions,
- (iii) if $\mu < \delta m + m - E$ whatever the initial conditions the trajectories converge toward

Xe_2 in R_2 if $\delta m > \mu + E$ (case a)

$Xe_2 = \Pi_2$ if $\delta m = \mu + E$

E if $\mu < \delta m < \mu + E$ (case b)

$Xe_1 = \Pi_1$ if $\delta m = \mu$

Xe_1 in R_1 if $\delta m < \mu$ (case c)

The IC system is therefore globally asymptotically stable.

4. The Sample-and-Hold Control Model

Recall that accounting for the sampling procedure implies that the decision process (2) is replaced by:

$$n\tau \leq t < (n+1)\tau \Rightarrow \begin{cases} \phi = \begin{cases} E & \text{if } \delta \leq \frac{x(n\tau)}{y(n\tau)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ \varphi = E - \phi \end{cases} \quad n \in \mathbb{N} \quad (3)$$

where τ is the time interval between two successive effort allocation choices. Since the discontinuous functions of the system are linear, the solutions of the Sample-and-Hold Control (SHC) system are obtained by integrating the initial system over the time period $[n\tau, (n+1)\tau]$. This can be done analytically. After matrix algebra and simplification the solutions are given by the discrete system (15):

$$X_{(n+1)\tau} = A(X)X_{n\tau} + b(X) \quad n \in \mathbb{N} \quad (15)$$

with $A(X) = A_1$ and $b(X) = b_1$ if $\delta \leq \frac{x_{n\tau}}{y_{n\tau}}$ and $A(X) = A_2$ and $b(X) = b_2$ otherwise, where

$$A_1 = \begin{pmatrix} e^{-(m+E)\tau} & 0 \\ \frac{m(e^{-(m+E)\tau} - e^{-\mu\tau})}{-m-E+\mu} & e^{-\mu\tau} \end{pmatrix} \quad b_1 = \begin{pmatrix} \frac{-R}{m+E}(e^{-(m+E)\tau} - 1) \\ \frac{mR}{-(m+E)} \left(\frac{e^{-(m+E)\tau} - e^{-\mu\tau}}{-m-E+\mu} \right) + \frac{e^{-\mu\tau}}{\mu} - \frac{1}{\mu} \end{pmatrix}$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} e^{-m\tau} & 0 \\ \frac{m(e^{-m\tau} - e^{-(\mu+E)\tau})}{-m+E+\mu} & e^{-(\mu+E)\tau} \end{pmatrix} \quad b_2 = \begin{pmatrix} -\frac{R}{m}(e^{-m\tau} - 1) \\ -R \left(\frac{e^{-m\tau} - e^{-(\mu+E)\tau}}{-m+E+\mu} \right) + \frac{e^{-(\mu+E)\tau}}{\mu+E} - \frac{1}{\mu+E} \end{pmatrix}$$

4.1. Preliminary analyses

The SHC system (15) is a non-homogeneous system where the diagonal coefficients of the matrix $A(X)$ are density-dependent. Like the IC system (4), it can be regarded as the result of a 'density-dependent switching' between two linear subsystems, S_1 and S_2 . For the SHC system

however, the switching is not instantaneous. Here it does not occur as soon as the trajectories cross Δ as it was the case for the IC system. Adopting the simplifying notation $(n+1)\tau = n+1$, the two subsystems S_1 and S_2 can be rewritten:

$$S_i: \quad X_{n+1} = A_i X_n + b_i \quad (16)$$

with the matrix A_i and the vector b_i as defined above $i = 1, 2$. These two subsystems are classical discrete linear systems the matrixes of which are triangular.

Let us rewrite these matrixes $A_i = \begin{bmatrix} a_i & 0 \\ k_i & c_i \end{bmatrix}$ and term the eigenvalues $\lambda(A_j)_i$ $j = 1, 2$, $i = 1, 2$.

Since m , E , and μ are positive, the components of the matrix A_i satisfy:

$$0 < a_i < 1 \quad 0 < c_i < 1 \quad k_i > 0 \quad (17)$$

and thus the eigenvalues of A_i which are $\{a_i, c_i\}$ $i = 1, 2$, (because A_i is triangular) are such that

$$0 < \lambda(A_j)_i < 1 \quad \forall i, j \quad (18)$$

This implies that the subsystem S_i is globally stable. The solutions converge monotonically to one unique stable equilibrium X°_i defined by $X^\circ_i = (I - A_i)^{-1}b_i$. Notice that this equilibrium is the same than the stable equilibrium of the continuous subsystems T_i since $X(t) = X(n\tau) = X_n$. We thus have $X^\circ_1 = Xe_1$ and $X^\circ_2 = Xe_2$. Recall that Xe_1 and Xe_2 can be located with respect to Δ according to three cases (a) (b) and (c) (cf. Fig.2). Hence the conditions on the parameters (E, δ) characterising these cases define three regions in the parameter-space. These subregions are noted **(A)**, **(B)**, and **(C)** with reference to the three cases (a), (b), (c). They are represented on Fig.8.

4.2. Behaviour of the model in region **(B)**

In the analytical section 4.2.1. below a series of lemma gives an insight into the qualitative behaviour of the system in region **(B)**. The analysis suggests that the system is characterised by stable cycles but it does not provide the complete prove of this. Indeed, it is sometime difficult to get the extensive analytical prove of the occurrence of stable cycles and notably to obtain the whole conditions for intrinsic cycle stability, especially for discrete multi-parameters systems (see [2,28,29] for analyses of discrete one-parameter systems). We will therefore present in a second section numerical simulations which reinforce the conclusions proposed in the analytical section.

4.2.1. Analytical approach

Remark that when the system is in region (B) X_{e1} is in R_2 and X_{e2} is in R_1 . Hence the solutions of the system oscillate between these two regions, since, when in R_2 the solutions of the system converges towards X_{e2} and vice versa. This remark does not however indicate the type of oscillating behaviour which is to occur. The solutions of the system can indeed display aperiodic bounded "chaotic" fluctuations, periodic cycles with finite or infinite number of orbit-points (the case of infinite number of orbit-points being not distinguishable from aperiodic chaotic fluctuations), or the system may even turn to be unstable (in the sense unbounded) and leads to explosion of the population.

Let us first show that the alternative of exploding population is not possible by proving the following

Lemma (5):

For any set of parameters (E, δ) in region (B) [m and μ being fixed], the SHC system is bounded.

Proof of Lemma (5): cf. Appendix (4).

Let us now determine whether it is possible to observe periodic cycles. Recall that the sufficient condition for a cycle to be locally stable is that is the eigenvalues of its cyclic matrix all lie between zero and one.

Lemma (6)

Any cycle of the SHC system is locally stable.

Proof of Lemma (6):

Consider a T -period cycle $C(T)$ and X^*_i the T points of its periodic orbit. By hypothesis, these orbit-points X^*_i verify

$$\begin{cases} X^*_n = X^*_{n+T} \\ X^*_{n+T} = \prod_T X^*_n + b' \end{cases} \quad \forall n \text{ large, with } 1 \leq i \leq T \text{ and } T \geq 2,$$

where the cyclic matrix $\prod_T$ results from a series of T successive products of the two matrixes A_i , $i = 1, 2$. The ordering of this T -product is determined by the location of the point X^*_n along the periodic orbit with respect to Δ . The cyclic matrix is thus defined by $\prod_T = \prod_{i=1}^T A_i$. Notice that there are T cyclic matrixes $\prod_T$, depending on the orbit-point at which the system is at the period n , and that all these cyclic matrixes $\prod_T$ have the same eigenvalues. Since A_i is a 2-D

triangular matrix, any product of T matrixes $A_1 \cdot \dots \cdot A_T$ is a 2-D triangular matrix Π_T the two diagonal components of which are the products of the diagonal components of the T matrixes A_i . Recall that these diagonal components are all less than one (cf. (17)). Then the two eigenvalues of Π_T which are merely the diagonal components of Π_T (since Π_T is a 2-D triangular matrix), lie between zero and one. This is the condition of local stability for a cycle. Hence any T -period cycle $C(T)$ of the SHC system is locally stable. $\square$

For the trajectories of a system to be attracted toward a stable cycle within a given region of the parameters-space, it is further necessary that the system does not possess any stable equilibrium for that region. It can be shown that the SHC system in region **(B)** meets this condition through the following

Lemma (7):

*For any set of parameters (E, δ) in region **(B)** [m and μ being fixed], the SHC system does not converge towards any equilibrium point, whatever the initial conditions X_0 .*

Proof of Lemma (7): cf. appendix (5)

4.2.2. Numerical simulations

Numerical simulations have been performed. We observed that the solutions of the system in region **(B)** were characterised by sustain oscillations. Some of these oscillations are portrayed on **Fig.9**. Note that different types of cycles can have the same period T according to the location of their orbit-points with respect to Δ (see for instance the two 3-period cycles).

Numerical simulations based on a grid search procedure were also performed in the parameter-space for different initial conditions. These simulations confirm that cycles occur within the entire region **(B)** whatever the parameters (E, δ) . It is furthermore possible to divide **(B)** into several subregions (**Fig.10**) such that each of these subregions is characterised by one type of cycle. However, for some couples of parameters (δ, E) located on the boundaries between two subregions, either one or the other cycle characterising the two subregions can be observed. In this case, the final cycle towards which the trajectories converge will depend on the initial conditions. The fact that different cycles can occurs for the same couple of parameters but different initial conditions indicates that the cycles are not globally stable. A rigorous prove of this non-global stability would require difficult and tedious algebraic manipulation. An intuitive explanation reads as follows:

Consider the 3-period cycle where two of the orbit-points are in R_1 and one in R_2 , (cf. Fig.9 with $T=3$; $\delta=0.53$, $E=0.40$). Since the unique orbit-point which is located in R_2 (let us term it the R_2 -point) is followed on the cycle by a orbit-point which is located in R_1 , this R_2 -point must lie within the part of R_2 denoted R_2^1 that satisfies:

$$(c1) \quad \forall X_t \in R_2^1, X_{t+1} \in R_1 \text{ with } X_{t+1} = A_2 X_t$$

Likewise, the first R_1 -point (the orbit-point issued from the R_2 -point), must lie within the part of R_1 denoted R_1^1 that satisfies:

$$(c2) \quad \forall X_t \in R_1^1, X_{t+1} \in R_1 \text{ with } X_{t+1} = A_1 X_t$$

Finally, the second R_1 -point must lie within the part of R_1 noted R_1^2 defined by:

$$(c3) \quad \forall X_t \in R_1^2, X_{t+1} \in R_2 \text{ with } X_{t+1} = A_1 X_t$$

Now the reasoning goes as follows: Like the three cases (a), (b), (c) in the phase-space appear to be associated to three constraints on the parameter-space (those which delimited the regions **(A)**, **(B)** and **(C)**), here the constraints (c1), (c2), (c3) are associated to a set of constraints in the parameter-space. These constraints, that we can denote (c'1), (c'2), (c'3) define the subregion in the parameter-space where the cycle is observed: This is the existence of these constraints (c'1, c'2, c'3) that prevents the 3-period cycle to occur in the entire region **(B)** and the cycle will in fact occur only for the sets of parameters (δ, E) which satisfy the constraints (c'1, c'2, c'3). This corresponds to the grey subregion identified numerically on Fig.10.

The existence of these constraints (c'1, c'2, c'3) also explains why there may appear two different types of cycle on the boundaries of the subregions. On these boundaries the set of parameters satisfy simultaneously the conditions associated with two cycles. In that case, this is the initial conditions which will then determine towards which cycle the system will then be attracted. Note also that when the period is long (i.e. T large), the number of constraints (c') is to be large. Thus it becomes harder and harder for the parameters couples (δ, E) to meet all these constraints and the part of **(B)** which is solution of the constraints (c') is likely to shrink when T increases. This is what is numerically observed. The largest subregion corresponds to the 2-period cycle, whereas the subregions corresponding to larger periods (e.g. $T = 4, 5, 6$, etc.) are more tiny. Consequently, no cycle with period T greater than 8 were observed. Notice however that the fact that no chaotic behaviour was observed through the numerical simulations does not permit to exclude the existence of chaotic trajectories.

4.3. Behaviour of the model in regions (A) and (C).

Recall that in regions (A) and (C), the equilibrium points are both located in the same subregions: R_1 in case (c) and R_2 in case (a). Let us consider case (a). Since X_{e_2} is the equilibrium point toward which the trajectories converge when they are associated to S_2 , then, from Fig.2.a, one can expect to observe a region around X_{e_2} within which the system is stable and where the trajectories converges to X_{e_2} . One may also expect that this stability region expands when X_{e_2} is located further away from Δ . Indeed, as the trajectories converge monotonically to X_{e_2} , the set of initial conditions that will reach the equilibrium without crossing Δ is likely to enlarge when this equilibrium point is away from Δ . This will occur for instance when δ increases, E being fixed. The numerical simulations confirm this scenario: a stability region is observed around X_{e_2} and this stability region expands rapidly when δ increases. In fact, the system becomes very rapidly globally stable. Similar remarks hold for case (c) except that in that case the trajectories converge towards X_{e_1} .

5. Conclusion

Decision making processes are classically represented through what is called decision trees. These trees are made up of two distinct steps: the sampling procedure (or assessment) and the control action. Because gathering of information and implementing actions generally involve costly procedures, these two steps usually appear to be implemented at discrete time intervals and not continuously. This implies the whole decision process to be discretised in time. This discretisation has to be taken into account when one attempts to model anthropic activities. When formalised in mathematical terms the appropriate approach is to use Sample and Hold Control (SHC) models. In the present study, we analysed the impact of this decision making process discretisation on the dynamics of a theoretical very simple shrimp fishery model. In this system the fishermen were assumed to be revenue maximisers and the decision process concerned the inshore or offshore allocation of the fleet's effort towards the young or the mature shrimp fractions of the same stock.

We first analysed the behaviour of the Instantaneous Control (IC) system, that is to say, when the discretisation was not taken into account. In that case, the fleet was assumed to adapt its effort allocation instantaneously to the changes which occurred in the resource abundance. From the mathematical point of view the fact that the control value switched instantaneously

between two values means that the model was characterised by a discontinuous right hand side. In the present case we tackled this technical difficulty by adopting an approach derived from the general concept of solution for discontinuous right hand side systems developed by Filippov. The IC system appeared to be globally stable and to possess three possible equilibrium points depending on the parameters values. We then compared this behaviour with that of the SHC system. In that system the discretisation of the decision process was accounted. This implies that the fishing effort allocation was maintained constant over the time interval separating the successive sampling procedures. On the contrary to the IC system, the solutions of the SHC system turned out to be characterised by sustained oscillations for a whole range of parameters (the region **B**). These oscillations, which occurred while the environment was set constant, resulted from the discretisation of the decision making process. Taking into account the discretisation of decision processes and introducing it into a model may therefore modify subsequently the dynamics of this system. The conclusion is thus that accounting for the discretisation which is known to characterise the decision making processes of most of the anthropic activity-derived systems, like for instance the fisheries, is of particular interest, especially for the studies the aim of which is precisely to analyse the dynamics of such systems.

References

- [1] Clark C.W., *Bioeconomics modelling and fisheries management* (John Wiley & Sons, New-York, 1985) 291 pp.
- [2] May R., Biological populations obeying difference equations: stable points, stable cycles, and chaos. *J. Theor. Biol.* **49** (1975) pp. 511-524.
- [3] Loreau M., Coexistence of temporally segregated competitors in a cyclic environment. *Theor. Pop. Biol.* **36** (1989) pp. 181-201.
- [4] Seymour R.M., Optimal resource consumption, discrete dynamics, and interspecific competition. *Theor. Pop. Biol.* **45** (1994) pp. 132-166.
- [5] Nicholson A.J. and Bailey V.A., The balance of animal populations. In *Proc. Zool. Soc. London* (1935) pp. 551-598.
- [6] Hassel M.P. and Varley G.C., New inductive population model for insect parasites and its bearing on biological control. *Nature* **223** (1969) pp. 1133-1137.
- [7] May R., Biological with nonoverlapping generations: stable points, stable cycles, and chaos. *Science* **186** (1974) pp. 645-647.
- [8] Adler F.R., Coexistence of two types on a single resource in discrete time. *J. Math. Biol.* **28** (1990) pp. 695-713.
- [9] Amstrong R.A. and McGehee R., Competition exclusion. *Am. Nat.* **115** (1980) pp. 151-170.
- [10] Chesson P., MacArthur's consumer-resource model. *Theor. Pop. Biol.* **37** (1990) pp. 26-38.
- [11] Vandermeer J., Loose coupling of predator-prey cycles: entrainment, chaos, and intermittency in the classical MacArthur consumer-resource equations. *Am. Nat.* **141** (1992) pp. 687-716.
- [12] Wang Y.H. and A.P. Gutierrez, An assessment of the use of stability analyses in population ecology. *J. Anim. Ecol.* **49** (1980) pp. 435-452.
- [13] May R., Beddington J.R., Horwood J.W., and Shepherd J.A., Exploiting natural populations in an uncertain world. *Math. Biosci.* **2** (1978) pp. 219-252.
- [14] Ludwig D.A., Harvesting strategies for randomly fluctuating population. *J. Cons. Intern. Expl. Mer* **39** (1980) pp. 168-174.
- [15] Allen P. and J.M. McGlade, Dynamics of discovery and exploitation: the case of the scotian shelf fisheries. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **43** (1986) pp. 1187-1200.

- [16] Walters C.J., *Adaptive management of renewable resources* (McMillan, New-York, 1986) 374 p.
- [17] Conrad J.M. and Clark C.W., *Natural resource economics* (Cambridge Univ. Press. 1987).
- [18] Clark C.W., Clarke F.H., and Munro G.R., The optimal exploitation of renewable resource stock: problem of irreversible investment. *Econometrica* **47**(1) (1979) pp. 25-47.
- [19] Clark C.W. and Mangel M., Flocking and foraging strategy: information in an uncertain environment. *Amer. Nat.* **123** (1984) pp. 626-641.
- [20] Dall W., Hill B.J., Rothlisberg P.C., and Staples D.J., *The biology of the Penaeidae* (Acad. Press, 1990) 489 pp.
- [22] McKelvey R., The fishery in a fluctuating environment: coexistence of specialist and generalist fishing vessels in a multipurpose fleet. *J. Envir. Econ. Manag.* **10** (1983) pp. 287-309.
- [23] Clark C.W. and Kirkwood G.P., Bioeconomic model of the Gulf of Carpentaria prawn fishery. *J. Res. Board Can.* **36** (1979) pp. 1304-1312.
- [24] Hilborn R. and Ledbetter M., Analysis of the British Columbia salmon purse-seine fleet: dynamics of movement. *J. Res. Board Can.* **36** (1979) pp. 384-391.
- [25] Bockstael N.E. and Opaluch J., Discrete modelling of behavioural response under uncertainty: the case of the fishery. *J. Environ. Econ. Manag.* **10** (1983) pp. 125-137.
- [26] Filippov A., Differential equations with discontinuous right-hand sides. *Trans A.M.S.* **42**(2) (1964) pp. 199-231.
- [27] Lobry C., Sciandra A., and Nival P., Effets paradoxaux des fluctuations de l'environnement sur la croissance des populations et la compétition entre espèces. *C.R. Acad. Sci. Vie* **317** (1994) pp. 102-107.
- [28] Li T.Y. and Yorke J.A., Period three implies chaos. *Amer. Math. Monthly* **82** (1975) pp. 985-992.
- [29] May R. and Oster G.H., Bifurcation and dynamic complexity in simple ecological models. *Amer. Natur.* **110** (1976) pp. 573-599.

Appendix (1)

1. Discontinuous Differential Equations

In this appendix we address the problem of defining what is an accurate mathematical model for what we called an "instantaneous decision". In order to avoid unnecessary technical details we give an abstract formulation to our problem. We consider two differential systems in the plane defined by :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y, u) \\ \frac{dy}{dt} = g(x, y, u) \end{cases} \quad (\text{A.1.1})$$

where the parameter u takes only two values : 1 and 2. We assume that, according to the observation of the state $x(t), y(t)$ at time t some decision maker chooses the value u . More precisely, the rule is the following :

$$\begin{aligned} &\text{if } ax + by > c \text{ then } u = 1 \\ &\text{if } ax + by < c \text{ then } u = 2 \end{aligned} \quad (\text{A.1.2})$$

where a , b and c are parameters. Thus the complete system can be considered as a differential system with a discontinuous right-hand side. Such systems have been considered for a long time by mathematicians (in particular by people working on control systems) and the most widely accepted concept of solution for this special case of differential equations (in the usual case the right-hand side is at least continuous) is the concept of « Filippov solution » [26]. We shall not explain what it is here because it uses somewhat sophisticated mathematics and, fortunately, the particular case which we are interested in is much more simple than the general case and is tractable with elementary means. But we emphasise that our approach is by no means new but just a simple special case of the more general Filippov concept of solution for differential equations with discontinuous right hand side.

Notice that our decision rule (A.1.2) is not completely defined. What is the choice when $ax + by = c$? It is precisely one of the tasks of the Fillipov concept to make solutions independent of this choice, but, for the sake of completeness we assume now that the value of the parameter u is subject to the rule :

$$\begin{aligned} &\text{if } ax + by \geq c \text{ then } u = 1 \\ &\text{if } ax + by < c \text{ then } u = 2 \end{aligned} \quad (\text{A.1.3})$$

1.1. Sample and hold solutions

Assume that we discretize the time in periods of length T and that at each instant nT we observe the state $x(nT), y(nT)$ ("sample") and that we "hold" the parameter u over the time interval $[nT, (n+1)T[$ equal to the value defined by the decision rule applied to the observed sample $x(nT), y(nT)$. Such a procedure defines in a non ambiguous way what is a solution : consider the initial condition x_0, y_0 , compute $ax_0 + by_0$ and integrate with $u = 1$ or 2 according

to the rule (A.1.3) up to the time $t = T$. Compute $ax(T) + by(T)$ and take it as a new initial condition for time T and apply the same procedure. Iterate the process. This defines what we call a « sample and hold control (SHC) solution » for system (A.1.1) submitted to the decision rule (A.1.3).

This is a very natural way to formalise any real system where the process is observed periodically and the dynamic modified with respect to some criteria. Notice that there is another situation of this type which deserves a different formalism : The situation where the observation process is continuous and the decision is taken when the state variables cross the border between two regions, but where it takes some times to change the dynamic. For instance imagine a decision process concerning the fishing areas where it takes time to go from one place to another. We call this a « delay in the control solution ». We shall outline this case in the last section. Let us first look to SHC solutions.

1.2. Sample and hold solutions of infinitesimal steps

Assume that we perform the same process as above, except that we now suppose that the time interval is very small with respect to the characteristic time of the system, that is to say assume that T is "infinitesimal". We look to what will be the outcome and try to make an idealisation of it. There is no loss of generality in assuming that the strait line $ax + by$ is just the X-axis. Thus we have :

$$\text{if } y \geq 0 \text{ then } u = 1 \text{ else } u = 2 \quad (\text{A.1.4})$$

There are many possibilities for the organisation of the differential equation along the line. We examine all possible cases :

Case 1 : $\alpha < x < \beta \Rightarrow g(x,0,1) < 0$ and $g(x,0,2) < 0$

On Fig.A.1 we have shown few integral curves of the system with $u = 1$ and the curved lines $-2T, -1T, 1T$ are just the image of initial conditions taken on the X-axis integrated (in reverse time) up to time $-1T$ or $-2T$, etc. or integrated up to time T . According to our integration process any solution starting above the X-axis will end to some point in the strip strictly below the X-axis and above the line T (since $g(x,0,1) < 0$).

Now from this point we integrate the system with $u = 2$ and the trajectory goes down for some time according to our hypothesis $g(x,0,2) < 0$. If we had chosen the rule : *if* $y > 0$ *then* $u = 1$ *else* $u = 2$ everything would have be the same except that the change from 1 to 2 would have occur when the point lies in the strip $x = 0, T$ with the X-axis included and the line T excluded.

Assume now that T is infinitesimal, or goes to 0. This means that the strip between $x = 0$ and T is infinitesimal. An idealisation of this situation is that u is changed from 1 to 2 as soon as the solution crosses the X-axis and we get Fig.A.2. Whether the decision is the first one or the

second is irrelevant since our idealisation is based on the fact that in both cases the trajectory with $u = 1$ must end in a strip which is infinitely close to the X-axis.

Case 1 bis : $\alpha < x < \beta \Rightarrow g(x,0,1) > 0$ and $g(x,0,2) > 0$

All the same remarks hold except the fact that the trajectories cross the X-axis from below to above

Case 2 : $\alpha < x < \beta \Rightarrow g(x,0,1) > 0$ and $g(x,0,2) < 0$

This case is trivial since, locally, trajectories will never cross the X-axis. See the two cases on **Fig.A.3-a-b**.

(a) if $y > 0$ then $u = 1$ else $u = 2$ (b) if $y \geq 0$ then $u = 1$ else $u = 2$.

In order that the phase portrait does not depend on the choice of the decision rule as regard to the fact that y is strictly positive or not, we decide deliberately to loose the unicity of solutions. We therefore adopt the rule imposing that from a point on the X-axis exactly two solutions are issued (cf. **Fig.A.3-c**).

Case 2 bis : $\alpha < x < \beta \Rightarrow g(x,0,1) < 0$ and $g(x,0,2) < 0$

Substitute 1 for 2 and see above.

Case 3 : $\alpha < x < \beta \Rightarrow g(x,0,1) < 0$ and $g(x,0,2) > 0$

This is the most interesting case. When we are above the X-axis we must go down and when we are below we must go up. What shall we do on the axis ? We cannot leave it because if we leave it below we must go up and vice versa. Consider now the SHC procedure with an infinitesimal T . Because T is infinitesimal we can assume that integrating during time T the differential equation :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x,y,u) \\ \frac{dy}{dt} = g(x,y,u) \end{cases} \quad (\text{A.1.1})$$

From the initial condition x_0, y_0 is the same as to add to this point the vector :

$$T \begin{bmatrix} f(x,y,u) \\ g(x,y,u) \end{bmatrix} \quad (\text{A.1.5})$$

In other words, to discuss the behaviour of the SHC solutions near the X-axis we assume that the right hand side of the differential equation is constant for both $u = 1$ and $u = 2$. There is no loss of generality in assuming that $g(x,y,2) = 1$ and $g(x,y,1) = l$ with $l \leq 1$. Let us focus on the y coordinate of a SHC solution at time t . Assume that at $t = 0$ it comes from below and that $0 < y(0) \leq T$. From this point, according to rule (A.1.3), we use the parameter $u = 1$ until we are below the X-axis.

Consider now D , the graph of the linear function $y = -lt + y(0)$ (cf. **Fig.A.4**); consider the first time it crosses some vertical nT below the X-axis : this corresponds to the time when we switch from $u = 1$ to $u = 2$. We thus have to add T to the y coordinate and then start again to go down. For each step time of length T the y coordinate decreases by a quantity l . From **Fig.A.4** it is clear that the time periods using $u = 1$ and $u = 2$ are proportional respectively to the number of vertical lines $t = nT$ and horizontal lines $y = nT$ crossed when one moves along D . When the number of line crossed is large these numbers are :

$$\{\text{Time elapsed with } u = 1\} = \frac{1}{1+l} \quad \{\text{Time elapsed with } u = 2\} = \frac{l}{1+l}$$

Therefore the velocity with respect to the X-axis will be :

$$\frac{f(x,0,1) \frac{1}{1+l} + f(x,0,2) \frac{l}{1+l}}{\frac{1}{1+l} + \frac{l}{1+l}} = \frac{f(x,0,1) \cdot 1 + f(x,0,2) \cdot l}{1+l}$$

A straightforward computation shows that this number is just given by taking the intersection of the strait line joining the two velocities with the X-axis.

On **Fig.A.5** it is shown in which sense the Filippov solution is an idealisation of the SHC solution which is represented through magnifying glasses.

Fig.A.6 shows that the velocity on the X-axis can point right or left (the different cases are illustrated on the left part of **Fig.A.6**) except if the two velocities are aligned. If it happens that for some isolated x the two velocities are aligned two cases are possible. They are portrayed on the right part of **Fig.A.6**.

The four next cases are given in the following table below and portrayed on **Fig.A.7**

Case 4 :	Case 5 :
$\alpha < x < \beta \Rightarrow g(x,0,1) > 0$	$\alpha < x < \beta \Rightarrow g(x,0,1) < 0$
$\beta < x < \gamma \Rightarrow g(x,0,1) < 0$	$\beta < x < \gamma \Rightarrow g(x,0,1) > 0$
$g(x,\beta,1) = 0 \quad f(x,\beta,1) > 0$	$g(x,\beta,1) = 0 \quad f(x,\beta,1) > 0$
$\alpha < x < \gamma \Rightarrow g(x,0,2) > 0$	$\alpha < x < \gamma \Rightarrow g(x,0,2) > 0$
Case 6 :	Case 7 :
$\alpha < x < \beta \Rightarrow g(x,0,1) > 0$	$\alpha < x < \beta \Rightarrow g(x,0,1) < 0$
$\beta < x < \gamma \Rightarrow g(x,0,1) < 0$	$\beta < x < \gamma \Rightarrow g(x,0,1) > 0$
$g(x,\beta,1) = 0 \quad f(x,\beta,1) > 0$	$g(x,\beta,1) = 0 \quad f(x,\beta,1) > 0$
$\alpha < x < \gamma \Rightarrow g(x,0,2) < 0$	$\alpha < x < \gamma \Rightarrow g(x,0,2) < 0$

□ Case 4 is a mixing of case 1bis and case 3. On Fig.A.7 are shown the trajectory which ends at the point $(\beta, 0)$ for $u = 2$. For every initial condition issued from the left of this trajectory the X-axis is crossed like in case 1bis. Then the trajectory for $u = 1$ turns around $(\beta, 0)$ and comes back to the X-axis to a point where case 3 applies. Thus on the X-axis on the right of $(\beta, 0)$, the motion is from left to right. According to the SHC procedure this trajectory will enter the region $y > 0$ and then follows $u = 1$. This drives the point back to the X-axis, strictly on the right of $(\beta, 0)$.

□ Case 5 is a mixing of case 3 and case 1.

□ Case 6 is a mixing of case 1 and case 2.

□ Case 7 is a mixing of case 1 and case 2. For these last three cases, the justification of the figure is left to the reader.

The cases where $g(x, 0, 2)$ vanishes are the same as the cases where $g(x, 0, 1)$ vanishes. The case where $g(x, 0, 1)$ and $g(x, 0, 2)$ vanish for the same x is not structurally stable (any small modification of the system will destroy the picture) and is of poor interest for applications. We do not consider this case in this appendix.

2. Delay in the control solutions

This case is simpler than the preceding one since the switchings between $u = 1$ and $u = 2$ are not time dependent, but just position dependant, as explained on Fig.A.8. We do not use this concept in the paper. Notice however that in this case, it can be shown that when the delay is infinitesimal the idealised solutions are the same ones than in the case of SHC solutions.

Appendix (2)

To prove Lemma (1) we come back to the initial form of the system:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= B(X)X(t) + v \\ X(0) &= X_0 \end{aligned} \quad \text{with} \quad v = \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix}$$

where the matrix $B(X)$ is either

$$B(X) = B_1 = \begin{bmatrix} -(m+E) & 0 \\ m & -\mu \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad B(X) = B_2 = \begin{bmatrix} -m & 0 \\ m & -(\mu+E) \end{bmatrix}$$

and we shall show that there exists a domain of the phase plan such that any trajectory on the boundaries of this domain points inside. In the present case we shall prove that the domain delimited by the two axes: $x = 0$, $y = 0$, and the two straight lines $x = 2R/m$ and $y = 4R/\mu$ satisfy the above property.

□ Consider first the two axes.

Along the Y-axis, $x = 0$, from (4.2) we have $\dot{x} = R > 0$, $\forall B_i \quad i=1,2$.

Along the X-axis, $y = 0$, we have $\dot{y} = mx > 0$, $\forall B_i \quad i=1,2$.

□ Let now observe what happens on the boundary $x = 2R/m$. From (4.2) we have:

$$\dot{x} = -m \frac{2R}{m} + R = -R < 0 \text{ for } B_1 \quad \dot{x} = -(m+E) \frac{2R}{m} + R < -R < 0 \text{ for } B_2.$$

□ The last boundary is the straight line $y = 4R/\mu$. We have

$$\dot{y} = mx - \mu \frac{4R}{\mu} \text{ for } B_1 \quad \dot{y} = mx - (\mu + E) \frac{4R}{\mu} \text{ for } B_2.$$

Thus for $0 \leq x \leq 2R/m$

$$\dot{y} \leq m \frac{2R}{m} - \mu \frac{4R}{\mu} = -2R < 0 \text{ for } B_1 \quad \dot{y} \leq m \frac{2R}{m} - (\mu + E) \frac{4R}{\mu} < -2R < 0 \text{ for } B_2.$$

Therefore any trajectory on the boundaries of the domain $\{x = 0, y = 0, x = 2R/m, y = 4R/\mu\}$ points inside. This proves that the IC system is bounded. □

Appendix (3)

To prove Lemma (4) we first have to show that the two equilibria Xe_1 and Xe_2 correspond to the intersection of the graph of ψ with the straight line Δ when $\delta m = \mu$ and $\delta m = \mu + E$ respectively. This can be done as follows: Substituting (6.1) and (6.2) in (14) indicates that Xe_1 and Xe_2 belong to the graph of the function ψ . Since Π_2 belong to Δ , from (9) we have $b = a/\delta$. Substituting $b = a/\delta$ in (12) we get

$$(A.3.1) \quad \rho(\Pi_2) = \frac{bR}{H_2} = \frac{R}{a(m + \delta m - E - \mu)}$$

When $\delta m = \mu + E$, (A.3.1) becomes

$$(A.3.2) \quad \rho(\Pi_2) = R/am = x_2 \text{ (cf. (6.2))}$$

On the other hand, if we substitute $a = b\delta$ in (12) we get

$$(A.3.3) \quad \rho(\Pi_2) = \frac{bR}{H_2} = \frac{R}{\delta(m + \delta m - E - \mu)}$$

When $\delta m = \mu + E$, (A.3.3) becomes

$$(A.3.4) \quad \rho(\Pi_2) = R/\delta m = R/(\mu + E) = y_2 \text{ (cf. (6.2))}$$

The equalities (A.3.2) and (A.3.4) imply that if $\delta m = \mu + E$, the point Π_2 confonds with Xe_2 on the graph of ψ . By changing equalities by inequalities it is then easy to see that Xe_2 is below the graph of ψ for $\delta m > \mu + E$ and above for $\delta m < \mu + E$.

Using the similar procedure for $\delta m = \mu$, we see that the point Π_1 confonds with Xe_1 on the graph of ψ . Consequently Π_1 is above the graph of ψ for $\delta m < \mu$ and below for $\delta m > \mu$. In other terms, since Π_1 is closer from the origin (0;0) than Π_2 , we end up with three cases:

Case (a): $\delta m > \mu + E, \Rightarrow$ both points Π_1 and Π_2 are below the graph of ψ .

Case (b): $\mu < \delta m < \mu + E, \Rightarrow \Pi_1$ is below the graph of ψ and Π_2 above.

Case (c): $\delta m < \mu, \Rightarrow$ both Π_1 and Π_2 are above the graph of ψ . $\square$

Appendix (4)

To prove Lemma (5), let us consider a trajectory of the SHC system. It is a succession of points $X_n, X_{n+1}, \dots, X_{n+k}$ (recall that we adopt the notation $(n+1)\tau = n+1$) where each consecutive point is connected to the preceding by trajectories defined by either

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -(m+E)x + R \\ \dot{y}(t) = mx - \mu y \end{cases} \quad \text{or} \quad \begin{cases} \dot{x}(t) = -(m+E)x + R \\ \dot{y}(t) = mx - \mu y \end{cases}$$

Since we proved by Lemma (2) that none of those type of trajectories can leave the domain $\{x = 0, y = 0, x = 2R/m, y = 4R/\mu\}$ this proves that the succession of points $X_n, X_{n+1}, \dots, X_{n+k}$ will also never leave it. Thus the SHC system is bounded. $\square$

Appendix (5)

We shall prove Lemma (7) by contradictions. First recall that in case (b), Xe_1 is in R_2 and Xe_2 is in R_1 . Assume now that X_n converges towards a points X^* . Assume furthermore that neither Xe_1 nor Xe_2 belong to Δ . Therefore there exist an infinite sequence of points $X_{n'}$ which belongs either to R_1 or to R_2 .

(i) if $X_{n'} \in R_2$ then X^* belongs to R_2 .

Since $X_{n'+1} = A_2 X_{n'} + b_2$ and $X_{n'+1}$ converges towards X^* , thus by continuity $X^* = A_2 X^* + b_2$. This means that X^* confonds with Xe_2 and by the way belongs to R_1 which is a contradiction.

(ii) if $X_{n'} \in R_1$ then X^* belongs to R_1 or to Δ .

Since $X_{n'+1} = A_1 X_{n'} + b_1$ and $X_{n'+1}$ converges towards X^* , thus by continuity $X^* = A_1 X^* + b_1$. This means that X^* confonds with Xe_1 and by the way belongs to R_2 and not to Δ (since we assumed that neither Xe_1 nor Xe_2 belong to Δ). This is a contradiction.

Thus there can not exist any equilibrium X^* towards which the trajctories of the SHC system converge if the system is in case (b). $\square$

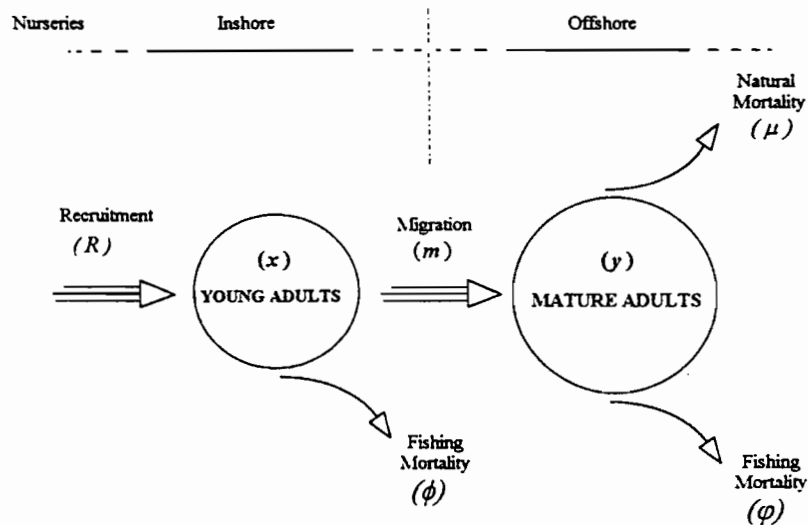


Fig.1

The conceptual scheme of the system. The two variables of the model are the two exploited fractions of the shrimp stock: the young adults (x) localised in shallow-water zone and the mature adult (y) located in deep-water zone. The rest of the cycle (i.e. the larvae and post-larvae stages that grow in the nursery) is introduced through a recruitment migration (R). Natural mortality is assumed to act only on the mature stages. The other biological and anthropic processes of the model are the offshore migration rate (m) through which the young adults join the mature adults' fraction in deep-water zones, and the two fishing mortality rates (ϕ) and (ϕ) that are applied respectively on the young and the mature adults.

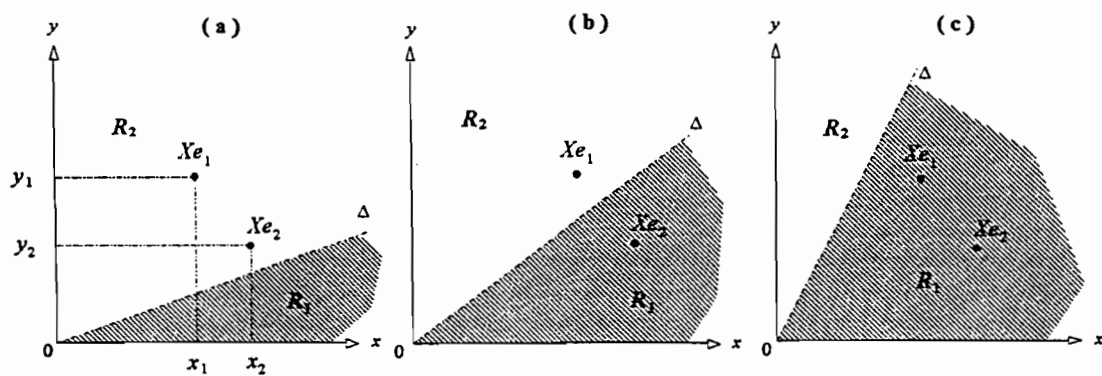


Fig.2

The three possibilities of location of the equilibrium points Xe_1 and Xe_2 with respect to the straight line Δ .

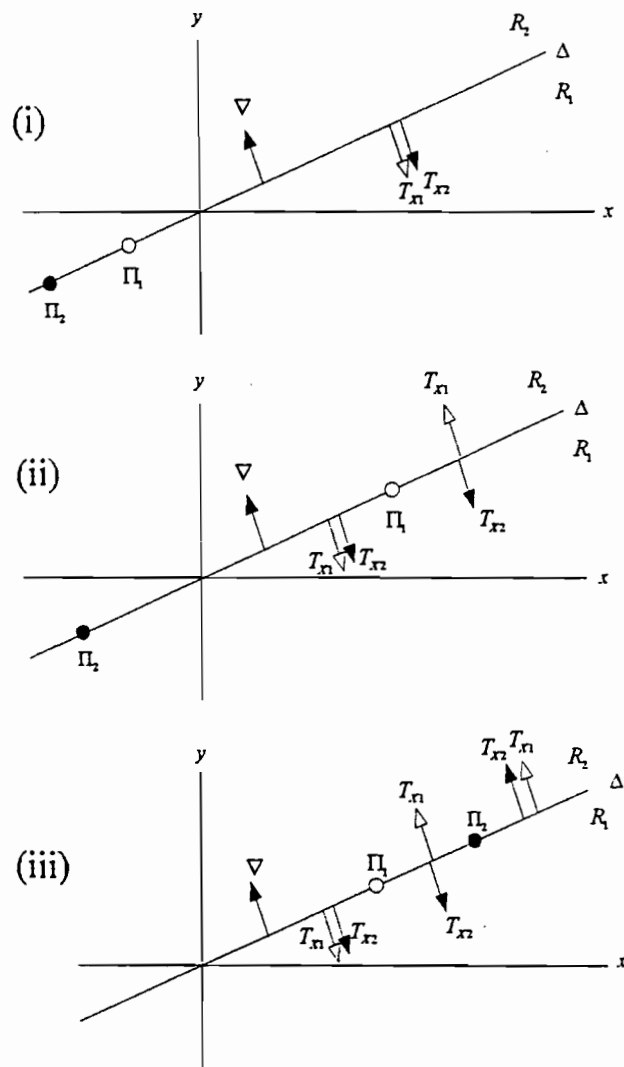


Fig.3

The three locations of the points Π_i in the phase-plan and the directions of the trajectories $X_{T_i}(\cdot)$. White symbols: points and trajectories associated to T_1 in R_1 ; black symbols: points and trajectories associated to T_2 in R_2 . The vector ∇ which points $R_1 \rightarrow R_2$ is also indicated (in grey).

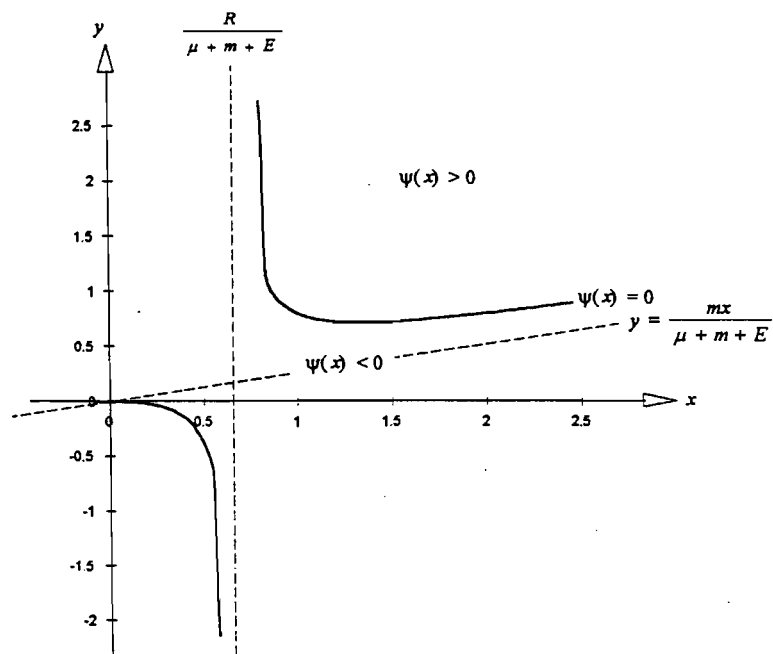


Fig.4

Graph of the function ψ (parameters values: $E = 1$, $\mu = 0.1$, $m = 0.4$).

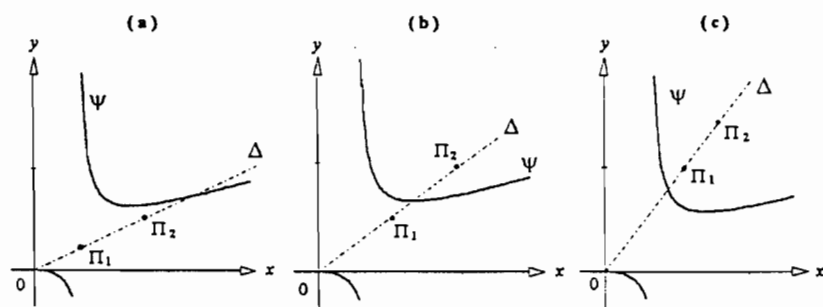


Fig.5

The three cases (a), (b), (c) and the associated locations of Π_1 and Π_2 along Δ with respect to the graph of ψ .

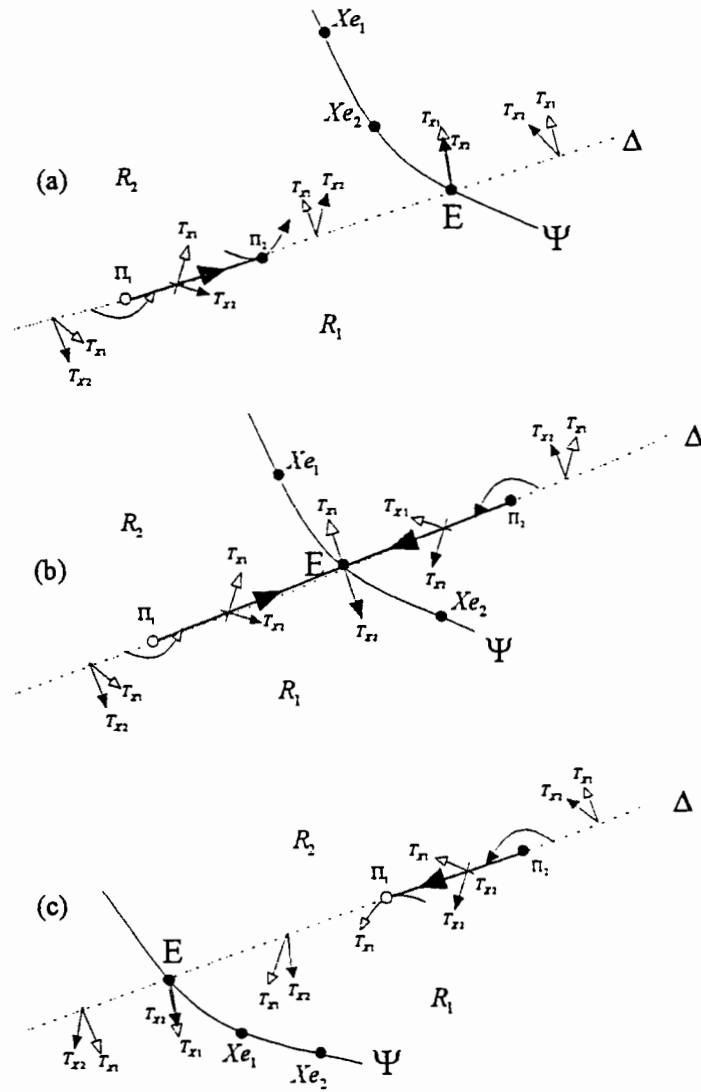
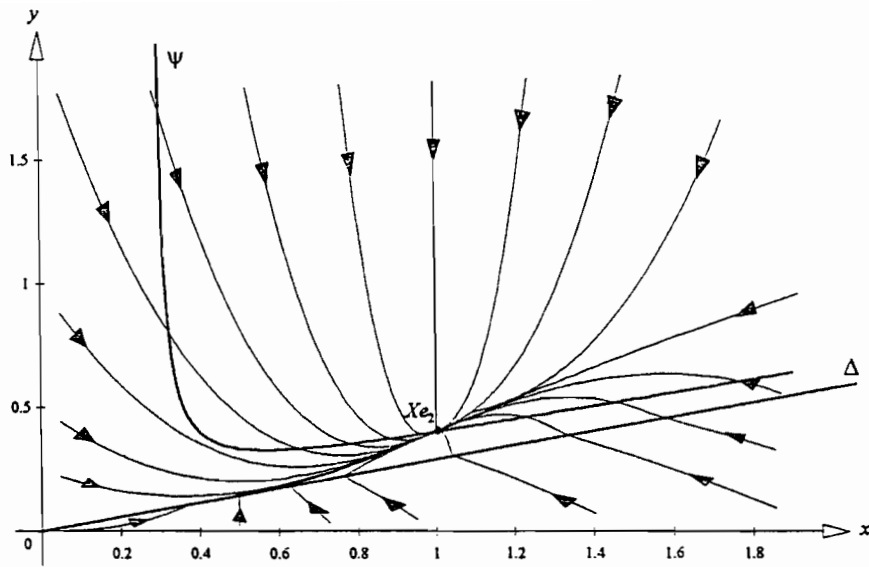


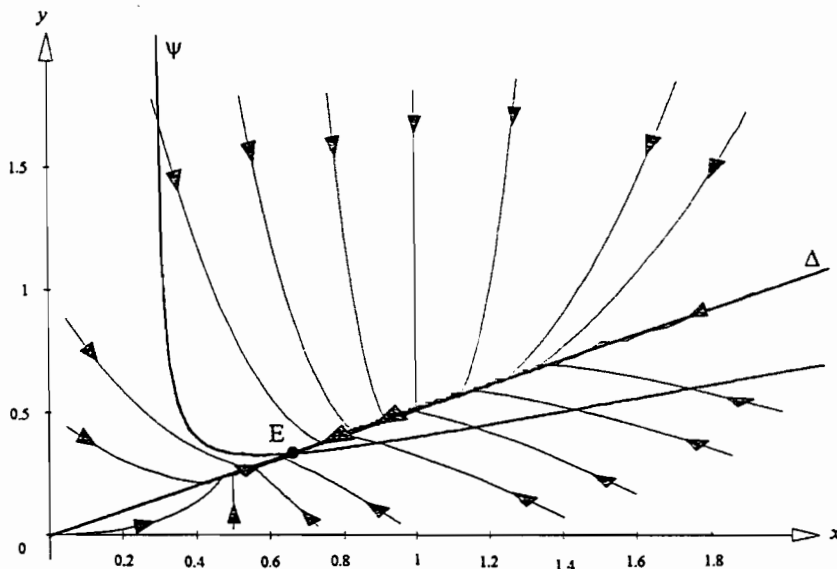
Fig.6

The three possibilities of location of the graph of ψ with respect to the points Π_1 and Π_2 and the corresponding directions of the trajectories along Δ and in the regions R_1 and R_2 . White symbols: points and trajectories associated to T_1 in R_1 ; black symbols: points and trajectories associated to T_2 in R_2 .



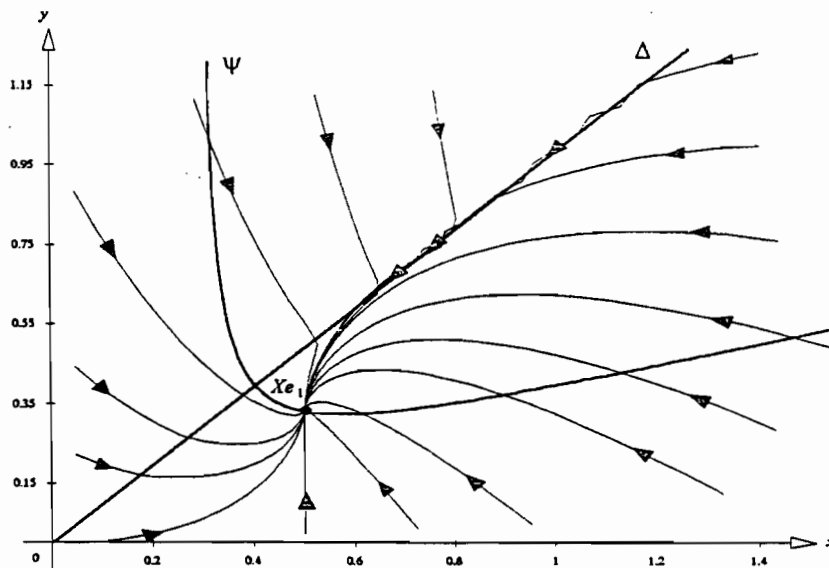
Case (a)

$$\delta = 3.45$$



Case (b)

$$\delta = 2.0$$



Case (c)

$$\delta = 1.0$$

Fig.7

Examples of numerical simulations corresponding to the analytical description given in Fig.6 (the parameters values are $R = 1$, $m = 1.0$, $E = 1.0$, $\mu = 1.5$ and the δ values as indicated above).

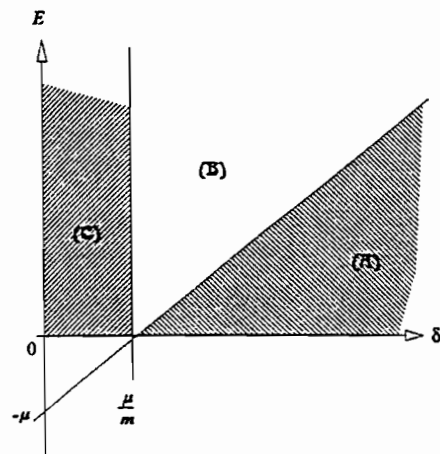


Fig.8

The three regions **(A)**, **(B)**, and **(C)** corresponding in the parameter-plan (E, δ) to the cases (a), (b), and (c) of Fig.2.

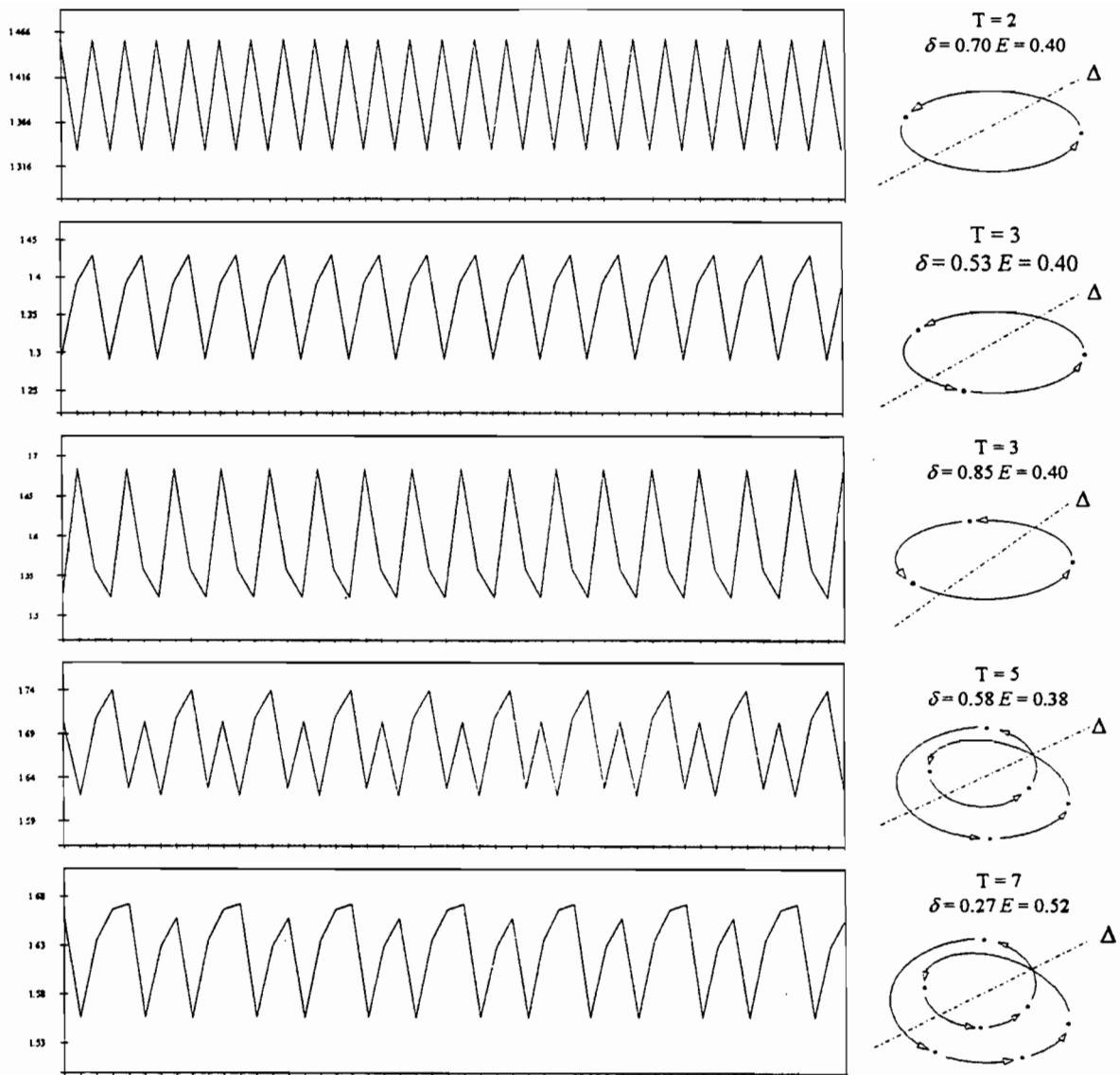


Fig.9

Examples of cycles obtained in region (B). Left: the x -values of the cycles. Right: the periods of these cycles, the δ and E values (the other parameters are $\mu = 0.5$, $m = 1.0$, $R = 1$) and the location of the orbit-points of these cycles with respect to Δ .

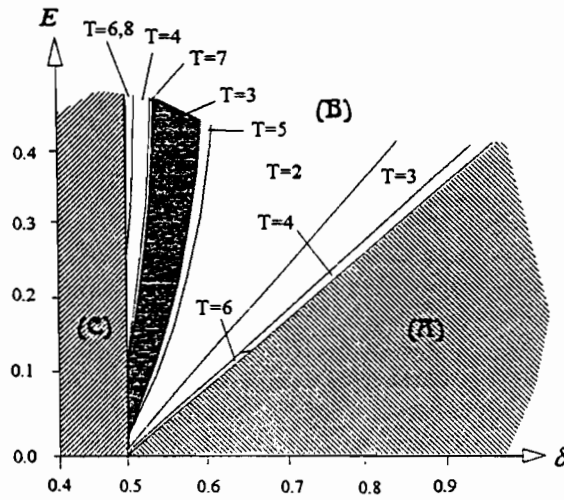


Fig.10

The different subregions which composed the region (B) and the periods of the cycles that characterised these subregions. For some isolated couples of parameters on the boundary between two subregions, the type of cycle may depend on the initial conditions (for instance for $E = 0.18$, $\delta = 0.641$ $T = 5$ if $(x_0, y_0) = (0, 0)$ and $T = 3$ if $(x_0, y_0) = (5, 2)$). The grey subregion corresponds to the couples of parameters (δ, E) which satisfy the constraints (c'1, c'2, c'3) associated to the cycle ($T = 3$ $\delta = 0.53$ $E = 0.40$) described in Fig.9 (cf. text for comments).

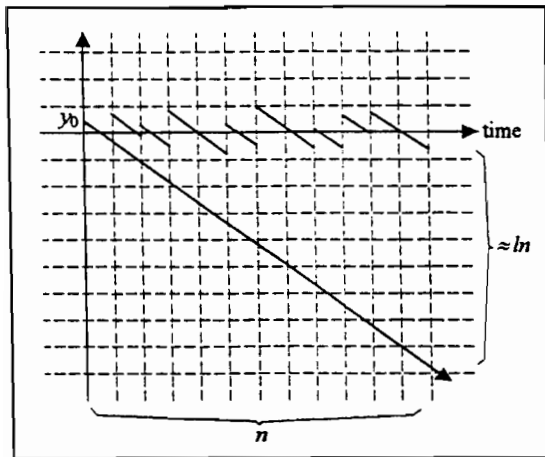


Fig. A.4

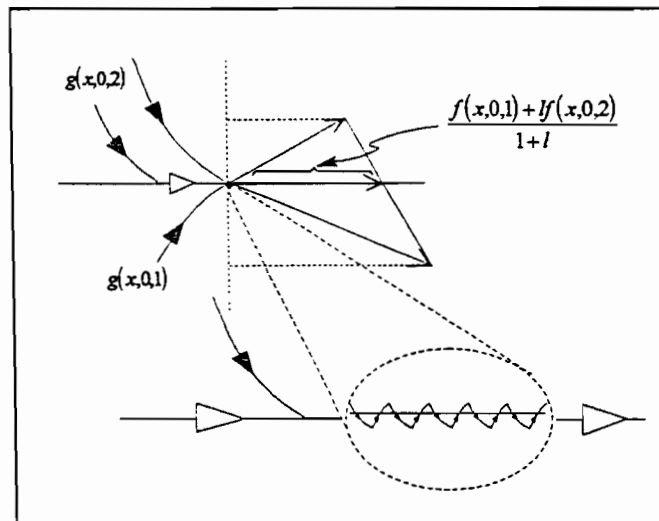


Fig. A.5

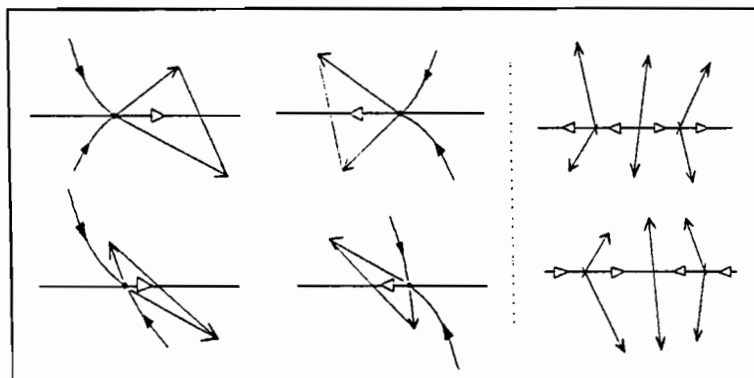


Fig. A.6

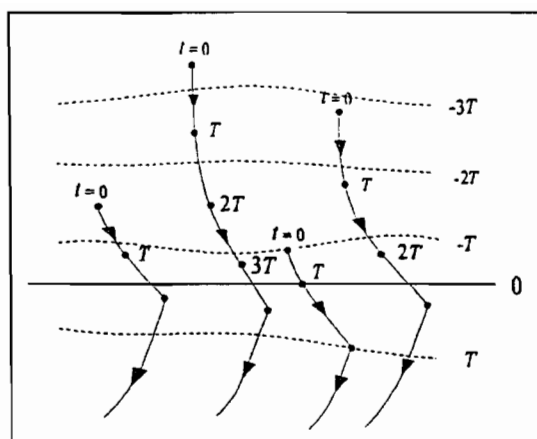


Fig. A.1

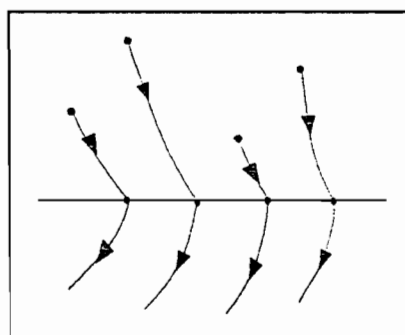


Fig. A.2

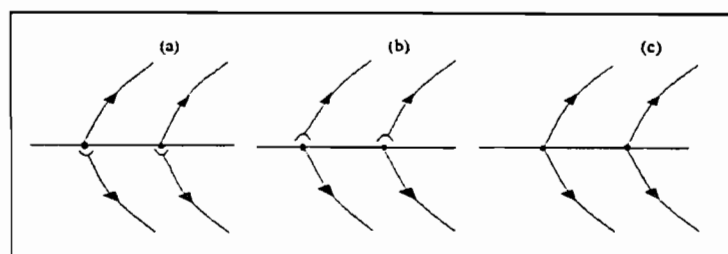


Fig. A.3

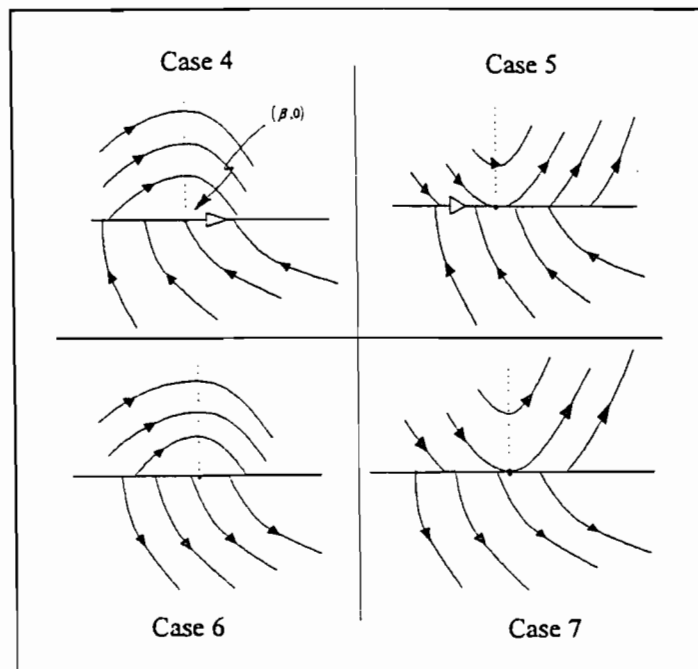


Fig. A.7

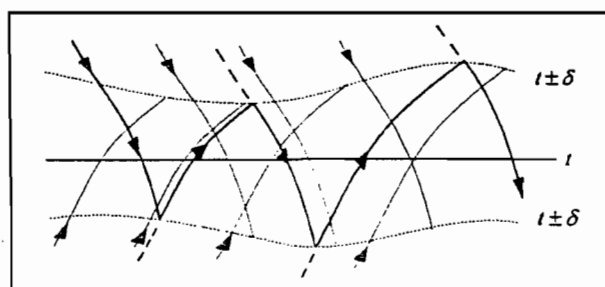


Fig. A.8