

UNIVERSITE MONTPELLIER II

— SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC —

N° attribué par la bibliothèque

□□□□□□□□□□

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER II

Discipline : Biostatistique

présentée et soutenue publiquement

par

Nicolas Pech

le 27 Janvier 1998

Titre

**Approche statistique d'une exploitation halieutique :
le cas de la pêche artisanale au Sénégal**

Directeur de thèse :

M. Robert Sabatier, Université Montpellier I

JURY

M. Gilles Ducharme	Professeur, Université Montpellier II, Montpellier	Président
M. Patrice Cayré	Directeur de recherche, ORSTOM, Paris	Rapporteur
M. Jean-Marie Legay	Professeur, Université Lyon I, Lyon	Rapporteur
M. Yves Escoufier	Professeur, Université Montpellier II, Montpellier	Examineur
M. Francis Laloë	Directeur de recherche, ORSTOM, Montpellier	Examineur
M. Alassane Samba	Chercheur, CRODT-ISRA, Dakar	Examineur
M. Robert Sabatier	Maître de conférence, Université Montpellier I, Montpellier	Directeur de thèse

A Christine

A mes parents

Remerciements

J'aimerais avant tout témoigner ici de ma profonde reconnaissance envers Francis LALOE. C'est lui qui, loin de se contenter d'être l'initiateur de ce travail, a constamment participé à son déroulement. J'ai ainsi pu tout au long de ces quelques années apprécier pleinement ses qualités tant scientifiques qu'humaines sans lesquelles cette étude n'aurait pu débiter, se dérouler, et aboutir.

Cette thèse a été co-encadrée par Francis LALOE, Robert SABATIER et Alassane SAMBA. J'ai beaucoup apprécié l'intelligence avec laquelle ce co-encadrement a été mené, l'attention accordée par chacun de ces trois chercheurs, ainsi que leur entente respectueuse.

Je remercie profondément Robert SABATIER d'avoir accepté d'être le directeur de cette thèse, puis d'avoir pleinement assumé la direction de ce travail. J'ai beaucoup apprécié sa disponibilité, son écoute, ses conseils qui se sont avérés être très judicieux, ainsi que la lecture minutieuse qu'il a fait du manuscrit présenté ici.

Je suis extrêmement reconnaissant à Alassane SAMBA de m'avoir fait partager sa connaissance intime de la pêche artisanale sénégalaise. Son apport a été déterminant dans ce travail, et je le remercie beaucoup de sa disponibilité lors de ses séjours à Montpellier comme pour son encadrement lors du stage que j'ai effectué au Sénégal.

Je voudrais exprimer ici ma gratitude envers chacun des autres membres du jury. Je remercie beaucoup Patrice CAYRE d'avoir, malgré ses lourdes responsabilités, accepté d'être rapporteur de cette thèse. Je suis très honoré que Jean-Marie LEGAY ait accepté d'être rapporteur de ce travail. Je les remercie tous deux infiniment de la lecture approfondie qu'ils ont faite du manuscrit, comme des remarques formulées. Je remercie beaucoup Gilles DUCHARME d'avoir accepté d'être examinateur de ce travail et de présider ce jury. Malgré ses lourdes charges, Yves ESCOUFIER me fait le grand honneur de participer à ce jury. C'est pour moi l'occasion de le remercier du soutien qu'il n'a jamais manqué de m'apporter.

Cette thèse n'aurait pas vu le jour sans l'allocation MESR qui m'a été accordée puis l'aide opportune de l'ORSTOM pour les six derniers mois. Que toutes les personnes m'ayant à cette occasion soutenu soient ici remerciées. Ce travail a été préparé au Laboratoire HEA (Halieutique et Ecosystèmes Aquatiques) de l'ORSTOM Montpellier. Je remercie à cette occasion l'ORSTOM (en particulier les départements TOA puis RED, Patrice CAYRE et Christian CHABOUD) de m'avoir fourni les moyens qui m'ont permis de mener ce travail dans d'excellentes conditions. Je tiens à souligner l'aide apportée par l'ensemble du service informatique et en particulier la disponibilité de son responsable Hervé LEMARTRET.

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le CRODT, et je remercie à travers son directeur Diafara TOURE l'ensemble de ses membres pour l'assistance qu'ils m'ont apportée et pour leur accueil. Je salue ici la mémoire d'Itaf DEME-GNINGUE. Un grand merci à Ibrahima KEBE, à I. CAMARA, B. COULIBALY, A. DIENG, D. DIOP, D. DIOUF, O. DIOUF, M. FALL, M. FAYE, D. GUYE, I. NDIAYE, F. NIANG enquêteurs du programme pêche artisanale et aux pêcheurs rencontrés pour la patience et le dévouement avec lesquels ils m'ont fait partager leur connaissance de la pêche artisanale sénégalaise.

J'ai été très sensible à l'appui et à l'intérêt manifesté par Jocelyne FERRARIS pour ce travail. Qu'elle en soit ici profondément remerciée comme Monique SIMIER et Marie-Hélène DURAND pour leur constant soutien. Merci beaucoup à Christine PETIT et Karine DOLLON pour leurs lectures attentives du manuscrit, et leurs conseils qui m'ont beaucoup apporté.

J'aimerais ici saluer chacun des membres des laboratoires HEA et LEA pour leur accueil. Ce fut pour moi un grand plaisir de passer ces quelques années parmi eux. Je remercie infiniment toutes les personnes qui ont manifesté un intérêt pour mon travail et m'ont encouragé... j'en avais parfois bien besoin. En guise d'échantillon, certainement pas représentatif, merci donc à Jean-Jacques ALBARET, Hélène ANDRE-BIGOT, Isabelle ANTUNES, Tarub BAHRI, Monia BEN ARFA, Pierre BOMMEL, Tidiane BOUSSO, Marc BOUVY, Jean-Christophe CASTELLA, Joseph CATANZANO, Emmanuel CHARLES-

DOMINIQUE, Jean-Pierre CHAUVEAU, Barbara CHOLLET, Espérance CILLAUREN, Philippe CECCHI, Philippe CURY, Hervé DEMARQ, Eric ELGUERO, Valérie FAURE, Nathalie FINOT, Alain et Viveca FONTENEAU, Pierre FREON, Daniel et Jean-Claude GAERTNER, Jean-Marc GASTELLU, Luis GONZALES, Daniel GUIRAL, Caroline JEHL, Didier JOUFFRE, Hayet KHODJA, Xavier LAZARRO, Jean LEFUR, André LERICOLLAIS, Hélène LUBES, Francis MARSAC, Frédéric MENARD, Jean-Luc NDIAYE, Oumarou NJIFONJOU, OLIVIER, Mauricio PAGAVINO, Marie-Christine PASCAL, Hélène REY, Bruno ROMAGNY, Patrick SIMON, Jean-Michel STRETTA, Arame SOUMARE, Tippawal SRIJANTR, Dominique TAPSOBA, Pierre TRAISSAC, Paulo TRAVASSOS, Philipe VEY, Guy VIDY ... Bien entendu je n'oublie pas mon ami Papa Samba DIOUF qui terminait sa thèse lorsque je la commençais, et qui m'a donné de grandes leçons d'humour, de détachement, et d'ardeur à la tâche.

Je remercie l'ensemble des enseignants du DEA (en particulier Jean-Dominique LEBRETON, Xavier MILHAUD, Gilberte VIGNAUX et Jean-Pierre VILA) pour leur enseignement et pour m'avoir accueilli dans leur formation. Merci également à Véronique SALS-VETTOREL et Cécile LOUCHE pour leur gentillesse et leur indulgence pour mes longs emprunts à la bibliothèque de l'Unité de Biométrie.

Enfin, je ne voudrais pas terminer ces remerciements sans y inclure mes camarades et amis Laurence GENSAC, Alexis FALQUES, Jean-Marie BOHER et Christophe LOMBARD.

Table des matières

Introduction	11
1 Contextes de l'étude	17
1.1 Modèles couplant une ressource et son exploitation	17
1.2 Présentation de la pêche artisanale sénégalaise	20
1.3 Présentation du système d'enquête	21
1.4 Discussion	29
2 Caractériser et synthétiser	31
2.1 Article du ICES Journal of Marine Science.	32
2.2 Compléments	48
2.3 Les tests de permutation	49
2.4 Discussion	55
3 Etude du modèle Laloë-Samba	57
3.1 Définition du modèle	57
3.1.1 Définition de trois typologies	57
3.1.2 Définition du modèle proprement dit.	61
3.1.3 Conclusion	67
3.2 Propriétés du modèle pour certains cas simples	68
3.2.1 Les systèmes dynamiques	69
3.2.2 Applications au modèle LS	71
3.2.3 Conclusion	77
3.3 Relations avec des familles de modèles	78
3.3.1 Les modèles de régression	78
3.3.2 Les modèles à équations simultanées	80
3.3.3 Les modèles à variables latentes	86
3.3.4 Les filtres de Kalman	88
3.4 Discussion	94

4	Ajustements du modèle	95
4.1	Rappel du modèle LS	95
4.2	Comparaison du modèle aux données	96
4.2.1	Variables du modèle et variables observées	96
4.2.2	Quels estimateurs pour quel modèle?	100
4.2.3	Que signifie le critère?	101
4.3	Algorithme d'ajustement	102
4.3.1	Minimisation d'une fonction à valeurs réelles d'un ensemble de paramètres	102
4.3.2	Algorithme d'ajustement	102
4.3.3	Expression analytique du gradient	104
4.4	Identification du modèle	107
4.5	Identifiabilité des paramètres	114
4.6	Discussion	116
5	Application à deux ports de la grande côte du Sénégal	121
5.1	Dynamique des débarquements à St-Louis et Kayar, deux ports de la grande côte du Sénégal	121
5.1.1	Présentation	121
5.1.2	Les données considérées	125
5.2	Méthode d'ajustement	127
5.3	Mise en œuvre de l'ajustement.	131
5.3.1	Choix d'un modèle initial et des valeurs des paramètres	131
5.3.2	Les principales étapes des ajustements	139
5.4	Description de l'ajustement retenu	149
5.5	Discussion	157
6	Evaluation du modèle	159
6.1	Etude des résidus	159
6.2	Comparaison des données observées aux données ajustées	165
6.3	Etude des variables internes au modèle	173
6.4	Discussion	176
7	Apports du modèle	177
	Conclusion	187
	Bibliographie	191
	Liste des tableaux	205

Liste des figures	209
Annexes	219
A Proposition 1 du chapitre 3	219
B Expression des dérivées partielles relative à l'algorithme d'ajustement utilisé.	221
C Valeurs des paramètres du modèle à l'issue du dernier ajustement	225
D Programmes sources S-PLUS	229
E Article soumis à <i>Fisheries Research</i> le 28 novembre 1997	247

Introduction

Les pêches artisanales ouest-africaines et en particulier la pêche artisanale maritime sénégalaise revêtent une importance économique et sociale tout à fait particulière à l'échelle du continent africain (Chauveau et Samba 1989, [28]). Exploitant des ressources naturelles très riches, les dynamiques de ces pêcheries ne sont pas seulement déterminées par les seules conditions du milieu et de la ressource, mais aussi par l'organisation sociale et économique, le marché, l'évolution technologique globale et locale (Charles-Dominique 1991, [25]). Parce qu'elles font intervenir tous ces éléments en interactions, ces exploitations dépassent le cadre de la seule question de l'impact de l'activité de pêche sur la ressource et ont nécessité la construction de nouveaux cadres de représentation aux seins desquels l'activité de pêche peut également être considérée comme "variable à expliquer" (Laloë et Samba 1989, [93]; Quensière 1993, [114]).

Notre travail s'inscrit dans ce contexte et va consister à présenter certains des apports de la statistique relativement à l'étude de telles exploitations halieutiques, et plus particulièrement de la pêche artisanale maritime sénégalaise. Il se situe dans la lignée des travaux menés par Laloë et Samba (1989, [93]) et Ferraris (1992, [49]; 1995, [45]), travaux qui ont conduit à formuler l'hypothèse suivante concernant l'activité de la pêche artisanale : *"... la variabilité générale des conditions de milieu (en fait aussi bien le milieu dans lequel vit et se renouvelle la ressource que celui qui « absorbe » la production des pêcheurs) a une contrepartie dans celle de l'activité des pêcheurs qui peuvent s'adapter à des situations diverses."* (Laloë et Samba 1989, [93]). L'objectif général sera donc de participer à la construction d'un cadre statistique en vue de représenter de telles exploitations.

La mise en place au cours des années 1970 du programme d'étude de la pêche artisanale répondait à un souci de gestion rationnelle de l'ensemble des stocks exploités sur le plateau continental sénégalais (Samba 1995, [126]). Il s'agissait alors de déterminer la capture (maximale) pouvant être "supportée" par chaque stock de poissons, en vue de procéder à un aménagement de la pêcherie. Des études sur la biologie des principales espèces exploitées sont alors menées en vue d'appliquer des modèles représentant les réactions d'une

ressource en fonction de l'effort de pêche¹. Ces modèles, développés pour d'autres régions que le Sénégal, font entre autres hypothèses celle que la variable "effort de pêche" puisse être "rendue" stationnaire par des mesures de gestion. C'est dans ce but qu'est mis en place un système de collecte des efforts de pêche et des captures associées (Laloë 1992, [88]). La collecte concerne au départ les principales espèces telles le tassergal, les sardinelles et le tiof. Mais au Sénégal, les pêcheurs artisans exploitent beaucoup plus d'espèces, utilisent plusieurs modes de pêche et exercent à partir de différents lieux de débarquements. On généralise donc le système à l'ensemble des espèces et engins utilisés dans les principaux lieux de débarquement de la côte sénégalaise. Le plan d'échantillonnage devient alors un plan d'échantillonnage stratifié (engin de pêche × lieu de débarquement × quinzaine) à plusieurs niveaux d'observation dans chaque strate.

En multipliant les strates du plan d'échantillonnage pour "couvrir" l'ensemble de la pêche artisanale, se posent alors un ensemble de difficultés. Par exemple, lorsque l'unité de pêche enquêtée a utilisé au cours de la sortie plusieurs engins, dans quelle strate doit-on l'affecter ? Plus généralement, on s'aperçoit que les unités de pêche peuvent au gré des conditions de la pêcherie (augmentation de prix, pénurie de moteurs, migrations d'espèces, introduction d'une nouvelle technique de pêche) changer d'engin, ou d'espèce cible. Par exemple, il est connu que les bancs de tassergal migrent le long de la côte sénégalaise : "*... en janvier et février, mouvement vers le sud sur les côtes de Mauritanie et au nord Sénégal ... stabilisation en mars-avril et inversion du mouvement en mai*" (Champagnat *et al.* 1983, [24]). Les pêcheurs à la ligne recherchent à la fin des années 70 le tassergal en particulier lorsque les individus se regroupent en bancs avant de remonter vers le nord. Entre temps ces mêmes pêcheurs ont tendance à viser d'autres espèces (le pagre par exemple). On voit donc au moyen de cet exemple qu'il existe une hétérogénéité intra-strate (mise en évidence par Laloë *et al.* 1981, [95]). Cet exemple illustre également l'impossibilité d'une gestion de la pêcherie qui serait menée en fixant des efforts par type d'engin, puisque les pêcheurs ont la capacité de modifier eux même les conditions d'usage de leurs engins. Les capacités d'adaptation des pêcheurs peuvent également les conduire à migrer pour changer de port d'attache. Dans ce cas là, les effectifs des strates qui sont enquêtées ne peuvent être considérés comme constants. Tout se passe donc comme si les pêcheurs aménageaient *de facto* la pêcherie. Cependant, au lieu de "rechercher" des conditions de stationnarité de leur activité, les pêcheurs artisans ont tendance, en modifiant sans cesse leurs modes de pêche, à accentuer la non-stationnarité du système, et donc celle des "variables" qui sont échantillonnées.

1. L'effort de pêche est ainsi défini par Laurec et Le Guen (1981, [99]) : "*L'effort de pêche appliqué à un stock d'animaux aquatiques est une mesure de l'ensemble des moyens de capture mis en œuvre par les pêcheurs sur ce stock, pendant un intervalle de temps déterminé.*"

Mais si l'on connaît l'existence de variabilités intra-strates, il n'est pas forcément envisageable de les identifier de manière claire et définitive (en vue de redéfinir les strates). Nous disons "de manière claire" parce que les modes d'utilisation des engins par les pêcheurs ne peuvent être forcément définis de manière simple. Une partie de la recherche menée en pêche artisanale a justement consisté à formaliser ces différents modes d'utilisation d'un même engin. Ainsi, en suivant un panel de 229 unités de pêche entre les 15 décembre 1991 et 15 décembre 1992, Ferraris (1996, [46]) détermine 27 classes d'actions de pêche différentes. La première d'entre elles regroupe des comportements de pêche attribuables à des pirogues moteurs lignes effectuant deux campagnes de pêche par an en visant plus particulièrement 4 espèces. On voit bien que concrètement si au débarquement on enquête une pirogue ligne on va être incapable de l'attribuer à une classe. Nous disons "de manière définitive" car la définition des comportements de pêche évolue avec le temps. Ainsi en 1997 où la présence du tassergal dans les eaux sénégalaises a fortement diminuée, on ne peut plus guère parler de pêcheurs lignes visant du tassergal, pratique majoritaire à la fin des années 70. Il apparaît donc plus raisonnable de définir les strates du plan d'échantillonnage au niveau plus "stable" de l'engin. En conséquence, outre le fait qu'on n'observe pas directement l'état des stocks mais les captures réalisées se rajoute une difficulté due au fait qu'on n'observe pas directement les actions de pêche mais qu'elles sont échantillonnées et encore à un niveau (celui du type de pêche pratiqué ou de l'engin utilisé) moins fin que celui qui fonde la dynamique de la pêche artisanale.

La collecte des données relatives à l'activité et aux résultats de la pêche artisanale nous permet de disposer d'un ensemble d'estimations indexées par le temps et concernant un grand nombre de variables. Il est difficilement envisageable d'étudier séparément chacune de ces variables. D'abord à cause de leur nombre, et surtout parce qu'elles n'apparaissent pas indépendantes les unes des autres. En d'autres termes, on ne comprendra pas l'évolution des captures du tiof si on ne les relie pas à celles du tassergal (et à celles des autres espèces), et si on ne relie pas les relations conjointes des captures du tassergal et du tiof aux conditions dans lesquelles s'exerce l'activité des pêcheurs. Une première étape va donc consister à "prendre la mesure" de ces données en proposant une méthode pour en caractériser la structure. Les auteurs soulignent que les résultats (efforts et captures) sont influencés par un ensemble de diverses sources de variabilités : influences environnementales, conditions socio-économiques, évolutions technologiques, . . . On voudrait donc *a priori* relier nos données à ces sources de variabilité pour faire la part des diverses influences. Malheureusement de telles sources de variabilités sont difficilement observables sous une forme fiable à nos observations. L'idée est alors de mener une étude de la variabilité interstrate de nos observations, en utilisant pour cela les différentes variables utilisées pour stratifier le plan d'échantillonnage.

L'activité et les résultats de la pêche artisanale peuvent être vus comme les résultantes d'un ensemble de processus aléatoires dépendants les uns des autres. Par exemple, il existe des processus de décision des pêcheurs artisans qui se traduisent par des choix relatifs aux actions de pêche qu'ils mettent en œuvre. Les résultats (captures) d'une action de pêche sont elles aussi la réalisation d'un processus aléatoire. La réaction des stocks suite au prélèvement effectué par les pêcheurs constitue un troisième processus. L'activité et les résultats de la pêche artisanale sénégalaise peuvent donc être vus comme résultant d'un ensemble de processus ... dont les réalisations constituent finalement la population parmi laquelle on échantillonne nos données. Il est à noter que si nous parlons de trois processus, on pourrait en considérer d'autres (par exemple ceux relatifs à la formation des prix à la vente du poisson, ceux concernant les entrées et sorties des unités de pêche dans l'exploitation, etc).

Laloë et Samba (1989, [93]; 1991, [94]) ont proposé un modèle présentant une articulation de ces différents processus. Laloë (1997, [91]) présente comment l'étude des données selon le cadre initial (représentation d'une ressource conditionnellement à son exploitation), et les observations par ailleurs faites de l'exploitation ont conduit à remettre en cause ce cadre pour proposer une représentation conjointe de la ressource et de son exploitation. Notre travail va consister à partir de ce résultat pour reconsidérer les données sous ce nouvel angle. De notre point de vue statistique, la question principale est : le modèle proposé est-il apte à rendre vraisemblable les données observées ? Si on parvient à un tel résultat, il devient possible d'envisager apporter des éléments de réponse à des questions relatives à la nature des évolutions conjointes de la ressource et de son exploitation. Par exemple si la monnaie du pays est dévaluée rendant les espèces exportées plus rémunératrices pour les pêcheurs artisans, alors dans quelle mesure les unités de pêche vont-elles changer d'espèces cibles ? Quelles pourraient en être les conséquences sur l'état de la ressource ? L'intérêt de questions de cette nature est certainement important dans le cadre de l'aménagement de la pêcherie.

Une seconde partie de notre travail va donc consister à bâtir un cadre statistique représentant l'activité de la pêche artisanale à partir du modèle proposé. Nous essayerons ensuite de relier ce cadre à ceux de familles plus générales de modèles statistiques qui traitent de certains des problèmes qui nous concernent. Il s'agit principalement des modèles à équations simultanées (pour l'existence de processus dépendants les uns des autres) ou des modèles de type "filtre de Kalman" (pour l'observation indirecte de processus).

La troisième partie sera consacrée au problème de la confrontation du modèle proposé aux données observées. Nous essayerons alors de bien préciser les problèmes posés avant de proposer une procédure d'ajustement du modèle aux données. En d'autres termes, comment spécifier le modèle ? Comment le relier aux observations ? Peut-on préciser les distributions

associées aux processus? Tous les paramètres sont-ils estimables? Comment choisir les estimateurs? Quelles sont leurs qualités? ...

Une fois la procédure d'ajustement proposée, notre objet sera de l'appliquer à des données réelles extraites de la base de données "pêche artisanale" du CRODT, choisies avec le spécialiste de l'exploitation (A. Samba). Nous considérerons ainsi l'activité et les résultats de pêche des deux principaux lieux de débarquement de la Grande Côte du Sénégal. Au total, nous étudierons 7 séries d'efforts associées à 36 séries de captures par unité d'effort concernant les principaux stocks exploitées. Ces 43 séries sont données par quinzaine de 1974 à 1992.

Nous serons ensuite amenés à considérer le problème de l'évaluation du modèle une fois celui-ci confronté aux données. Cette évaluation sera menée en regardant si les suppositions du modèle sont vérifiées (analyse des résidus), mais également en confrontant les synthèses respectives qui peuvent être réalisées des données observées et ajustées, selon le cadre déterminé dans la première partie du travail. De manière générale, nous considérons qu'un modèle est valide (ou n'est pas invalidé) lorsqu'il permet d'accorder une vraisemblance aux données observées. Dans ce cas, on peut espérer que les estimations associées ont une chance d'être correctes. Le modèle ayant été bâti en fonction des données qu'il représente, si l'on n'arrive pas à accorder une vraisemblance aux données observées, ce ne seront pas les données qui seront remises en cause, mais bien le modèle.

Laloë et Samba (1989, [93]; 1991, [94]) ont proposé un modèle en vue de représenter la dynamique de l'exploitation de la pêche artisanale sénégalaise. Nous allons dans notre travail essayer d'apporter une contribution à la recherche des conditions dans lesquelles ce modèle rend vraisemblables les données observées. Le premier chapitre est consacré à la présentation des contextes de l'étude, en particulier nous y décrivons la procédure de collecte des données. Dans un second chapitre, nous présentons et appliquons les outils d'analyse exploratoire adaptés à nos données. Nous exposons dans le troisième chapitre le cadre statistique bâti en vue de représenter l'activité de la pêche artisanale, et relient le modèle proposé à certaines familles de modèles statistiques. Nous proposons dans un quatrième chapitre une procédure d'ajustement du modèle que nous mettons en œuvre au chapitre 5 sur des données relatives à la dynamique de l'exploitation de deux ports de la Grande Côte du Sénégal. Le sixième chapitre est consacré à l'évaluation du modèle. Nous essayons enfin, dans un septième chapitre, d'ouvrir quelques perspectives à partir des résultats obtenus.

Chapitre 1

Contextes de l'étude

1.1 Modèles couplant une ressource et son exploitation

L'halieutique ou "science de la pêche" peut être définie comme l'étude des interactions entre une ressource aquatique exploitée et la pêche. Un modèle sera une hypothèse sur le fonctionnement d'un système permettant de prévoir son évolution en réponse à une question précise (Charles-Dominique 1991, [25]).

Historiquement, la question est celle de la détermination de l'effort de pêche permettant d'obtenir des captures maximales de manière durable. Les modèles développés expriment alors l'état de la ressource conditionnellement à l'activité de pêche. Ils sont classés en deux grandes familles. Lorsque la ressource est décrite à l'aide d'une quantité (*ie* un effectif ou une biomasse) on parle de modèles globaux dont on trouvera une présentation détaillée dans Schnute (1977, [131]), Laurec et Le Guen (1981, [99]) ou Laloë et Samba (1989, [93]). Si l'on cherche à prendre en compte plus précisément les mécanismes biologiques du système, la ressource est décrite à l'aide de sous modèles de croissance et de mortalité. On parle alors de modèles analytiques (Laurec et Le Guen 1981, [99]; Laurec 1993, [97]).

Si B_t désigne la biomasse du stock au temps t , le modèle global décrit l'évolution du stock soumis à une pression de pêche f_t à l'aide de l'équation différentielle :

$$\frac{dB_t}{dt} = g(f_t, B_t). \quad (1.1)$$

Plusieurs formulations pour g ont été proposées (Pella et Tomlinson 1969, [109]; Garrod 1969, [56], Fox 1970, [51]) généralisant la forme initiale proposée par Graham (1935, [64]) et Schaefer (1954, [130]):

$$\frac{dB_t}{dt} = \underbrace{rB_t\left(1 - \frac{B_t}{B_v}\right)}_{\text{production}} - \underbrace{qf_tB_t}_{\text{capture}}. \quad (1.2)$$

Le taux instantané d'évolution de la biomasse s'exprime donc comme la différence entre un taux de production naturel (fonction des paramètres r et B_v , respectivement taux de croissance caractéristique de l'espèce et biomasse vierge¹) et le taux de capture (fonction de q , la capturabilité de la ressource par la pêche²). Lorsque l'effort de pêche est stationnaire (d'espérance f), l'espérance de la solution de l'équation (1.2) tend vers une valeur $B(f)$, appelée valeur de la biomasse à l'équilibre. On peut alors sous certaines hypothèses déterminer la valeur f_{MSY} qui maximise $B(f)$. Les captures étant supposées proportionnelles à la biomasse, on en déduit la réponse à la question posée. *MSY* est l'abréviation anglo-saxonne de maximum sustainable yields. C'est la capture maximale qui peut être prélevée de manière durable. Elle correspond à l'effort de pêche f_{MSY} . Ces modèles expliquent donc les résultats de la pêche (les captures) par son activité, supposée pouvoir être résumée par une seule quantité f_t . Cela suppose que l'effort de chaque unité de pêche puisse être exprimée en fonction d'une unité d'effort de référence. Les modèles globaux ont été adaptés pour maximiser non pas les captures mais le profit généré par la pêche (MEY pour maximum economic yield). D'autres adaptations concernent la prise en compte des conditions environnementales (Fréon 1986, [52]) ou l'existence d'une part de biomasse vierge restant inaccessible aux pêcheurs (Laloë 1988, [87]).

Ce type de modélisation peut être également abordé sous l'angle du contrôle optimal des captures ou des revenus de pêche par une variable contrôle: l'effort de pêche (Walters et Hilborn 1976, [146]). Une synthèse bibliographique réalisée par Lane (1992, [96]) recense un ensemble de travaux relatif à la modélisation d'une pêcherie en vue d'aborder le problème de son contrôle et de son aménagement.

Une étude critique de l'utilisation du modèle global est menée par Laloë (1995, [90]). Laloë et Samba (1989, [93]) soulignent l'un des points importants à savoir la manière dont est représenté l'effort de pêche. Lorsqu'une population marine est exploitée par des pêcheurs utilisant m modes de pêche ayant chacun une capturabilité q_j , f_t est en fait l'effort de pêche standardisé: $f_t = \sum_{j=1}^m \frac{q_j}{q_1} f_{j,t}$, où q_1 est la capturabilité d'un engin étalon.

1. Le terme biomasse vierge désigne l'effectif maximal que peuvent atteindre les effectifs de la ressource, compte tenu des capacités disponibles dans le milieu. Ce terme est également appelé capacité de charge du milieu (carrying capacity en anglais).

2. La capturabilité est la probabilité de capture d'une unité de biomasse lorsqu'on met en œuvre une unité d'effort.

Si plusieurs populations sont exploitées, alors :

- Lorsque les rapports $p_j = \frac{q_{ij}}{q_{i0}}$ ne dépendent pas de la population i , l'effort peut être standardisé : $f_t = \sum_{j=1}^m p_j f_{j,t}$
- Lorsque les rapports $\frac{q_{ij}}{q_{i0}}$ dépendent de la population considérée i et quand les efficacités relatives des méthodes de pêche considérées dépendent de la population, alors la définition d'un effort standardisé n'est plus possible.

Dans le second cas il apparaît alors nécessaire de comprendre, outre le déterminisme de la ressource, celui de l'activité de pêche. Hilborn (1985 [69]) constate que certaines crises observées dans les pêcheries peuvent avoir une autre origine que biologique. Soulignant l'incompréhension pouvant exister des pratiques de pêche, il indique que : *"the relationship between catch per effort and fish abundance require looking at both the fish and the fishermen"*. Une partie de la recherche halieutique est alors consacrée à la description de la dynamique propre à l'effort de pêche. (Hilborn et Ledbetter 1979, [70]; Laloë *et al.* 1981, [95]; Hilborn 1985, [69]; Murawski 1984, [107]; Biseau et Gondeaux 1988, [14]; Ferraris 1992 [49]; 1995 [45]; 1996 [46]). Cette orientation est résumée par Allen et McGlade (1986, [1]) pour qui la pêche est un système complexe dont il est important d'identifier les processus et leurs causes : *"fisheries management must move away from simply considering fish population and turn to models which include the behaviour of the fishermen as an intrinsic part of their structure"*.

Les modèles représentant la dynamique d'une exploitation halieutique ont d'abord été développés pour les régions de l'hémisphère nord. Dans ces régions, les pêcheries sont souvent spécialisées sur l'exploitation d'un petit nombre d'espèces (Pope 1979, [112]). Le cas des pêches artisanales tropicales est moins simple : *"Ces pêcheries sont réputées pour leur complexité, tant au niveau de la ressource (souvent des dizaines d'espèces exploitées simultanément) que du mode d'exploitation (nombreux engins, changements de techniques)." (Charles-Dominique 1991, [25]).* Les problèmes précédemment évoqués s'y avèrent d'autant plus cruciaux.

La description d'une pêcherie à l'aide d'un modèle prenant en compte l'existence d'une ressource et des modes de pêche multiples doit être basée sur une description des interactions liant les composantes par ailleurs identifiées de la pêcherie. (Laloë et Samba 1989, [93]). Ces auteurs distinguent deux types d'interactions :

- Les interactions affectant la ressource et la pêcherie: il s'agit d'une part des interactions spécifiques et d'autre part des interactions technologiques. Ces dernières recouvrent les différents niveaux d'exploitation de la ressource dues à des utilisations

différentes des techniques de pêche. Il existe également des interactions entre l'état de la ressource et l'emploi qui est fait par les pêcheurs des techniques à leur disposition.

- Des interactions faisant intervenir l'environnement et le contexte socio-économique. Si l'on définit le "système pêche" par la donnée deux sous-systèmes (une "pêcherie" et une "ressource") et de leurs relations, il n'en n'est pas moins vrai que ce système pêche peut être influencé par des éléments extérieurs, par exemple le contexte socio-économique ou le contexte environnemental.

Plusieurs modèles couplant la ressource et son exploitation ont ainsi été développés. Ceux-ci peuvent tenir compte de l'existence de plusieurs pratiques de pêche (Murawski et Finn 1986, [108]), de l'influence de la ressource et de facteurs socio-économiques sur le déterminisme de l'effort de pêche (Silvert et Dickie 1982, [136]; Allen et McGlade 1986, [1]; Hilborn et Walters 1987, [72]). Laurec *et al.* (1991, [?]) présentent un modèle où les unités de pêche, regroupées suivant des flottilles ont le choix entre plusieurs "métiers". Le principe de ce modèle est voisin de celui développé par Laloë et Samba (1989, [93]; 1991, [94]) dans le cadre de la pêche artisanale sénégalaise où les unités de pêche déterminent leur effort de pêche en se répartissant suivant des "tactiques de pêche" en fonction des conditions de l'exploitation.

Les modèles couplant une ressource et son exploitation tentent d'intégrer le déterminisme de l'effort de pêche à la représentation d'un "système pêche" décrit par deux éléments (une ressource et une pêcherie) en interaction entre eux et avec l'"extérieur". Ces modèles sont certainement plus en phase avec la réalité des pêcheries artisanales tropicales que ne le sont des modèles plus "classiques". Mais alors, la gamme de questions en relation avec ces modèles est beaucoup plus riche que le questionnement initial (Stephenson et Lane 1995, [138]).

1.2 Présentation de la pêche artisanale sénégalaise

Débarquant près de 250000 tonnes en 1991, soit près des 2/3 des débarquements totaux, la pêche artisanale joue un rôle de tout premier plan dans l'économie nationale : elle est un des trois premiers secteurs d'activité économique du Sénégal et fait vivre directement ou indirectement quelque 10 % de la population³ pour environ 35 000 pêcheurs. Cette activité, qui existait antérieurement à l'arrivée des premiers navigateurs portugais au XV^{ème} siècle (Chauveau 1984, [27]), a de tout temps fait preuve d'un très grand dynamisme. Comme le soulignent Chauveau et Samba (1989, [28]) : *"La pêche artisanale maritime sénégalaise*

3. Le Sénégal comptait en 1996 près de 7.9 millions d'habitants pour une superficie de 190 000 kilomètres carrés.

revêt une importance économique et sociale tout à fait particulière dans ce pays mais aussi à l'échelle du continent africain”.

La côte sénégalaise s'étend sur près de 400 km (figure 1.1). On distingue la Grande Côte au nord de la presqu'île du Cap-Vert de la Petite Côte située au sud. Les eaux sénégalaises renferment un ensemble très varié d'espèces marines dont on trouvera une description dans Laloë et Samba (1989, [93]). Le climat est rythmé par l'alternance d'une saison chaude (juin à octobre) et d'une saison froide (novembre à mai). Cette dernière est déclenchée par l'upwelling ie l'apparition fin octobre-début novembre des vents alizés qui, chassant la couche d'eau superficielle, font remonter des eaux profondes plus froides et plus riches en nutriments (Laloë et Samba 1989, [93]; Roy 1991, [120]).

La pêche artisanale est pratiquée tout le long du littoral sénégalais. Laloë et Samba (1989, [93], chapitre I) décrivent ainsi les embarcations utilisées par les pêcheurs artisans : *“Sur l'ensemble de la côte, les unités de pêche utilisées sont constituées par un élément central permanent, la pirogue, et par des engins de pêche pouvant être individuels comme la ligne à la main ou collectifs comme les filets tournants. La pirogue est une embarcation en bois, dont la quille est généralement taillée dans un tronc d'arbre sur lequel sont rajoutées des bordées. Les extrémités sont prolongées par des éperons servant de brise lames en mer et de balanciers à terre pour la remontée de la pirogue sur la plage. Ces pirogues ont des longueurs variant entre 4 et 18 mètres et sont pour la plupart équipées de moteurs hors bord [...]. Les formes et tailles des pirogues sont fonction de la zone d'évolution et du type de pêche pratiqué.”.*

La pêche artisanale est caractérisée par la diversité des modes de pêche employés par les unités de pêche. Ceci recouvre non seulement les techniques de pêche, mais aussi les utilisations qui en sont faites. Cette diversité va de pair avec une grande capacité de pêcheurs à s'adapter aux conditions de l'exploitation (environnementales, économiques, politiques ...). Enfin, une composante du dynamisme de la pêche artisanale réside également en la capacité qu'ont les pêcheurs artisans à développer de nouveaux modes d'exploitation de la ressource.

1.3 Présentation du système d'enquête

La collecte des données utilisées dans notre étude a débuté au début des années 1970. Même si les emplois qui ont pu être faits de ces données ont évolué suivant les problèmes auxquels on s'est intéressé (Laloë 1992, [88]; Morand et Ferraris 1997, [106]), le principe général de la collecte est resté le même depuis sa mise en place (Ferraris *et al* 1993a,

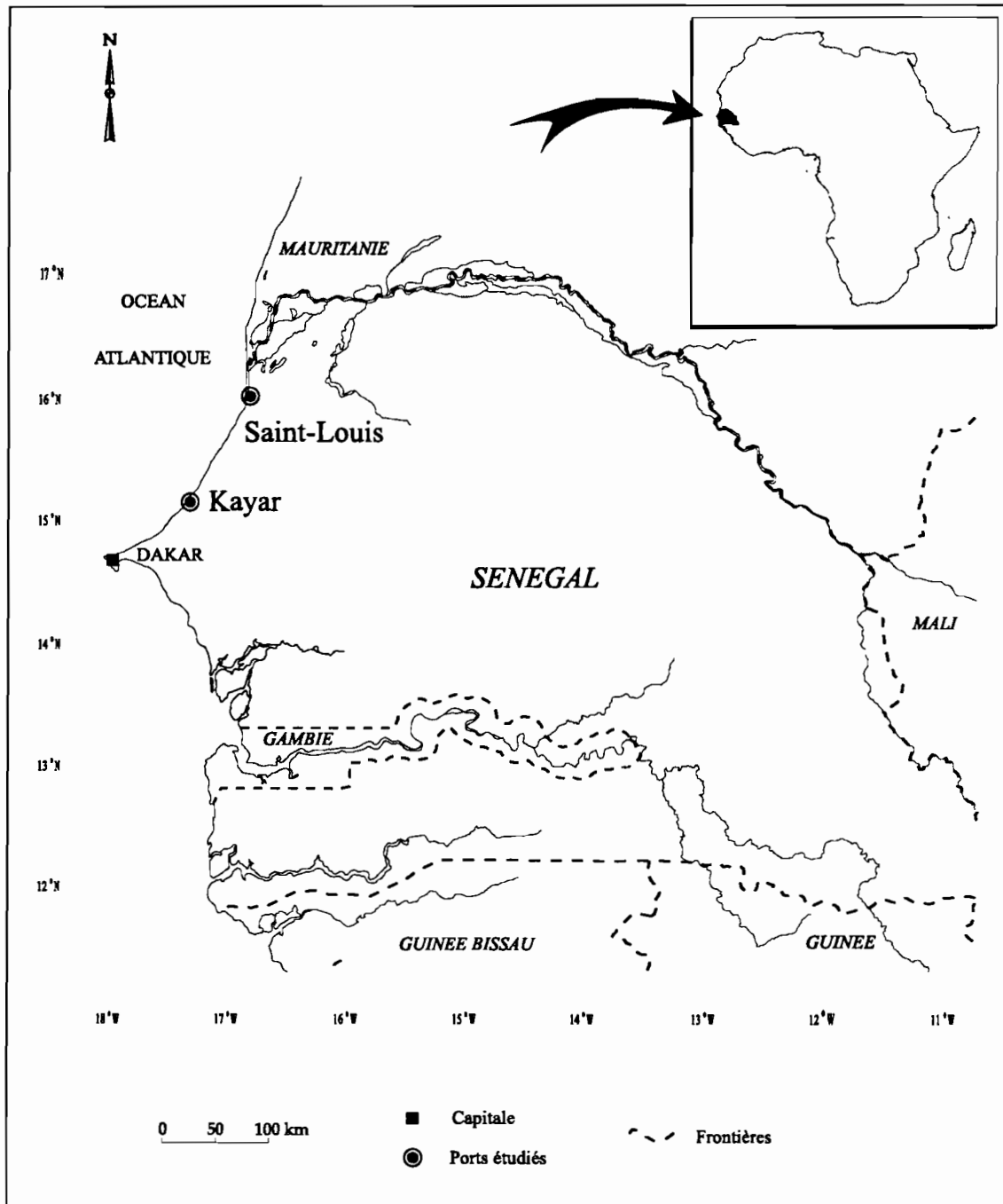


FIG. 1.1 – Situation géographique de la zone d'étude. Réalisation : Barbara Chollet.

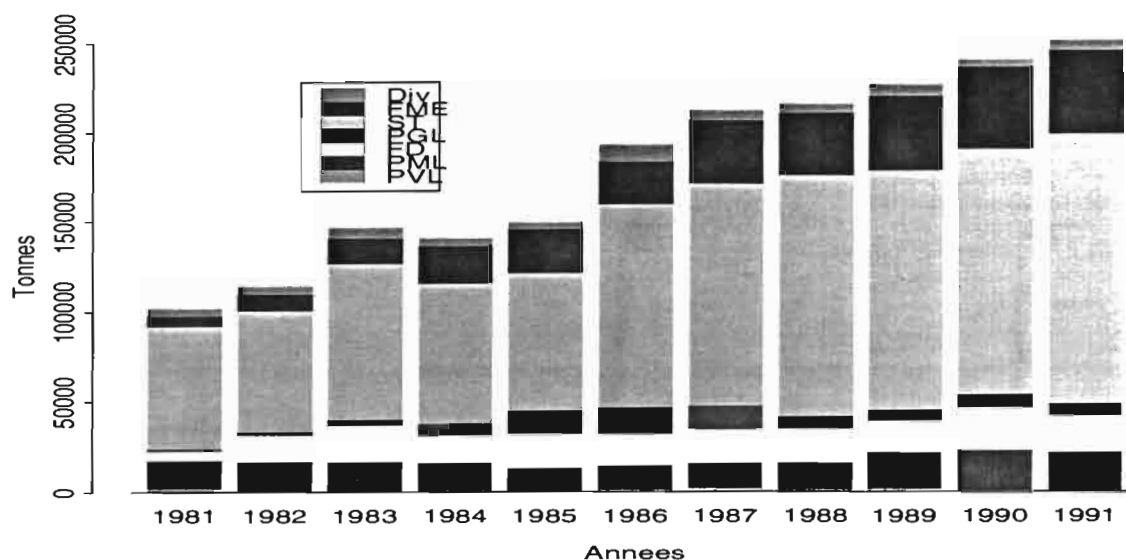


FIG. 1.2 - Débarquements de la pêche artisanale sénégalaise par type d'engin pour les années 1981 à 1991 (d'après Ferraris 1992, [44]). Div = divers, FME= filets maillants encerclants, ST= sennes tournantes, PGL= pirogues lignes glacières, FD= filets dormants, PML= pirogues motorisées lignes; PVL= pirogues voiles lignes.

[47]). L'objectif principal est l'estimation des débarquements de la pêche artisanale. Ceux-ci concernent près de 200 espèces marines (Ferraris *et al* 1993a, [47]) et se déroulent dans près de 82 points de débarquements du littoral sénégalais (Anonyme 1982, [2]).

En l'absence de criées et de traces écrites, il a été choisi d'estimer ces quantités à partir d'un échantillonnage des débarquements de pêche (Laloë et Samba 1989, [93]). La procédure d'échantillonnage a été décrite dans Anonyme (1982, [2]), Laloë et Samba (1989, [93]), Gérard *et al* (1991, [10]), Ferraris *et al* (1993a, [47]). Plusieurs études critiques de la procédure ont été réalisées (Laloë *et al* 1981, [95]; Destanques 1982, [34]; Laloë 1985, [86]; Gérard 1985, [61]; Gérard et Gréber 1985, [65]; Laloë et Samba 1989, [93]; Gérard *et al* 1991, [10]; Laloë 1992, [88]), et un document recense l'ensemble des données disponibles ainsi que leur structuration (Ferraris *et al* 1993b, [48]).

Le plan d'échantillonnage mis en place (figure 1.3 et tableau 1.1) est un plan stratifié: lieu de débarquement \times type de pêche⁴ \times quinzaine. Pour une strate, la population parmi

4. Les strates contenaient initialement 7 types de pêche (pirogue ligne voile, pirogue ligne moteur, pirogue ligne glacière, filet dormant, senne tournante, filet maillant encerclant et divers), ce nombre a été

TAB. 1.1 – Couverture spatiale et temporelle du système de collecte de statistiques de pêche artisanale (d'après Ferraris 1993a, [47])

Port	Début	Moyens		Enquêtes débarquements	Enquêtes efforts
		Enquêteurs	Aides de plage		
Saint-Louis	1974	1	2	5 jours/semaine	6 jours / semaine
Kayar	1974	1	2	5 jours/semaine	6 jours/semaine
Yoff	1979	1	2	2 jours/semaine	6 jours/semaine
Ouakam	1982	1	0	5 jours/semaine	2 jours/semaine
Soumbédioune	1976	1	2	2 jours/semaine	6 jours/semaine
Hann	1981	1	2	2 jours/semaine	6 jours/semaine
Mbour	1981	2	0	5 jours/semaine	6 jours/semaine
Joal	1982	2	0	5 jours/semaine	6 jours/semaine
Pointe Sarène	1988	1	0	5 jours/semaine	6 jours/semaine

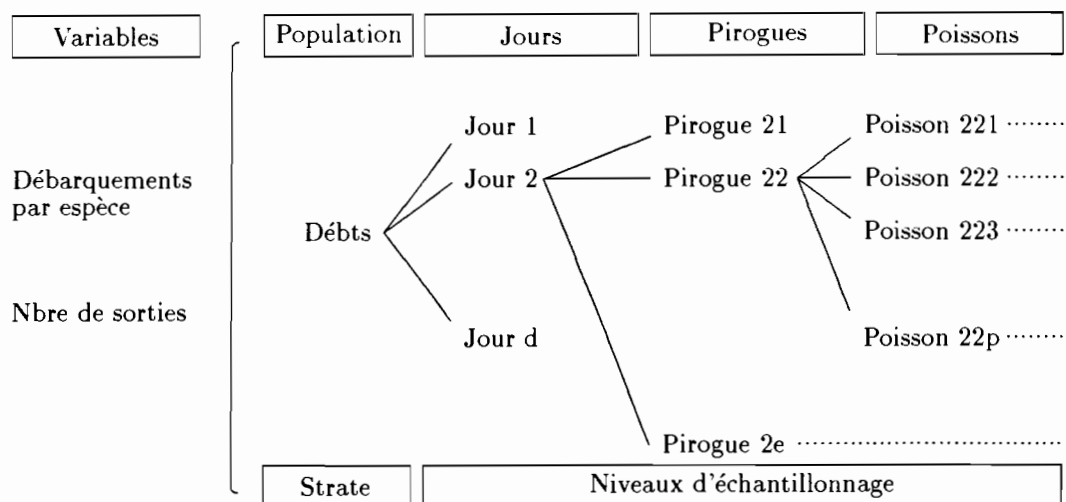
laquelle on échantillonne est constituée de l'ensemble des débarquements. Seulement, il est matériellement impossible d'effectuer un échantillonnage aléatoire simple parmi cette population. En effet, les débarquements ont lieu chaque jour et sont effectués par les pirogues au retour de leur sortie de pêche, ces pirogues vendant leur production dès leur arrivée sur la plage.

Le plan a donc été conçu suivant plusieurs niveaux d'échantillonnage. Il peut y avoir deux ou trois niveaux suivant que l'estimation de la capture d'une pirogue est faite en dénombrant tout (ou partie) de la capture et en mesurant les individus⁵ ou que l'on estime "à vue" cette capture.

porté à 24 en 1985 (pirogue ligne voile, pirogue ligne moteur (< 12 cv), pirogue ligne moteur (> 12 cv), pirogue ligne glacière, filet dormant général, senne tournante, filet maillant encerclant, senne de plage, ligne rhinobatos, ligne casier seiche, ligne traine, palangre, épervier, barrage, filet maillant dérivant de surface à ethmalose, filet maillant dérivant de surface à mullet, filet maillant dérivant de fond, filet maillant dérivant de fond à trachinote, filet dormant à poisson, filet dormant à sole, filet dormant à ethmalose et à sardinelle, filet dormant à langouste, filet dormant à yett, pêche sous-marine). On trouvera une description de ces engins dans Seck (1980, [135]), Laloë et Samba (1989, [93]) et Bouso (1994, [15]).

5. L'estimation du poids d'un individu est obtenue à partir de celle de sa longueur en utilisant une relation taille -poids caractéristique de l'espèce (cf Laurec et Le Guen 1981, [99])

FIG. 1.3 – Schéma du plan d'échantillonnage



Les unités primaires sont constituées des jours de la période pendant lesquels les enquêtes seront menées (la quinzaine). Les unités secondaires sont les pirogues échantillonnées durant une journée d'enquête, parmi l'ensemble des pirogues débarquant ce jour là. Les unités tertiaires sont les poissons dans la pirogue échantillonnée parmi l'ensemble des poissons s'y trouvant (dans le cas où la capture est estimée à vue, il n'y a pas d'unités tertiaires).

Si l'on émet l'hypothèse qu'à chaque étape les sélections sont réalisées suivant une procédure d'échantillonnage aléatoire simple, alors on dispose d'estimateurs des captures par espèce pour chacune des strates du plan (Laloë 1985, [86]; Laloë et Samba 1989, [93]).

Ces estimateurs nécessitent la connaissance des effectifs de chacun des niveaux que l'on considère. Ainsi, si l'on estime le poids de certains des poissons débarqués par la pirogue, la connaissance du nombre de poissons débarqués nous permettra d'estimer la capture de la pirogue. De même, la connaissance du nombre de pirogues ayant débarqué nous permettra, à partir de l'estimation des débarquements des pirogues échantillonnées, d'estimer les débarquements du jour. A partir des débarquements obtenus les jours d'enquête, on estimera les débarquements pour une période de temps. Une seconde enquête est donc menée afin d'estimer par type d'engin le nombre de pirogues débarquant dans une journée (estimation de ce qui est communément appelé effort de pêche). Le déroulement de ces enquêtes est adapté aux lieux de débarquements et une description en est faite dans Anonyme (1982, [2]), Ferraris (1993a, [47]).

Laloë et Samba (1985, [86]; 1989, [93]) décrivent les types d'erreurs (tableau 1.3) commises lors de l'échantillonnage et les difficultés pouvant engendrer le non respect des règles

d'échantillonnage. Ils distinguent deux types d'erreurs liées à l'estimation du nombre de sorties par type d'engin et à l'échantillonnage d'une pirogue. Dans ce dernier cas, les erreurs commises sont les erreurs systématiques lors de la mesure des poissons ou de l'estimation à vue du débarquement. Quand les débarquements sont estimés à vue les auteurs soulignent l'existence d'un biais dû à l'enquêteur (un enquêteur peut par exemple avoir tendance à surestimer les poids des tas de poissons).

D'après le plan qui a été défini, les unités devraient à l'intérieur de chaque niveau d'échantillonnage être sélectionnées suivant un échantillonnage aléatoire simple et sans remise. La sélection des jours d'enquête ne pose pas trop de problème si l'on excepte le fait que les jours de repos des enquêteurs ainsi que les jours fériés ne sont pas couverts. Le problème le plus important se situe au niveau de la sélection des pirogues dans la journée. En effet, Laloë *et al* (1981, [95]) ont mis en évidence l'existence d'une structure dans les débarquements. Cette structure est spatiale (souvent l'endroit de la plage où débarquent les pirogues dépend du type de pêche qu'elles ont pratiqué), mais aussi temporelle (suivant le type de pêche que l'on pratique on ne va pas pêcher aux mêmes endroits et aux mêmes heures, donc on ne débarquera pas au même moment). D'autre part, les auteurs soulignent que durant l'enquête d'une pirogue toutes celles qui débarquent au même lieu ont une probabilité nulle d'être sélectionnées (il y a généralement un enquêteur par plage).

Afin d'estimer les débarquements de l'ensemble de la pêche artisanale maritime sénégalaise, les résultats obtenus au niveau des centres enquêtés sont extrapolés en utilisant le recensement des pirogues effectué sur l'ensemble du littoral sénégalais (PECHART 1982, [2]; Laloë et Samba 1989, [93]) pour chaque saison (un premier recensement a lieu au mois d'avril *ie* durant la saison froide et un second en septembre *ie* durant la saison chaude). Pour ce faire la côte est découpée en plusieurs régions. Pour chaque région la capture réalisée au cours d'une saison est estimée par

$$P_{ekrs} = C_{ekrs} \frac{U_{ers}^t}{U_{ers}}$$

où P_{ekrs} est la capture totale de l'espèce k par l'engin e durant la saison s dans la région r , C_{ekrs} est la capture totale de l'espèce k par l'engin e durant la saison s dans les ports enquêtés de la région r . $\frac{U_{ers}^t}{U_{ers}}$ est le facteur d'extrapolation égal au rapport entre le nombre total de pirogues actives dénombrées lors du recensement et le nombre total de pirogues estimées au cours des enquêtes.

TAB. 1.2 – *Récapitulatif des diverses valeurs estimées à partir du plan d'échantillonnage (d'après Laloë 1985, [86])*

Niveau	Variable	Cas	Hypothèses
Poisson	L_u longueur d'un poisson u		
Poisson	$P_{k,u}$ poids d'un poisson u de l'espèce k		Il existe une relation taille-poids caractéristique de l'espèce paramétrée par (a_k, b_k)
Pirogue	C_k débarquements de l'espèce k	On connaît le nombre M_k de poissons de l'espèce k débarqués, et on en échantillonne m_k	Les erreurs de mesure sont indépendantes et les poissons sont échantillonnés au hasard
Pirogue	C_k débarquements de l'espèce k	On ignore le nombre de poissons de l'espèce k débarqués par la pirogue	L'estimation par l'enquêteur d'un tas T de poissons recouvre une erreur systématique ϵ centrée et de variance σ_ϵ^2 et une erreur propre à l'enquêteur de moyenne ΔT et de variance σ_Δ^2 . Les deux types d'erreurs sont indépendantes
Journée	$N_{d,e}$ Nombre de sorties de pirogues ayant utilisé l'engin e durant la journée d		
Journée	Débarquements de l'espèce k par les unités de pêche ayant utilisé l'engin e durant la journée d	On a échantillonné $n_{d,e}$ pirogues dont $n_{1,d,e}$ à vue	Les pirogues échantillonnées ont été tirées au hasard
Période	$N_{e,P}$ Nombre de sorties correspondant à l'utilisation de l'engin e durant la période P	Les efforts de pêche sont estimés pendant les $ P $ jours de la période P	Les estimateurs d'efforts quotidiens sont indépendants
Période	$C_{e,k}$ Débarquements de l'espèce k réalisée par les unités de pêche ayant employé l'engin e	et toutes les enquêtes sont effectuées par le même enquêteur	\hat{P}_{dkv} est la part estimée à vue et \hat{C}_{dkv} est la quantité correspondante de l'espèce k le jour d . Les estimateurs des captures sont indépendants
Période	$C_{e,k}$ Débarquements de l'espèce k réalisés par les unités de pêche ayant employé l'engin e	et toutes les enquêtes ne sont pas effectuées par le même enquêteur durant $ P_e $ jours d'enquêtes des débarquements	$\sigma_{N_{e,P}}^2 = 0$ si les efforts de pêche sont supposés connus avec exactitude
Période	$N_{e,P}$ Nombre de sorties correspondant à l'utilisation de l'engin e durant la période P	Les efforts de pêche ne sont estimés que pour les $ P_e $ jours d'enquête	Les estimateurs des efforts quotidiens sont indépendants
Période	$C_{e,k}$ Capture de l'espèce k réalisée par les unités de pêche ayant employé l'engin e	et toutes les enquêtes sont effectuées par le même enquêteur	$\sigma_{N_{e,P}}^2 = 0$ si les efforts de pêche sont supposés connus avec exactitude
Période	$C_{e,k}$ Capture de l'espèce k réalisée par les unités de pêche ayant employé l'engin e	et toutes les enquêtes ne sont pas effectuées par le même enquêteur	$\sigma_{N_{e,P}}^2 = 0$ si les efforts de pêche sont supposés connus avec exactitude

Estimateur	Biais	Variance
$\widehat{L}_u = \text{Mesure}$	0	-
$\widehat{P}_{k,u} = a_k(\widehat{L}_u + 0.5)^{b_k}$	0	$\widehat{\sigma}_{P_{k,u}}^2 = \left(\frac{b_k}{100} \widehat{P}_{k,u}\right)^2$
$\widehat{C}_k = \frac{M_k}{m_k} \sum_{u=1}^{m_k} \widehat{P}_{k,u}$	0	$\widehat{\sigma}_{C_k}^2 = \frac{M_k}{m_k} \left(\frac{M_k - m_k}{m_k - 1} \sum_{u=1}^{m_k} (\widehat{P}_{u,k} - \widehat{P}_k)^2 + \sum_{u=1}^{m_k} \widehat{\sigma}_{P_{k,u}}^2 \right)$
Estimation à vue	$C_k \Delta$	$\widehat{\sigma}_{C_k}^2 = (\sigma_e^2 + \sigma_\Delta^2) \widehat{C}_k^2$
Comptage	0	$\widehat{\sigma}_{N_{d,e}}^2 = 0.01 \widehat{N}_{d,e}^2$
$\widehat{C}_{d,e,k} = \frac{\widehat{N}_{d,e}}{n_{d,e}} \sum_{p=1}^{n_{d,e}} \widehat{C}_{k,p}$	$\Delta \frac{\widehat{N}_{e,k}}{n_{d,e}} \sum_{p=1}^{n_{d,e}} C_{k,p}$	$\widehat{\sigma}_{C_{d,e,k}}^2 = \frac{\widehat{N}_{d,e}(\widehat{N}_{d,e} - n_{d,e})}{n_{d,e}} + \sum_{p=1}^{n_{d,e}} \frac{(\widehat{C}_{d,e,p} - \widehat{C}_{d,e,k})^2}{n_{d,e} - 1} + \frac{\widehat{N}_{d,e}}{n_{d,e}} \sum_{i=1}^{n_{d,e}} \sigma_i^2$
$\widehat{N}_{e,P} = \sum_{d=1}^{ P } \widehat{N}_{d,e}$	0	$\sum_{d=1}^{ P } \widehat{\sigma}_{N_{d,e}}^2$
$\widehat{C}_{e,k} = \widehat{N}_{e,P} \left(\frac{\sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{C}_{d,e,k}}{\sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{N}_{d,e}} \right)$	$\Delta \frac{\widehat{N}_{e,P}}{\sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{N}_{d,e}} \sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{C}_{v,d,k}$	$\frac{ P ^2}{ P_e } \left(1 - \frac{ P_e }{ P } \right) \sum_{d=1}^{ P_e } \frac{\widehat{N}_{e,d}^2 (\widehat{C}_{e,k,d} - \widehat{C}_{e,k})^2}{(P_e - 1)} + \frac{ P }{ P_e } \sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{\sigma}_{e,d,k}^2 + \sigma_\Delta^2 \left(\widehat{N}_{e,P} \sum_{d=1}^{ P_e } \frac{\widehat{P}_{v,d,k}}{\sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{N}_{d,e}} \right)^2$
$\widehat{C}_{e,k} = \widehat{N}_{e,P} \left(\frac{\sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{C}_{d,e,k}}{\sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{N}_{d,e}} \right)$	0	$\frac{ P ^2}{ P_e } \left(1 - \frac{ P_e }{ P } \right) \sum_{d=1}^{ P_e } \frac{\widehat{N}_{e,d}^2 (\widehat{C}_{e,k,d} - \widehat{C}_{e,k})^2}{(P_e - 1)} + \frac{ P }{ P_e } \sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{\sigma}_{e,d,k}^2$
$\frac{ P }{ P_e } \sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{N}_{d,e}$	0	$\left(\frac{ P }{ P_e } \right)^2 \sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{\sigma}_{N_{e,d}}$
$\frac{ P }{ P_e } \sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{C}_{d,e,k}$	0	$\frac{ P }{ P_e } \left((P - P_e) \sum_{d=1}^{ P_e } \frac{(C_{e,d,k} - \widehat{C}_{e,k})^2}{ P_e - 1} + \sum_{d=1}^{ P_e } \sigma_{d,e,k}^2 + \sigma_\Delta^2 \widehat{P}_{v,d,k} \right)$
$\frac{ P }{ P_e } \sum_{d=1}^{ P_e } \widehat{C}_{d,e,k}$	0	$\frac{ P }{ P_e } \left((P - P_e) \sum_{d=1}^{ P_e } \frac{(C_{e,d,k} - \widehat{C}_{e,k})^2}{ P_e - 1} + \sum_{d=1}^{ P_e } \sigma_{d,e,k}^2 \right)$

Nous terminerons cette brève présentation du système de collecte des données en soulignant qu'il représente un compromis entre les moyens humains disponibles et les informations diverses (captures par type de pêche et par espèce pour plusieurs lieux de débarquements et les efforts de pêche associés) qui sont recherchées. A ce titre et comme souligné par Laloë et Samba (1989, [93]): “... le système de collecte conduit à un très grand nombre d'estimations (par espèce, par engin, par centre de débarquement, par période) et il n'est guère possible d'en hiérarchiser "l'intérêt", et donc d'établir un critère général d'optimisation du plan d'enquête”

1.4 Discussion

La dynamique de l'exploitation de la pêche artisanale sénégalaise a d'abord été abordée dans le cadre d'études monospécifiques sur la biologie des principales espèces exploitées par les pêcheurs artisans (Samba 1995, [126]). C'est initialement pour de telles études qu'a été mis en place le système de collecte de données relatives aux efforts et aux débarquements de la pêche artisanale que nous utiliserons dans notre étude.

Seulement, les auteurs ont mis en évidence l'existence de variabilités intrastrates : “Ainsi, à Kayar en avril 1978, au cours d'une opération de suréchantillonnage menée pendant six jours consécutifs, l'activité des pirogues lignes (environ 400 sorties par jour) est caractérisée par un report massif d'effort du tassergal (espèce semi-pélagique pêchée sans ancrer l'embarcation) vers des espèces démersales (pêchées après avoir ancré la pirogue). La capture moyenne de tassergal est passée en trois jours de 25 kg à 250 g! L'examen des résultats indique que cette évolution de la capture du tassergal peut s'interpréter en un premier temps par une diminution de la capture de tassergal réalisée par les pêcheurs qui recherchent cette espèce, diminution accentuée par la suite par un abandon de cette recherche au profit de celle d'espèces démersales” (Laloë 1991 [88]). Dès lors, l'existence de telles variabilités rend impossible l'attribution aux ligneurs d'une gamme de mortalités envers les espèces qu'ils exploitent, puisque en changeant de mode de pêche, les unités peuvent modifier les mortalités effectives. C'est le problème du lien entre ce qui est appelé l'effort nominal ie le nombre de pêcheurs ayant pêché à la ligne et ce qui est dénommé effort effectif ie les mortalités infligées par ces pêcheurs aux espèces (voir pour une présentation de ce problème Laloë 1993, [89]).

Dans un tel contexte la question ne peut plus être celle de fixer l'effort de pêche à un niveau (ie en décrétant un effort nominal) qui permettrait d'“optimiser” l'exploitation. Cet état de fait a conduit les auteurs à s'intéresser aux causes des changements des comportements de pêche des unités de la pêche artisanale sénégalaise, étant donné que: “la

disponibilité de la ressource n'explique pas à elle seule la décision de sortir ou les succès d'une sortie de pêche" (Samba 1995, [126]).

Si les résultats des enquêtes qui sont effectuées ne peuvent être appréhendés sous l'angle réducteur "les captures sont le reflet direct de la ressource", elles n'en constituent pas moins un aperçu de l'activité de l'exploitation. Nous savons que cet aperçu qui nous est disponible est partiel, gommant certains aspects fondamentaux de l'activité de la pêche : d'une part la collecte des données n'a pas initialement été conçue pour étudier la dynamique de l'exploitation mais celle de la ressource, et d'autre part il serait peut-être difficile concrètement sur le terrain de procéder autrement. Nous allons donc maintenant, sachant ce contexte, chercher à caractériser nos données en en faisant une analyse descriptive. C'est l'objet du second chapitre.

Chapitre 2

Caractériser et synthétiser

L'analyse exploratoire de nos données a pour but la recherche des principales sources de variabilité affectant les observations ainsi que la description des relations entre les variables estimées à l'aide du plan d'échantillonnage. Notre objet n'est pas ici une présentation des méthodes qui pourraient être utilisées mais l'application de l'une d'entre elles à notre cas (on trouvera dans Prodon et Lebreton (1994, [113]) une revue générale de ce type d'approche dans le cas des relations espèces-milieu).

Pour reprendre le vocabulaire propre à l'analyse des données, les unités statistiques ou individus correspondront ici aux strates du plan d'échantillonnage et les variables seront les descripteurs estimés pour chacune des strates (*ie* les efforts de pêche, les captures par espèce, ou encore les captures par espèces et par unité d'effort). Bien entendu, il ne peut s'agir ici d'étudier la variabilité intrastrate (puisque l'on dispose d'une valeur par variable et par strate). Ce type d'étude a par ailleurs été mené pour essayer de caractériser la nature des actions de pêche mises en œuvre par les pêcheurs artisans (Laloë *et al* 1981, [95]; Ferraris 1992, [49]; 1995, [45]; 1996, [46]).

Puisque les observations sont structurées par le plan d'échantillonnage (*ie* les engins, les lieux de débarquement, les quinzaines et donc les années), nous nous sommes orientés vers des méthodes, telle l'ACPVI (analyse en composantes principales sur variables instrumentales), permettant l'analyse de nos variables d'intérêt conditionnellement aux variables stratifiant le plan d'échantillonnage. Nous présentons maintenant une analyse de ce type dans le cas des captures par unité d'effort réalisées par les pêcheurs à la ligne à Saint-Louis et à Kayar de 1975 à 1991.

Use of Principal Component Analysis with Instrumental Variables (PCAIV) to analyse fisheries catch data

Nicolas Pech and Francis Laloë



Pech, N., and Laloë, F. 1997. Use of Principal Component Analysis with Instrumental Variables (PCAIV) to analyse fisheries catch data. – ICES Journal of Marine Science, 54: 32–47.

Principal Component Analysis with respect to Instrumental Variables (PCAIV) is a statistical tool for exploratory analysis combining both principal component analysis and multivariate regression analysis. This tool is used to analyse mean fortnightly catches obtained by Senegalese fishermen in two ports from 1975 to 1991. The aim of the study is to identify significant sources of variation and to present separately the impact of each of them. These descriptions are used to characterize the initial data.

© 1997 International Council for the Exploration of the Sea

Key words: principal component analysis, multivariate analysis of variance, instrumental variables, selection of models.

Received 28 June 1995; accepted 22 May 1996.

N. Pech and F. Laloë: Centre ORSTOM, HEA, B.P. 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France.

L'Analyse en Composantes Principales sur Variables Instrumentales (ACPVI) est un outil statistique d'analyse exploratoire faisant intervenir l'analyse en composantes principales et l'analyse de régression multivariée. Cet outil est utilisé ici pour l'analyse d'estimations bimensuelles de rendements de pêche réalisés par les pêcheurs artisans Sénégalais dans deux ports de 1975 à 1991. L'objet de notre étude est d'identifier des sources de variation influentes en présentant séparément l'impact de chacune d'entre elles. Ces descriptions seront ensuite utilisées afin de former une synthèse des données initiales.

© 1997 International Council for the Exploration of the Sea

Mots clés: analyse en composantes principales, analyse de variance multivariée, variables instrumentales, sélection de modèles.

Introduction

The Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye (CRODT) of the Institut Sénégalais de Recherche Agricole (ISRA) has been collecting data for at least 20 years on the artisanal fishery along the coast of Senegal, using a consistent sampling design (Gérard and Greber, 1985; Laloë, 1985). The objective of this system is to obtain fishing effort and catch data used for stock assessment purposes. In this design, data are collected within strata defined by combinations of gears, fortnights¹ and ports of landing.

While stock assessments are generally done on a single species basis, questions concerning biological and

technical interactions (the latter include the “effort allocation problem”, see Laurec *et al.*, 1991) require multi-species approaches. To that end, data from individual fishing trips are usually analysed using multivariate methods and cluster analysis to build up typologies of fishing units or typologies of “métiers” (Murawski *et al.*, 1983; Biseau and Gondeaux, 1988). In our experience (Gérard and Greber, 1985; Laloë and Samba, 1990; Samba and Laloë, 1991; Ferraris and Samba, 1992), such analyses of these kinds of data clearly indicate the existence, even within the use of a particular gear, of different “tactics” (Laloë and Samba, 1990) or “métiers” (Laurec *et al.*, 1991) or “technotopes” (Fay, 1994). In addition, the fishermen may take information from the “environment” into account in order to decide which “métier” to use (Garrod, 1973; Hilborn, 1985; Allen and MacGlade, 1986; Laurec *et al.*, 1991; Laloë and

¹Fortnight is defined here as “half a month”, thus there are 24 fortnights in a year.

Table 1. Fish species mainly caught by hand-line in Senegalese fishery, with code numbers used on the figures in this paper. Ouolof is one of the national languages of Senegal

Code	Scientific name	English name	Ouolof name
1	<i>Pomatomus saltatrix</i>	Bluefish	Ngott
2	<i>Pagrus caeruleostictus</i>	Blue spotted seabream	Kibaro naar
3	<i>Decapterus rhonchus</i>	False scad	Diaï
4	<i>Epinephelus aeneus</i>	White grouper	Thiof
5	<i>Euthymus alletteratus</i>	Little tuny	Oualass
6	<i>Pagellus bellotti</i>	Red pandora	Youfouf
7	<i>Arius latisculatus</i>	Rough-head sea catfish	Dakak
8	<i>Alectis alexandrinus</i>	Alexandria pompano	Yawal
9	<i>Trichurus lepturus</i>	Largehead hairtail	Tallar
10	<i>Epinephelus guaza</i>	Dusky sea perch	Kauthieu
11	<i>Pseudotilapia senegalensis</i>	Cassava croaker	Feute
12	<i>Rhinobato</i> spp.	Guitarfish	Thiaukher
13	<i>Argyrosomus regius</i>	Meagre	Seukhebi
14	<i>Sphyrna</i> spp.	Sharks	Gaïndé Guédj
15	<i>Epinephelus goreensis</i>	Dungat grouper	Doï
16	<i>Lagocephalus laevigatus</i>	Smooth puffer	Boun fokï
17	<i>Sarda sarda</i>	Atlantic bonito	Oual
18	<i>Dentex canariensis</i>	Canary dentex	Kibaro ngokh
19	<i>Diversus ienaplenus</i>	Various	Ndiakhas
20	<i>Coryphaena hippurus</i>	Common dolphinfish	Ndiakhsine
21	<i>Istiophorus albicans</i>	Atlantic sailfish	Dieunou dong
22	<i>Mustelus mustelus</i>	Smooth hound	Mâne
23	<i>Brotula barbata</i>	Bearded brotula	Mori
24	<i>Octopus vulgaris</i>	Common octopus	Yaranka
25	<i>Dentex macrophthalmus</i>	Large eye dentex	Mbagne mbagnère

Samba, 1991); the term environment here refers to the environment experienced by the fish as well as that experienced by the fishermen (Fréon, 1986; Cury and Roy, 1988, 1991; Samba and Laloë, 1991).

While the time series of mean catches for a single species may simply reflect changes in abundances as is usually assumed, these changes may also be due to many other sources of variation and interactions. Therefore, we need tools to partition out these sources of variation. In this paper, we present an application of principal component analysis with respect to instrumental variables (PCAIV: Rao, 1964; Inzenman, 1980; Sabatier

et al., 1989; Lebreton *et al.*, 1991) to partition the sources of variation in the Senegalese landings data for handlines. This method combines features of the more familiar methods of multivariate regression analysis and principal component analysis (PCA). The partitions identified herein correspond to inter-annual variation, intra-annual variation, variation of port of landing and the interactions between all of these. Our approach emphasizes the use of graphics.

Materials and methods

Data

For our analysis we used data extracted from the CRODT data base (Ferraris *et al.*, 1993), consisting of mean catches of fish from handlines on daily trips and landed in one of two ports (Saint-Louis and Kayar). These catch data are given by species and by fortnight from 1975 to 1991. The 25 species that we considered are listed in Table 1. In our analysis the data were in matrix form Z , with 816 rows and 25 columns, where each column (or variable) represents a species and each of the 816 rows (2 ports \times 17 years \times 24 fortnights) contains the catch by species. Based on empirical evidence of skew, we transformed the data with the logarithmic function ($Y = \log(Z+1)$). Moreover, Y has been centred and scaled in columns, so that the mean of each column is zero with variance equal to one.

Table 2. Decomposition of the inertia according to orthogonal subspaces induced by instrumental variables. This variability is expressed in terms of inertia (see Appendix 1) which is the multivariate expression of the variance.

Source of variation	Degree of freedom	Inertia	Inertia df
Port	1	1.87	1.87
Year	16	2.98	0.19
Fortnight	23	4.89	0.21
Port \times year	16	1.33	0.08
Port \times fortnight	23	2.25	0.10
Year \times fortnight	368	6.56	0.02
Year \times port \times fortnight	368	5.12	0.01
Total	815	25	0.03

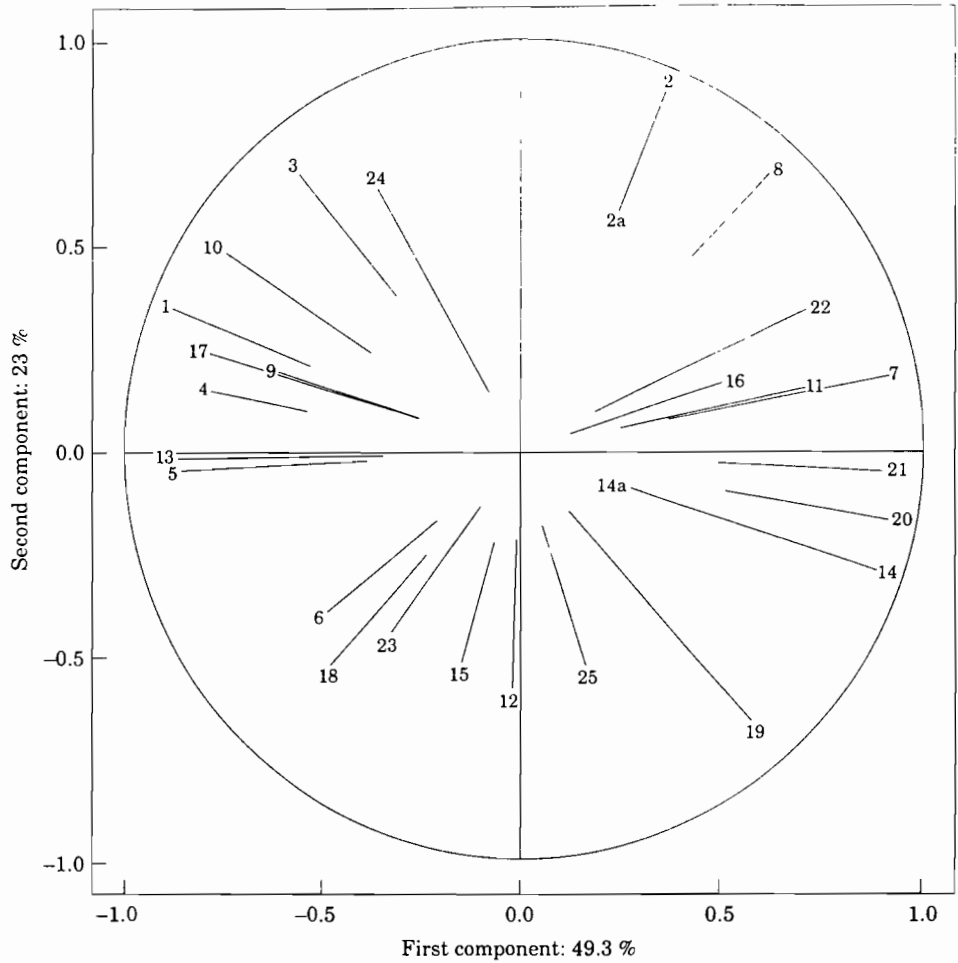


Figure 1. Principal component analysis of Y with respect to Fortnight, representation of species on the principal plane, within the correlation circle.

Method

For species *l* the data consist of a 816 element vector, Y^l (column *l* of Y), with each element y^l_{ijk} of Y^l being the transformed mean catch for port *i* during year *j* and for fortnight *k*.

Such data are usually represented in terms of an analysis of variance model (see for example Draper and Smith, 1981 or Arnold, 1981). This type of model is univariate (ANOVA) when applied to one species (Y^l), and multivariate (MANOVA) when applied to all of the species (Y). The model contains three main factors (Port, P; Year, A and Fortnight, F), three two-way interactions terms (Port × Fortnight, PF; Port × Year, PA; Year × Fortnight, AF) and one three-way interaction term (Year × Fortnight × Port, AFP). There is one observed catch for each combination of the factors (Port, Year, Fortnight) so that the design is balanced and the main factors and interaction terms are orthogonal.

Let us consider Y^l and the complete ANOVA model based on the three previously defined factors (i.e. including main and interaction terms). Because there is no replication the model is saturated and hence the residual term is null. Such a model allows us to decompose Y^l (see Appendix 1) into additive terms, each of these being linked to a factor or an interaction between factors:

$$Y^l = Y^l_P + Y^l_A + Y^l_F + Y^l_{PA} + Y^l_{PF} + Y^l_{AF} + Y^l_{AFP} \quad (1)$$

For example, Y^l_F contains the fortnight effect of Y^l . Moreover, due to the orthogonality we have a similar decomposition for the variance of Y^l .

$$1 = \text{var}(Y^l) = \text{var}(Y^l_P) + \text{var}(Y^l_A) + \text{var}(Y^l_F) + \dots + \text{var}(Y^l_{AFP}) \quad (2)$$

Due to the initial scaling of the columns of Y, $\text{var}(Y^l) = 1$. Thus, for example, that part of the variance

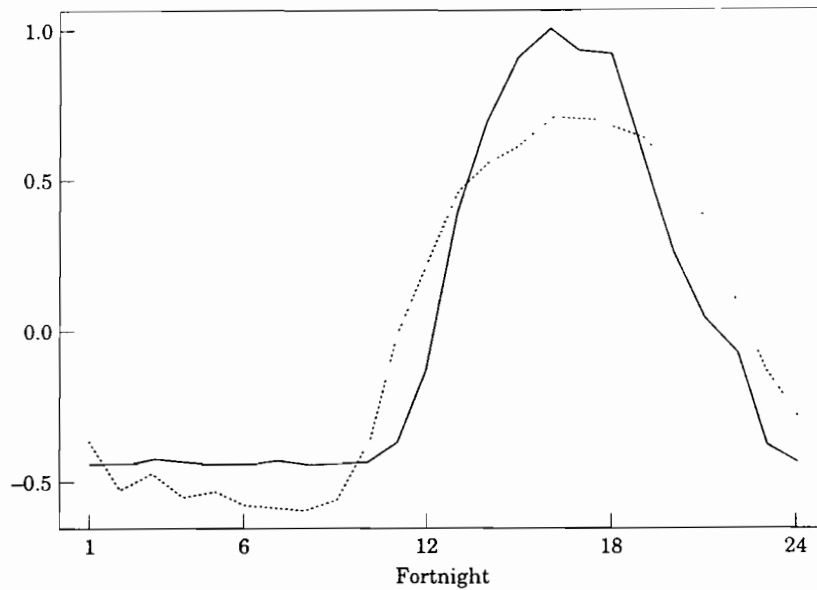


Figure 2. Fitted values from the first component of seasonal effect of *Istiophorus albicans*, — seasonal effect, - - - fitted values

of Y^l explained by the fortnight factor is expressed as $\text{var}(Y^l_F)$, the value of which will be between zero and one.

Considering all the species, the saturated MANOVA model generalizes the univariate decomposition presented above to,

$$Y = Y_P + Y_A + Y_F + Y_{PA} + Y_{PF} + Y_{AF} + Y_{AFP}. \quad (3)$$

Y therefore consists of a 816×25 matrix which is decomposed in a sum of 7 fitted matrices (see Appendix 1). Each of these contains the effects of the 25 species relative to a factor or interaction. Note that by considering the l^{th} column of each of those matrices, we find again the decomposition in (1).

Similar to (2), we have an additive decomposition for the variability of Y . This variability is now expressed in terms of inertia (see Appendix 1) which is the multivariate expression of the variance. The inertia of Y (I_Y) is defined as the sum of the variances over the columns, i.e. $I_Y = \sum_{l=1}^{25} \text{var}(Y^l)$. Thus, analogous to (2), we obtain,

$$25 = \sum_{l=1}^{25} \text{var}(Y^l) = \sum_{l=1}^{25} \text{var}(Y^l_P) + \dots + \sum_{l=1}^{25} \text{var}(Y^l_{AFP})$$

or

$$25 = I_Y = I_P + I_A + I_F + I_{PA} + I_{PF} + I_{AF} + I_{AFP}. \quad (4)$$

The latter Equation (4) may be expressed as the term by term sum of the 25 Equations (2). For example, $I_F = \sum_{l=1}^{25} \text{var}(Y^l_F)$ expresses the part of the inertia of Y explained by the fortnight factor. Furthermore, if each

of the seven sources of variation has no systematic effect at all, then all the ratios of inertia to the corresponding degree of freedom have the same expectation. Hence, it is useful to consider those ratios in order to describe the impact of the various sources of variation.

Being saturated, such a model is not explanatory because it contains as many parameters as we have data. Nevertheless, it does allow us to link the catches to the qualitative or instrumental variables (Port, Year, Fortnight or their interactions) used in the sampling design. The method used to study the relationship between catches and instrumental variables was principal component analysis with respect to instrumental variables, or PCAIV (Rao, 1964; Sabatier *et al.*, 1989).

Principal Components Analysis (PCA) is a useful tool for description of global linear correlations between variables (see, for example, Biseau and Gondeaux, 1988). However, particularly in the case of data collected according to a sampling design, it may be interesting to present an analysis of the correlations of the variables of interest conditional on the instrumental variables. PCAIV is suitable method for this purpose. In practice, a PCAIV on several variables of interest relative to an instrumental variable consists of carrying out a PCA on the fitted variables of interest after the regression on the instrumental variable (Sabatier *et al.*, 1989). This analysis can be done using any software that has both general linear models and PCA (e.g. SAS, S-PLUS, Genstat).

As in (3), we decomposed Y into a sum of seven fitted matrices. Each of them is linked to a factor or interaction between factors identified here as instrumental variables. Such a decomposition may be useful for

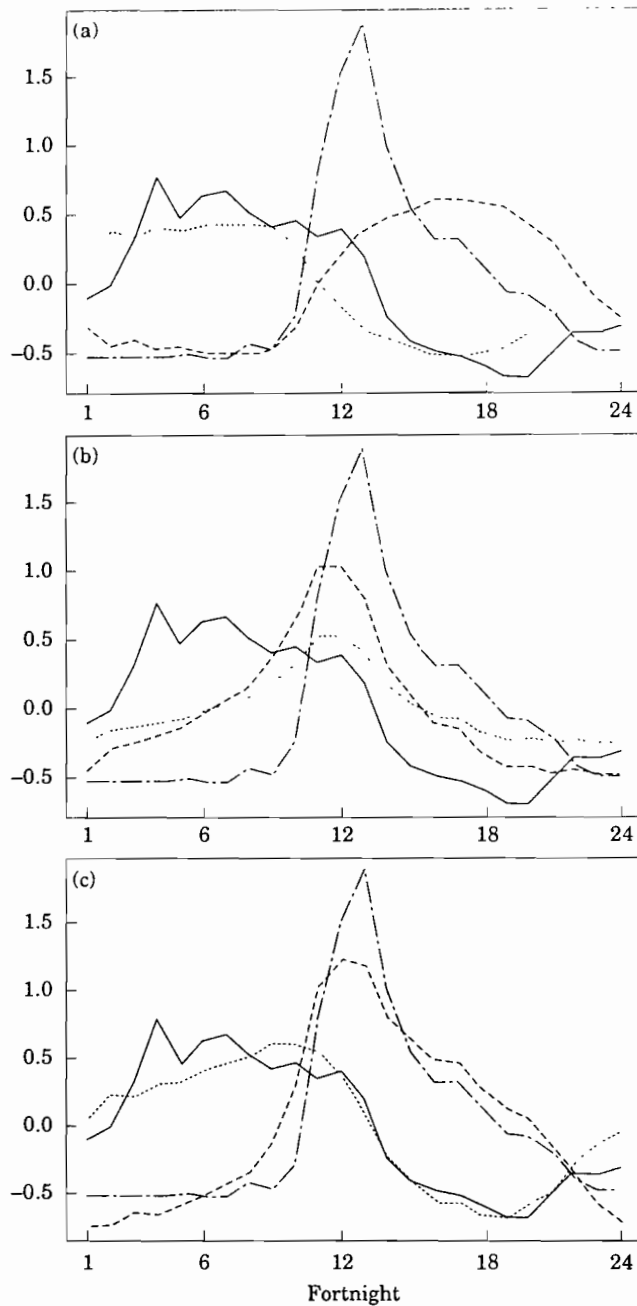


Figure 3. (a) Fitted values from using the first component of seasonal effect of *Alectis alexandrinus* (species 8) and *Epinephelus guaza* (species 10). (b) Fitted values from using the second component of seasonal effect of *Alectis alexandrinus* (species 8) and *Epinephelus guaza* (species 10). (c) Fitted values from using the two first components of seasonal effect of *Alectis alexandrinus* (species 8) and *Epinephelus guaza* (species 10). For each graph, — seasonal effect of species 10, ···· fitted values for species 10, - - - seasonal effect of species 8, - · - fitted values for species 8.

interpretation purposes. For example, Y_F contains the seasonal effects with respect to the yields and, due to the orthogonality, those effects may be discussed independently of other sources of variation. Hence, PCA of each of these arrays will allow us to describe the relations

between yields of the species for each of the seven sources of variations defined by the saturated model.

Graphical outputs are very useful for the presentation and interpretation of results. We shall focus on fitted values of the observations from multiple regression on

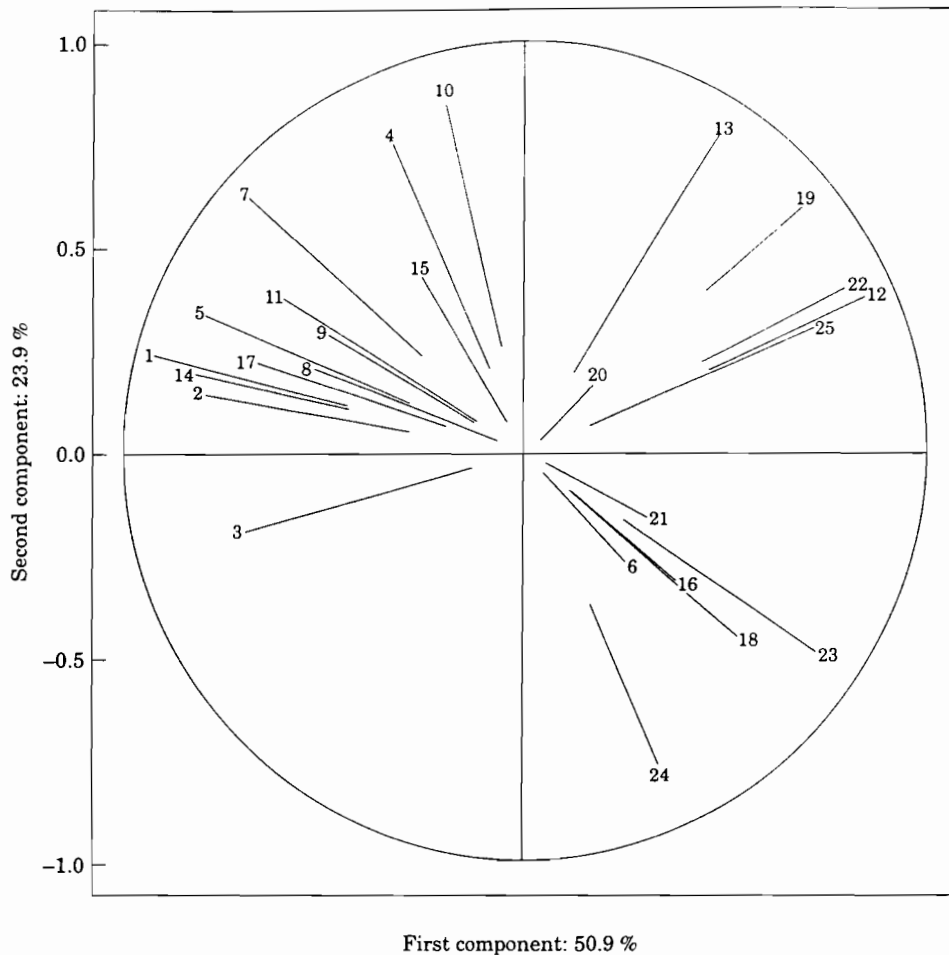


Figure 4. Principal component analysis of Y with respect to Year, representation of species on the principal plane, within the correlation circle.

principal components (Persat and Chessel, 1989) and correlation of the variables of interest with the principal planes. These fitted values will be described in connection with the presentation of results of the PCA of Y_F (i.e. the PCAIV of Y with respect to the factor Fortnight).

Results

Decomposition of inertia

The decomposition of the inertia of Y according to Equation (4) is presented in Table 2. We can distinguish two groups here. The first one (Port, Year, Fortnight and interactions Port \times Fortnight and Port \times Year) characterizes terms with low degree of freedom (df), strong inertia and high ratio of inertia to df. The second group (interactions Year \times Fortnight and Port \times Year \times Fortnight) comprises terms with high degrees of freedom, whose ratio of inertia to df is low.

This latter group accounts for about 47% of the total inertia.

PCAIV of Y for Fortnight

Representation of the variables in the principal plane

Each PCAIV concerns a fitted matrix whose columns are not reduced. Hence, their variances, which belong to $[0,1]$, express the importance of the considered factor. Figure 1 presents the variables in the plane of the first two principal components for PCAIV for Y Fortnight (i.e. the PCA of Y_F). Species are indicated by numbers (1 to 25, see Table 1 for species names) with an associated line segment of length s_i , where $i=1, \dots, 25$. The ratio of $(d_i - s_i)/d_i$, where d_i is the distance from species number i to the centre of the circle, is equal to the square root of the variance explained by the instrumental variable (e.g. for Fortnight, $\text{var}(Y_F^i)^{1/2}$). Therefore the representation

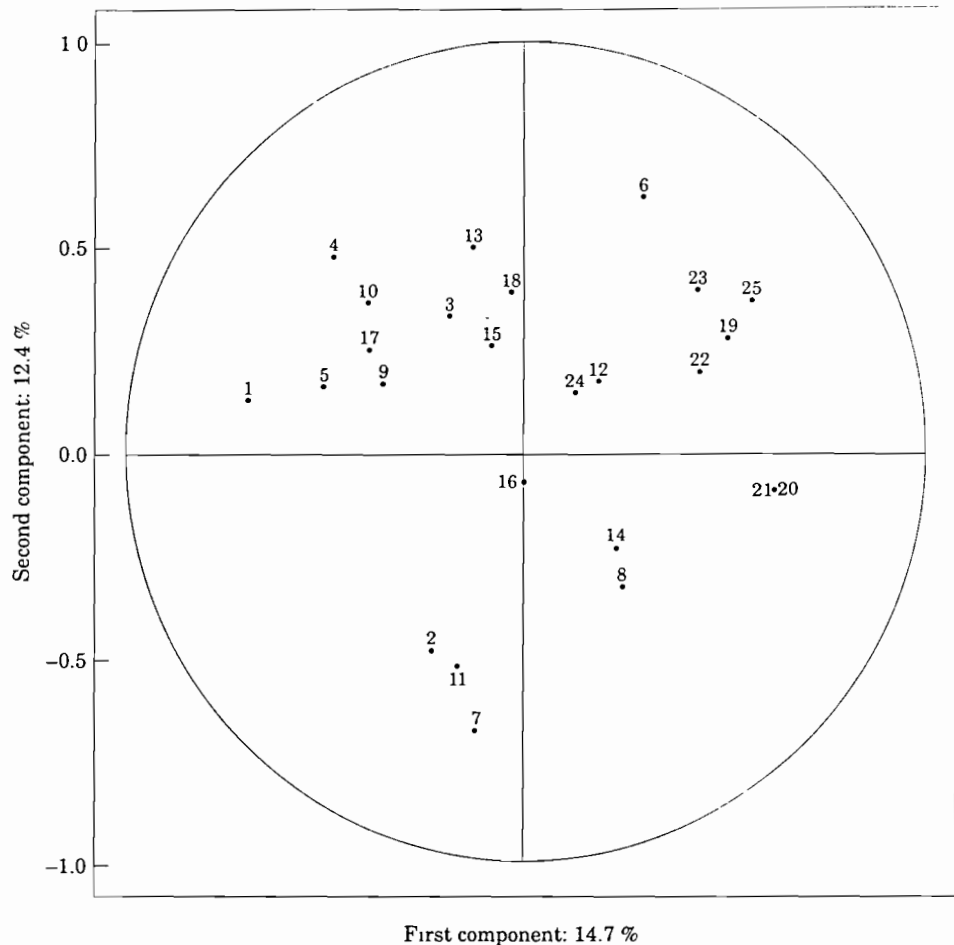


Figure 5. Principal component analysis of Y , representation of species on the principal plane, within the correlation circle.

of the variables by the principal plane in Figure 1 contains information about:

- (1) the quality of the representation by the principal plane with points closer to the circumference of the circle being better represented (i.e. higher correlation) and,
- (2) the influence of the instrumental variable being considered which is measured by the lengths with shorter lengths indicating a higher proportion of the variance being explained.

For example, let us consider (Fig. 1) species 14 (*Sphyrna* spp.) and 2 (*Pagrus caeruleostictus*). The positions of items 14 and 2 indicate that the seasonal effects of those species are well represented by the principal plane. However, extremity 2a is nearer to 2 than 14a to 14. This difference corresponds to the differing importance of fortnight variabilities. Indeed, the factor fortnight explains about 45% of the variance of the *Pagrus caeruleostictus*, and only 9% for the *Sphyrna* spp. Hence,

consideration of both extremities of the segment allows us to make an analysis taking into account the quantitative influence of the factor on each of the species.

On the whole (Fig. 1), many of the species have important fortnight effects. We distinguish an opposition between cold season species (1, 3, 4, 5, 10, 13) and warm season species (7, 8, 20, 21). A positive correlation with the second component is interpreted here as indicating a seasonal effect which extends past the cold season (species 10, *Epinephelus guaza*) or anticipates the warm season (species 8, *Alectis alexandrinus*). This interpretation may be illustrated by looking at the fitted values from using principal components.

Fitted values from principal components

We obtained fitted values from principal components by applying a multiple regression of Y^1_F on the first principal components. This allows one to substitute a smoothed image for Y^1_F taking into account the structure of all the data (Persat and Chessel, 1989).

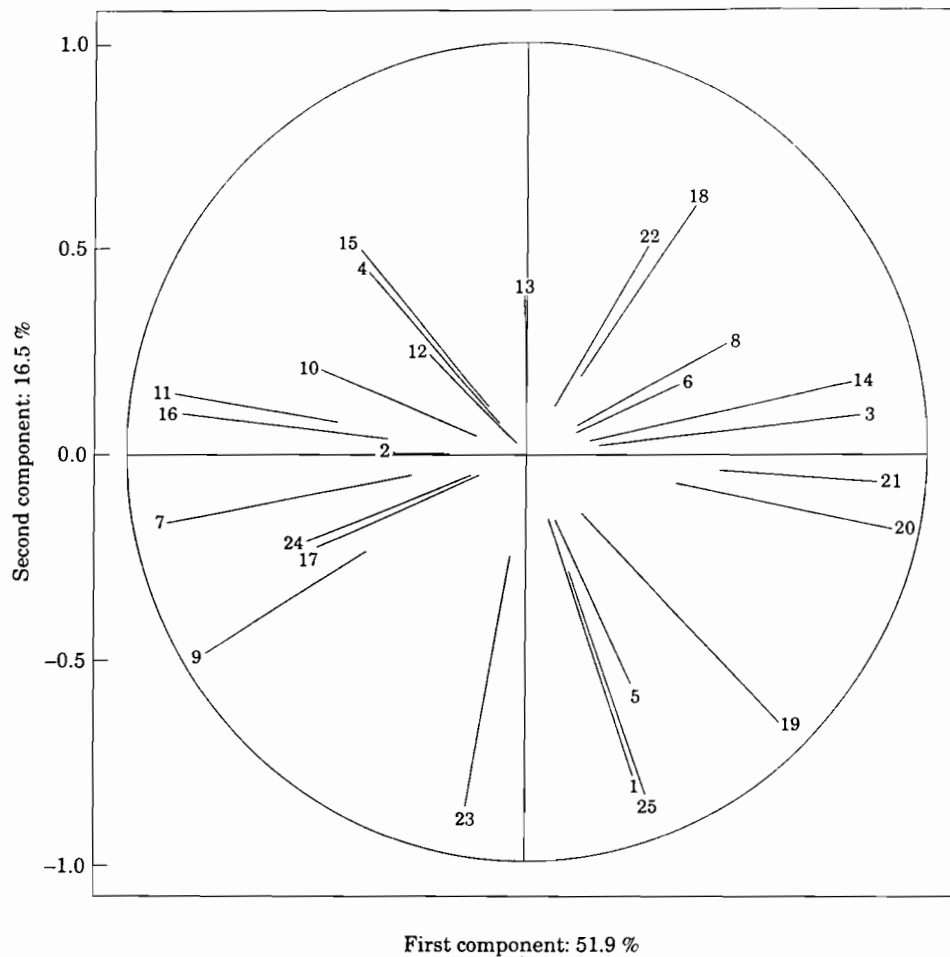


Figure 6. Principal component analysis of Y with respect to interaction Port \times Fortnight, representation of species on the principal plane, within the correlation circle.

The seasonal effect for *Istiophorus albicans* (species 21) is highly correlated with the first principal component (Fig. 1). Therefore model fitting with this component is very efficient (Fig. 2) and allows a clear interpretation of this component and of the seasonal effect for *Istiophorus albicans*. This is also true for the seasonal effects for the other species that are highly correlated (positively or not) with the first component. This first principal component is characteristic of the succession of seasons, a warm and rainy season from July to October (fortnights 13–20) and a cold and dry season from December to May (fortnights 23, 24 and 1–10) – June (fortnights 11, 12) and November (fortnights 21, 22) being “inter-seasonal”. The cold and dry season is also characterized by the presence of an upwelling phenomenon (Rébert, 1983).

The seasonal effects of mean catches for *Alectis alexandrinus* (species 8) and *Epinephelus guaza* (species 10) are combinations of the two first principal components (Fig. 3a, b, c); the first species is mainly caught during

the warm season, with high values observed in the inter-seasonal month of June (fortnight 11 and 12). The second species is mainly caught during the cold season, also with high values in June. This characteristic is taken into account by the second component which presents a peak during June and July (Fig. 3b). We may note on Figure 3a and b that the contributions of first component are in opposition and that the contributions of the second are quite similar.

Species whose code number or item is not close to the correlation circle (Fig. 1) are not well correlated with a combination of the first two components. For such species (for example species 12, 15, 23, 25), a useful model fit would require more than two components.

PCAIV of Y for Year

The principal plane (Fig. 4) explains about 75% of the inertia of Y_A . The variables whose year effect is strong are generally well fitted by the model. We can distinguish three groups of variables: species (23, 24) (with an

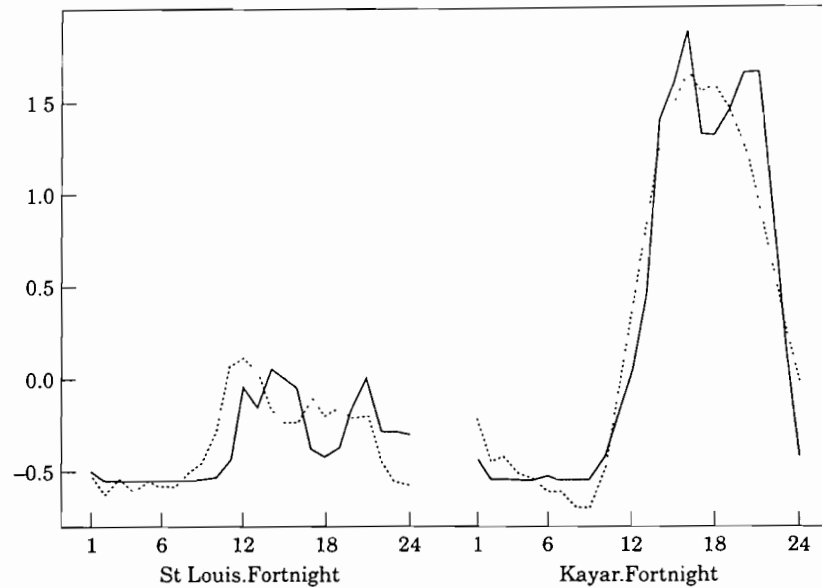


Figure 7. Fitted values from using the interaction Port \times Fortnight by aid of the first component for *Coryphaena hippurus*, including main effects. — interaction, fitted

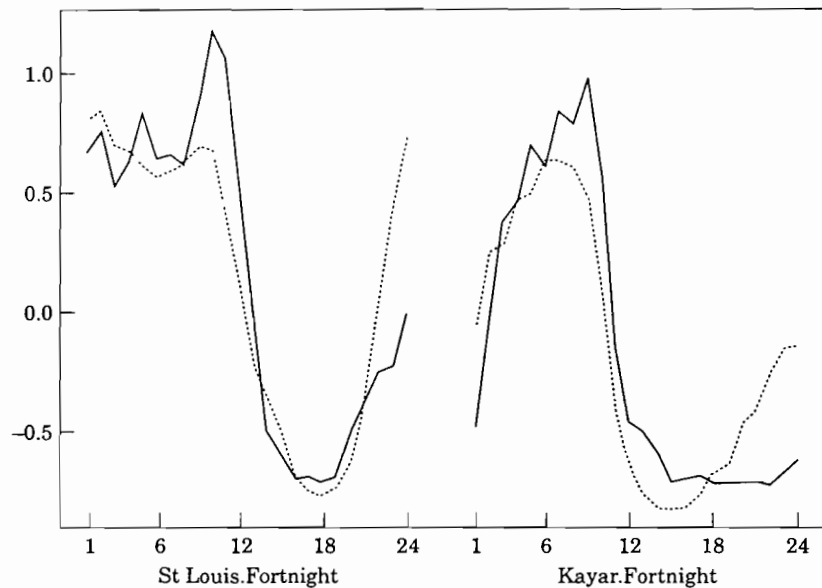


Figure 8. Fitted values from using the interaction Port \times Fortnight by aid of the two first components for *Pomatomus saltatrix*, including main effects. — interaction, fitted.

increasing year effect) are in opposition to species (1, 5, 7, 14) whose year effect is decreasing. These two groups are orthogonal to species (12, 13, 19, 22), whose year effect first increases and then decreases.

If we now consider the general PCA of Y (Fig. 5), and the PCA of Y_F and Y_A , we may observe one of the interesting insights from PCAIV. On the general PCA for example, species 1 (*Pomatomus saltatrix*) and 7 (*Arius latisculatus*) appear to be quite orthogonal

($r = -0.06$). Considering the PCA of Y_F (Fig. 1), shows that their seasonal effects are opposed (one cold season species versus warm season species), while PCA of Y_A (Fig. 4) shows that their inter-annual variabilities are actually positively correlated.

PCAIV of Y for Port

The qualitative variable Port having two modalities and therefore only generates a subspace of dimension 1. That

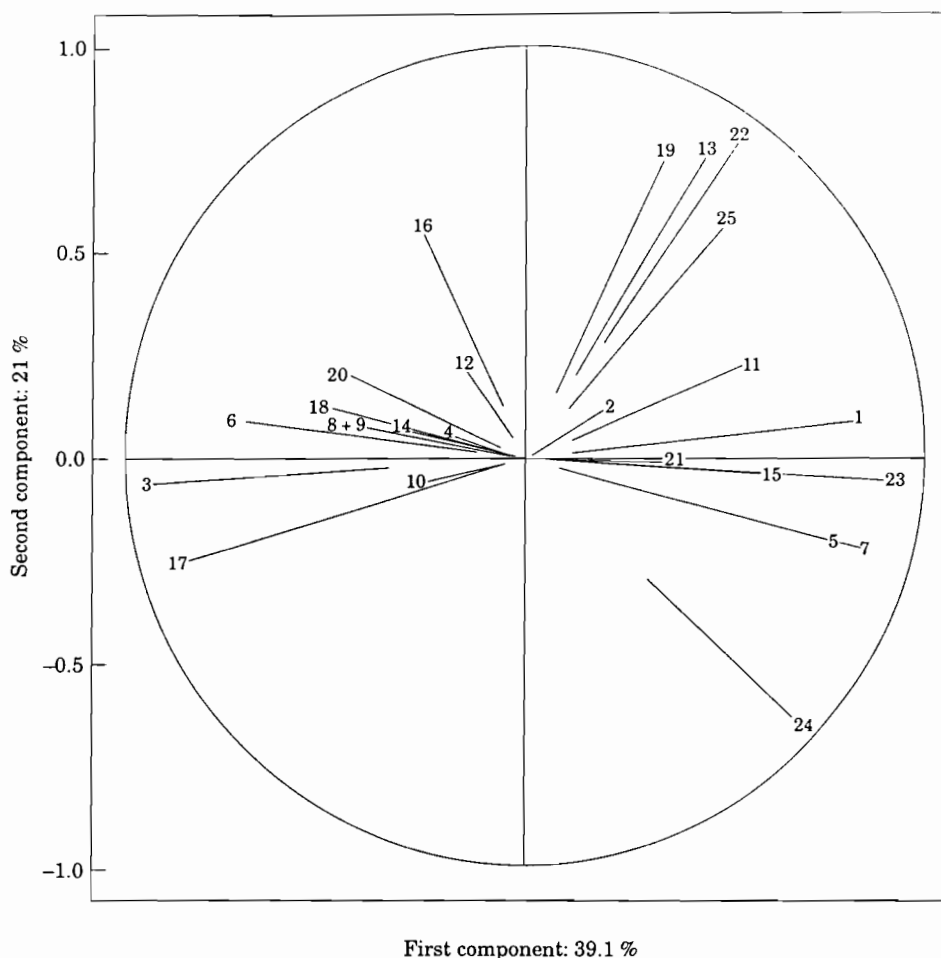


Figure 9 Principal component analysis of Y with respect to interaction Port \times Year, representation of species on the principal plane, within the correlation circle.

is why we do not show the representation in the principal plane. We can distinguish St Louis's species (7, 1) from Kayar's species (6, 20, 21, 23, 25).

PCAIV of Y for Port \times Fortnight

The influence of this factor on species is variable (Fig. 6). It is difficult to interpret the interactions without taking into account the main effects. As an example, consider the following representations for species 20 (*Coryphaena hippurus*) and species 1 (*Pomatomus saltatrix*). The global fitting of species 20 was constructed as the regression on first component of PCA on Fortnight, Port and Port \times Fortnight (Fig. 7). For species 1, we observe that interaction Port \times Fortnight is principally correlated with the second principal component. So, we may obtain fitted values (Fig. 8) for this species with first component of PCA of Y_F , the only component of PCA of Y_P , and the two first components of PCA of Y_{PF} .

We see that the interactions may reflect different situations. For *Coryphaena hippurus*, the catches are

mainly made at Kayar during the warm season; catches are quite small during the cold season in the two ports. For *Pomatomus saltatrix*, the interaction highlights a possibly more interesting situation, with catches made during a longer period of the cold season in St Louis. This is in agreement with available knowledge on the migratory pattern of that species (Champagnat *et al.*, 1983).

PCAIV of Y for Year \times Port

The influence of this interaction is weak (Fig. 9). Only species 24 (*Octopus vulgaris*) has a significant interaction. Indeed, the exploitation of this species is quite recent and takes place mainly at Kayar.

PCAIV for Y for Year \times Fortnight and Port \times Fortnight \times Year

Inertias corresponding to these effects are strong, but with a low ratio inertia/df (Table 2). Contrary to previous PCAIV, inertia is spread out over the principal

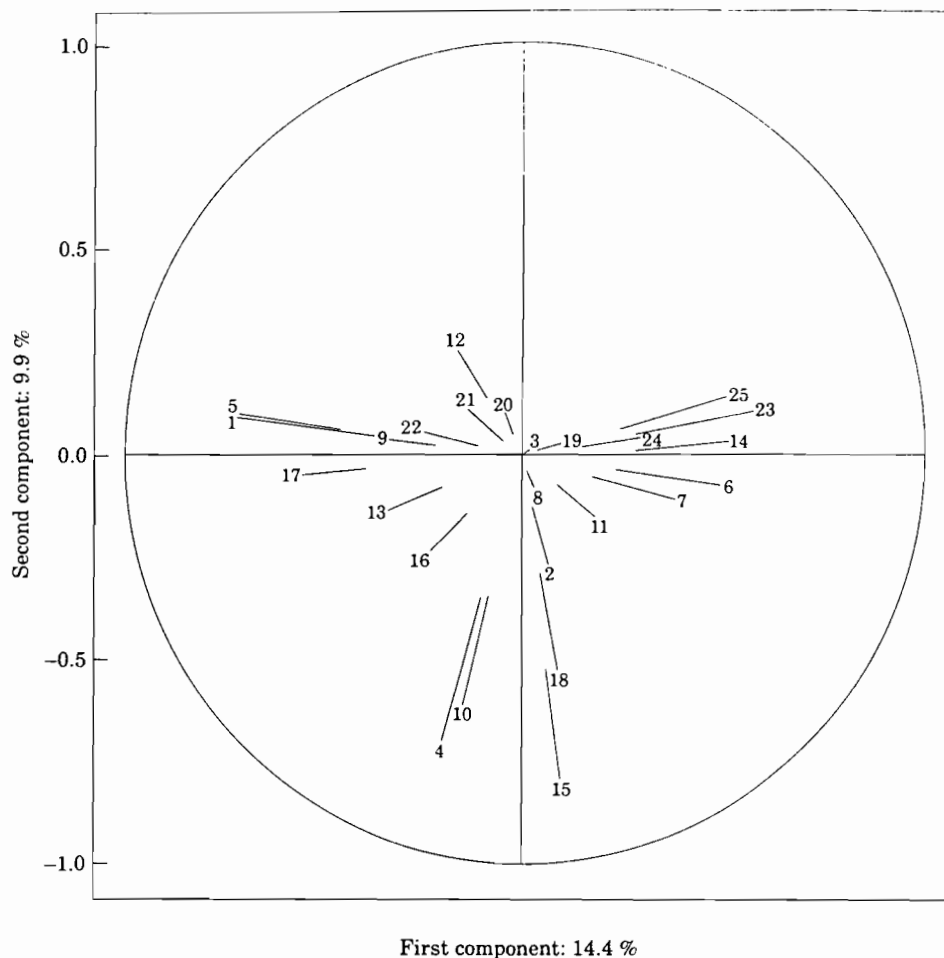


Figure 10. Principal component analysis of Y with respect to interaction Year \times Fortnight, representation of species on the principal plane, within the correlation circle

components and no one or two of the components dominate enough to represent typical behaviours (Figs 10 and 11).

A global model

In preceding sections, partial models for fitted values obtained from the principal components were considered. Taking into account a small number of principal components, we may fit the model in a quite satisfying way with each term of the decomposition as given in Equation (3). It is important to look at the data i.e. at the matrix Y itself. This may be done by pooling the partial results and by summing the results for each fitted matrix. For example, using the one component for the Port effect and three components for the six other sources of variation (Table 3). We present this model fit with species 1 (*Pomatomus saltatrix*) in Figure 12b. Such a model fit may be done for each species. This kind of

model should be considered to be a non-parametric model because it was constructed as a linear combination of a limited number of smoothed series (i.e. principal components).

As an alternative to the above, a parametric model may be obtained by fitting multivariate linear models. The best-fitting model can be selected among a greater number of possibilities using a criterion derived from the Akaike's information criterion (Hurvitch and Tsai, 1989; Sakamoto *et al.*, 1986) and adapted for multivariate models (Bedrick and Tsai, 1994; see Appendix 2). Among 165 possible linear models, we selected the following expression:

$$Y = \text{Port} + P(A) + H3 + \text{Port} \times P(A) + \text{Port} \times H3 + P(A) \times H3 + \text{Port} \times P(A) \times H3 + \varepsilon$$

where H3 is a set of six sine and cosine functions on the fortnight number of respective periods 24, 12 and 8;

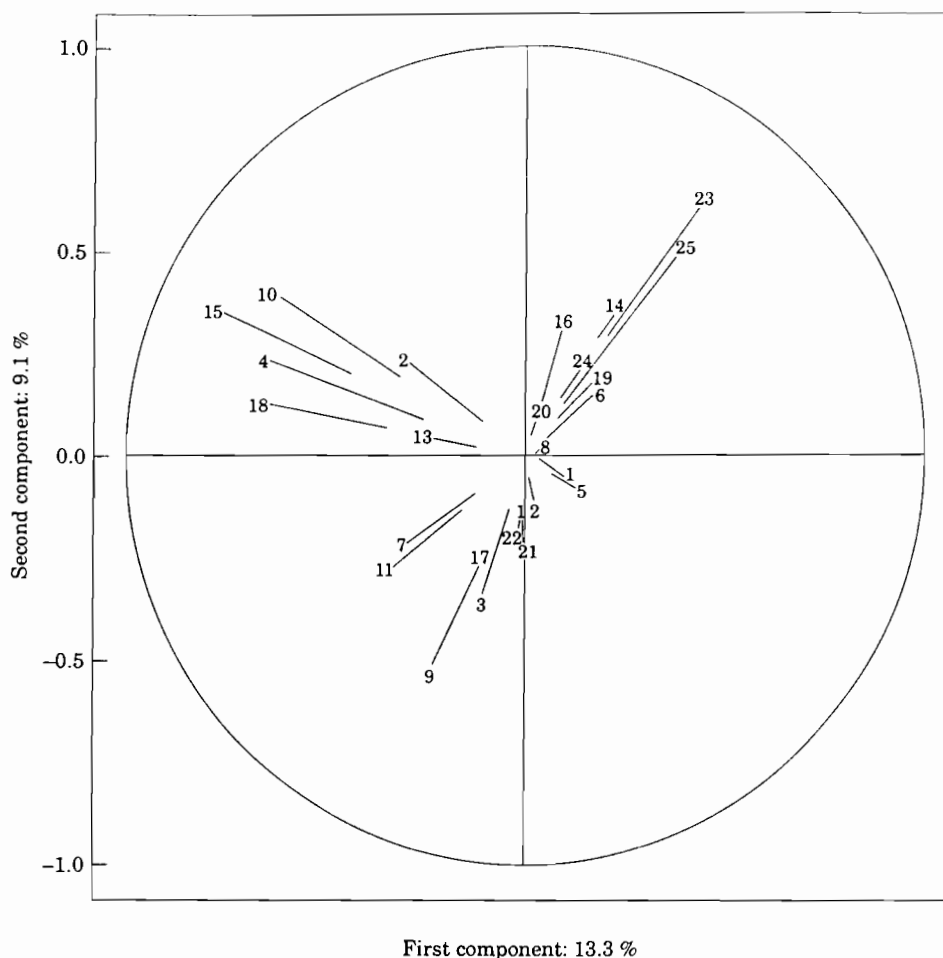


Figure 11 Principal component analysis of Y with respect to interaction Port x Year x Fortnight, representation of species on the principal plane, within the correlation circle.

Table 3. Decomposition of the inertia according to orthogonal subspaces induced by principal components. This variability is expressed in terms of inertia (see Appendix 1) which is the multivariate expression of the variance.

Source of variation	Number of components	Inertia	Inertia/total inertia
Port	1	1.87	0.1
Year	3	2.42	0.13
Fortnight	3	4.13	0.22
Port x year	3	0.92	0.05
Port x fortnight	3	1.87	0.1
Year x fortnight	3	2.06	0.11
Year x port x fortnight	3	1.47	0.08

P(A) is a polynomial of degree 6 on the year n. This model has 97 degrees of freedom, and the composition of sum of squares is given in Table 3. However, this model must be not considered as

pletely optimal because assumptions of homogeneity of variances and normality do not hold. Fitted values from this model are also given for *Pomatomus saltatrix* on Figure 12b.

The parametric and non-parametric versions of the analysis are compared by considering Tables 3 and 4, and Figure 12b. Furthermore, values obtained by the two methods are similar for each species, as shown by quite high correlation values (Table 5).

The versatility of the two methods is illustrated in Figure 12 where we present the original data set, the fitted values described above and the results of two partial models, of potential interest for *Pomatomus saltatrix*. In Figure 12c we show the fitted values using one component for the Port effect and three components for the two other main effects and interaction Port x Fortnight. We also present in Figure 12c the fitted values obtained from the linear model:

$$Y = \text{Port} + P(A) + H3 + \text{Port} \times H3 + \epsilon$$

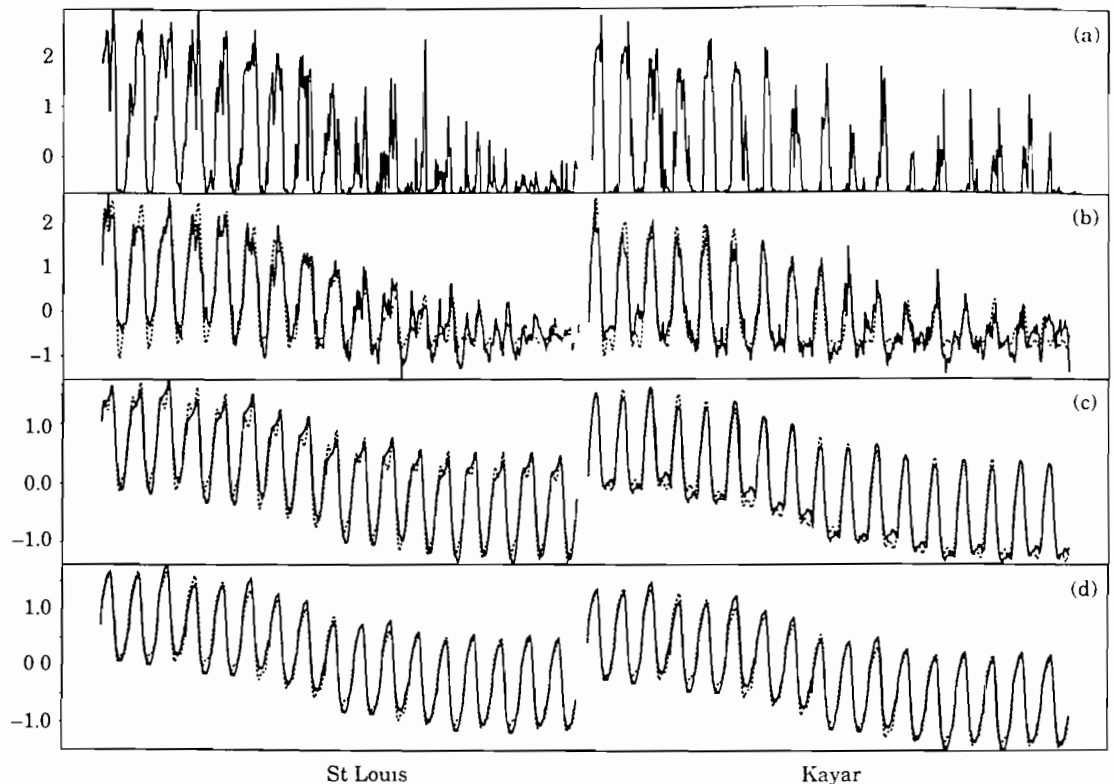


Figure 12 Yields of *Pomatomus saltatrix*. Fitted values from principal components (continuous lines) and fitted values with linear models (dotted lines) (a) Observed yields (b) Fitted yields from PCAIV and the linear model with all the sources of variations (see text) (c) Fitted yields from PCAIV and the linear model with the three main effects and interaction Port \times Fortnight. (d) Fitted yields from PCAIV and the linear model with the three main effects only.

Table 4 Decomposition of the inertia according to orthogonal subspaces induced by the selected model. This variability is expressed in terms of inertia (see Appendix 1) which is the multivariate expression of the variance

Source of variation	Df	Inertia	Inertia/df	Inertia/initial inertia
Port	1	1.87	1.87	1
$P(A)$ (year)	6	2.43	0.40	0.82
H3 (fortnight)	6	4.56	0.76	0.93
Port \times $P(A)$	6	0.99	0.17	0.74
Port \times H3	6	2.02	0.33	0.89
$P(A) \times$ H3	36	2.22	0.06	0.33
$P(A) \times$ port \times H3	36	1.48	0.04	0.28
Residuals	718	9.43	0.01	
Total	815	25	0.03	

Figure 12c includes the previously discussed (see Fig. 8) results on the difference between intra-annual yield patterns in Kayar and Saint-Louis, together with the inter-annual trend of those yields.

The results given in Figure 12d were obtained by dropping the components relative to the interaction Port \times Fortnight in the model fitting procedure for the

principal components and the term Port \times H3 in the linear model.

Both methods give quite similar results in the three cases. Results presented in Figure 12 may be used to illustrate the nature of what is taken into account from the original data when using one source or a combination of sources of variation.

Table 5 Correlation for each species between adjusted variables for both models (first column), between adjusted variables for the parametric model and initial data (second column), between adjusted variables for the non parametric model and initial data (third column)

Species	Cor(Y_p, Y_{np})	Cor(Y_p, Y)	Cor(Y_{np}, Y)
1	0.92	0.91	0.89
2	0.86	0.86	0.79
3	0.83	0.82	0.76
4	0.83	0.81	0.86
5	0.80	0.76	0.88
6	0.88	0.88	0.82
7	0.92	0.81	0.78
8	0.88	0.79	0.73
9	0.84	0.80	0.74
10	0.73	0.70	0.79
11	0.86	0.77	0.71
12	0.76	0.77	0.66
13	0.77	0.66	0.66
14	0.86	0.86	0.77
15	0.60	0.62	0.83
16	0.75	0.65	0.69
17	0.65	0.64	0.75
18	0.70	0.66	0.74
19	0.85	0.77	0.79
20	0.91	0.80	0.74
21	0.94	0.89	0.84
22	0.87	0.78	0.77
23	0.86	0.88	0.83
24	0.73	0.95	0.72
25	0.85	0.83	0.82

Our intention is not to choose one model over the other. Indeed, the non-parametric model can be considered to be a more parsimonious summary of the data than the parametric model. However, the components of the non-parametric model are linear combinations of the yields fitted using instrumental variables. Hence, they form a summary of the influences of those factors. Such a summary may be considered an “*ad hoc* smoothed” transformation of the factors. So, principal components cannot be considered regressor variables in the usual sense and we cannot consider the non-parametric model as to be a classical multiple regression model with 19 independent variables.

Discussion and conclusion

Descriptions made by means of PCAIV helped identify the most important sources of variation among those defined by the sampling design. Such sources of variation have been described by fitting the model with the major factors with the aid of principal components.

The initial data set Y may be described in a satisfying way by using a few components in the model. A similar model fit may also be obtained by selecting a parametric model from a family of candidate models. Both appear

to be equivalent in the sense that principal data characteristics are taken into account.

Such models may be considered with some criticism with respect to violations of assumptions usually required for classical inference (independence of the residuals, homogeneity of their variances). However, because they capture some major characteristics of our initial data set, we can think that they have been formulated according to the principle expressed by Lebreton *et al* (1992):

“We approach data analysis in this spirit we want to find an useful model that correctly represents the biologically important structure that is real in the data. We may be unable to ferret out the correct form of the more subtle structure in the data. In this case, we believe it is appropriate to *sweep* this residual structure into the model error component.”

The analysis presented in this paper is exploratory, not explanatory. It does not result in a model of population dynamics nor of fleet dynamics. We have only tried to give a parsimonious synthesis of the spatio-temporal variability. This variability represents many sources of variation in environmental conditions of fish species and fishermen and from interactions between such sources. Hence, further models are needed and the results presented here should be considered as possible frameworks for analysis of outputs of simulation models. The use of “multi-species–multi-fleet” models appears to be necessary in the context of many fisheries (Garrod, 1973; Gulland and Garcia, 1984; Hilborn, 1985) and such models have been used in the Senegalese case (Laloé and Samba, 1990, 1991; Lefur, 1995). Model outputs have to be compared with available data sets for tuning and validation purposes, and the methods presented here offer tools for describing the salient features of the available data.

Acknowledgements

We thank Drs D. Toure and A. Samba of the CRODT at Dakar. We also thank Drs R. Sabatier and J. D. Lebreton and two anonymous referees. We are very grateful to assistant editor S. J. Smith for very valuable help on many aspects of this work.

References

- Allen, P. M., and Mac Glade, J. M. 1986. Dynamics of discovery and exploitation, the case of Scotian shelf ground-fish fishery. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 43: 1187–1200.
- Arnold, S. F. 1981. *The theory of linear models in multivariate analysis*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Bedrick, E. J., and Tsai, C. L. 1994. Model selection for multivariate regression in small samples. *Biometrics*, 50: 226–231.
- Biseau, A., and Gondeaux, E. 1988. Apport des méthodes d'ordination en typologie des flotilles. *Journal du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, 44: 286–296.

- Champagnat, C., Caverivière, A., Conand, C., Cury, P., Durand, J. R., Fontana, A., Fonteneau, A., Fréon, P., and Samba, A. 1983 Pêche, biologie et dynamique du tassergal (*Pomatomus saltator*, Linnaeus, 1766) sur les côtes sénégalaises mauritaniennes. Trav. Doc. ORSTOM Paris, 168: 279pp.
- Cury, P., and Roy, C. 1988 Migration saisonnière du thiof (*Epinephelus aeneus*) au Sénégal: influence des upwellings sénégalais et mauritaniens. *Oceanologica Acta*, 11: 25–36.
- Cury, P., and Roy, C. (eds) 1991 Pêcheries Ouest Africaines. Variabilité, instabilité, changement. Orstom, Paris, 525pp.
- Draper, N., and Smith, H. 1981 Applied regression analysis. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Fay, C. 1994. Organisation sociale et culturelle de la production de pêche morphologie et grandes mutations. In La pêche dans le delta central du Niger, pp. 191–207. Ed. by J. Quenière. I. E. R./ORSTOM/KARTHALA, Paris.
- Ferraris, J., and Samba, A. 1992 Variabilité de la pêche artisanale Sénégalaise et statistique exploratoire. Seminfor 5, ORSTOM, septembre 1991. Montpellier: 169–190.
- Ferraris, J., Fonteneau, V., and Sy Bo, A. 1993. Structuration de la base de données "pêche artisanale" et chaîne de traitement informatique. Arch. C.R.O.D.T., 39pp + annexes.
- Fréon, P. 1986 Réponses et adaptation des stocks de cupléidés d'Afrique de l'ouest à la variabilité du milieu et de l'exploitation. Analyse et réflexion à partir de l'exemple du Sénégal. Thèse doctorat d'état. Université Aix Marseille II.
- Garrod, D. J. 1973. Management of multiple resources. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 30: 1977–1985.
- Gérard, M., and Greber, P. 1985 Analyse de la pêche artisanale au cap vert: description et étude critique du système d'enquête. Doc. Scient. Cent. Rech. Océano. Dakar-Thiaroye, 98: 77pp.
- Gulland, J., and Garcia, S. 1984. Observed patterns in multi-species fisheries. In *Exploitation of marine communities*, pp. 155–190. Ed. by R. M. May. Dahlem Konferenzen, Springer Verlag.
- Hilborn, R. 1985. Fleet dynamics and individual variation: why some people catch more fish than other. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 42: 2–13.
- Hurvitch, C. M., and Tsai, C. L. 1989. Regression and time series model selection in small samples. *Biometrika*, 76: 297–307.
- Inzenman, A. J. 1980. Assessing dimensionality in Multivariate regression. In *Handbook of statistics, Vol. 1, Analysis of variance*, pp. 571–591. Ed. by P. R. Krishnaiah. North-Holland, Amsterdam.
- Laloë, F. 1985. Etude de la précision des estimations de captures et prises par unité d'effort obtenues à l'aide du système d'enquêtes de la section "pêche artisanale" du C.R.O.D.T., Doc. Sci. Cent. Rech. Océano. Dakar-Thiaroye, 100: 36pp.
- Laloë, F., and Samba, A. 1990. La pêche artisanale au Sénégal: ressources et stratégies de pêches. Collection études et thèses, ed. ORSTOM, Paris.
- Laloë, F., and Samba, A. 1991. A simulation model of artisanal fisheries of Senegal. ICES Marine Symposium, 193: 281–286.
- Laurec, A., Biseau, A., and Charuau, A. 1991. Modelling technical interactions. ICES Marine Symposium, 193: 225–234.
- Lebreton, J. D., Sabatier, R., Banco, G., and Bacou, A. M. 1991. Principal component and Correspondences analyses with respect to Instrumental Variables: an overview of their role in studies of structure-activity and species-environment relationships. In *Applied multivariate analysis in SAR and Environmental studies*, pp. 85–114. Ed. by J. Devillers and W. Karcher. Kluwer.
- Lebreton, J. D., Burnham, K. P., Clobert, D., and Anderson, D. R. 1992. Modelling survival and testing biological hypotheses using marked animals: a unified approach with case studies. *Ecological Monographs*, 62: 67–118.
- Lefur, J. 1995. Modeling adaptive fishery activities facing fluctuating environment. An AI approach. *AI Applications*, 9: 85–97.
- Murawski, S. A. 1984. Mixed species yield per recruit analyses accounting for technological interactions. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 41: 897–916.
- Persat, H., and Chessel, D. 1989. Typologies de distributions en classes de taille: intérêt dans l'étude des populations de poissons et d'invertébrés. *Acta Oecologica*, 10: 175–195.
- Rao, C. R. 1964. The use and interpretation of Principal Component Analysis in applied research. *Sankhya Series*, 26: 329–358.
- Rébert, J. P. 1983. Hydrobiologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. Doc. Scient. Cent. Rech. Océano. Dakar-Thiaroye, 89: 99pp.
- Sabatier, R., Lebreton, J. D., and Chessel, D. 1989. Principal component analysis with instrumental variables as a tool for modelling composition data. In *Multivariate data analysis*, pp. 341–352. Ed. by R. Coppi and S. Bolasco. Elsevier, Amsterdam.
- Sakamoto, Y., Ishiguro, M., and Kitagawa, G. 1986. Akaike information criterion statistics. KTK Scientific Publishers, Tokyo, Japan.
- Samba, A., and Laloë, F. 1991. Upwelling Sénégal-Mauritanien et pêche au tassergal (*Pomatomus saltator*) sur la côte nord du Sénégal. In *Pêcheries Ouest Africaines. Variabilité, instabilité, changement*, pp. 307–310. Ed. by P. Cury and C. Roy. ORSTOM, Paris.

Appendix 1: the decomposition of matrix Y and the inertia

Let us consider Y^1 . The complete model based on the three previously defined factors (i.e. including main and interaction terms) may be written as an addition of effects.

$$Y_{ijk}^1 = \mu^1 + p_i^1 + a_j^1 + f_k^1 + pa_{ij}^1 + pf_{ik}^1 + af_{jk}^1 + apf_{jki}^1 + \varepsilon_{ijk}$$

where $i=1, 2$ refers to the port; $j=1, \dots, 17$ refers to the year; $k=1, \dots, 24$ refers to the fortnight.

With usual notations, estimators of parameters are (cf. Draper and Smith, 1981, p. 446)

$$\hat{\mu}^1 = Y \dots$$

$$\hat{p}_i^1 = Y_{i \dots} - Y \dots$$

$$\hat{a}_j^1 = Y_{. j \dots} - Y \dots$$

$$\hat{f}_k^1 = Y \dots k - Y \dots$$

$$\hat{pa}_{ij}^1 = Y_{ij \dots} - Y_{i \dots} - Y_{. j \dots} + Y \dots$$

$$\hat{pf}_{ik}^1 = Y_{i \dots k} - Y_{i \dots} - Y \dots k + Y \dots$$

$$\hat{af}_{jk}^1 = Y_{. j \dots k} - Y_{. j \dots} - Y \dots k + Y \dots$$

$$\hat{apf}_{ijk}^1 = Y_{ijk} - Y_{ij \dots} - Y_{i \dots k} - Y_{. j \dots k} + Y_{i \dots} + Y_{. j \dots} + Y \dots k - Y \dots$$

(note that $\hat{\mu}^1 = Y \dots$ equals zero because Y^1 has been centred.)

Now, each of the seven matrices in decomposition

$$Y = Y_P + Y_A + Y_F + Y_{PA} + Y_{PF} + Y_{AF} + Y_{AFP}$$

is obtained by the estimations of the effects given above.

For example, the element of line ijk and column l of matrix Y_F

$$y_{F,ijk}^l = \hat{f}_{k,j}^l = y_{k,j}^l$$

The total inertia is obtained from:

$$I_Y = \sum_i \left[\sum_{i,j,k} \frac{(Y_{ijk}^l - \bar{Y}^l)^2}{816} \right]$$

Inertia for each source of variation is obtained in a similar way. For example we have for fortnights:

$$I_F = \sum_i \left[\sum_{i,j,k} \frac{(Y_{ijk}^l - \bar{Y}^l)^2}{816} \right]$$

Note that the additivity of inertias (cf. Equation 4) stems from that of the sum of squares decomposition in a balanced design.

Appendix 2: the AICc criterion

Let us consider the multivariate regression model:

$$Y = XB + U$$

where $Y_{n \times p}$ corresponds to p response variables on each of n individuals, $X_{n \times m}$ is a known matrix of covariate values, and $B_{m \times p}$ is a matrix of unknown regression parameters. The rows of the error matrix $U_{n \times p}$ are assumed to be independent, with identical $N_p(0, \Sigma)$. Maximum likelihood estimators for B and Σ are $\hat{B} = (X'X)^{-1}X'Y$, and $\hat{\Sigma} = Y'(I - X(X'X)^{-1}X')Y/n$.

The AICc value for model (1) is then defined as:

$$\text{AICc} = n \log |\hat{\Sigma}| + dp(n+m)$$

where $d = n/(n - (m + p + 1))$.

2.2 Compléments

Nous donnons ici la proposition évoquée dans l'article. Les notations employées sont celles de Sabatier (1988, [121]): Y désigne un tableau de p variables d'intérêt (les colonnes) mesurées sur n unités statistiques (les lignes). X correspond à un tableau $n \times q$ de q variables instrumentales ou explicatives mesurées sur les mêmes n individus. D est une métrique sur l'espace engendré par les colonnes de Y ($\subset \mathbf{R}^n$) et Q_Y une métrique sur l'espace E_Y ($\subset \mathbf{R}^p$) engendré par les lignes de Y . X et Y sont de plus supposés centrés pour D . Sabatier (1988, [121]) définit ainsi l'ACPVI:

Définition 2.2.1 *On appelle ACPVI d'ordre r ($1 \leq r \leq q$) de X par rapport au triplet (Y, Q_Y, D) l'ACP d'ordre r du triplet (X, Q_X, D) où Q_X est la "semi-métrique" de E_X rendant minimale $\|XQ_X {}^tXD - YQ_Y {}^tYD\|$.*

L'auteur a montré qu'en terme de représentation des individus l'ACPVI d'ordre r de X par rapport au triplet (Y, Q_Y, D) est équivalente à l'ACP d'ordre r de $(P_X Y, Q_Y, D)$. C'est cette présentation de l'ACPVI que nous avons utilisée.

Proposition 2.2.1 *Considérons l'ACPVI d'ordre r de X par rapport au triplet (Y, Q_Y, D) . Soit $(P_X Y)_k^j$ (resp. $(P_X Y^*)_k^j$) la reconstitution au rang k ($1 \leq k \leq r$) de la $j^{\text{ième}}$ variable de $P_X Y$ (resp. la $j^{\text{ième}}$ variable de $P_X Y$ réduite). Alors :*

$$\forall k \in \{1, \dots, rg(P_X Y)\}, \quad var(P_X Y) = \frac{\|(P_X Y)_k^j\|^2}{\|(P_X Y^*)_k^j\|^2}$$

□ Notons $(\psi_\alpha)_{\alpha=1, \dots, r}$ la base orthonormée des r premiers vecteurs propres issus de la diagonalisation de l'opérateur $P_X Y Q_X {}^t(P_X Y) D$. Alors la reconstitution au rang k de la $j^{\text{ième}}$ variable du tableau $P_X Y$ s'écrit :

$$\begin{aligned} (P_X Y^j)_k &= \sum_{\alpha=1}^k cov(\psi_\alpha, P_X Y^j) \psi_\alpha \\ &= \sum_{\alpha=1}^k cov(\psi_\alpha, \frac{P_X Y^j}{\|P_X Y^j\|} \|P_X Y^j\|) \psi_\alpha \\ &= \|P_X Y^j\| \sum_{\alpha=1}^k cov(\psi_\alpha, \frac{P_X Y^j}{\|P_X Y^j\|}) \psi_\alpha \\ &= \|P_X Y^j\| \sum_{\alpha=1}^k (\psi_\alpha | \frac{P_X Y^j}{\|P_X Y^j\|})_D \psi_\alpha. \end{aligned}$$

Posons $(P_X Y^{j*})_k = \sum_{\alpha=1}^k (\psi_\alpha | \frac{P_X Y^j}{\|P_X Y^j\|})_D \psi_\alpha$. La base (ψ_α) étant orthonormée $(P_X Y^{j*})_k$ est bien la reconstitution à l'aide des k premiers vecteurs de cette base de $\frac{P_X Y^j}{\|P_X Y^j\|}$, c'est à dire de la variable $P_X Y^j$ si cette dernière était réduite ou encore si l'effet du facteur Y expliquait totalement cette variable. Nous en déduisons alors que :

$$\|(P_X Y^J)_k\| = \|P_X Y\| \|(P_X Y^{J^*})_k\| \Leftrightarrow \frac{\|(P_X Y^J)_k\|}{\|(P_X Y^{J^*})_k\|} = \|P_X Y\| = \text{var}(P_X Y^J)^{\frac{1}{2}} \square$$

2.3 Les tests de permutation

Nous avons réalisé nos ACPVI sans réaliser de test quant à la significativité des différents effets considérés. Il est vrai que les tests usuels dépendent d'hypothèses (normalité, ...) qui peuvent être contraignantes surtout lorsqu'on considère des applications biologiques (Kazi-Aoual *et al.* 1995, [82]; voir Ito 1985, [78] pour une étude de la robustesse de ce type de tests). On peut cependant effectuer des tests de permutation (Cléroux 1976, [29]; Edgington 1987, [41]) qui permettent de s'affranchir de certaines de ces hypothèses.

Dans le cas où l'on cherche à tester l'indépendance de deux tableaux $X_{n \times p}$ et $Y_{n \times q}$, l'hypothèse (H_0) se traduit par celle de la permutabilité des lignes d'un des deux tableaux.

Il existe plusieurs statistiques permettant de mesurer le lien entre deux tables X et Y . Le choix de l'une d'entre elles dépend des rôles que l'on fait jouer aux tableaux X et Y (voir Kazi-Aoual *et al.* 1995, [82] ou Hitier 1993, [74] pour une revue de ces statistiques). Dans le cas qui nous intéresse les rôles joués par X et Y ne sont pas symétriques puisque X est explicatif de Y . Une statistique pouvant être considérée est alors¹ :

$$S_{ACPVI} = \text{tr}(S_{12} S_{22}^{-1} S_{21}) / \text{tr}(S_{11}).$$

Kazi-Aoual *et al.* (1992, [83]; 1993, [81]; 1995, [82]) ont calculé sous l'hypothèse (H_0) l'expression analytique des trois premiers moments de la statistique. On peut alors, en ajustant les moments obtenus à une loi gaussienne, à une loi de Pearson de type III, ou à une loi Beta réaliser le test sans avoir à réaliser explicitement les permutations.

Nous avons maintenant à définir les hypothèses que nous voulons tester, voir comment elles se traduisent en terme de permutabilité des unités statistiques (*ie* les lignes de nos tableaux) et à réaliser les tests. A priori, nous désirons tester les hypothèses d'existence de différences significatives entre les différents niveaux des effets simples et des interactions des trois facteurs que nous avons considéré : Port, Quinzaine et Année. Pour un effet principal, l'hypothèse (H_0) peut être formulée ainsi :

1. On pose $S_{11} = \frac{1}{n} Y Y$, $S_{12} = \frac{1}{n} Y X = {}^t S_{21}$ et $S_{22} = \frac{1}{n} X X$. $\text{tr}(M)$ désigne la trace d'une matrice M et on considère, si nécessaire, des inverses généralisées de Moore-Penrose.

“la mesure de chaque unité statistique est indépendante du niveau du facteur considéré auquel le sujet est assigné”.

Ici, nous pouvons distinguer deux cas (Edgington 1987, [41]):

Dans le premier cas, on ne tient pas compte de l'existence éventuelle d'autres facteurs. L'hypothèse (H_0) correspond alors à l'hypothèse de permutabilité des lignes de Y . On est dans le cas traité par Kazi-Aoual *et al.* (1995, [82]). A l'aide d'un programme fourni par R. Sabatier et développé sous le logiciel S-PLUS (1995, [137]) nous avons réalisé les tests pour chacun de nos trois effets simples. Les résultats donnés dans le tableau 2.1 concluent à la significativité de chacun des effets considérés.

TAB. 2.1 – Résultats des tests de permutation relativement à chacun des effets simples.

Test	m	σ	γ	$(S_{ACPVI} - m)/\sigma$	$P_{\alpha=5\%}$		
					Gaussien	Pearson type III	Beta
Port	1.2210^{-3}	4.5610^{-4}	1.05	161.59	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
Annee	1.9610^{-2}	1.810^{-3}	2.6510^{-1}	55.19	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
Qzne	2.8210^{-2}	2.1510^{-3}	2.2210^{-1}	77.7	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$

Le second cas est celui où l'on tient compte de l'existence d'autres effets simples (dans notre cas on peut par exemple vouloir tester l'hypothèse de non influence du facteur quinzaine sans préjuger de celles des facteurs année et port). (H_0) va correspondre à une hypothèse de permutabilité des lignes de Y appartenant à une combinaison donnée des modalités des autres facteurs. Considérons pour simplifier un facteur \mathcal{V} à v modalités. L'hypothèse (H'_0) considérée est alors la suivante :

“Les lignes de Y qui prennent une même modalité v du facteur \mathcal{V} sont permutable entre elles.”.

En conservant les notations de Kazi-Aoual *et al.* (1995, [82]) et en nous inspirant de leur travail, nous avons calculé sous cette dernière hypothèse les expressions des deux premiers moments de la statistique $tr(AW)^2$:

2. Les auteurs remarquent que: $S_{ACPVI} = \frac{tr(AW)}{tr(W)}$ où $A = P_X$ et $W = Y^t Y$. $tr(W)$ étant invariante par permutation, à partir de l'expression des moments de $tr(AW)$ nous en déduisons ceux de S_{ACPVI} .

Proposition 2.3.1 *Sous l'hypothèse de permutabilité (H'_0), et en supposant qu'il y a égalité des effectifs pour chacune des modalités du facteur \mathcal{V} , alors :*

$$E_p(\text{tr}(AW)) = \frac{1}{\tilde{n}} \sum_v T_v T_v^* + \frac{1}{\tilde{n}(\tilde{n}-1)} \sum_v (S_v - T_v)(S_v^* - T_v^*) + \frac{1}{n_v^2} \sum_{v_1, v_2} S_{v_1 v_2} S_{v_1 v_2}^*,$$

$$\text{où : } S_v = \sum \sum_{i,j/v(i)=v(j)=v} w_{ij}; T_v = \sum_{i/v(i)=v} w_{ii}; S_v^* = \sum \sum_{i,j/v(i)=v(j)=v} a_{ij};$$

$$T_v^* = \sum_{i/v(i)=v} a_{ii}; S_{v_1 v_2} = \sum_{i/v(i)=v_1} \sum_{j/v(j)=v_2} w_{ij}; S_{v_1 v_2}^* = \sum_{i/v(i)=v_1} \sum_{j/v(j)=v_2} a_{ij}.$$

$$\begin{aligned} \square E_p(\text{tr}(AW)) &= E_p(\sum_i a_{ii} \omega_{ii} + \sum_i \sum_{j \neq i} a_{ij} \omega_{ij}) \\ &= \sum_i a_{ii} E_p(\omega_{ii}) + \sum_i \sum_{j \neq i} a_{ij} E_p(\omega_{ij}). \end{aligned}$$

$$E_p(\omega_{ii}) = \frac{(n_v-1)!}{n_v!} \sum_{i \in U_v} \omega_{ii} = \frac{1}{n_v} \sum_{i \in U_v} \omega_{ii}.$$

$$E_p(\omega_{ij}) = \frac{\sum_{i,j/v(i)=v(j)=v} w_{ij}}{n_v(n_v-1)} = \frac{S_v - T_v}{n_v(n_v-1)} \quad \text{si } v(i) = v(j) = v, i \neq j$$

$$E_p(\omega_{ij}) = \frac{\sum_{i,j/v(i)=v_1, v(j)=v_2} w_{ij}}{n_{v_1} n_{v_2}} = \frac{S_{v_1 v_2}}{n_{v_1} n_{v_2}} \quad \text{si } v(i) \neq v(j).$$

où l'on note U_v l'ensemble des unités statistiques prenant la modalité v du facteur \mathcal{V} , et n_v le cardinal de U_v . Nous en déduisons alors :

$$\begin{aligned} E_p(\sum_{ij} a_{ij} w_{ij}) &= \sum_{ij} a_{ij} E_p(w_{ij}) \\ &= \sum_i a_{ii} E_p(w_{ii}) + \sum_v \sum \sum_{i,j/v(i)=v(j)=v; i \neq j} a_{ij} E_p(w_{ij}) + \sum_{v_1, v_2} \sum_i \sum_j a_{ij} E_p(w_{ij}) \\ &= \sum_{v \in \mathcal{V}} \frac{T_v T_v^*}{n_v} + \sum_v \frac{(S_v - T_v)(S_v^* - T_v^*)}{n_v(n_v-1)} + \sum_{v_1 \neq v_2} \frac{S_{v_1 v_2} S_{v_1 v_2}^*}{n_{v_1} n_{v_2}}. \end{aligned}$$

Lorsque n_v est le même pour toutes les modalités v de \mathcal{V} , nous le noterons \tilde{n} . Nous avons alors :

$$E_p(\text{tr}(AW)) = \frac{\sum_v T_v T_v^*}{\tilde{n}} + \sum_v \frac{(S_v - T_v)(S_v^* - T_v^*)}{\tilde{n}(\tilde{n}-1)} + \sum_{v_1, v_2} \frac{S_{v_1 v_2} S_{v_1 v_2}^*}{\tilde{n}^2}$$

Lorsque $\tilde{n} = n$ (ie quand on ne tient pas compte du facteur \mathcal{V}), nous retrouvons bien le résultat énoncé par Kazi-Aoual *et al.* (1995, [82]). \square

Remarquons que lorsque le sous espace engendré par les colonnes de X est orthogonal à celui engendré par \mathcal{V} l'expression se simplifie en

$$E_p(\text{tr}(AW)) = \frac{\sum_v T_v T_v^*}{(\tilde{n} - 1)} - \frac{\sum_v S_v T_v^*}{\tilde{n}(\tilde{n} - 1)}.$$

Proposition 2.3.2 *Sous l'hypothèse de permutabilité (H'_0), si l'on suppose en outre que le sous-espace engendré par $X \in \mathcal{V}^\perp$, nous avons :*

$$\begin{aligned} E_p(\text{tr}(AW)^2) &= \sum_{v \in \mathcal{V}} \frac{S_{4v} S_{4v}^*}{n_v} + \frac{2(S_{2v} - S_{4v})(S_{2v}^* - S_{4v}^*)}{n_v(n_v - 1)} + \frac{(T_v^2 - S_{4v})(T_v^{*2} - S_{4v}^*)}{n_v(n_v - 1)} \\ &+ \frac{(2S_{4v} - S_{2v})(2S_{4v}^* - S_{2v}^*)}{n_v(n_v - 1)(n_v - 2)} + \frac{(T_v^2 - 6S_{4v} + 2S_{2v})(T_v^{*2} - 6S_{4v}^* + 2S_{2v}^*)}{n_v(n_v - 1)(n_v - 2)(n_v - 3)} \\ &+ \sum_{v_1, v_2, v_1 \neq v_2} \left(\frac{2S_{2v_1 v_2} S_{2v_1 v_2}^*}{n_{v_1} n_{v_2}} + \frac{T_{v_1} T_{v_2} T_{v_1}^* T_{v_2}^* + 2S_{2v_1 v_2} S_{2v_1 v_2}^*}{n_{v_1} n_{v_2} (n_{v_2} - 1)} + \frac{T_{v_1} T_{v_2} T_{v_1}^* T_{v_2}^* + 2S_{2v_1 v_2} S_{2v_1 v_2}^*}{n_{v_1} n_{v_2} (n_{v_1} - 1)(n_{v_2} - 2)} \right). \end{aligned}$$

où les expressions de chacun des termes de la somme sont donnés dans les tableaux 2.2 et 2.3.

Nous pouvons alors en déduire l'expression de la variance.

$$\text{Nous avons : } V(\text{tr}(AW)) = E(\text{tr}(AW)^2) - (E(\text{tr}(AW)))^2,$$

$$\begin{aligned} \text{où } E(\text{tr}(AW)^2) &= \sum_{i \neq j \neq k \neq l} a_{ij} a_{kl} E(w_{ij} w_{kl}) \\ &+ \sum_{i \neq j \neq k} (2a_{ii} a_{jk} E(w_{ii} w_{jk}) + 4a_{ij} a_{ik} E(w_{ij} w_{ik})) \\ &+ \sum_{i \neq j} (a_{ii} a_{jj} E(w_{ii} w_{jj}) + 2a_{ij}^2 E(w_{ij}^2) + 4a_{ii} a_{ij} E(w_{ii} w_{ij})) \\ &+ \sum_i a_{ii} E(w_{ii}^2). \end{aligned}$$

Nous donnons dans les tableaux 2.2 et 2.3 les valeurs de chacun des termes de la somme, où l'on utilise les notations suivantes :

$$S_{4v} = \sum_{i \in U_v} w_{ii}^2; \quad S_{2v} = \text{tr}(W_{vv}^2)$$

$$S_{4v}^* = \sum_{i \in U_v} a_{ii}^2; \quad S_{2v}^* = \text{tr}(A_{vv}^2).$$

TAB. 2.2 – Expression des termes de la somme décomposant $E(\text{tr}(AW)^2)$ sous l'hypothèse de permutabilité (première partie).

Cas	Résultat intermédiaire	Expression
	$E_p(w_{ii}^2) = \frac{S_{4v}}{n_v}$	$\sum_i a_{ii}^2 E_p(w_{ii}^2) = \sum_{v \in \mathcal{V}} \frac{S_{4v} S_{4v}^*}{n_v}$
$i \neq j :$		
$v(i) = v(j) = v$	$E_p(w_{ij}^2) = \frac{(S_{2v} - S_{4v})}{n_v(n_v - 1)}$	$\sum_i \sum_{j \neq i} 2a_{ij}^2 E_p(w_{ij}^2) = \sum_{v \in \mathcal{V}} \frac{2(S_{2v} - S_{4v})(S_{2v}^* - S_{4v}^*)}{n_v(n_v - 1)}$
$v(i) = v_1 \neq v_2 = v(j)$	$E_p(w_{ij}^2) = \frac{S_{2v_1 v_2}}{n_{v_1} n_{v_2}}$	$\sum_i \sum_{j \neq i} 2a_{ij}^2 E_p(w_{ij}^2) = \sum_{v_1 \in \mathcal{V}} \sum_{v_2 \in \mathcal{V}, v_2 \neq v_1} \frac{2S_{2v_1 v_2} S_{2v_1 v_2}^*}{n_{v_1} n_{v_2}}$
$v(i) = v(j) = v$	$E_p(w_{ii} w_{jj}) = \frac{(T_v^2 - S_{4v})}{n_v(n_v - 1)}$	$\sum_i \sum_{j \neq i} a_{ii} a_{jj} E_p(w_{ii} w_{jj}) = \sum_{v \in \mathcal{V}} \frac{(T_v^2 - S_{4v})(T_v^{*2} - S_{4v}^*)}{n_v(n_v - 1)}$
$v(i) = v_1 \neq v_2 = v(j)$	$E_p(w_{ii} w_{jj}) = \frac{T_{v_1} T_{v_2}}{n_{v_1} n_{v_2}}$	$\sum_i \sum_{j \neq i} a_{ii} a_{jj} E_p(w_{ii} w_{jj}) = \sum_{v_1 \in \mathcal{V}} \sum_{v_2 \neq v_1} \frac{T_{v_1} T_{v_2} T_{v_1}^* T_{v_2}^*}{n_{v_1} n_{v_2}}$
$v(i) = v(j) = v$	$E_p(w_{ii} w_{ij}) = \frac{-S_{4v}}{n_v(n_v - 1)}$	$\sum_i \sum_{j \neq i} a_{ii} a_{ij} E_p(w_{ii} w_{ij}) = \sum_{v \in \mathcal{V}} \frac{S_{4v} S_{4v}^*}{n_v(n_v - 1)}$
$v(i) = v_1 \neq v_2 = v(j)$	$E_p(w_{ii} w_{ij}) = 0$	$\sum_i \sum_{j \neq i} a_{ii} a_{ij} E_p(w_{ii} w_{ij}) = 0$
$i \neq j \neq k :$		
$v(i) = v(j) = v(k)$	$E_p(w_{ij} w_{jk}) = \frac{(2S_{4v} - T_v^2)}{n_v(n_v - 1)(n_v - 2)}$	$\sum_i \sum_j \sum_k a_{ii} a_{jk} E_p(w_{ij} w_{jk}) = \sum_{v \in \mathcal{V}} \frac{(2S_{4v} - T_v^2)(2S_{4v}^* - T_v^{*2})}{n_v(n_v - 1)(n_v - 2)}$
$v(i) = v_1 \neq v_2 = v(j) = v(k)$	$E_p(w_{ij} w_{jk}) = \frac{-T_{v_1} T_{v_2}}{n_{v_1} n_{v_2} (n_{v_2} - 1)}$	$\sum_i \sum_j \sum_k a_{ii} a_{jk} E_p(w_{ij} w_{jk}) = \sum_{v_1 \in \mathcal{V}} \sum_{v_2 \in \mathcal{V}, v_1 \neq v_2} \frac{T_{v_1} T_{v_2} T_{v_1}^* T_{v_2}^*}{n_{v_1} n_{v_2} (n_{v_2} - 1)}$
$v(i) = v(j) = v_1 \neq v_2 = v(k)$	$E_p(w_{ij} w_{jk}) = 0$	$\sum_i \sum_j \sum_k a_{ii} a_{jk} E_p(w_{ij} w_{jk}) = 0$
$v(i) = v(k) = v_1 \neq v_2 = v(j)$	$E_p(w_{ij} w_{jk}) = 0$	$\sum_i \sum_j \sum_k a_{ii} a_{jk} E_p(w_{ij} w_{jk}) = 0$
$v(i) \neq v(j) \neq v(k)$	$E_p(w_{ij} w_{jk}) = 0$	$\sum_i \sum_j \sum_k a_{ii} a_{jk} E_p(w_{ij} w_{jk}) = 0$
$v(i) = v(j) = v(k)$	$E_p(w_{ij} w_{ik}) = \frac{2S_{4v} - S_{2v}}{n_v(n_v - 1)(n_v - 2)}$	$\sum_i \sum_j \sum_k a_{ij} a_{ik} E_p(w_{ij} w_{ik}) = \sum_{v \in \mathcal{V}} \frac{(2S_{4v} - S_{2v})(2S_{4v}^* - S_{2v}^*)}{n_v(n_v - 1)(n_v - 2)}$
$v(i) = v_1 \neq v_2 = v(j) = v(k)$	$E_p(w_{ij} w_{ik}) = \frac{-S_{2v_1 v_2}}{n_{v_1} n_{v_2} (n_{v_2} - 1)}$	$\sum_i \sum_j \sum_k a_{ij} a_{ik} E_p(w_{ij} w_{ik}) = \sum_{v_1 \in \mathcal{V}} \sum_{v_2 \in \mathcal{V}, v_2 \neq v_1} \frac{S_{2v_1 v_2} S_{2v_1 v_2}^*}{n_{v_1} n_{v_2} (n_{v_2} - 1)}$
$v(i) = v(j) = v_1 \neq v_2 = v(k)$	$E_p(w_{ij} w_{ik}) = 0$	$\sum_i \sum_j \sum_k a_{ij} a_{ik} E_p(w_{ij} w_{ik}) = 0$
$v(i) = v(k) = v_1 \neq v_2 = v(j)$	$E_p(w_{ij} w_{ik}) = 0$	$\sum_i \sum_j \sum_k a_{ij} a_{ik} E_p(w_{ij} w_{ik}) = 0$
$v(i) \neq v(j) \neq v(k)$	$E_p(w_{ij} w_{ik}) = 0$	$\sum_i \sum_j \sum_k a_{ij} a_{ik} E_p(w_{ij} w_{ik}) = 0$

TAB. 2.3 – Expression des termes de la somme décomposant $E(\text{tr}(AW)^2)$ sous l'hypothèse de permutabilité (seconde partie)

Cas	Résultat intermédiaire ($E_P(w_{ij}w_{kl})$)	Expression ($\sum_{i,j,k,l} a_{ij}a_{kl}E_P(w_{ij}w_{kl})$)
$i \neq j \neq k \neq l$:		
$v(i) = v(j) = v(k) = v(l) = v$	$\frac{(n_v-4)!}{n_v!}(T_v^2 - 6S_{4v} + 2S_{2v})$	$\frac{(n_v-4)!}{n_v!}(T_v^2 - 6S_{4v} + 2S_{2v}) \times (T_v^{2*} - 6S_{4v}^* + 2S_{2v}^*)$
$v(i) = v_1 \neq v_2 = v(j) = v(k) = v(l)$	0	0
$v(j) = v_1 \neq v_2 = v(i) = v(k) = v(l)$	0	0
$v(k) = v_1 \neq v_2 = v(i) = v(j) = v(l)$	0	0
$v(l) = v_1 \neq v_2 = v(i) = v(j) = v(k)$	0	0
$v(i) = v(j) \neq v(k) \neq v(l)$	0	0
$v(i) = v(k) \neq v(j) \neq v(l)$	0	0
$v(i) = v(l) \neq v(j) \neq v(k)$	0	0
$v(j) = v(l) \neq v(i) \neq v(k)$	0	0
$v(j) = v(k) \neq v(i) \neq v(l)$	0	0
$v(k) = v(l) \neq v(i) \neq v(j)$	0	0
$v(i) = v(j) \neq v(k) = v(l)$	$\frac{T_{v_1} T_{v_2}}{n_{v_1} n_{v_2} (n_{v_1}-1)(n_{v_2}-2)}$	$\frac{T_{v_1} T_{v_2} T_{v_1}^* T_{v_2}^*}{n_{v_1} n_{v_2} (n_{v_1}-1)(n_{v_2}-2)}$
$v(i) = v(l) \neq v(j) = v(k)$	$\frac{S_{2v_1 v_2}}{n_{v_1} n_{v_2} (n_{v_1}-1)(n_{v_2}-1)}$	$\frac{S_{2v_1 v_2} S_{2v_1 v_2}^*}{n_{v_1} n_{v_2} (n_{v_1}-1)(n_{v_2}-1)}$
$v(j) = v(l) \neq v(i) = v(k)$	$\frac{S_{2v_1 v_2}}{n_{v_1} n_{v_2} (n_{v_1}-1)(n_{v_2}-1)}$	$\frac{S_{2v_1 v_2} S_{2v_1 v_2}^*}{n_{v_1} n_{v_2} (n_{v_1}-1)(n_{v_2}-1)}$
$v(i) \neq v(j) \neq v(k) \neq v(l)$	0	0

Lorsque l'hypothèse (H_0'') concerne l'absence d'interaction entre deux facteurs, Edgington (1987, [41] p 144-145) montre qu'on ne peut la tester à l'aide d'un test de permutation. Pour cela, il considère l'exemple suivant :

Soit un modèle d'analyse de la variance à deux facteurs correspondant à 8 réalisations selon deux facteurs ayant chacun deux modalités. Les données sont les suivantes :

	A_1	A_2
B_1	(3, 4)	(1, 2)
B_2	(7, 8)	(5, 6)

L'hypothèse (H_0'') est l'absence d'interaction entre les deux effets. Pour pouvoir tester cette hypothèse à l'aide d'un test de permutation, il nous faut pouvoir la traduire en une hypothèse concernant la permutabilité des observations. Une manière pour cela est de poser que pour chaque sujet $X_1 - X_2 = X_3 - X_4 = \theta$ (\star) où X_i est l'observation sur le sujet lorsqu'il est soumis à la combinaison i des facteurs ($i = 1$ correspond à la combinaison (A_1, B_1) , $i = 2$ à (A_2, B_1) , $i = 3$ à (A_1, B_2) et $i = 4$ à (A_2, B_2)).

Considérons une permutation des sujets. Le résultat de l'expérience va être une nouvelle table où ce ne sont pas les résultats observés qui sont permutés mais les sujets. Par exemple, si l'on permute le sujet pour lequel on a observé 7 avec celui où on a observé 5, 7 est remplacée par la valeur qu'aurait obtenu l'autre sujet étant donné la contrainte (\star) :

	A_1	A_2
B_1	(3, 4)	(1, 2)
B_2	$(5 + \theta_1, 8)$	$(7 - \theta_2, 6)$

Mais les valeurs θ_1 et θ_2 sont inconnues. Donc la valeur de la statistique que l'on considèrera (par exemple F) pour calculer la probabilité de dépassement est indéterminée car elle dépend des valeurs de θ . Donc, comme souligné par Edgington (1987, [41] p 144-145): “... , since the proportion of data permutations with as large a value of interaction F as the obtained value is a function of the value of θ , the H_0 for interaction cannot be tested, because it does not specify the value of θ .”

2.4 Discussion

L'ACPVI nous permet de décomposer la variabilité d'un tableau d'observations suivant les variables ayant servi à définir les strates du plan d'échantillonnage. Cette décomposition qui est simple et facilement interprétable n'est peut-être pas la seule à pouvoir être envisagée. Par exemple, nous avons décrit la saisonnalité de nos séries sous la forme d'un

effet périodique se répétant au cours des années. Or, nous savons que les saisonnalités des captures ne suivent généralement pas un schéma aussi régulier. Par exemple, certaines espèces sont inféodées à la température de l'eau, qui elle-même dépend de l'upwelling. Mais le déclenchement de l'upwelling n'a pas lieu chaque année au même moment. On pourrait donc envisager de décrire notre effet saisonnier comme une transformation "adéquate" de l'effet quinzaine. De telles méthodes ont été développées dans le cadre de l'analyse de séries chronologiques univariées (par exemple la méthode STL, Cleveland *et al.* 1990, [30]) et une généralisation de l'ACPVI où l'on cherche une transformation des variables instrumentales a été proposée (Durand 1993, [38]). Plus généralement se pose dans notre cas le problème de l'étude des interactions entre facteurs. En effet ces interactions sont souvent révélatrices de modifications du schéma d'évolution de nos séries conséquences de changements intervenus dans les conditions de l'exploitation (disparition d'une espèce, mise au point d'une nouvelle technique de pêche, modification des conditions environnementales ...).

Nous venons au cours de ce chapitre de voir comment pouvait être formulée une synthèse des résultats de la pêche artisanale. Une seconde approche va consister à caractériser les différents processus par ailleurs identifiés de cette activité. C'est ce que nous nous proposons de faire dans le chapitre suivant, en poursuivant là un travail effectué par Laloë et Samba (1989, [93]; 1991, [94]). Il va donc s'agir de caractériser les différents processus relatifs à l'exploitation de la pêche artisanale sénégalaise, processus dont certaines de leurs réalisations constituent la population dans laquelle on échantillonne nos données, données dont nous venons de proposer une caractérisation.

Chapitre 3

Etude du modèle Laloë-Samba

3.1 Définition du modèle

3.1.1 Définition de trois typologies

Le modèle que nous considérons est directement issu de celui défini par Laloë et Samba (1989, [93]; 1991, [94]). Nous l'appellerons dans la suite modèle LS. Le modèle LS repose sur le principe que les débarquements de pêche sont fonction de l'état de la ressource et de choix réalisés par les unités de pêche. Le modèle LS met ainsi en relation une ressource multispécifique avec des unités de pêche regroupées selon des gammes d'actions de pêche à leur disposition.

Définition 3.1.1 Une **ressource** est un ensemble d'êtres vivants (poissons, mollusques, céphalopodes, crustacés,...) vivant en mer et pouvant y être capturés.

Définition 3.1.2 Une **unité de pêche** est caractérisée¹ par :

1. L'existence d'un centre de décision principal (patron de pêche, chef d'unité, capitaine);
2. L'existence de personnes participant à la fourniture du produit; seules ou sous la direction d'un chef d'unité (membres d'équipages ou de compagnie);
3. Un outillage technique nécessaire à la production (engins de pêche, embarcations, engins de propulsion...);
4. Des rapports de production et d'échange.

1. Nous reprenons ici la définition donnée par Diaw (1994, [35]).

Définition 3.1.3 *On appelle action de pêche l'ensemble des moyens utilisés au cours d'une sortie en mer en vue de capturer le poisson. Ceci comprend le ou les engins de pêche utilisés au cours de la sortie, la manière dont ces engins sont employés, le ou les lieux de pêche où s'est rendue l'embarcation. . .*

Définition 3.1.4 *Une sortie de pêche est la mise en œuvre par une unité de pêche d'une action de pêche et les résultats qui en découlent.*

A chaque pas de temps, toute unité de pêche met en œuvre une action de pêche². Les résultats des actions de pêche vont d'une part influencer sur l'état de la ressource qui subira la conséquence des captures réalisées, et d'autre part sur les choix des actions de pêche effectués lors des prochaines sorties (qui seront la conséquence des revenus obtenus et/ou espérés de la vente de la ressource).

Nous avons assisté, le vendredi 15 novembre 1996, à l'enquête d'une pirogue sur la plage de débarquement de Saint-Louis. Cette pirogue était équipée d'une caisse contenant de la glace qui permet de conserver le poisson et donc d'effectuer des marées de plusieurs jours. Elle était rentrée la veille d'une campagne de trois jours ramenant des soles, puis était ressortie le lendemain pour la journée cherchant de nouveau des soles (qui se vendaient le jour de l'enquête environ 500 FCFA/kg). N'en trouvant pas, le pêcheur avait ciblé des poissons d'autres espèces (arius et requins) qu'il avait pu attraper. Le cours de ces espèces était d'environ 150 FCFA/kg.

L'unité de pêche enquêtée avait ainsi effectué au cours des quatre dernières journées deux sorties de pêche. Lors de chacune de ces sorties, le même engin avait été utilisé (un filet dormant), mais les actions de pêche mises en œuvre n'étaient probablement pas du même type: les deux sorties ne se sont certainement pas déroulées sur les mêmes lieux de pêche, la conservation du produit dans de la glace permettant d'accéder à des zones de pêche plus éloignées.

Nous associons à chacune des trois composantes de l'exploitation une typologie :

Définition 3.1.5 *Un stock k est une classe d'équivalence d'éléments de la ressource³ décrits à l'aide d'une quantité: leur biomasse. La relation d'équivalence est la suivante: deux poissons sont équivalents s'ils sont équicapturables⁴ et équiproductifs⁵*

2. Il existe des unités de pêche ne sortant pas en mer certains jours, par exemple lorsqu'elles pratiquent une autre activité comme l'agriculture. Dans ce cas on considèrera cette activité comme une action de pêche particulière ayant un impact nul sur la ressource, mais pouvant apporter à l'unité un revenu.

3. Pour simplifier nous remplacerons le terme *élément de la ressource* par *poisson*.

4. Deux poissons P_1 et P_2 sont équicapturables s'ils ont la même probabilité d'être capturés, quelle que soit l'action de pêche mise en œuvre.

5. Deux poissons P_1 et P_2 sont équiproductifs si, considérant leurs biomasses Q_{P_1,t_i} et $Q_{P_2,t_i} = \lambda Q_{P_1,t_i}$, au temps t_i , alors: $E(Q_{P_2,t_{i+1}}/Q_{P_2,t_i}) = \lambda E(Q_{P_1,t_{i+1}}/Q_{P_1,t_i})$.

Définition 3.1.6 Une **tactique** j est une classe d'équivalence d'actions de pêche pour la relation suivante : deux actions de pêche relèvent de la même tactique si les probabilités qu'elles ont de capturer toute partie de la ressource sont égales.

Définition 3.1.7 Une **stratégie** s est une classe d'équivalence d'unités de pêche pour la relation deux unités de pêche sont équivalentes si les probabilités qu'elles ont de mettre en œuvre une action de pêche relevant d'une tactique donnée sont égales.

Dans la suite, l'indice k ($k = 1, \dots, K$) caractérisera les stocks, j ($j = 1, \dots, J$) les tactiques et s ($s = 1, \dots, S$) les stratégies.

Le modèle résumera donc l'exploitation ainsi (figure 3.1) : il existe différents modes d'exploitation (ou tactiques de pêche) des stocks (représentant la ressource). L'exploitation de la ressource est le fait d'unités de pêche regroupées suivant des stratégies de pêche. La mise en œuvre de deux actions de pêche relevant d'une même tactique peut-être le fait de deux unités de pêche ne relevant pas de la même stratégie de pêche. Ainsi, même si le nombre d'unités de pêche reste constant, la répartition des unités suivant les tactiques disponibles et donc les captures prélevées sur les différents stocks peuvent varier à chaque pas de temps.

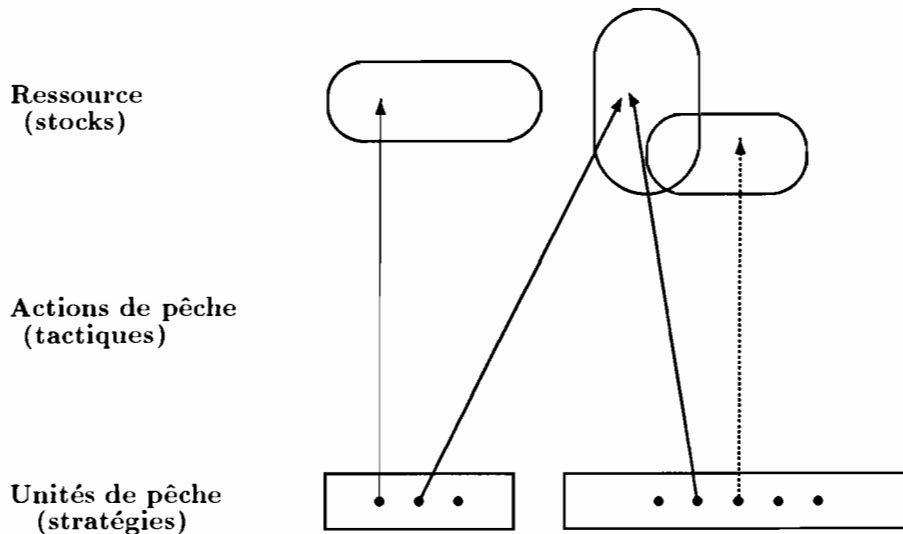
Nous avons ensuite enquêté une seconde unité de pêche sortie pour la journée avec un filet dormant et qui débarquait des espèces analogues à celles observées lors de la première enquête. Nous pouvons alors émettre l'hypothèse que le jour de l'enquête les deux pirogues ont mis en œuvre des actions de pêche du même type donc relevant d'une même tactique de pêche (ie sortie à la journée avec un filet dormant au large de Saint-Louis en visant d'autres espèces que la sole). Néanmoins, la seconde unité de pêche enquêtée ne disposait pas de glacière, ni de filet dormant permettant d'attraper des soles⁶. Donc, la première unité de pêche peut mettre en œuvre des actions de pêche (sorties en glacière visant des soles) qui sont inaccessibles à la seconde unité.

Les notions que nous venons de définir ont été introduites dans le cadre de la pêche artisanale sénégalaise par Laloë et Samba (1989, [93]; 1991, [94]) et Diaw (1994, [35]). Une notion voisine à celle de tactique (celle de "métiers") a été définie dans le cadre de pêcheries de la mer celtique (Laurec *et al.* 1991, [98]).

Le modèle est donc fondé sur trois composantes : ressource, actions de pêche, unités de pêche, auxquelles on associe trois typologies : stocks, tactiques, stratégies. Nous rappelons

6. Il existe en effet plusieurs types de filets dormants, celui à sole ayant des mailles beaucoup plus fines que celles des autres filets dormants (A. Samba, comm. pers.).

FIG. 3.1 – Principe du modèle.



son principe: à chaque pas de temps toute unité de pêche met en œuvre une action de pêche relevant d'une tactique de pêche. Cette action va avoir une conséquence d'une part sur la ressource et d'autre part sur le choix de la future action de pêche qui sera employée au pas de temps suivant. Ce choix dépend de la gamme de tactiques dont dispose l'unité de pêche. Cette gamme dépend de la stratégie à laquelle appartient cette unité de pêche.

L'état de chacune des typologies sera décrit à l'aide d'une variable aléatoire à temps discret. Il s'agit respectivement de $(B_{k,t_i})_{(k,t_i) \in \{1,\dots,K\} \times T \subset \mathbf{N}}$ les biomasses du stock k , de $(f_{j,t_i})_{(j,t_i) \in \{1,\dots,J\} \times T \subset \mathbf{N}}$ le nombre d'unités de pêche mettant en œuvre une action de pêche qui relève de la tactique j , et $(N_{s,t_i})_{(s,t_i) \in \{1,\dots,S\} \times T \subset \mathbf{N}}$ le nombre d'unités de pêche relevant de la stratégie s . Ces variables aléatoires sont les conséquences de processus caractéristiques de la pêcherie que nous allons maintenant définir.

3.1.2 Définition du modèle proprement dit.

Soit au temps t_i une unité de pêche. Considérons l'expérience aléatoire *l'unité de pêche effectue une sortie de pêche*. Notons Ω l'ensemble des réalisations possibles de l'expérience, ie l'ensemble des sorties de pêche possibles. (Ω, \mathcal{A}, P) désigne alors un espace probabilisé associé à cette expérience. Considérons maintenant l'expérience aléatoire *N unités de pêche effectuent au temps t_i une sortie de pêche* qui est la généralisation de l'expérience aléatoire relative à une unité de pêche. Nous considérons comme espace probabilisé associé à cette seconde expérience $(\Omega, \mathcal{A}, P)^{\otimes N}$. A ces deux expériences, nous associons trois processus aléatoires :

1. Le premier processus est relatif à l' **adoption par les unités de pêche des tactiques** dont relèveront les actions de pêche mises en œuvre :

$$\begin{aligned} Tact : (\Omega, \mathcal{A}, P) \times T \subset \mathbf{N} &\longrightarrow (\{1, \dots, J\} \subset \mathbf{N}, \mathcal{J}) \\ (\tilde{\omega} \quad , \quad t_i) &\longmapsto Tact_{t_i}(\tilde{\omega}). \end{aligned}$$

La variable aléatoire $Tact$ associée à une sortie de pêche effectuée au pas de temps t_i , $Tact_{t_i}(\tilde{\omega})$ qui est la tactique adoptée au cours de la sortie. Cette variable aléatoire est à valeurs dans l'ensemble $\{1, \dots, J\}$ que l'on munit d'une tribu \mathcal{J} .

$$\begin{aligned} f : (\Omega, \mathcal{A}, P)^{\otimes N} \times T \subset \mathbf{N} &\longrightarrow (\{0, \dots, N\}^J, \mathcal{T}) \\ (\omega \quad , \quad t_i) &\longmapsto f_{t_i}(\omega) = (f_{1,t_i}(\omega), \dots, f_{J,t_i}(\omega)). \end{aligned}$$

La variable aléatoire f associée à l'ensemble des sorties de pêche ayant eu lieu au temps t_i , le J -vecteur $f_{t_i}(\omega)$ dont la $j^{ième}$ composante est égale au nombre d'unités de pêche ayant au temps t_i adopté la $j^{ième}$ tactique. Ce vecteur est à valeurs dans l'ensemble $\{0, \dots, N\}^J$ que l'on munit d'une tribu \mathcal{T} .

2. Le second processus est relatif à la **capture issue de la pêche** :

$$\begin{aligned} c : (\Omega, \mathcal{A}, P) \times T \subset \mathbf{N} &\longrightarrow (\prod_k B_k \subset \mathbf{R}^K, \mathcal{V}) \\ (\tilde{\omega} \quad , \quad t_i) &\longmapsto c_{t_i}(\tilde{\omega}) = (c_{1,t_i}(\tilde{\omega}), \dots, c_{K,t_i}(\tilde{\omega})) \end{aligned}$$

La variable aléatoire c associée à une sortie ayant eu lieu au temps t_i sa capture. La capture est ici exprimée sous la forme d'un K -vecteur dont le $k^{ième}$ élément est égal à la capture réalisée du stock k .

$$\begin{aligned} C : (\Omega, \mathcal{A}, P)^{\otimes N} \times T \subset \mathbf{N} &\longrightarrow (\prod_k B_k \subset \mathbf{R}^K, \mathcal{V}) \\ (\omega \quad , \quad t_i) &\longmapsto C_{t_i}(\omega) = (C_{1,t_i}(\omega), \dots, C_{K,t_i}(\omega)) \end{aligned}$$

La variable aléatoire C associée à l'ensemble des sorties effectuées au pas de temps t_i le K -vecteur C_{t_i} dont le $k^{\text{ième}}$ élément est égal à la quantité du stock k qui a été capturée par l'ensemble des unités de pêche sorties au temps t_i .

3. Le troisième processus considéré concerne l'évolution des biomasses des stocks entre les pas de temps t_i et t_{i+1} :

$$B : (\Omega, \mathcal{A}, P)^{\otimes N} \times T \subset \mathbf{N} \longrightarrow (\prod_k [0, B_{v_k}] \subset \mathbf{R}^K, \mathcal{B})$$

$$(\omega, t_i) \longmapsto B_{t_{i+1}}(\omega) = (B_{1,t_{i+1}}(\omega), \dots, B_{K,t_{i+1}}(\omega)).$$

La variable aléatoire B associée à l'ensemble des sorties ayant eu lieu au pas de temps t_i , l'état de la biomasse de chacun des K stocks considérés. Pour un stock k donné, B_{k,t_i} prend ses valeurs dans l'intervalle $[0, B_{v_k}]$, B_{v_k} étant la biomasse vierge⁷ associée au stock k .

Processus relatif à l'activité menée par les unités de pêche

Considérons d'abord le résultat associé à une sortie de pêche, et posons :

$$E(c_{k,t_i}(\tilde{\omega})/B_{k,t_i}(\omega) = B_{k,t_i}, Tact_{t_i}(\tilde{\omega}) = j) = q_{jk}(B_{k,t_i} - \alpha_{j,k,m_{t_i}} B_{v_k})e^{\varepsilon_{t_i}(\tilde{\omega})}, \quad (3.1)$$

où ε_{t_i} suit une loi $\mathcal{N}(0, \sigma_{j_k}^2)$. Le premier terme q_{jk} est l'espérance de capture d'une unité de biomasse du stock k lorsqu'on met en œuvre une action de pêche relevant de la tactique j . Ce terme est aussi appelé capturabilité. Le second terme $(B_{k,t_i} - \alpha_{j,k,m_{t_i}} B_{v_k})$ est la quantité de biomasse du stock k accessible au temps t_i à la tactique j . Cette quantité s'exprime comme la différence entre la biomasse totale du stock et une quantité de la biomasse vierge inaccessible à la tactique. Le paramètre $\alpha_{j,k,m_{t_i}}$ représente la proportion de biomasse vierge de l'espèce k inaccessible lorsqu'on met en œuvre une action de pêche relevant de la tactique j .

Cette caractéristique a été introduite par Laloë (Laloë 1988, [87]; Laloë et Samba 1989, [93]; Laloë et Samba 1991, [94]) afin de rendre compte du fait que les unités de pêche artisanale ont un rayon d'action limité et donc ne peuvent avoir accès à la totalité de l'aire de répartition du stock. De plus, cette aire varie au cours de l'année au gré des migrations des poissons. Le rythme de ces migrations étant généralement annuel, l'accessibilité de la ressource par les pêcheurs artisans sera décrite à l'aide d'une fonction périodique de période annuelle. Si l'année est divisée en M intervalles de temps, l'accessibilité du stock k par la

7. Le terme biomasse vierge désigne l'effectif maximal que peuvent atteindre les effectifs d'un stock, compte tenu des capacités disponibles dans le milieu. Ce terme est également appelé capacité de charge du milieu (carrying capacity en anglais).

tactique j au temps t , vaudra α_{j,k,m_t} , où m_t , est l'intervalle de l'année correspondant au pas de temps t .

Conditionnellement à l'état de la ressource et à la tactique utilisée, la capture du stock k obtenue au cours d'une sortie de pêche suit donc une loi log-normale. C'est une représentation généralement employée (Robson 1966, [118]; Gavaris 1980, [59]. Hilborn et Walters 1992, [71]; Polacheck *et al.*, [111]) comme le souligne Gauthiez (1997, [58]) : “*Dans le domaine halieutique, le formalisme log-normal est très largement utilisé dans les modèles multiplicatifs. Ces modèles présentent la capture comme une variable aléatoire dont la moyenne est le produit d'effets liés à l'abondance, la zone, l'année, le navire, le temps de pêche, etc.*”.

Considérons maintenant la variable aléatoire $C_{k,t}$, qui exprime la capture réalisée par l'ensemble des unités de pêche comme la somme des captures individuelles :

$$C_{k,t}(\omega) = \sum_{\tilde{\omega}} c_{k,t}(\tilde{\omega}) = \sum_{j=1}^J \sum_{\{\tilde{\omega}/Tact_t(\tilde{\omega})=j\}} c_{k,t}(\tilde{\omega}).$$

Nous en déduisons alors que :

$$\begin{aligned} E(C_{k,t}(\omega)/B_{k,t}(\omega), f_t(\omega)) &= \sum_{\tilde{\omega}} E(c_{k,t}(\tilde{\omega})/B_{k,t}(\omega), f_t(\omega)) \\ &= \sum_{j=1}^J \sum_{\{\tilde{\omega}/Tact_t(\tilde{\omega})=j\}} E(c_{k,t}(\tilde{\omega})/B_{k,t}(\omega), Tact_t(\tilde{\omega}) = j) \\ &= \sum_{j \in J} \sum_{\{\tilde{\omega}/Tact_t(\tilde{\omega})=j\}} q_{j,k} (B_{k,t}(\omega) - \alpha_{j,k,m_t} Bv_k) e^{\varepsilon_t(\tilde{\omega})}. \end{aligned}$$

Si l'on suppose les erreurs indépendantes, et comme $f_{j,t}(\omega) = \text{card}\{\tilde{\omega}/Tact_t(\tilde{\omega}) = j\}$, $E(C_{k,t}(\omega)/B_{k,t}(\omega), f_t(\omega))$ s'exprime comme la somme de N variables aléatoires $X_i(\tilde{\omega}) = E(c_{k,t}(\tilde{\omega})/B_{k,t}(\omega), Tact_t(\tilde{\omega}) = j)$ parmi lesquelles $f_{j,t}$ suivent une loi log-normale d'espérance $E(X_i) = m_{j,k} e^{\sigma_{j,k}^2/2}$ et de variance $Var(X_i) = m_{j,k}^2 e^{\sigma_{j,k}^2} (e^{\sigma_{j,k}^2} - 1)$, en posant $m_{j,k} = q_{j,k} (B_{k,t}(\omega) - \alpha_{j,k,m_t} Bv_k)$.

Posons $S_N^2 = \sum_{i=1}^N Var(X_i) = \sum_{j=1}^J f_{j,t} m_{j,k}^2 e^{\sigma_{j,k}^2} (e^{\sigma_{j,k}^2} - 1)$. Nous sommes alors dans les conditions d'application du théorème de Lindeberg (Saporta 1990, [129] p. 63) qui généralise le théorème central-limite. Cela nous permet d'en déduire :

$$\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - E(X_i))}{S_N} \xrightarrow{\mathcal{L}} \mathcal{N}(0, 1).$$

On obtient alors une approximation de la loi de $E(C_{k,t}/B_{k,t}, f_t)$:

$$E(C_{k,t_i}(\omega)/B_{k,t_i}(\omega), f_{t_i}(\omega)) \sim \mathcal{N}\left(\sum_{j=1}^J f_{j,t_i} m_{j,k} e^{\sigma_{j,k}^2/2}, \sum_{j=1}^J f_{j,t_i} m_{j,k}^2 e^{\sigma_{j,k}^2} (\epsilon^{\sigma_{j,k}^2} - 1)\right).$$

Processus d'évolution de la biomasse

B_{k,t_i} est la quantité de biomasse du stock k au temps t_i . Le principe est de considérer que l'état du stock au pas de temps t_{i+1} est fonction de sa valeur au temps t_i et de la capture prélevée par la pêche pendant l'intervalle de temps considéré. En temps continu, la quantité de biomasse du stock k est modélisée à partir de l'équation différentielle :

$$\frac{dB_{k,t}}{dt} = r_k B_{k,t} \left(1 - \frac{B_{k,t}}{Bv_k}\right) - \sum_{j=1}^J f_{j,t} q_{j,k} (B_{k,t} - \alpha_{j,k,m_{t_i}} Bv_k) \quad (3.2)$$

Le différentiel de biomasse est exprimé comme la différence de deux termes. Le premier est égal à la variation que connaîtrait la biomasse en l'absence de pêche. Ce terme est fonction du paramètre r_k qui est un taux de croissance caractéristique de l'espèce et de la biomasse vierge Bv_k . Le second terme représente la capture prélevée par la pêche.

Si l'on suppose l'effort de pêche $(f_{j,t})_{j \in \{1, \dots, J\}}$ constant sur l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$, alors nous pouvons intégrer l'équation (3.2) pour en déduire l'expression de $B_{k,t_{i+1}}$ en fonction de celle de B_{k,t_i} et de $(f_{j,t_i})_{j \in \{1, \dots, J\}}$.

Proposition 3.1.1 *Considérons le stock k , et remplaçons pour simplifier B_k par B . Alors, la solution de l'équation différentielle*

$$\begin{cases} \frac{dB_t}{dt} = r B_t \left(1 - \frac{B_t}{Bv}\right) - \sum_{j=1}^J q_j f_j (B_t - \alpha_{j,m} Bv), \\ B_{t_0} = B_0 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\text{est } B_t = \frac{r_1 \alpha K e^{-a\alpha \Delta t} - r_2}{\alpha K e^{-a\alpha \Delta t} - 1} = g(B_{t_0}, f = (f_j)_{j \in \{1, \dots, J\}}, \theta_t),$$

$$\text{où l'on pose : } \begin{cases} a = -\frac{r}{Bv}; & \Delta = b^2 - 4ac \geq 0 \text{ car } c \geq 0 \text{ et } a \leq 0 \quad \Delta_t = t - t_0 \\ b = r - \sum_{j=1}^J q_j f_j & r_1 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a}, (\alpha_{(j,m_t)} \in \{1, \dots, J\} \times T \subset \mathbb{N}) \\ c = \sum_{j=1}^J q_j f_j \alpha_{j,m} Bv & r_2 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a} \\ \alpha = r_1 - r_2 = \frac{\sqrt{\Delta}}{a} \leq 0 & K = \frac{1}{B_{t_0} - r_1} + \frac{1}{\alpha} \end{cases},$$

et $\theta_t = \{r, Bv, (q_j)_{j \in \{1, \dots, J\}}\}$.

Nous rappelons la démonstration dans l'annexe A.

Nous avons alors plusieurs possibilités pour traduire l'incertitude relative au processus d'évolution de la biomasse. Une première possibilité serait d'introduire un bruit dans

l'équation différentielle (3.2). Nous aurions alors à faire à une équation différentielle stochastique. Nous avons préféré, à l'instar de ce qu'ont fait Hilborn et Walters (Hilborn et Walters 1992, [71], p. 225), considérer :

$$E(B_{k,t_{i+1}}(\omega)/B_{k,t_i}(\omega), f_{t_i}(\omega)) = g(B_{k,t_i}(\omega), f_{t_i}(\omega), \theta_{f_{t_i}} \subset \Theta) + \varepsilon_{t_i}(\omega), \quad \varepsilon_{t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{k,t_i}^2) \quad (3.4)$$

Processus de répartition de l'effort de pêche

Le processus de répartition des unités de pêche suivant les tactiques qui leur sont disponibles est défini en deux temps :

1. Les unités de pêche se répartissent selon les stratégies disponibles. Nous ne décrivons pas ici ce processus. A chaque pas de temps t_i les effectif $(N_{s,t_i})_{s \in \{1, \dots, S\}}$ de la stratégie s seront supposés fixés (connus ou inconnus).

2. Chaque unité de pêche va au temps t_i adopter une tactique parmi celles qui lui sont accessibles. Supposons que la variable aléatoire T_{t_i} suive une loi multinomiale $\mathcal{M}(1, (p_{j,s,t_i})_{j \in \mathcal{J}(s)})$ où p_{j,s,t_i} est la probabilité qu'une unité de pêche appartenant à la stratégie s mette en œuvre au temps t_i une action de pêche relevant de la tactique j . Si l'on suppose que les choix effectués par les unités de pêche sont indépendants les uns des autres, nous avons :

$$(f_{j,s,t_i})_j = (\text{card}\{\tilde{\omega}/T_{t_i}(\tilde{\omega}) = j, N_{t_i}(\tilde{\omega}) = s\})_j \sim \mathcal{M}(N_{s,t_i}, (p_{j,s,t_i})_{j \in \mathcal{J}(s)})$$

Lorsque $\sum_s N_{s,t_i}$ est "assez grand" nous en déduisons d'après le théorème central-limite l'approximation suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{N_{s,t_i}}} (f_{1,s,t_i} - N_{s,t_i} p_{1,s,t_i}, \dots, f_{J,s,t_i} - N_{s,t_i} p_{J,s,t_i}) \sim \mathcal{N}(0, \Sigma_{t_i}),$$

$$\text{où } \Sigma_{t_i} = \begin{pmatrix} p_{1,s,t_i}(1-p_{1,s,t_i}) & -p_{1,s,t_i}p_{2,s,t_i} & \dots & -p_{1,s,t_i}p_{J,s,t_i} \\ -p_{1,s,t_i}p_{2,s,t_i} & p_{2,s,t_i}(1-p_{2,s,t_i}) & \dots & -p_{2,s,t_i}p_{J,s,t_i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -p_{1,s,t_i}p_{J,s,t_i} & -p_{2,s,t_i}p_{J,s,t_i} & \dots & p_{J,s,t_i}(1-p_{J,s,t_i}) \end{pmatrix}.$$

La loi suivie par chacune des composantes peut être approximée par une loi normale :

$$f_{j,s,t_i} \sim \mathcal{N}(N_{s,t_i} p_{j,s,t_i}, N_{s,t_i} p_{j,s,t_i} (1 - p_{j,s,t_i})),$$

et l'approximation pour la variable aléatoire *nombre d'unités de pêche ayant au temps t_i mis en œuvre une action de pêche relevant de la tactique j* s'en déduit directement :

$$f_{j,t_i} = \sum_{s=1}^S f_{j,s,t_i} \sim \mathcal{N}\left(\sum_s N_{s,t_i} p_{j,s,t_i}, \sum_s N_{s,t_i} p_{j,s,t_i} (1 - p_{j,s,t_i})\right). \quad (3.5)$$

p_{j,s,t_i} a été définie comme la probabilité qu'a une unité de pêche de la stratégie s de mettre en œuvre au temps t_i une action de pêche relevant de la tactique j . Les probabilités $(p_{j,s,t_i})_{j,s}$ évoluent au cours du temps traduisant l'adaptation des pêcheurs aux conditions d'exercice de leur activité.

Soit $c_{j,k,t_i}(\tilde{\omega})$ la capture du stock k obtenue au temps t_i par une unité de pêche ayant employé une action de pêche relevant de la tactique j . Si P_k est le prix unitaire de vente du stock k et C_j représente le coût de mise en œuvre de la tactique, alors le revenu obtenu au temps t_i par cette unité est exprimé par :

$$R_{j,t_i} = \sum_k P_k c_{j,k,t_i} - C_j.$$

Lorsque l'unité de pêche n'effectue pas de sortie de pêche, $E(R_{j,t_i}) = -C_j$. En attribuant à la tactique correspondante (la tactique *non pêche* ou *pêche en dehors de la zone d'étude*) un coût de mise en œuvre C_j négatif, nous pouvons alors rendre compte des revenus obtenus de la pratique d'une autre activité que la pêche à l'aide des tactiques considérées (par exemple, la pratique d'une activité agricole). Posons :

$$\bar{R}_{j,t_{i+1}} = \frac{R_{j,t_i} + R_{j,t_i - \Delta t_i}}{2} = \sum_k P_k \frac{c_{j,k,t_i} + c_{j,k,t_i - \Delta t_i}}{2} - C_j.$$

Ce terme représente ici le revenu au temps t_{i+1} qui est espéré par les pêcheurs s'ils employaient la tactique j . Il est supposé égal à la moyenne des revenus obtenus aux pas de temps t_i et $t_i - \Delta t_i$, soit respectivement le revenu obtenu à la sortie précédente et celui à la même époque de l'année passée. Afin de disposer de fonctions qui soient continues et dérivables, nous considérons en fait le terme :

$$R_{j,t_{i+1}}^\pi = e^{\rho \bar{R}_{j,t_{i+1}}}.$$

Le terme ρ peut être interprété comme une pondération donnant une importance d'autant plus forte aux tactiques les plus rémunératrices qu'il sera élevé.

Nous définissons ainsi l'évolution des probabilités :

$$\begin{cases} \forall j \notin \mathcal{J}(s), \forall i, & p_{j,s,t_i} = 0 \\ \forall j \in \mathcal{J}(s), \forall i, & p_{j,s,t_{i+1}} = \mu p_{j,s,t_i} + (1 - \mu) \frac{R_{j,t_{i+1}}^\pi}{\sum_{j \in \mathcal{J}(s)} R_{j,t_{i+1}}^\pi} \end{cases}.$$

Nous avons bien $\sum_{j \in \mathcal{J}(s)} p_{j,s,t_{i+1}} = 1$ dès que $\sum_{j \in \mathcal{J}(s)} p_{j,s,t_i} = 1$. $\mathcal{J}(s)$ désigne ici l'ensemble des tactiques accessibles à la stratégie s .

$\mu \in [0, 1]$ est un terme relatif à la capacité qu'ont les unités de pêche de changer de tactique de pêche. Par exemple lorsque $\mu = 1$, $p_{j,s,t_i} = p_{j,s} \forall i$: la probabilité qu'une unité de pêche de la stratégie s emploie une action de pêche relevant d'une tactique donnée reste la même.

L'évolution des probabilités d'adoption des tactiques peut s'interpréter ainsi : au pas de temps t_{i+1} , la probabilité qu'une unité de pêche appartenant à la stratégie s emploie la tactique j s'exprime comme la somme de deux termes : $\mu p_{j,s,t_i}$ (ie une proportion μ de pêcheurs ayant au temps t_i employé la tactique j conserve cette tactique au temps t_{i+1}) et $(1 - \mu)$ fois la part du revenu espéré de l'emploi d'une action de pêche relevant de la tactique j lorsqu'on le compare aux autres tactiques disponibles dans la stratégie (ie une proportion $(1-\mu)$ de pêcheurs ayant au temps t_i employé la tactique j va se répartir parmi les tactiques accessibles à la stratégie au prorata des revenus espérés de leur emploi).

3.1.3 Conclusion

Le modèle est basé sur des descriptions de la ressource, de l'activité de pêche, et de leurs relations. Il est défini à l'aide de variables aléatoires dont nous avons essayé de caractériser les distributions conditionnelles (équations 3.1, 3.4 et 3.5), et est fonction d'un ensemble de paramètres relatifs à la "ressource" (capacités de charge, taux de croissance), à l'"économie" (prix de vente des espèces, coûts de mise en œuvre des tactiques), à la "pêche" (capturabilités, taux d'inaccessibilité) et aux "décisions" des pêcheurs (paramètre μ). Il peut se résumer sous la forme du système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{j,k,t_i} = f(B_{k,t_i}, \theta_f \subset \Theta) e^{\varepsilon_{f,j,k,t_i}}, \quad \varepsilon_{f,j,k,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{j,k}^2) \\ B_{k,t_i} = g(B_{k,t_{i-1}}, \sum_{j,s} f_{j,s,t_i} c_{j,k,t_i}, \theta_g \subset \Theta) + \varepsilon_{g,k,t_i}, \quad \varepsilon_{g,k,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{k,t_i}^2) \\ f_{j,s,t_i} = h((c_{j,k,t_{i-1}}, c_{j,k,t_i - \Delta t})_{j,k}, \theta_{h,j,s} \subset \Theta) + \varepsilon_{h,j,s,t_i}, \quad \varepsilon_{h,j,s,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{j,s,t_i}^2) \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Ce modèle constitue bien évidemment une simplification abusive de la réalité de l'exploitation, d'autant plus que celle-ci est reconnue comme étant "complexe" (Lefur 1995, [102]). Nous ne prétendons pas ici fournir "la" représentation de l'exploitation. Les descriptions qui ont été proposées des différentes composantes sont certainement contestables et simplificatrices : le modèle que nous considérons est censé refléter les principales caractéristiques de l'exploitation.

téristiques de la dynamique d'une exploitation artisanale.

La représentation de la "ressource" à l'aide de modèles analytiques (Laurec et Le Guen 1981, [99]; Laurec 93, [97]) et l'introduction d'interactions spécifiques permettraient certainement d'en proposer une description plus fine, mais moins synthétique. Cependant, notre objectif n'étant pas directement lié à l'estimation de la ressource, les modèles globaux peuvent alors s'avérer utiles (Laloë 1995, [90]).

Si la représentation de la ressource s'appuie sur des modèles classiques, il n'en est pas de même des modes d'adoption des tactiques par les pêcheurs. En effet, si l'on connaît l'existence de processus de décisions du pêcheur quant à l'action qu'il entreprend (Laloë et Samba 1989a, [93]; Ferraris 1995, [45]; Ferraris 1997, [46]), on ne dispose pas de description du processus lui-même. La description que nous avons choisi du processus de décision des pêcheurs artisans est très sommaire. Elle pourrait être précisée en tenant compte de l'appréciation par le pêcheur d'un risque ou d'incertitudes liées à son action de pêche (Chaboud 1995, [21]). On pourrait également tenir compte dans la modélisation des différences de comportements de pêche qui existent suivant les groupes de pêcheurs (Hilborn 1985, [69]; Ecoutin 1991, [40]).

3.2 Propriétés du modèle pour certains cas simples

L'objet de cette partie est de considérer la version déterministe du modèle afin d'étudier ses propriétés mathématiques dans des cas simples. Nous utiliserons pour cela les résultats énoncés par Arrowsmith et Place (1992, [5]) et Tu (1994, [144]), en considérant alors le modèle LS sous la forme d'un système dynamique, *ie* comme l'"évolution" au cours du temps d'un ensemble de points dans un sous-espace donné d'un espace euclidien de dimension n . Il s'agira dans notre cas des évolutions des biomasses des différents stocks considérés, des effectifs des tactiques . . . On trouvera des exemples d'applications des systèmes dynamiques concernant le domaine halieutique dans Durand et Lobry (1993, [39]), Sciandra et Lobry (1995, [134]) et Touzeau (1997, [143]).

Considérer le modèle LS sous sa version déterministe revient à supposer l'absence de terme aléatoire dans la formule (4.1). Le modèle s'écrit alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{j,k,t_i} = f(B_{k,t_i}, \theta_f \in \Theta) \\ B_{k,t_i} = g(B_{k,t_{i-1}}, \sum_{j,s} f_{j,s,t_i} c_{j,k,t_i}, \theta_g \in \Theta) \\ f_{j,s,t_i} = h((c_{j,k,t_{i-1}}, c_{j,k,t_{i-\Delta t}})_{j,k}, \theta_h \in \Theta) \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Le modèle (3.7), parce qu'il est indexé par les tactiques, les stocks et les stratégies, définit plutôt une famille de modèles. Avant d'étudier les propriétés de certains éléments simples de cette famille, rappelons brièvement la démarche associée à l'étude des systèmes dynamiques.

3.2.1 Les systèmes dynamiques

Définition 3.2.1 (d'après Tu 1994, [144], p. 1) *Un système dynamique est une application :*

$$\begin{array}{ccc} \Phi : T \times S \subset \mathbf{R}^n & \longrightarrow & \mathbf{R}^n \\ (t, x) & \longmapsto & \Phi(t, x) = \Phi_t(x) = x_t \end{array}$$

telle que $\Phi(0, x) = id$ et $\Phi(t, x) \circ \Phi(s, x) = \Phi(t + s, x)$.

L'indice t représente le temps, et $(x_t)_{t \in T}$ définit la trajectoire du système. Lorsque $T \subseteq \mathbf{R}$ (resp. $T \subseteq \mathbf{Z}$) le système dynamique est dit continu (resp. discret). Dans le cas continu, on peut définir un système dynamique à l'aide d'un système d'équations différentielles $\dot{x} = f(t, x)$; où $f : \mathbf{R} \times \mathbf{R}^n \longrightarrow \mathbf{R}^n$. Dans le cas discret, on peut définir un système dynamique à l'aide d'un système d'équations aux différences $x_{n+1} = f(n, x_n)$ où $f : \mathbf{Z} \times \mathbf{R}^n \longrightarrow \mathbf{R}^n$. C'est sous ces formes que nous considérerons les systèmes dynamiques présentés dans la suite.

L'étude de base d'un système dynamique consiste à déterminer sa trajectoire $(x_t)_t$. Une telle étude est facilitée lorsque $x \in \mathbf{R}$ ou $x \in \mathbf{R}^2$. En effet, nous disposons alors de représentations géométriques dans un plan. Il peut s'agir de x en fonction de t , ou $x(t+1) = g(x(t))$ lorsque $x \in \mathbf{R}$ ou du graphique $x_2 = h(x_1)$ lorsque $x = (x_1, x_2) \in \mathbf{R}^2$. On appelle portraits de phase de telles représentations géométriques de la solution.

3.2.1.1. Systèmes dynamiques linéaires

Lorsque le système dynamique est linéaire (ie $f(x) = Ax + b$ où $x \in \mathbf{R}^n$, $A \in \mathcal{M}(n, n)$ et $b \in \mathbf{R}^n$), on peut déterminer sa solution explicite (théorèmes 5.1 et 5.2 p. 84, Tu 1994, [144]).

Celle-ci va être liée à la décomposition de la matrice A en valeurs singulières (voir Tu 1994, [144] chapitre 5). On montre alors que l'ensemble des portraits de phase est fini⁸ (Arrowsmith and Place 1992, [5], p. 51.). Dans le cas où $x \in \mathbf{R}^2$, cet ensemble a été déterminé (Tu 1994, [144] : figure 5.9 p. 107; Arrowsmith and Place 1992, [5] : figure 2.7 p. 47.).

3.2.1.2. Systèmes dynamiques non linéaires

Lorsque le système est linéaire et simple (ie admet un unique point fixe pouvant être ramené à l'origine), et si l'on considère sa restriction à un voisinage N autour de l'origine, il existe un voisinage $N' \subset N$ tel que la restriction du portrait de phase à N' soit qualitativement équivalente au portrait de phase global⁹ (Arrowsmith and Place 1992, [5], p. 71). Cette propriété n'est plus valable lorsque le système n'est pas linéaire. La détermination du portrait de phase d'un système non linéaire fait donc appel à des études locales (au voisinage des points fixes) et globales.

Définition 3.2.2 (Tu 1994, [144], p.3) $x \in S$ est dit point d'équilibre ou point fixe de Φ si $\forall t \in \mathbf{R}, \Phi(t, x) = x$.

Définition 3.2.3 (Tu 1994, [144], p. 134) Un point fixe au voisinage de l'origine d'un système non linéaire est dit simple si son système linéarisé n'admet pas de valeur propre nulle (ie si $\det(A) \neq 0$).

Définition 3.2.4 (Tu 1994, [144], p. 134) Un point hyperbolique est un point fixe simple dont le système linéarisé Ax n'admet pas de valeur propre de partie réelle nulle.

Théorème 3.2.1 (Tu 1994, [144], p. 135) Supposons que le système dynamique non linéaire $\dot{x} = f(x)$ où $f : S \subset \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$ admette un point fixe hyperbolique. Alors il existe un voisinage de ce point pour lequel les comportements du système linéarisé et du système non linéarisé sont qualitativement équivalents.

Lorsque les points fixes ne sont pas simples, il n'y a pas équivalence au voisinage du point fixe entre le portrait de phase du système et celui de sa version linéarisée. Ainsi, il n'existe pas de classification détaillée de la forme de la solution au voisinage de points qui ne sont pas simples. On dispose cependant de résultats quant à la stabilité de la solution. En particulier, il existe des théorèmes donnant des conditions nécessaires de stabilité et de non stabilité, (Arrowsmith and Place 1992, [5], théorèmes 3.5.1 page 89 et 3.5.3 page 91),

8. Plus exactement, il existe un nombre fini de portraits de phase qualitativement différents. Deux systèmes dynamiques sont qualitativement équivalents s'il existe une bijection continue entre les deux portraits de phase laissant invariante l'orientation des trajectoires.

9. ie il existe une bijection continue entre N' et \mathbf{R}^2 reliant le portrait de phase restreint à N' au portrait de phase global.

relativement aux définitions de la stabilité données par les auteurs (Arrowsmith and Place 1992, [5], p. 84 et 86).

On appelle point ordinaire tout point du plan de phase qui n'est pas fixe. Nous disposons alors d'un résultat nous indiquant que tous les portraits de phase locaux des points ordinaires sont qualitativement équivalents (Arrowsmith and Place 1992, [5], théorème 3.6.1 page 94).

On est donc capable de déterminer les portraits de phase dans le cas de tous les points ordinaires et des points fixes simples hyperboliques. Toutefois, cette information ne permet pas de déterminer le portrait de phase complet du système, et en particulier d'identifier l'existence de cycles limites.

3.2.1.3. Cas discret

Nous pouvons mener (Tu 1994, [144], p 157), une analyse parallèle à celle concernant le cas continu lorsqu'on considère un système d'équations aux différences. La forme de la solution est toujours conditionnée par la décomposition en valeurs propres de A (l'ensemble des formes dans le cas \mathbf{R}^2 , est présenté dans Tu 1994, [144], à la figure 6.6 page 128.). Un point hyperbolique est alors un point fixe n'admettant pas de valeur propre sur le cercle unité. Nous avons alors l'équivalent du théorème 3.2.1 nous assurant l'équivalence au voisinage d'un point fixe hyperbolique du portrait de phase du système avec sa version linéarisée.

3.2.2 Applications au modèle LS

Nous allons maintenant étudier certaines propriétés du modèle. Cette étude sera limitée à des cas simples, comparés aux modèles qui seront utilisés pour représenter une partie de l'exploitation artisanale sénégalaise. Dans les exemples traités, nous considérerons suivant les cas les versions continues ou discrétisées du modèle. Les systèmes que nous considérons n'étant pas linéaires, nous procéderons de la manière suivante pour chacun des exemples considérés :

- Recherche du ou des points fixes du modèle,
- Linéarisation au voisinage des points fixes, et étude pour chacun d'eux des comportements du système linéarisé à leur voisinage.

3.2.2.1. Exemple 1 : Une tactique et un stock, $\alpha = cte$

Version continue

$$\text{Le modèle s'écrit : } \begin{cases} c_t = qf_t(B_t - \alpha Bv) \\ \frac{dB_t}{dt} = rB_t(1 - \frac{B_t}{Bv}) - qf(B_t - \alpha Bv) \\ f_t = cte \end{cases} \quad (3.8)$$

Ici, la capture par unité d'effort étant proportionnelle à la biomasse et f étant fixé, l'étude du modèle 3.8 se ramène à celle du modèle :

$$\frac{dB_t}{dt} = -\frac{r}{Bv}B_t^2 + (r - qf)B_t + qf\alpha Bv = aB_t^2 + bB_t + c = F(B_t).$$

Proposition 3.2.1 *Il existe deux valeurs d'équilibre de la biomasse $B_1^* = 0$ et $B_2^* = \frac{-(r-qf)-\sqrt{\Delta}}{2a}$. L'équilibre non trivial est stable.*

A l'équilibre $F(B) = 0$, et le discriminant vaut $\Delta = (r - qf)^2 + 4rqf\alpha \geq (r - qf)^2$.

- Si $\alpha = 0$ et $r = qf$, alors $\Delta = 0$, et $F(B)$ admet une racine double $B^* = 0$.
- Sinon $\Delta = (r - qf)^2 + 4rqf\alpha > 0$. Il existe deux racines $r_1 = \frac{-(r-qf)+\sqrt{\Delta}}{2a}$ et $r_2 = \frac{-(r-qf)-\sqrt{\Delta}}{2a}$. Comme $rqf\alpha > 0$, nous avons $\sqrt{\Delta} > (r - qf)$. Donc $r_1 < 0$ et $r_2 > 0$ puisque $r_1 r_2 = \frac{qf\alpha}{-r} < 0$. Les valeurs d'équilibre de la biomasse sont donc : B_1^* et $B_2^* = \frac{-(r-qf)-\sqrt{\Delta}}{2a}$.

Dans le cas non trivial ($B^* \neq 0$), la linéarisation du modèle autour de l'équilibre s'écrit :

$$F(B) = F(B^*) + (2aB^* + b)(B - B^*) + o(B - B^*)^2 \Rightarrow F(B) \simeq (2aB^* + b)(B - B^*).$$

Or $2aB^* + b = -\sqrt{\Delta} < 0$. Ici, la matrice A est réduite à un point. Le système linéarisé au voisinage de l'équilibre B^* s'écrit donc : $\frac{dB}{dt} = -\sqrt{\Delta}B$. $\sqrt{\Delta}$ étant négative, nous en déduisons que le point fixe est un point fixe stable.

Version discrétisée

$$\text{Le modèle s'écrit : } \begin{cases} c_{t+1} = qf_t(B_t - \alpha Bv) \\ B_{t+1} = \frac{r_1 \alpha K_t e^{-\alpha \Delta t} - r_2}{\alpha K_t e^{-\alpha \Delta t} - 1} = F(B_t) \\ f_{t+1} = cte \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\text{où } a = \frac{-r}{Bv} \leq 0, r_1 = \frac{-b+\sqrt{\Delta}}{2a} \leq 0, r_2 = \frac{-b-\sqrt{\Delta}}{2a} \geq 0, \alpha = r_1 - r_2 \leq 0, K_t = \frac{1}{B_t - r_1} + \frac{1}{r_1 - r_2}.$$

TAB. 3.1 – Valeurs des paramètres pour l'exemple 1: un modèle à une tactique exploitant un stock.

$Bv(kg)$	r	Δ_t	ρ	α	q_1	N
33.333 10^6	0.3	1/12	0.005	0.1	3 10^{-6}	2433

Pour les mêmes raisons que précédemment, l'étude du modèle se ramène à celle de :

$$B_{t+1} = \frac{r_1 \alpha K_t e^{-a\alpha\Delta_t} - r_2}{\alpha K_t e^{-a\alpha\Delta_t} - 1} = F(B_t)$$

Proposition 3.2.2 *Il existe un unique point fixe non nul pour le système (3.9). et l'équilibre au voisinage de ce point fixe est stable.*

On montre que $F(B_t) = \frac{uB_t + v}{wB_t + k}$ où $u = r_1 e^{-a\alpha\Delta_t} - r_2 \leq 0$, $v = r_1 r_2 (1 - e^{-a\alpha\Delta_t}) \leq 0$, $w = e^{-a\alpha\Delta_t} - 1 \leq 0$, et $k = r_1 - r_2 e^{-a\alpha\Delta_t} \leq 0$.

$$B \text{ point fixe} \iff wB^2 + (k - u)B - v = 0.$$

$$\text{Or } k - u = (1 - e^{-a\alpha\Delta_t})(r_1 + r_2) \text{ et } v = r_1 r_2 (1 - e^{-a\alpha\Delta_t}),$$

$$\text{ainsi: } B \text{ point fixe} \iff 1 - e^{-a\alpha\Delta_t} = 0 \text{ ou } B^2 - (r_1 + r_2)B + r_1 r_2 = 0$$

$$\iff r_1 = r_2 \text{ ou } B^2 - (r_1 + r_2)B + r_1 r_2 = 0. \quad (*)$$

Si $r_1 \neq r_2$, alors il existe deux points fixes r_1 et r_2 . Comme $r_1 \leq 0$, il existe une unique solution non nulle r_2 à l'équation (*).

Le système linéarisé en B^* s'écrit: $F(B_t) = F'(B^*)(B_t - B^*) + o(B_t - B^*)$.

D'après les conditions de stabilité relatives au cas discret (Tu 1994, [144], p. 123-125), le système est asymptotiquement stable ssi $|F'(B^*)| < 1$.

Nous avons $F'(B_t) = \frac{uk - wv}{wB_t + k} \geq 0$, $\forall B_t$. En effet, $uk - wv = (r_1 - r_2)^2 e^{-a\alpha\Delta_t}$. En remplaçant B_t par $B^* = r_2$, nous en déduisons que $wr_2 + k = (r_1 - r_2)$. Ainsi, $F'(B_t) = e^{-a\alpha\Delta_t} < 1$ car $a\alpha\Delta_t \geq 0$, a et α étant à valeurs négatives ou nulles.

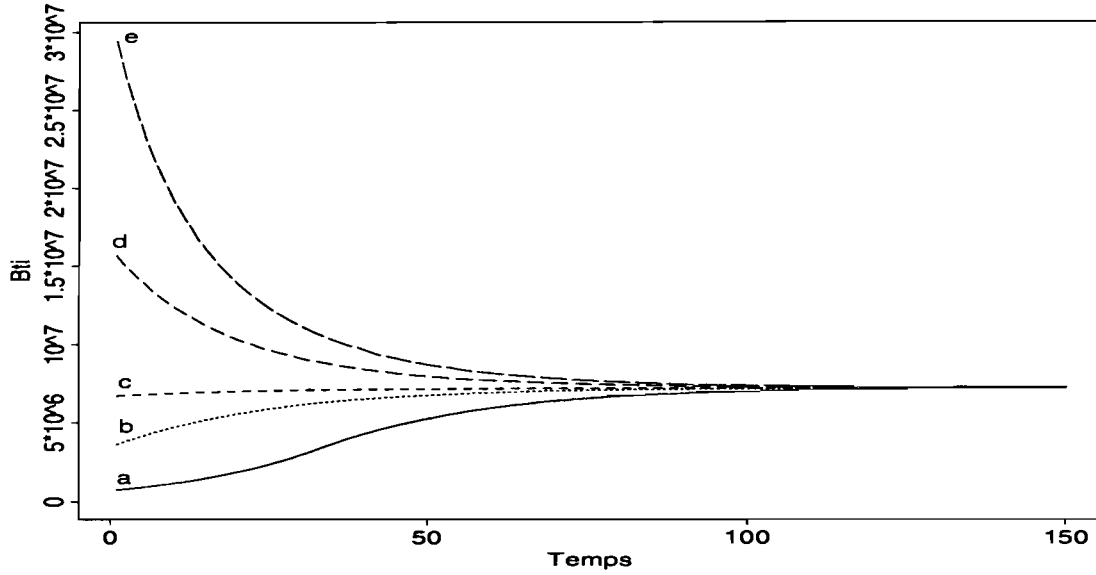


FIG. 3.2 – *Modèle à un stock et à une tactique où l’effort est fixé : graphe de B_{t_i} en fonction de t_i pour 5 valeurs de biomasses initiales : a) 666660 kg, b) 3333300 kg, c) 6666600 kg, d) 16666500 kg, e) 33333000 kg. Simulation sur 15 années avec pas de temps mensuel.*

Nous illustrons cet exemple en considérant un modèle LS à une tactique, un stock et une stratégie où α et N sont constants. Les valeurs des paramètres sont données dans le tableau (3.1). Nous avons effectué 5 simulations pour des valeurs initiales B_{t_0} différentes. Nous pouvons alors constater (figure 3.2) que (B_{t_i}) converge bien dans chacun des cas vers le point d’équilibre, correspondant ici à l’asymptote.

3.2.2.2: Exemple 2: deux tactiques et un stock, α est constant

$$\text{Le modèle s'écrit : } \begin{cases} c_{11,t_i} = q_{11}(B_{1,t_i} - \alpha B v_k) \\ c_{21,t_i} = q_{21}(B_{1,t_i} - \alpha B v_k) \\ B_{t_{i+1}} = \frac{uB_{t_i} + v}{wB_{t_i} + k} = F(B_{t_i}) \\ f_{1,t_{i+1}} = \mu f_{1,t_i} + (1 - \mu)N \frac{R_1}{R_1 + R_2} = G(f_{1,t_i}) \end{cases} .$$

Etant donné que les captures par unité d’effort sont à une constante près proportionnelles à l’état de la biomasse, l’étude du modèle peut se ramener à celle du système :

$$\text{Le modèle s'écrit : } \begin{cases} B_{t_{i+1}} = \frac{uB_{t_i} + v}{wB_{t_i} + k} = F(B_{t_i}) \\ f_{1,t_{i+1}} = \mu f_{1,t_i} + (1 - \mu)N \frac{R_1}{R_1 + R_2} = G(f_{1,t_i}) \end{cases} . \quad (3.10)$$

$$(B, f_1) \text{ point fixe } \iff \begin{cases} r_1 = r_2 \text{ ou } B = r_2 \\ f_1 = N \frac{R_1}{R_1 + R_2} \end{cases} .$$

Il existe donc un point fixe non nul pour le système considéré. Nous considérons désormais ce point fixe (f^*, B^*) correspondant à B^* non nul. Pour étudier les conditions de stabilité de la solution, il faut donc linéariser le système (3.10) autour de l'équilibre. et pour cela exprimer la matrice :

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial B}(f^*, B^*) & \frac{\partial F}{\partial f}(f^*, B^*) \\ \frac{\partial G}{\partial B}(f^*, B^*) & \frac{\partial G}{\partial f}(f^*, B^*) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}.$$

A l'équilibre nous avons $f^* = N \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ et $B^* = r_2^*$ que nous noterons r_2 dans la suite. En reportant dans l'équation (1) nous obtenons alors:

$$\frac{\partial F}{\partial B}(f^*, B^*) = \frac{uk}{(wB+k)^2} = e^{-a\alpha\Delta t} = \frac{r_2^2 e^{-a\alpha\Delta t}}{((e^{-a\alpha\Delta t}-1)B - r_2 e^{-a\alpha\Delta t})^2} = e^{-r_2 \frac{r}{B^*} \Delta t} = a.$$

$$\frac{\partial F}{\partial f}(f, B) = \frac{B}{(wB+k)^2} (B(u'w - w'u) + (u'k - k'u)) = r_2'(e^{ar_2\Delta t} - 1) = b,$$

$$\frac{\partial G}{\partial B}(f, B) = (1 - \mu)N \frac{\partial}{\partial B} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = (1 - \mu)N \frac{R_1 R_2 P \rho}{(R_1 + R_2)^2} (q_1 - q_2) = c,$$

$$\frac{\partial G}{\partial f}(f, B) = \mu = d.$$

$$\text{Ainsi nous avons : } \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-r_2 \frac{r}{B^*} \Delta t} & -r_2'(e^{ar_2\Delta t} - 1) \\ (1 - \mu)N \frac{R_1 R_2 P \rho}{(R_1 + R_2)^2} (q_1 - q_2) & \mu \end{pmatrix},$$

$$\text{où } r_2 = \frac{(r - q_1 f_1 - q_2 f_2)}{a} \text{ et donc } r_2' = \frac{q_2 - q_1}{a}, \text{ car } f_2 = f - f_1.$$

La forme de la solution autour de l'équilibre va donc dépendre de la diagonalisation de la matrice A . Nous avons λ valeur propre $\iff (\lambda)^2 - \tau\lambda + \delta$ où $\tau = a + d$ et $\delta = ad - cb$. Nous avons ainsi $\Delta = (a + d)^2 - 4(ad - cb) = (a - d)^2 + 4cb$: si $\Delta < 0$ alors les valeurs propres sont imaginaires, si $\Delta \geq 0$, alors les valeurs propres sont réelles.

D'après le théorème 7.9 paragraphe 7.6 p157 (Tu 1994, [144]), nous avons équivalence au voisinage de l'équilibre entre les solutions du système (3.10) et de sa version linéarisée lorsque aucune des valeurs propres n'est en module égale à 1. On distingue alors quatre cas:

$|\lambda_i| < 1, i = 1, 2$: nous avons alors convergence vers le point (B^*, f^*) d'équilibre. L'équilibre est atteint de manière oscillatoire si les valeurs propres sont imaginaires et non oscillatoire si les valeurs propres sont réelles.

$|\lambda_i| > 1, i = 1, 2$: nous avons divergence autour de l'équilibre, de manière oscillatoire si les valeurs propres sont imaginaires et de manière non oscillatoire si les valeurs propres sont réelles.

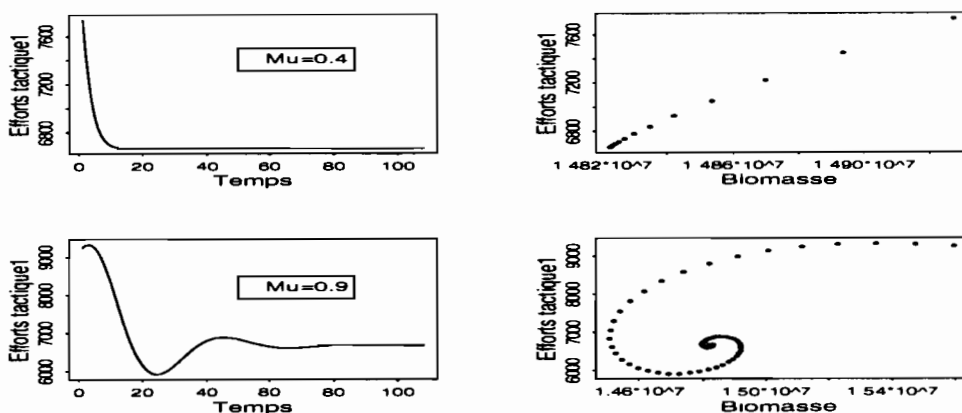


FIG. 3.3 – Un modèle à deux tactiques exploitant un stock : tracé des effectifs de la première tactique en fonction du temps et en fonction de la biomasse du stock pour deux valeurs du paramètre μ ($\mu = 0.4$ et $\mu = 0.9$). Simulation sur 11 années avec pas de temps mensuel.

$|\lambda_i| < 1 < |\lambda_j|$: le point d'équilibre est un point selle.

$|\lambda_i| = |\lambda_j| \iff \Delta = 0$: le point d'équilibre est alors un nœud stable impropre si le module est inférieur à 1 et instable si le module est supérieur à 1.

Les conditions de stabilité de la solution sont $|\lambda_i| \leq 1; i = 1, 2$.

Nous illustrons cet exemple en considérant un modèle à un stock et deux tactiques. Les valeurs des paramètres sont données dans le tableau 3.2. En fait la deuxième tactique ne correspond pas à une tactique de pêche ($q_2 = 0$). Elle représente ici la possibilité pour les pêcheurs de pratiquer une autre activité que la pêche (tactique 1). Cette activité engendre un revenu dont nous rendons compte en accordant à la tactique un coût de mise en œuvre négatif.

Nous avons alors $(f^*, B^*) = (6658, 14.810^6)$; et on en déduit:

$$A = \begin{pmatrix} 0.985 & -40.91 \\ 0.021(1 - \mu) & \mu \end{pmatrix}.$$

$\Delta = \mu^2 - 1.63\mu + 0.63$, cette équation admettant deux racines $\mu_1 = 0.63$ et $\mu_2 = 0.99$. Si μ est à l'intérieur des racines alors les valeurs propres sont imaginaires et sinon elles sont réelles. Nous avons considéré deux cas, avec $\mu = 0.9$ et $\mu = 0.4$ Nous obtenons alors les résultats suivants:

TAB. 3.2 – Valeurs des paramètres pour le second exemple : un modèle à deux tactiques exploitant un stock.

Bv	r	Δ_t	P	C_1	C_2	ρ	q_1	q_2	N
$33.333 \cdot 10^6$	0.4	1/12	1600	0	-65000	0.005	$2.78 \cdot 10^{-6}$	0	10948.5

μ	λ_1	λ_2	$ \lambda_1 $	$ \lambda_2 $
0.4	0.88	0.55	0.88	0.55
0.9	0.942-0.082i	0.942+0.082i	0.946	0.946

Dans chacun des deux cas (figure 3.3) nous avons convergence vers le point d'équilibre, suivant un mode oscillatoire ($\mu = 0.9$) ou non ($\mu = 0.4$).

3.2.3 Conclusion

Nous avons étudié le comportement du modèle sur des exemples simples voire simplistes comparés à ceux auxquels nous serons confrontés lorsque nous considérerons des cas réels d'application du modèle.

Si dans le cas classique d'une pêcherie monostock où l'on fixe l'effort à un niveau constant (exemple 1) on trouve un unique cas d'équilibre qui est stable, il suffit de considérer deux tactiques de pêche pour qu'il en soit autrement (exemple 2).

Notre objet n'était pas ici de faire une typologie des comportements du modèle. En effet, ceux-ci vont se compliquer à mesure que l'on va considérer des versions plus élaborées du modèle, de telles études dépassant alors nos compétences en la matière. De plus, l'intérêt des équilibres en eux-même est peut-être limité étant donné que les exploitations halieutiques que nous étudions sont reconnues comme ne pouvant jamais atteindre un état d'équilibre à cause des perpétuels changements, voire bouleversements dont elles sont l'objet.

3.3 Relations avec des familles de modèles

Avant d'aborder au chapitre 4 les problèmes posés par la confrontation du modèle LS aux données, nous allons maintenant essayer de le relier à certaines familles classiques de modèles. Notre objet n'est pas ici de faire rentrer "à tout prix" le modèle LS dans une famille donnée, mais plutôt de rechercher certaines analogies pouvant nous être utiles par la suite.

3.3.1 Les modèles de régression

Un cas classique en halieutique est celui d'un stock exploité par des pêcheurs dont on suppose qu'ils n'emploient qu'un mode de pêche. Nous considérons ici l'exemple d'une pêcherie néo-zélandaise de homards pour laquelle nous disposons de données annuelles de captures et d'efforts de 1945 à 1990 (Breen 1991, [17]). Nous sommes dans le cas d'une stratégie ($S=1$), d'une tactique ($J=1$) et d'un stock ($K=1$) et le modèle (4.1) s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} c_{t_i} &= f(B_{t_i}, \theta_f \subset \Theta) e^{\varepsilon_{f,t_i}}, & \varepsilon_{f,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_1^2) \\ B_{t_i} &= g(B_{t_{i-1}}, \sum_{j,s} f_{t_j} c_{t_j}, \theta_g \subset \Theta) + \varepsilon_{g,t_i}, & \varepsilon_{g,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{2,t_i}^2) \\ f_{t_i} &= h(c_{t_i}, \theta_h \subset \Theta) + \varepsilon_{h,t_i}, & \varepsilon_{h,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{3,t_i}^2) \end{array} \right. .$$

Si l'on suppose que les efforts de pêche et l'état de la biomasse sont connus avec exactitude (ie $\sigma_{2,t_i} = \sigma_1 = 0$) alors le modèle précédent devient :

$$\left\{ \begin{array}{ll} c_{t_i} &= q(B_{t_i} - \alpha B_{v_k}) e^{\varepsilon_{t_i}} \quad \varepsilon_{f,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_1^2) \quad (1) \\ B_{t_i} &= g(B_{k,t_{i-1}}, f_{t_{i-1}}) \quad (2) \end{array} \right.$$

Nous retrouvons là le cadre classique d'application du modèle global (Laloë 1995, [90]) où l'on estime les paramètres du modèle à l'aide de l'équation de régression non linéaire (1) B_{t_i} étant considérée comme variable explicative. Comme cette variable n'est pas observée, elle est calculée récursivement à partir de l'équation (2).

Les données étant ici annuelles, l'accessibilité du stock est décrite par un seul paramètre α . D'autre part, nous supposons que l'activité de pêche a débuté la première année en posant $B_{t_0} = B_v$. Les paramètres du modèle sont donc $\Theta = (q, B_v, \alpha, r)$. Nous présentons dans le tableau (3.3) les résultats des ajustements pour chacun des cas considérés, et dans

la figure (3.4) les graphiques de la série observée et des séries ajustées. Nous avons considéré ici trois critères d'ajustement :

1. **Les moindres carrés.** Les paramètres sont estimés en minimisant la fonction objectif :

$$S_1(\Theta) = \sum_{i=1}^n (c_{t_i} - f(B_{t_i}, \Theta))^2, \text{ où } f(B_{t_i}, \Theta) = q(B_{t_i} - \alpha B_{t_i}).$$

2. **Le maximum de vraisemblance.** En prenant le logarithme de l'équation (1), nous obtenons $\varepsilon_{t_i} = \ln(c_{t_i}) - \ln(f(B_{t_i}, \Theta))$. Si l'on suppose que les ε_{t_i} sont indépendants alors les estimateurs du maximum de vraisemblance sont obtenus en minimisant :

$$S_2(\Theta) = \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{c_{t_i}}{f(B_{t_i}, \Theta)}\right)^2.$$

3. **La transformation logarithmique $\ln(1 + x)$.** Dans ce cas, nous considérons la transformation à l'aide de la fonction $\ln(1 + x)$. Cette transformation est souvent utilisée pour des variables à valeurs dans \mathbf{R}^+ expliquées à l'aide d'un modèle multiplicatif. Ce cas est classiquement rencontré lors de l'analyse de données d'efforts et de captures. Les paramètres Θ sont estimés en minimisant :

$$S_3(\Theta) = \sum_{i=1}^n \left(\ln\left(\frac{1 + c_{t_i}}{1 + f(B_{t_i}, \Theta)}\right)\right)^2.$$

Pour chacun des critères considérés, nous retrouvons sur cet exemple les résultats classiques d'ajustements univariés d'une série de captures moyennes sur des données d'efforts de pêche (Polachek *et al.* 1993, [111], Laloë 1995, [90]).

Laloë (1995, [90]) a présenté diverses méthodes d'estimations classiquement utilisées. Il note la piètre qualité des estimateurs qui n'étant pas fonctions linéaires de l'échantillon ne sont pas fortement convergent¹⁰ (voir aussi Schnute 1985, [132]; 1989, [133]). Il souligne là des problèmes d'estimabilité des paramètres fréquemment posés en régression non linéaire (Antoniadis 1992, [3]; Ross 1990, [119]). Ainsi, Schnute (1985, [132]) note que : “... *a mathematically rigorous procedure for a model identification procedure may be inaccessible*”. Quant aux interprétations pouvant être faites de telles estimations, Feller (1940, [43]) en décrivant de manière équivalente ses données par différents modèles souligne que “*thus in no special case any biological conclusion must be based solely on an agreement between the observed data and the logistic form*”.

10. Un estimateur $\hat{\theta}$ pour un paramètre θ est fortement convergent s'il converge P_0 -presque sûrement vers la vraie valeur θ_0 de ce paramètre lorsque le nombre n d'observations tend vers l'infini, P_0 étant la vraie distribution des observations, nous emploierons par la suite le terme de consistance pour la même notion.

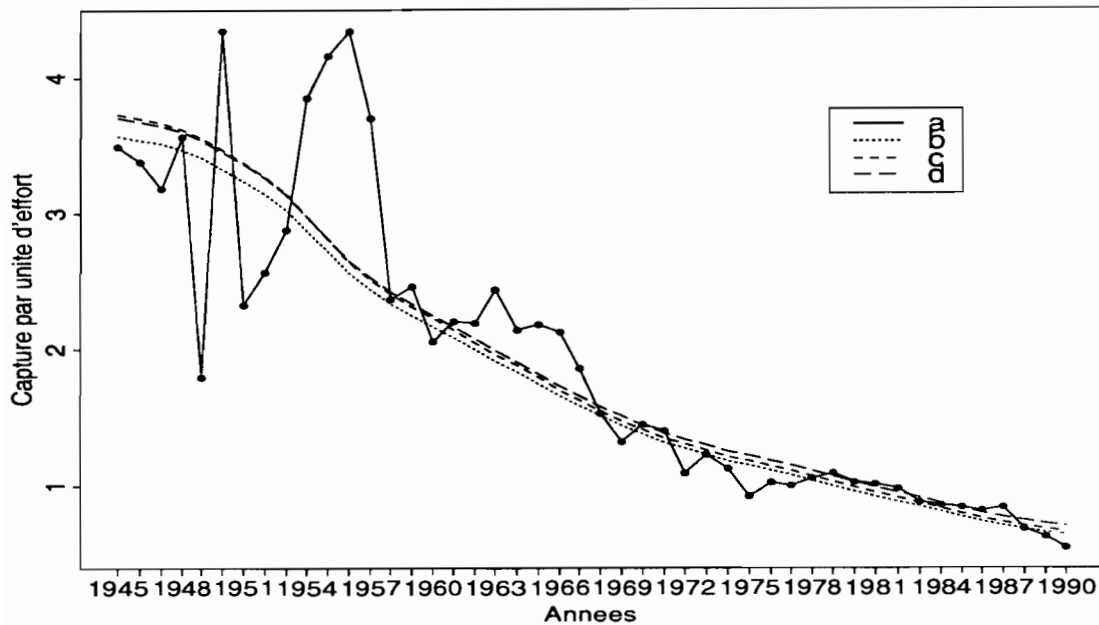


FIG. 3.4 – Exemple d'un modèle LS à une stratégie, une tactique et un stock : ajustement des captures par unité d'effort de rock-lobster (*Jassus edwardii*) pour chacun des critères considérés : a) données observées; b) moindres carrés; c) maximum de vraisemblance; d) transformation $\ln(1+x)$.

3.3.2 Les modèles à équations simultanées

Un modèle à équations simultanées est un modèle de régression multivariée où certaines variables sont suivant les équations explicatives ou à expliquer. Cette famille de modèles a été développée en économie, où on les désigne sous le nom de modèles économétriques (on en trouvera une présentation générale dans Theil (1971, [140]) ou Johnston (1984, [79]). Johnston (1984, [79], chapitre I) définit le rôle des modèles économétriques ainsi : *building and estimating models of the interconnections between various sets of variables in a predominantly non experimental situation*.

On observe n réalisations de q variables y_1, \dots, y_q . Ces variables sont dites dépendantes ou endogènes. L'objet est d'expliquer chacune des variables y_j par les autres variables endogènes et par p variables x_1, \dots, x_p explicatives ou exogènes. Le modèle s'écrit sous sa forme générale (Gallant 1987, [55]):

$$f(y, x, e, \Theta) = 0. \quad (3.11)$$

Certaines variables x peuvent être des variables endogènes décalées ou retardées. On re-

TAB. 3.3 – Exemple d'un modèle LS à une stratégie, une tactique et un stock : ajustement des captures par unité d'effort de rock-lobster (*Jassus edwardii*). Pour chacun des trois critères considérés : estimations et intervalles de confiance pour un coefficient de sécurité de 95 %.

Paramètre	Moindres carrés	Maximum de vraisemblance	Transformation $\log(1+x)$
\hat{q}	$9.1 \cdot 10^{-6} \in [7.67 \cdot 10^{-6}, 1.06 \cdot 10^{-5}]$	$9.6 \cdot 10^{-6} \in [8.1 \cdot 10^{-6}, 1.1 \cdot 10^{-5}]$	$9.4 \cdot 10^{-6} \in [7.9 \cdot 10^{-6}, 1.1 \cdot 10^{-5}]$
$\hat{\alpha}$	$0.03 \in [0, 1.16 \cdot 10^{-1}]$	$0.001 \in [0, 0.14]$	$0.011 \in [0, 0.14]$
\hat{r}	$4.2 \cdot 10^{-3} \in [0, 1.8 \cdot 10^{-2}]$	$6.5 \cdot 10^{-4} \in [0, 2.4 \cdot 10^{-2}]$	$5 \cdot 10^{-8} \in [0, 2 \cdot 10^{-2}]$
$\widehat{Bv} = \widehat{Bt}_0$	$4.1 \cdot 10^5 \in [3.6 \cdot 10^5, 4.57 \cdot 10^5]$	$3.9 \cdot 10^5 \in [3.5 \cdot 10^5, 4.4 \cdot 10^5]$	$4.1 \cdot 10^5 \in [3.6 \cdot 10^5, 4.5 \cdot 10^5]$
$\hat{\sigma}^2$	0.29	0.3	0.29

groupe souvent sous le terme de variables prédéterminées les variables endogènes retardées et les variables exogènes. Elles correspondent dans l'équation (3.12) aux variables x_i .

Modèles à équations simultanées linéaires

Lorsque les relations entre les variables sont linéaires, le modèle s'écrit sous sa **forme structurelle** :

$$YA + XB = \Gamma \quad (3.12)$$

- où $Y = (y_1, \dots, y_q)$ est la matrice $n \times q$ des variables endogènes,
 $X = (x_1, \dots, x_p)$ est la matrice $n \times p$ des variables prédéterminées,
 $\Gamma = (\epsilon_1, \dots, \epsilon_q)$ est la matrice $n \times q$, des résidus sur laquelle on émet généralement les hypothèses suivantes : $E(\Gamma_i) = 0$, $var(\Gamma_i) = \Sigma$, et où l'on suppose les lignes de Γ indépendantes,
 $A_{q \times q}$ et $B_{p \times q}$ sont deux matrices de coefficients exprimant les liens entre variables endogènes et exogènes.

Identification des paramètres

Considérons un modèle statistique paramétré, ie la description de la densité de probabilité d'un ensemble d'observations y à l'aide d'une fonction $f(y, x)$, $x \in \Omega$. Bartels (1985, [11]) définit ainsi l'identifiabilité de paramètres du modèle : "Write $\theta = (\theta_1, \theta_2)$. The value θ'_1 is then defined to be identifiable if there are no feasible values of θ_1^* , θ'_2 , and θ_2^* with

$\theta_1^* \neq \theta_1'$ for which $f(y; \theta_1', \theta_2') = f(y; \theta_1^*, \theta_2^*)$ ”.

Considérons maintenant le modèle (3.12). On sait que les paramètres d'un modèle de régression de la forme $y = X\beta + \varepsilon$ sont identifiables (Bartels 1985, [11]). Si A est inversible, alors nous pouvons écrire le modèle (3.12) sous une forme dite réduite :

$$Y = -XBA^{-1} + \Gamma A^{-1} \quad (3.13)$$

Les paramètres $\Pi = BA^{-1}$ sont identifiables, le problème est alors de retourner aux paramètres B et A . Cela revient à résoudre un système de pq équations ayant au plus $pq + q^2$ inconnues. Trois cas sont à distinguer :

1. Il y a plus de paramètres que d'équations : le modèle est sous-identifié. Cela signifie qu'il existe une infinité de solutions.
2. Il y a autant de paramètres que d'équations : le modèle est exactement identifié.
3. Il y a plus d'équations que de paramètres : le modèle est sur-identifié : il n'y a pas de solution.

Dans le troisième cas, certains des paramètres de B et A peuvent cependant être définis de manière unique. Nous sommes alors amenés à considérer l'identification de chacune des équations du modèle. On dispose d'une condition nécessaire et suffisante d'identifiabilité d'une équation du modèle (3.12) (Johnston 1984, [79], p 454).

Estimation des paramètres d'un modèle à équations simultanées

Nous considérons maintenant le cas d'un modèle sur ou exactement identifié. Si le modèle (3.12) est récursif (ie la matrice A est triangulaire supérieure), alors les estimateurs obtenus en appliquant les moindres carrés à l'équation structurelle sont non biaisés et consistants (Johnston 1984, [79], p. 468).

Lorsque le modèle (3.12) n'est pas récursif, l'estimation des paramètres du modèle à partir de sa forme structurelle par les moindres carrés ne conduit pas forcément à des estimateurs convergeant vers les vraies valeurs des paramètres. (voir à ce sujet l'exemple donné par Johnston (1984, [79], chapitre VII, p. 440)). La non consistance des estimateurs des moindres carrés est due à la non indépendance entre certains régresseurs (les variables endogènes) et les résidus du modèle. Afin d'obtenir pour un modèle à équations simultanées des estimateurs qui soient consistants, plusieurs méthodes existent. Leur principe est de se débarrasser de la non indépendance des régresseurs avec les résidus, on les dénomme sous la forme générique de méthodes sur variables instrumentales.

Soit le modèle $y = Z\beta + u$ où les régresseurs Z ne sont pas indépendants de u . Si l'on dispose d'un ensemble de variables indépendantes du bruit : $W_{n \times r}$ telles que $E(W'_t u_t) = 0 \forall i \in 1 \dots k, \forall t \in 1 \dots n$, et en multipliant par W' , nous obtenons :

$$W'y = W'Z\beta_{iv} + 0 \implies \hat{\beta}_{iv} = (W'Z)^{-1}W'y.$$

On montre alors que $\hat{\beta}_{iv}$ est un estimateur consistant de β .

Les moindres carrés indirects (ILS pour indirect least squares)

C'est une méthode que l'on peut employer dans le cas d'un modèle exactement identifié. Son principe est, lorsque A est inversible, de multiplier à gauche l'équation (3.12) par A^{-1} , nous retrouvons alors l'équation (3.13). Nous sommes alors ramenés à un problème de régression multiple "classique", Π étant estimé par $\hat{\Pi} = \widehat{BA}^{-1} = ({}^tXX)^{-1} {}^tXY$. Nous en déduisons par les moindres carrés des estimateurs consistants : $\hat{\Pi} = \widehat{B}\widehat{A}^{-1}$. Le modèle étant exactement identifié, nous en déduisons les estimateurs de A et B .

Cette méthode s'interprète comme une méthode sur variables instrumentales en prenant pour variables instrumentales les variables prédéterminées du modèle. La méthode d'estimation ainsi définie est nommée moindres carrés indirects (ILS). Les estimateurs qui lui sont associés sont consistants.

Les doubles moindres carrés (2SLS pour two stages least squares)

Cette procédure d'ajustement (Johnston 1984, [79]; Womer 1985, [147]) est applicable aux équations sur-identifiées ou exactement identifiées. Dans le cas d'un modèle ou d'une équation exactement identifiés, les doubles moindres carrés sont les estimateurs des moindres carrés indirects. Le principe consiste à se débarrasser de la non indépendance des régresseurs de l'équation (*ie* les variables endogènes) en les remplaçant par leur projection sur un ensemble de variables indépendantes de la résiduelle : les variables prédéterminées.

Les doubles moindres carrés peuvent s'interpréter comme des estimateurs sur variables instrumentales (Johnston 1984, [79], p 478). Cet auteur souligne un des désavantages des doubles moindres carrés dans le cas où le nombre de variables prédéterminées devient important par rapport au nombre d'observations. Dans ce cas nous pouvons avoir $Im(X) = \mathbf{R}^n$, et donc $P_X = Y$, les doubles moindres carrés se ramenant alors aux moindres carrés ordinaires.

Les triples moindres carrés (3SLS pour three stages least squares)

Cette méthode consiste à utiliser les moindres carrés généralisés pour corriger la non homoscedasticité des résidus. Pour cela, on estime la matrice de variance-covariance des résidus à l'aide des doubles moindres carrés puis on effectue la régression.

Exemple

Considérons le modèle LS tel que nous l'avons défini (paragraphe 3.1 de ce chapitre), et posons :

$$\begin{cases} y_{1,t} = (y_{1,t})_t = (c_{j,k,t})_{j,k}, & y_{2,t} = (B_{k,t})_k, & y_{3,t} = (f_{j,s,t})_{j,s}, \\ x_{1,t} = (x_{1,t})_t = (B_{k,t-1})_k, & x_{2,t} = (f_{j,s,t-1})_{j,s}, & x_{3,t} = (c_{j,k,t})_{j,k}, & x_{4,t} = (c_{j,k,t-\Delta_t})_{j,k}. \end{cases}$$

Le modèle (4.1) peut alors s'écrire :

$$y_t = f(x_t, y_t, \varepsilon_t),$$

ie sous la forme d'un modèle à équations simultanées où y_t définit l'ensemble des variables endogènes du modèle et x_t l'ensemble des variables prédéterminées. Ce modèle n'est pas dans le cas général linéaire. Considérons cependant l'exemple simple suivant d'un stock exploité par des unités de pêche employant deux tactiques de pêche. Nous supposons ici que $\mu=1$ ce qui signifie que les unités de pêche ne changent pas de tactique. Dans ce cas, les variables $f_{1,t}$ et $f_{2,t}$ sont des constantes et peuvent donc être considérées comme des paramètres que nous noterons N_1 et N_2 . Si nous décrivons l'évolution de la biomasse non pas en intégrant l'équation différentielle (3.3) mais en considérant la version discrète soit :

$$B_{t+1} = B_t(r + 1) - \frac{r}{B_v} B_t^2 - C_{1,t} - C_{2,t} + \varepsilon_{3,t},$$

et en faisant l'hypothèse supplémentaire d'additivité du bruit pour $c_{1,t}$ et $c_{2,t}$, le modèle (4.1) se met sous la forme :

$$\begin{cases} c_{1,t} = q_1(B_t - \alpha_1 B_v) + \varepsilon_{1,t} \\ c_{2,t} = q_2(B_t - \alpha_2 B_v) + \varepsilon_{2,t} \\ B_t = B_{t-1}(r + 1) - \frac{r}{B_v} B_{t-1}^2 - N_1 c_{1,t-1} - N_2 c_{2,t-1} + \varepsilon_{3,t} \end{cases} \quad (3.14)$$

Le jeu de données que nous considérons a été simulé à l'aide du modèle LS où les valeurs des paramètres utilisés sont donnés dans le tableau 3.4.

Sous la forme 3.14, le modèle à équations simultanées est linéaire en les variables. Ce modèle comprend 6 variables dont trois sont endogènes ($c_{1,t}, c_{2,t}, B_t$) et trois sont prédéterminées ($B_{t-1}, C_{1,t-1}, C_{2,t-1}$). La forme structurelle du modèle est alors :

TAB. 3.4 – Exemple d'un modèle LS exprimé comme un modèle à équations simultanées linéaires : ajustement par les moindres carrés récursifs sur des données simulées. Estimations et intervalles de confiance pour un coefficient de sécurité de 95 %

Paramètres	Valeurs utilisées	Estimations
$r + 1$	1.05	$1.048679 \in [1.047, 1.049]$
$-r/Bv$	$-1.5e - 09$	$-1.46665e - 09 \in [-1.57e - 09, -1.36e - 09]$
$-N_1$	-1520.83	$-1524.46 \in [-1538.87, -1510.27]$
$-N_2$	-1520.83	$-1531.568 \in [-1549.66, -1513.47]$
q_1	$3 \cdot 10^{-5}$	$3.048908e - 05 \in [2.102e - 05, 3.919e - 05]$
q_2	$2 \cdot 10^{-5}$	$1.956119e - 05 \in [1.8e - 05, 2.11e - 05]$
$-q_1\alpha_1 Bv$	-599.99	$-608.6042 \in [-834.23, -382.27]$
$-q_2\alpha_2 Bv$	-466.66	$-455.1758 \in [-493.68, -416.66]$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} B_{t_2} & c_{1,t_2} & c_{2,t_2} \\ B_{t_n} & c_{1,t_n} & c_{2,t_n} \end{pmatrix}}_Y \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -q_1 & -q_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_A + \underbrace{\begin{pmatrix} B_{t_1} & B_{t_1}^2 & c_{1,t_1} & c_{2,t_1} & 1 \\ B_{t_n} & B_{t_n}^2 & c_{1,t_n} & c_{2,t_n} & 1 \end{pmatrix}}_X \underbrace{\begin{pmatrix} -(1+r) & 0 & 0 \\ r/Bv & 0 & 0 \\ N_1 & 0 & 0 \\ N_2 & 0 & 0 \\ 0 & q_1\alpha_1 Bv & q_2\alpha_2 Bv \end{pmatrix}}_B = \Gamma$$

où l'on suppose que ${}^t\Gamma\Gamma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}$.

Ici le modèle est récursif car A est une matrice triangulaire supérieure. Nous pouvons donc estimer les paramètres directement à partir de la forme structurelle. Pour cela, nous estimons d'abord les paramètres de la troisième équation en appliquant les moindres carrés. En remplaçant $(B_{t_i})_{t_i \in T_{CN}}$ par l'estimation obtenue, nous pouvons alors ajuster les deux premières équations.

Les modèles à équations simultanées non-linéaires

L'exemple précédent nous a permis d'exprimer dans un cas simple le modèle LS sous la forme d'un modèle à équations simultanées linéaires. Les estimateurs obtenus sont alors non biaisés et consistants (Johnston 1984, [79], p. 468). Cependant ces résultats ne sont pas forcément valables lorsque l'on va considérer des cas plus généraux.

Si l'on permet aux unités de pêche de changer de tactique (et c'est bien l'une des caractéristiques du modèle LS), le modèle n'est plus linéaire (*cf* équations 4.1). Le problème de l'estimation d'un modèle à équations simultanées non linéaires est traité par Gallant (1987, [55], chapitres 6 et 7). L'auteur y exhibe des conditions d'existence d'estimateurs non biaisés et consistants. Il considère pour cela les méthodes des triples moindres carrés et celle du maximum de vraisemblance.

La méthode des triples moindres carrés consiste comme dans le cas linéaire à se débarrasser de la non indépendance des régresseurs avec les résidus en projetant les variables endogènes sur des variables instrumentales indépendantes des résidus. Un problème souligné par Gallant (1987, [55] p. 439) est celui du choix des variables instrumentales: *"The most disturbing aspect of three stage least squares estimators is that they are not invariant to the choice of instrumental variables. Various sets of instrumentals variables can lead to quite different parameters estimates even though the model specification and data remain the same."*

Les estimateurs du maximum de vraisemblance possèdent de bonnes propriétés. Cependant, leurs qualités sont peu robustes à une mauvaise spécification de la nature des distributions du modèle (Gallant 1987, [55] p. 467). Or nous avons déjà souligné que la nature des distributions définies (paragraphe 3.1 de ce chapitre) pouvait très bien ne pas correspondre aux "vraies" distributions.

3.3.3 Les modèles à variables latentes

Cette famille de modèles à été développée en économétrie, où l'on distingue les **modèles fonctionnels** ou à effets fixes (comme les modèles de régression, en particulier les modèles à équations simultanées) des **modèles structurels** ou à effets aléatoires (les modèles de variables latentes).

On observe n réalisations de p variables rangées dans un tableau $X_{n \times p}$ à n lignes (les individus) et p colonnes (les variables). On se propose de reconstituer ces observations à partir d'un petit nombre q ($q < p$) de facteurs non observés. Son objectif est, comme dans le cas d'une ACP (voir Fine 1993, [50] pour une comparaison des deux approches), de réduire la dimension du tableau X et d'étudier les relations entre individus et variables.

Soit $y = (y_1, \dots, y_p)'$ un vecteur aléatoire de \mathbf{R}^p , et $x = y - E(y)$. Le modèle de l'analyse en facteurs est le suivant :

$$\begin{cases} x = \Lambda f + \epsilon: & x \in \mathbf{R}^p; \mathbf{f} \in \mathbf{R}^p; \mathbf{e} \in \mathbf{R}^p \\ E(f) = E(\epsilon) = E(f^t \epsilon) = 0; E(\epsilon^t \epsilon) \text{ diagonale et régulière} \end{cases} \quad (3.15)$$

A partir du modèle (3.15) et en notant $\Sigma = E(xx')$, $\Phi = E(f^t f)$ et $\Psi = E(\epsilon^t \epsilon)$ on en déduit un modèle dit de structure de covariance :

$$\Sigma = \Lambda \Phi^t \Lambda + \Psi. \quad (3.16)$$

Les éléments $f = (f^1, \dots, f^q)$ sont appelés facteurs communs aux p variables, et les variables $e = (e^1, \dots, e^p)$ sont dénommées facteurs spécifiques. Λ est appelée "factor loadings matrix". Lorsque $\Phi = I$, on exprime ainsi chaque variable x^u observée comme une combinaison linéaire de facteurs communs plus un facteur spécifique e^u ; Λ étant la matrice de covariance entre les variables observables et les facteurs communs.

L'existence d'une solution (Λ, Φ, Ψ) au modèle (3.16) est une condition nécessaire à l'existence d'une solution (Λ, f, e) au modèle (3.15). Aussi la démarche consiste-t-elle à étudier d'abord le modèle (3.16) : c'est la phase d'estimation de Λ , ie on étudie les relations entre les variables observables et les facteurs communs; puis à considérer le modèle (3.15) : c'est la phase d'"estimation" de f , ie de prédiction des valeurs de f sur les individus à partir des valeurs observées sur les variables initiales. Ces deux étapes d'estimation font intervenir plusieurs niveaux d'indétermination relatifs (Fine 1993, [50]):

- Au problème de l'identification de Λ :

Les solutions (Λ, f, e) de (3.15) et (Λ, Φ, Ψ) de (3.16) ne sont pas uniques, mais définies à une "rotation" près. En effet, si A est une matrice $q \times q$ régulière, alors $(\Lambda A, A^{-1} f, e)$ et $(\Lambda A, A^{-1} \Phi^t A^{-1}, \Phi)$ sont deux solutions de (3.15) et (3.16). Cela permet de rechercher, sans perte de généralité, des solutions de (3.15) et (3.16) vérifiant $E(f^t f) = I$ et ${}^t \Lambda \Phi^{-1} \Lambda = \Gamma$ diagonale. Le modèle (3.16) devient ainsi

$$\Sigma_{pp} = \Lambda_{pq} {}^t \Lambda_{pq} + \Phi_{pp} \text{ où } \Phi_{pp} \text{ et } \Gamma = {}^t \Lambda \Phi^{-1} \Lambda \text{ sont diagonales.}$$

- Au problème de l'identification du modèle de structure de covariance :

En effet, si on considère le modèle (3.16), et si l'on note r le nombre de paramètres libres du modèle ie la différence entre le nombre de paramètres de Σ sans contraintes et le nombre d'équations, alors :

- Si $r < 0$, le modèle est surparamétré, il existe une infinité de solutions.
- Si $r = 0$, il existe une solution unique.

- Si $r > 0$, il y a plus d'équations que de paramètres, il n'y a pas de solution.

Comme le souligne Fine (1993, [50]): *“Le premier cas étant évidemment à éviter, le deuxième impossible à réaliser de façon pratique, on se place généralement dans le troisième cas. De plus, pour des raisons de parcimonie, il est conseillé d'utiliser peu de paramètres et donc de se placer dans cette situation. Il est alors nécessaire de rechercher des solutions approchées”*

Dans ce dernier cas, les paramètres de la matrice de variance-covariance sont alors estimés par $(\hat{\Lambda}_F, \hat{\Sigma}_F)$ minimisant une fonction de divergence

$F: (\hat{\Lambda}_F, \hat{\Sigma}_F) = \arg \min F(S, \Lambda^t \Lambda + \Phi)$, où S est la matrice de variance-covariance empirique des variables observées.

Il existe bien sûr plusieurs fonctions de divergence, par exemple basées sur les critères du maximum de vraisemblance ou des moindres carrés; les propriétés des estimateurs ayant été étudiées en particulier par Browne (1987, [19]).

- Considérons maintenant le cas où le modèle de structure de covariance est identifié, ie on dispose de (Λ, Φ) défini de manière unique ou de (Λ_F, Φ_F) minimum unique de la fonction de divergence: on montre alors que le modèle (3.15) admet une infinité de solutions (Fine 1993, [50]).

3.3.4 Les filtres de Kalman

Le principe du filtre de Kalman est d'estimer de manière récursive un processus ou une variable d'état x_t qui n'est pas directement observable mais qui l'est par l'intermédiaire d'une variable d'observation y_t . Meinhold et Singpurwalla (1983, [105]) présentent ainsi le problème: *“Let y_t, y_{t-1}, \dots, y_1 the data, denote the observed values of a variable of interest at time $t, t-1, \dots, 1$. We assume that y_t depends on an unobservable quantity x_t , known as the state of nature. Our aim is to make inferences about x_t .”*

Lorsque les relations entre la variable d'état et la variable d'observation sont linéaires, le modèle s'écrit (Meinhold et Singpurwalla 1983, [105]; Goodwin et Sang Sin 1984, [62]; Ljung and Söderstrom 1984,[103]; Gouriéroux et Monfort 1995, [63]; Brockwell and Davies 1987, [18]):

$$\begin{cases} x_{t+1} = A_t x_t + \epsilon_t \\ y_t = C_t x_t + \eta_t \end{cases}$$

et $\Sigma = \begin{bmatrix} Q & S \\ S' & R \end{bmatrix}$ est la matrice de variance covariance de $\begin{pmatrix} \epsilon_t \\ \eta_t \end{pmatrix}$ que l'on suppose suivre une loi normale d'espérance nulle.

Au temps t , x_t (K -vecteur aléatoire) constitue l'état du système. Cette variable est partiellement ou totalement inobservable. Le vecteur Y_t (L -vecteur aléatoire) désigne le vecteur des observations, ϵ_t est le vecteur des perturbations et η_t le vecteur des erreurs de mesures. L'objectif est d'estimer l'"état" du système au vu des observations, soit à calculer $\hat{x}_t = E(x_t/Y_0, \dots, Y_u)^{11}$. Un exemple traité par Sullivan (1992, [139]) est celui où l'on cherche à estimer la répartition en classes de taille (inobservable) d'une population de poissons à partir des captures (observables). Une première équation décrit l'évolution des effectifs suivant les tailles de la population au cours du temps, elle définit l'équation d'état. Une seconde équation, exprimant les captures par classe de taille en fonction des classes de taille de la population permet de définir l'équation d'observation.

L'estimateur récursif par le filtre de Kalman de x_{t+1} conditionnel aux valeurs observées de $\mathcal{Y}_t = \{y_t, y_{t-1}, \dots, y_1\}$ est donné (Goodwin and Sin 1984, [62], p 249) par :

$$\begin{cases} \hat{x}_{t+1} = A_t \hat{x}_t + K(t)[y_t - C_t \hat{x}_t] \\ \hat{x}_{t_0} = \bar{x}_0 \end{cases}, \quad (3.17)$$

où $K(t)$ est le gain du filtre donné par $K(t) = [A_t \Sigma(t)^t C_t + S][C_t \Sigma(t)^t C_t + R]^{-1}$ et $\Sigma(t)$ est la matrice de variance-covariance des erreurs conditionnelles :

$$\Sigma(t) = E\{[\hat{x}_t - x_t]^t [\hat{x}_t - x_t] / \mathcal{Y}_t\}$$

$$\text{vérifiant : } \begin{cases} \Sigma(t+1) = A_t \Sigma(t)^t A_t + Q - K(t)[C_t \Sigma(t)^t C_t + R]^t K(t) \\ \Sigma(t_0) = \Sigma_0 \end{cases}. \quad (3.18)$$

Le filtre de Kalman vérifie les "bonnes" propriétés (Goodwin and Sin 1984, [62]):

1. Si le bruit est gaussien, alors conditionnellement aux observations de y , \hat{x}_t est un estimateur non biaisé de x_t : $E\{\hat{x}_t - x_t / \mathcal{Y}(t-1)\} = 0$
2. \hat{x}_t est l'estimateur de variance minimale de l'état, ie si Σ_F est la matrice de variance covariance des erreurs, alors on a : $\Sigma(t) \leq \Sigma_F$ pour tout autre filtre.
3. Sans l'hypothèse gaussienne sur le bruit, alors le filtre de Kalman donne l'estimateur de variance minimale parmi les estimateurs linéaires des observations de y_t .

11. On parle suivant les cas de prédiction ($u < t$), de lissage ($u > t$) ou de filtrage ($u = t$).

Lorsque les relations entre les variables d'état et d'observation et/ou l'expression de la variable d'état au temps $t + 1$ en fonction de sa valeur au temps t ne sont pas linéaires, le modèle s'écrit :

$$\begin{cases} x_{t+1} = f_t(x_t, \epsilon_t) \\ y_t = h_t(x_t, \eta_t) \end{cases} \quad (3.19)$$

où $\Sigma = \begin{bmatrix} Q & S \\ S' & R \end{bmatrix}$ est la matrice de variance covariance de $\begin{pmatrix} \epsilon_t \\ \eta_t \end{pmatrix}$ toujours supposé gaussien d'espérance nulle.

Dans ce cas le filtre de Kalman n'est plus strictement applicable. Une manière de s'y ramener est de considérer la linéarisation du modèle (3.19) au voisinage de \hat{x}_t ie l'estimation de la variable d'état au temps t , $\epsilon_t = 0$ et $\eta_t = 0$. Le filtre qu'on en déduit est alors appelé filtre de Kalman étendu. Le modèle linéarisé s'écrit :

$$\begin{cases} x_{t+1} \simeq f_t(\hat{x}_t, 0) + F(t)[x_t - \hat{x}_t] + G(t)\epsilon_t \\ y_t \simeq h_t(\hat{x}_t, 0) + H(t)[x_t - \hat{x}_t] + J(t)\eta_t \end{cases}$$

$$\text{où } F(t) = \left[\frac{\partial f_t(x_t, \epsilon_t)}{\partial x_t} \right]_{x_t = \hat{x}_t, \epsilon_t = 0}, \quad G(t) = \left[\frac{\partial f_t(x_t, \epsilon_t)}{\partial \epsilon_t} \right]_{x_t = \hat{x}_t, \epsilon_t = 0},$$

$$H(t) = \left[\frac{\partial h_t(x_t, \eta_t)}{\partial x_t} \right]_{x_t = \hat{x}_t, \eta_t = 0}, \quad J(t) = \left[\frac{\partial h_t(x_t, \eta_t)}{\partial \eta_t} \right]_{x_t = \hat{x}_t, \eta_t = 0}.$$

On estime alors x_{t+1} et $\Sigma(t)$ en utilisant les formules données dans le cas linéaire. Cependant, nous ne disposons plus des propriétés d'optimalité du filtre, et comme souligné par Goodwin et Sin Sang (1984, [62]): "*Due to the linear approximation, it is quite possible that the filter diverge, and thus care must be exercised in using this method.*".

Le filtre de Kalman s'interprète comme l'estimation récursive de la variable d'état x_t : au pas de temps $t + 1$, on corrige l'estimation \hat{x}_t obtenue au pas de temps t en lui ajoutant un terme correctif proportionnel à l'erreur de prédiction ($y_{t+1} - \hat{y}_{t+1}$) de la variable d'observation commise en utilisant \hat{x}_t .

L'estimation récursive d'une variable d'état à l'aide d'un filtre de Kalman nécessite donc que l'on connaisse l'expression de A_t (cas linéaire) ou de f_t (cas non linéaire). Lorsqu'on ne connaît pas ces expressions, il faut les estimer à partir des observations y_0, y_1, \dots, y_T . Pour cela (Gouriéroux et Monfort 1995, [63]) on peut considérer la méthode du maximum de vraisemblance et utiliser le filtre de Kalman pour calculer numériquement la vraisemblance. Si on note θ le vecteur des paramètres inconnus, la vraisemblance associée

à l'échantillon (y_0, y_1, \dots, y_T) s'écrit $l(y, \theta) = p(y_0, y_1, \dots, y_T) = \prod_{t=1}^T p(y_t / \mathcal{Y}_{t-1})$. Le terme général $p(y_t / \mathcal{Y}_{t-1})$ est la densité d'une loi normale de moyenne $E(y_t / \mathcal{Y}_{t-1})$ et de matrice de variance-covariance Σ_t dont les valeurs peuvent être déterminées par le filtre de Kalman (formules (3.17) et (3.18)). Les valeurs de la vraisemblance ainsi déterminées peuvent être utilisées dans un algorithme de minimisation de $l(y, \theta)$ dans le but d'en déduire les estimations par le maximum de vraisemblance. Tout ceci suppose que les paramètres soient identifiables, ce qui n'est pas toujours le cas (Reed et Clement 1996, [117]). On trouvera deux exemples d'applications récentes dans le domaine des pêches menés par Sullivan (1992, [139]) et Reed et Clement (1996, [117]).

Un autre problème souligné par les auteurs (Ljung et Söderstrom 1984, [103]; Grillenzoni 1994, [66]) concerne le cas où nous sommes incapables de spécifier A_t et/ou C_t (f_t et/ou g_t dans le cas non-linéaire). Une solution consiste à émettre l'hypothèse de marche aléatoire pour la variable d'état, la valeur de la variance associée au bruit influant sur la sensibilité de l'algorithme au bruit. Grillenzoni (1994, [66]) note que les problèmes qui se posent alors peuvent être rapprochés de ceux rencontrés en régression non paramétrique à savoir trouver un compromis entre l'inaptitude à détecter des changements et une trop grande sensibilité au bruit.

Exemple

Nous considérons un modèle LS où deux stocks A et B sont exploités par des pêcheurs relevant d'une stratégie, et qui emploient deux tactiques. Nous avons lors de la présentation du modèle (paragraphe 4.1 de ce chapitre) décrit la capturabilité de la tactique j envers le stock k à l'aide du paramètre q_{jk} . Ce paramètre a été défini comme l'espérance de capture d'une unité de biomasse du stock k lorsqu'on met en œuvre une unité d'effort de la tactique j .

Le statut de ce paramètre n'est pas forcément très clair et il peut très bien être considéré comme une variable aléatoire dont les caractéristiques peuvent varier au cours du temps. Par exemple au milieu des années 1980, il y a une pénurie de pièces détachées et de moteurs hors-bord utilisés par les pêcheurs artisans. Il s'ensuit des difficultés de déplacement pour les unités de pêche artisanale, donc une diminution de leur capacité de capture, en particulier pour des stocks fréquentant des zones de pêche éloignées.

L'exemple présenté maintenant est bâti en s'inspirant du cas réel que nous venons de décrire. Cependant les données sont issues de simulations du modèle. Le lien avec la réalité doit être vu ici comme une aide à la compréhension de l'exemple proposé. Pour le modèle

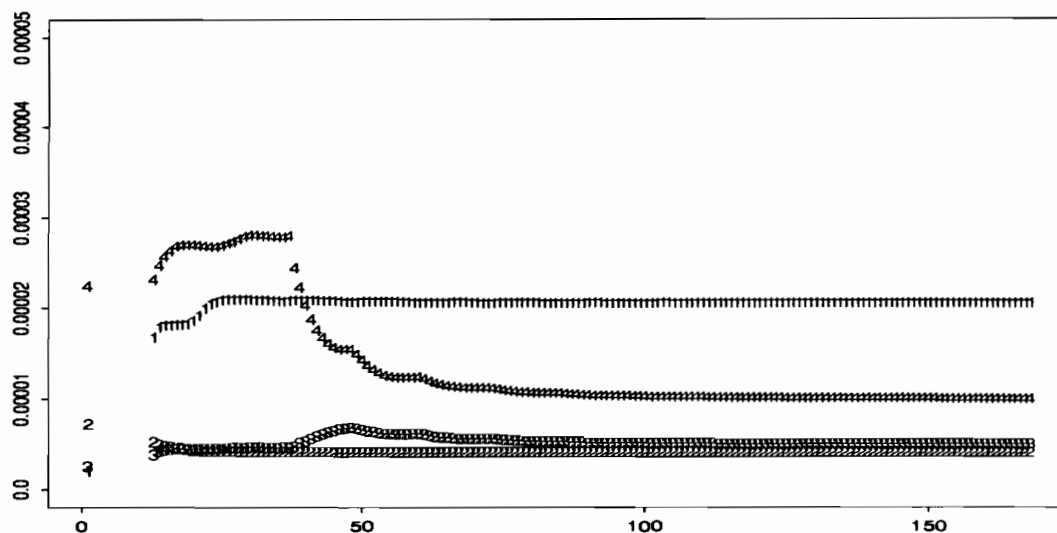


FIG. 3.5 – Représentation sous la forme espace-état du modèle LS. Estimation récursive des quatre paramètres de capturabilité d'un modèle à deux tactiques, deux stocks et une stratégie. 1 : estimations de q_1 ; 2 : estimations de q_2 ; 3 : estimations de q_3 ; 4 : estimations de q_4 .

considéré ici, chacune des deux tactiques capture des deux espèces, la première tactique visant plus particulièrement le stock A et la seconde le stock B. Nous avons simulé les données en supposant que la capturabilité q_4 de la seconde tactique envers le stock B est divisée par $5/2$ à une certaine date pour traduire une diminution de la capacité de déplacement des pirogues suite à une pénurie dans l'approvisionnement des moteurs. Les autres capturabilités restent inchangées.

Nous supposons ici que nous observons les efforts de pêche de chacune des deux tactiques ainsi que les captures moyennes associées sur les stocks exploités. Le modèle LS admet alors la représentation espace état suivante :

$$\left\{ \begin{array}{lll} q_{1,t} & = & E(q_1) + \varepsilon_{1,t} & \varepsilon_{1,t} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{q_1}^2) \\ q_{2,t} & = & E(q_2) + \varepsilon_{2,t} & \varepsilon_{2,t} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{q_2}^2) \\ q_{3,t} & = & E(q_3) + \varepsilon_{3,t} & \varepsilon_{3,t} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{q_3}^2) \\ q_{4,t} & = & E(q_4) + \varepsilon_{4,t} & \varepsilon_{4,t} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{q_4}^2) \\ \ln(c_{1,t}) & = & \ln(f(B_{A,t}, \theta_f \subset \Theta)) + \varepsilon_{f,1} & \varepsilon_{f,1} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_1^2) \\ \ln(c_{2,t}) & = & \ln(f(B_{B,t}, \theta_f \subset \Theta)) + \varepsilon_{f,2} & \varepsilon_{f,2} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_2^2) \\ \ln(c_{3,t}) & = & \ln(f(B_{A,t}, \theta_f \subset \Theta)) + \varepsilon_{f,3} & \varepsilon_{f,3} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_1^2) \\ \ln(c_{4,t}) & = & \ln(f(B_{B,t}, \theta_f \subset \Theta)) + \varepsilon_{f,4} & \varepsilon_{f,4} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_2^2) \\ f_{1,t} & = & h(f_{1,t-1}, c_{1,t-1}, c_{2,t-1}, c_{3,t-1}, c_{4,t-1}, \theta_h \subset \Theta) + \varepsilon_{h,1} & \varepsilon_{h,1} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{h,1}^2) \\ f_{2,t} & = & h(f_{2,t-1}, c_{1,t-1}, c_{2,t-1}, c_{3,t-1}, c_{4,t-1}, \theta_h \subset \Theta) + \varepsilon_{h,2} & \varepsilon_{h,2} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{h,2}^2) \end{array} \right.$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} x_t = f(x_t, \theta) + \varepsilon_{x,t} \\ y_t = g(y_{t-1}, x_t, \theta, \varepsilon_{y,t}) \end{array} \right.$$

$$\text{avec } \left\{ \begin{array}{l} x_t = (q_{1,t}, q_{2,t}, q_{3,t}, q_{4,t})' \\ y_t = (\ln(c_{1,t}), \ln(c_{2,t}), \ln(c_{3,t}), \ln(c_{4,t}), f_{1,t}, f_{2,t})' \end{array} \right.$$

Nous avons alors estimé récursivement les 4 paramètres de capturabilité de notre modèle à l'aide de l'algorithme pour un filtre de Kalman étendu précédemment décrit. Nous arrivons alors (figure 3.5) à estimer le changement intervenu sur la capturabilité. Cet exemple, bien entendu caricatural, permet cependant de souligner l'existence de représentations de type espace-état qui peuvent être appropriées à certains de nos problèmes. En effet, certaines sources de variabilité affectant les observations correspondent à des modifications des conditions de l'exploitation qui ne sont pas directement observées, et que l'on traduira par des changements des valeurs de nos paramètres. Si l'on cherche à estimer nos paramètres, nous sommes donc amenés au problème de l'estimation des modifications de leurs caractéristiques.

3.4 Discussion

En essayant de relier le modèle LS à plusieurs familles connues de modèles, nous pouvons noter que :

- Le problème du choix des estimateurs est un problème délicat pour lequel on ne dispose pas toujours de résultats ou de solutions bien nettes (voir par exemple le problème de la qualité des estimateurs récursifs dans le cas d'un filtre de Kalman étendu, ou celui du problème du choix des variables instrumentales dans les modèles à équations simultanées).
- Etant donné la confiance relative que l'on peut accorder aux distributions associées au modèle LS, et/ou la difficulté à décrire ces distributions sans poser des hypothèses trop restrictives, il est important de disposer d'estimateurs qui soient robustes aux écarts entre les distributions que nous considérons et les "vraies" distributions.
- Même si l'on dispose de "bons" estimateurs se pose le problème de la détermination de leurs estimations. Cette difficulté correspond à des problèmes d'ordre numérique de minimisation de fonctions qui peuvent avoir plusieurs minima.
- La question précédente est reliée à celle de l'identifiabilité des paramètres. Si l'on est capable dans le cas linéaire de juger de l'identifiabilité des paramètres d'un modèle, ce n'est pas le cas dans le cas non linéaire. On trouvera des illustrations de ce problème dans Ross (1990, [119]), Hills (1987, [73]) ou Hartley (1986, [68]).

L'importance des difficultés qui viennent d'être soulevées doivent maintenant être décrites pour le modèle que nous avons proposé. Cette explicitation ne pourra être faite que si l'on précise les conditions dans lesquelles peut être mené un ajustement du modèle LS aux données observées. C'est l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 4

Ajustements du modèle

Ce chapitre a pour objet la proposition d'une procédure d'ajustement du modèle LS. Nous essayerons dans un premier temps de voir comment les variables du modèle peuvent être reliées aux variables échantillonnées. Nous discuterons les méthodes d'ajustement envisageables avant de justifier celle que nous choisirons. Nous montrerons ensuite sur des jeux de données simulés certains problèmes qui se posent avant de proposer une procédure d'ajustement du modèle LS aux données observées.

4.1 Rappel du modèle LS

Le modèle LS est fondé sur une description de l'exploitation à l'aide de trois composantes : une ressource, des actions de pêche et des unités de pêche. Il définit trois processus liés respectivement à l'évolution de la ressource, à l'activité de pêche et à la répartition de l'effort de pêche. Il fait intervenir (tableau 4.1) cinq variables principales caractéristiques de l'état d'une des composantes (par exemple l'effectif d'une tactique) ou de l'interaction entre deux d'entre elles (par exemple la capture par unité d'effort d'une tactique envers un stock). Le modèle LS est régi par l'ensemble d'équations aux différences suivant qui a été défini au chapitre 3 :

$$\begin{cases} c_{j,k,t_i} = f(B_{k,t_i}, \theta_f \subset \Theta) e^{\varepsilon_{f,j,k,t_i}}, & \varepsilon_{f,j,k,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{j,k}^2) \\ B_{k,t_i} = g(B_{k,t_{i-1}}, \sum_{j,s} f_{j,s,t_i} c_{j,k,t_i}, \theta_g \subset \Theta) + \varepsilon_{g,k,t_i}, & \varepsilon_{g,k,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{k,t_i}^2) \\ f_{j,s,t_i} = h((c_{j,k,t_{i-1}}, c_{j,k,t_{i-\Delta_t}})_{j,k}, \theta_{h,j,s}) \subset \Theta + \varepsilon_{h,j,s,t_i}, & \varepsilon_{h,j,s,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{j,s,t_i}^2) \end{cases} \quad (4.1)$$

TAB. 4.1 – Récapitulatif des composantes et variables du modèle LS.

Composantes	Descripteurs	Variables	
Ressource	Stock	$(B_{k,t_1})_{(k,t_1) \in \{1, \dots, K\} \times TCN}$	B_{k,t_1} est la biomasse du stock k au temps t_1
		$(c_{j,k,t_1})_{(j,k,t_1) \in \{1, \dots, J\} \times \{1, \dots, K\} \times TCN}$	c_{j,k,t_1} est la capture du stock k par unité d'effort de la tactique j au temps t_1
Actions de pêche	Tactique	$(f_{j,t_1})_{(j,t_1) \in \{1, \dots, J\} \times TCN}$	f_{j,t_1} est l'effectif de la tactique j au temps t_1
		$(f_{j,s,t_1})_{(j,s,t_1) \in \{1, \dots, J\} \times \{1, \dots, S\} \times TCN}$	f_{j,s,t_1} est l'effectif de la stratégie s ayant au temps t_1 employé une action de pêche relevant de la tactique j .
Unités de pêche	Stratégie	$(N_s)_{s \in \{1, \dots, S\}}$	N_s est l'effectif de la stratégie s

4.2 Comparaison du modèle aux données

4.2.1 Variables du modèle et variables observées

Sur le terrain, les observations portent sur les efforts de pêche (*ie* le nombre de pirogues sorties en mer) et les débarquements pour chacune des strates lieu de débarquement \times type de pêche \times quinzaine (chapitre 1, paragraphe 1.3). En divisant les débarquements par le nombre de sorties, on peut également considérer une variable qui sera appelée capture par unité d'effort ou encore capture moyenne par sortie de pêche. D'autre part, ces variables ne sont pas directement observées mais estimées à partir d'un échantillonnage des efforts et des débarquements.

Le mercredi 13 novembre 1996, nous avons suivi les enquêtes menées à Yoff, plage de débarquement située au nord de Dakar. Parmi les pirogues lignes qui débarquaient certaines unités ramenaient des dorades profondes et d'autres des pageots. Toutes les enquêtes concernant ces débarquements ont été comptabilisées dans la même strate, en l'occurrence Yoff \times ligne \times 21^{ème} quinzaine de l'année 1996. Cependant tous les débarquements relatifs à ces pirogues ne correspondaient pas à un même choix tactique. En effet les pageots sont attrapés plus près de la côte et sur des fonds moins profonds que ceux où sont pêchées les dorades profondes. Un pêcheur nous indique que le fait de se rendre sur un des lieux est spécifiquement lié à la recherche d'une des deux espèces.

A partir des enquêtes menées ce jour là, nous disposerons d'estimations des captures débarquées par l'ensemble de ces pirogues, mais sans pouvoir distinguer les captures dues aux pirogues ayant recherché du pageot de celles ayant visé les dorades profondes.

Nous voyons au travers de cet exemple que toutes les variables définies dans le modèle ne sont pas directement observées ou estimées. S'il est assez évident que l'on n'observe pas directement les biomasses des stocks, cela est également vrai pour les efforts des tactiques et les captures associées, donc également pour les captures moyennes. En effet, excepté le cas où un engin de pêche ne correspond qu'à l'emploi d'une tactique, ces dernières sont définies dans le modèle à un niveau plus fin que la strate correspondante du plan d'échantillonnage.

Nous ferons dans la suite l'hypothèse que toute tactique de pêche relève d'une seule strate lieu de débarquement \times type de pêche. Nous considérons donc que deux engins de pêche différents n'engendrent pas les mêmes impacts sur la ressource, et que ceci est également le cas pour un même engin de pêche utilisé à partir de deux lieux de débarquements distincts. Par contre, la réciproque n'existe pas : une strate lieu de débarquement \times type de pêche peut recouvrir l'utilisation de plusieurs tactiques de pêche.

Si l'on appelle E l'ensemble des strates lieu de débarquement \times type de pêche, J l'ensemble des tactiques, K l'ensemble des stocks et S l'ensemble des stratégies alors nous pouvons définir :

$$\begin{aligned} \mathcal{E} : J &\longrightarrow E \\ j &\longmapsto \mathcal{E}(j) \end{aligned}$$

qui à une tactique associe la strate lieu de débarquement \times type d'engin dont elle relève,

$$\begin{aligned} \mathcal{E}^- : E &\longrightarrow 2^J \\ e &\longmapsto \mathcal{E}^-(e) = \{j \in J / \mathcal{E}(j) = e\} \end{aligned}$$

qui à une strate associe l'ensemble des tactiques relevant de cette strate,

$$\begin{aligned} \mathcal{J} : S &\longrightarrow 2^J \\ s &\longmapsto \mathcal{J}(s) \end{aligned}$$

qui à une stratégie associe l'ensemble des tactiques qu'elle contient,

$$\begin{aligned} \mathcal{K} : J &\longrightarrow 2^K \\ j &\longmapsto \mathcal{K}(j) \end{aligned}$$

qui à une tactique associe l'ensemble des stocks auxquels elle a accès.

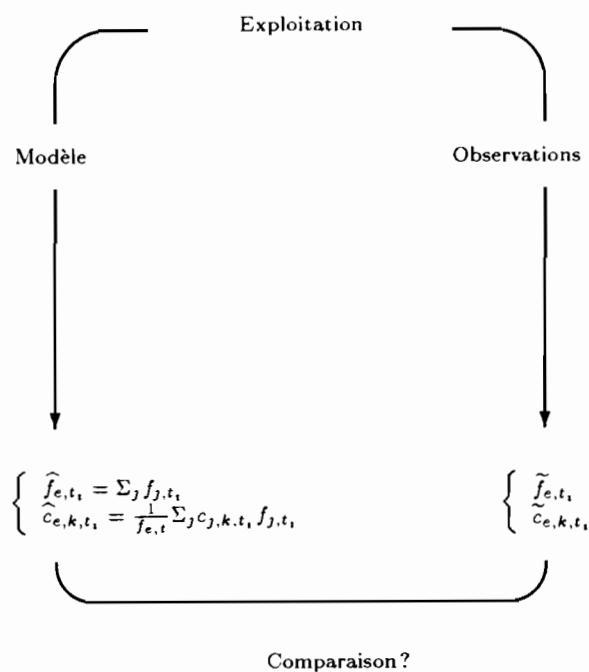


FIG. 4.1 - *Confrontation du modèle LS aux données observées.*

Nous désirons relier les variables échantillonnées (chapitre 1, paragraphe 1.3) à celles définies par le modèle (chapitre 3, paragraphe 3.1). Les variables échantillonnées sont les efforts et débarquements par strate lieu de débarquement \times type d'engin \times quinzaine. Nous venons de voir que les variables du modèle étaient définies à un niveau plus fin que la strate. Nous agrégerons donc les variables du modèle afin d'en déduire des variables du même type que celles qui sont observées :

$$\begin{cases} f_{e,t_i} &= \sum_{j \in \mathcal{E}^-(e)} f_{j,t_i} \\ c_{e,k,t_i} &= \begin{cases} \frac{1}{f_{e,t_i}} \sum_{j \in \mathcal{E}^-(e), k \in \mathcal{K}_J(j)} c_{j,k,t_i} f_{j,t_i} & \text{si } f_{e,t_i} \neq 0 \\ 0 & \text{si } f_{e,t_i} = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (4.2)$$

La modélisation à proposer doit *a priori* tenir compte d'au moins deux sources de variabilité :

- Une source relative aux processus, dont nous avons proposé une description au paragraphe 3.1 du chapitre 3.
- Une source relative à l'incertitude due à l'échantillonnage des variables. Nous avons brièvement présenté au paragraphe 1.3 du chapitre 1 comment les personnes ayant

participé à la mise en place du plan d'échantillonnage avaient alors caractérisé ces sources de variabilité.

Nous sommes ainsi amenés à considérer trois types de variables :

- Les réalisations des processus, notés $f_{e,t_i}(\omega)$ et $c_{e,k,t_i}(\omega)$.
- Les observations des processus, notés \tilde{f}_{e,t_i} et \tilde{c}_{e,k,t_i} .
- Les estimations des réalisations des processus à l'aide du modèle, notées \hat{f}_{e,t_i} et \hat{c}_{e,k,t_i} .

Il nous faudrait donc maintenant exprimer les distributions théoriques associées aux variables f_{e,t_i} et c_{e,k,t_i} définies dans l'équation 4.2. Mais de telles expressions sont difficiles à obtenir et peut-être d'un intérêt limité si l'on tient compte du peu de crédit qui peut légitimement être accordé aux distributions que nous avons proposées.

Considérons cependant la variable f_{e,t_i} du nombre d'unités de pêche ayant au temps t_i employé l'engin e . Si nous modélisons $f_{e,t_i}(\omega)$ par $f_{e,t_i}(\omega) = \hat{f}_{e,t_i} + \varepsilon_{1,t_i}(\omega)$ où $\varepsilon_{1,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_1)$, alors nous pouvons poser pour \tilde{f}_{e,t_i} la relation suivante :

$$\tilde{f}_{e,t_i} = (\hat{f}_{e,t_i} + \varepsilon_{1,t_i})(1 + \varepsilon_{2,t_i}), \quad \varepsilon_{2,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_2^2). \quad (4.3)$$

Ici, ε_{1,t_i} est un terme d'erreur traduisant l'incertitude commise lorsqu'on modélise le processus (variabilité du processus) et ε_{2,t_i} est relative à l'incertitude relative à l'échantillonnage de la variable $f_{e,t_i}(\omega)$ (variabilité due à l'échantillonnage). La formulation (4.3) revient à supposer que la variance associée à la variable "estimation du nombre de pirogues sorties en mer" est fonction de la valeur prise par la variable que l'on estime. L'équation (4.3) s'écrit alors :

$$\tilde{f}_{e,t_i} = \hat{f}_{e,t_i} + \hat{f}_{e,t_i}\varepsilon_{2,t_i} + \varepsilon_{1,t_i} + \varepsilon_{1,t_i}\varepsilon_{2,t_i}.$$

Si l'on néglige le dernier terme, et si l'on suppose que ε_{1,t_i} et ε_{2,t_i} ont des variances égales, alors nous obtenons :

$$\tilde{f}_{e,t_i} = \hat{f}_{e,t_i} + (1 + \hat{f}_{e,t_i})\varepsilon_{e,t_i}, \quad \varepsilon_{e,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_e^2).$$

Les résidus réduits s'expriment alors par : $\varepsilon_{t_i}^r = \frac{\tilde{f}_{e,t_i} - \hat{f}_{e,t_i}}{(1 + \hat{f}_{e,t_i})\hat{\sigma}_e}$.

Nous avons déjà signalé, au paragraphe 3.1 du chapitre 3 que la capture par unité d'effort est généralement modélisée en utilisant un modèle lognormal. Nous pouvons alors poser :

$$\tilde{c}_{e,k,t_i} = \hat{c}_{e,k,t_i} e^{\varepsilon_{e,k,t_i}}, \quad \text{où } \varepsilon_{e,k,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{e,k}^2), \quad e = 1, \dots, E; \quad k = 1, \dots, K. \quad (4.4)$$

4.2.2 Quels estimateurs pour quel modèle ?

Le modèle que nous considérons est donc présenté ci-dessous, l'expression de $f_{e,t}$, et $c_{e,k,t}$, ayant été donnée en (4.2):

$$\begin{cases} \tilde{f}_{e,t} &= \hat{f}_{e,t} + (1 + \hat{f}_{e,t})\varepsilon_{e,t}, & \varepsilon_{e,t} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_e^2), & e = 1, \dots, E. \\ \tilde{c}_{e,k,t} &= \hat{c}_{e,k,t} e^{\varepsilon_{e,k,t}}, & \varepsilon_{e,k,t} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{e,k}^2), & e = 1, \dots, E; k = 1, \dots, K. \end{cases} \quad (4.5)$$

Dans la formulation 4.5, les termes aléatoires sont les variables observées ($\tilde{f}_{e,t}, \tilde{c}_{e,k,t}$) et les termes résiduels ($\varepsilon_{e,t}, \varepsilon_{e,k,t}$) traduisant la variabilité causée par l'échantillonnage. Finalement, si l'on considère le système d'équations 4.2, $f_{e,t}$ (resp. $c_{e,k,t}$) est de la forme $f(\Theta, t_1, \dots, t_n)$ (resp. $g(\Theta, t_1, \dots, t_n)$), même si ces expressions sont difficilement directement exprimables.

Nous supposons que les termes résiduels du modèle (4.5) ne sont pas temporellement corrélés, ie $\forall s \neq t \neq u \neq v$ les termes $\tilde{f}_{e,s}, \tilde{f}_{e,t}, \tilde{c}_{e,k,u}, \tilde{c}_{e,k,v} \quad \forall e = 1, \dots, E; k = 1, \dots, K$ sont indépendants. Le système 4.5 se présente donc sous la forme d'un modèle de régression non linéaire "classique" tels ceux traités par Huet *et al.* (1992, [75]), à ceci près que nous nous situons ici dans un contexte multivarié.

Soulignons que les variances associées au modèle ne sont pas constantes dans le temps, en effet nous avons $var(\tilde{f}_{e,t}) = \sigma_e^2(1 + \hat{f}_{e,t})^2$ et nous avons posé pour les captures par unité d'effort un modèle lognormal. D'autre part, les distributions que nous avons attribuées aux variables observées (en particulier la distribution lognormale pour les captures par unité d'effort) sont des distributions utilisées de manière empirique en halieutique (Gauthiez 1997, [58]). Nous ne pouvons donc leur accorder une trop grande confiance, c'est la raison pour laquelle nous éviterons *a priori* l'utilisation de l'estimateur du maximum de vraisemblance.

Nous considérerons donc comme critère d'ajustement un critère de type moindres carrés. Pour une série, par exemple une série d'efforts $(\tilde{f}_{e,t})_{t=1,n}$, cela revient à considérer :

$$\sum_{t=1}^n (\tilde{f}_{e,t} - \hat{f}_{e,t})^2 = \|\tilde{f}_e - \hat{f}_e\|^2$$

Nous aurions pu introduire dans ce critère une pondération sur les termes de la somme visant à corriger la non homogénéité des variances des observations. Cependant, comme dans la cadre de la régression non-linéaire usuelle les estimateurs associés ne sont pas consistants (Huet *et al.* 1992, [75]), nous avons préféré ne pas inclure dans notre critère de

terme de pondération. D'autres critères seraient envisageables, par exemple ceux basés sur l'annulation d'équations estimantes (Huet *et al.* 1992, [75]; Gauthiez 1997, [58]).

Considérant plusieurs séries (et au minimum une série d'effort et une série de captures par unité d'effort), nous sommes amenés à présenter notre critère comme étant égal à une somme sur les séries des écarts quadratiques associés. Ces termes devant être comparables entre eux, nous diviserons chaque écart entre séries par un terme proportionnel à la variance empirique de la variable observée. Finalement un critère que nous pouvons proposer en vue d'ajuster nos données est :

$$SC(\Theta) = \sum_{e=1}^E \frac{\|\tilde{f}_e - \hat{f}_e\|^2}{\|\tilde{f}_e - \bar{f}_e\|^2} + \sum_{e,k} \frac{\|\tilde{c}_{e,k} - \hat{c}_{e,k}\|^2}{\|\tilde{c}_{e,k} - \bar{c}_{e,k}\|^2}. \quad (4.6)$$

4.2.3 Que signifie le critère ?

Nous ajustons en estimant les paramètres suivant un critère des moindres carrés (paragraphe 4.2.2). Plus généralement, pour un vecteur $Y \in \mathbf{R}^n$, notons \bar{Y} sa projection sur le vecteur unitaire que nous appellerons aussi moyenne de Y , (*ie*¹ $\bar{Y} = \frac{\langle Y, 1 \rangle}{\langle 1, 1 \rangle} 1$), \hat{Y} l'ajusté de Y et \tilde{Y} la moyenne de l'ajusté. Nous avons alors :

$$\begin{aligned} \|Y - \hat{Y}\|^2 &= \langle Y - \hat{Y}, Y - \hat{Y} \rangle \\ &= \langle (Y - \bar{Y}) + (\bar{Y} - \tilde{Y}) + (\tilde{Y} - \hat{Y}), (Y - \bar{Y}) + (\bar{Y} - \tilde{Y}) + (\tilde{Y} - \hat{Y}) \rangle \\ &= \|Y - \bar{Y}\|^2 + \|\bar{Y} - \tilde{Y}\|^2 + \|\tilde{Y} - \hat{Y}\|^2 + 2 \langle Y - \bar{Y}, \tilde{Y} - \hat{Y} \rangle \\ &\quad + 2 \langle Y - \bar{Y}, \bar{Y} - \tilde{Y} \rangle + 2 \langle \bar{Y} - \tilde{Y}, \tilde{Y} - \hat{Y} \rangle. \end{aligned}$$

Les deux derniers termes de la somme sont nuls car ils correspondent au produit scalaire d'un élément de 1^\perp avec un élément de 1 . Nous en déduisons que :

$$\frac{\|Y - \hat{Y}\|^2}{\|Y - \bar{Y}\|^2} = 1 + \frac{\|\bar{Y} - \tilde{Y}\|^2}{\|Y - \bar{Y}\|^2} + \frac{\|\tilde{Y} - \hat{Y}\|^2}{\|Y - \bar{Y}\|^2} - 2 \frac{1}{\|Y - \bar{Y}\|^2} \langle Y - \bar{Y}, \hat{Y} - \tilde{Y} \rangle. \quad (4.7)$$

L'écart des données observées aux données ajustées se décompose ainsi en une somme de plusieurs termes correspondants respectivement à une constante, un écart entre les moyennes des séries initiales et ajustées (qui est nul dans le cas "idéal" où la série ajustée est la série observée), le rapport entre les variabilités respectives des séries estimées et observées (qui vaut un dans le cas "idéal") et moins deux fois le produit scalaire entre les

1. Nous notons ici $\langle \cdot, \cdot \rangle$ le produit scalaire usuel sur \mathbf{R} , et $\|\cdot\|$ la norme associée.

séries (centrées) ajustées et observées.

Ainsi, lorsque nous ajustons par la moyenne ie $\hat{Y} = \bar{Y}$, le critère vaut 1. Toute valeur du critère supérieure à 1 est donc plus "mauvaise" qu'un simple ajustement par la moyenne.

4.3 Algorithme d'ajustement

Nous rappelons ici l'algorithme d'ajustement que nous avons utilisé (Gay 1983, [60]). On trouvera une description plus détaillée dans des ouvrages consacrés au thème de l'ajustement non linéaire comme par exemple ceux rédigés par Bard 1974, [8]; Gallant 1987, [55]; Bates 1988, [12]; Ross 1990, [119]; Antoniadis 1992, [3]; Huet 1992, [75]. Les applications ont été menées en utilisant la fonction "ms" du logiciel S-PLUS (Statistical Science 1995, [137])

4.3.1 Minimisation d'une fonction à valeurs réelles d'un ensemble de paramètres

Soit $\mathcal{L} : \Theta \subseteq \mathbf{R}^p \rightarrow \mathbf{R}$

$\theta \mapsto \mathcal{L}(\theta)$.

Définition 1 $\theta_0 \in \Theta$ est un minimum global de \mathcal{L} si $\mathcal{L}(\theta_0) \leq \mathcal{L}(\theta)$ pour tout $\theta \in \Theta$.

Définition 2 $\theta_0 \in \Theta$ est un minimum local strict s'il existe $\epsilon > 0$ tel que $\forall \theta \in \Theta, \|\theta - \theta_0\| \leq \epsilon, \theta \neq \theta_0 \implies \mathcal{L}(\theta) > \mathcal{L}(\theta_0)$

Définition 3 $\theta_0 \in \Theta$ est un minimum local faible s'il existe $\epsilon > 0$ tel que $\forall \theta \in \Theta, \|\theta - \theta_0\| \leq \epsilon \implies \mathcal{L}(\theta) \geq \mathcal{L}(\theta_0)$

On montre qu'une condition nécessaire pour que θ_0 soit un minimum local faible est que $\text{grad } \mathcal{L}(\theta_0) = 0$ et $\text{Hess} \mathcal{L}(\theta_0)$ semi-définie positive. Une condition suffisante pour que θ_0 soit un minimum local strict est que $\text{Hess} \mathcal{L}(\theta_0)$ soit définie-positive.

4.3.2 Algorithme d'ajustement

Si \mathcal{L} est quadratique en θ , ie $\mathcal{L}(\theta) = a + {}^t b \theta + \frac{1}{2} \theta H \theta$ où $a \in \mathbf{R}; b \in \mathbf{R}^p$, et si H est une matrice semi-définie positive (resp. définie-positive) ne dépendant pas de Θ , alors $\theta_0 = -H^{-1}b$ est un minimum local faible (resp. strict).

TAB. 4.2 – Algorithme d'estimation des paramètres : méthode de Newton

Etape 0 : Choix des valeurs initiales des paramètres, θ^0

Etape courante :

1. On approxime la fonction à minimiser par son développement de Taylor à l'ordre 2 :

$$\mathcal{L}(\theta) \simeq \mathcal{L}(\theta^i) + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta}(\theta - \theta^i) + \frac{1}{2} (\theta - \theta^i) \text{Hess} \mathcal{L}(\theta^i) (\theta - \theta^i) = L(\theta).$$

2. On en déduit :

$$\tilde{\theta} = \underset{\theta}{\text{Arg min}} L(\theta) = \theta^i - \text{Hess}^{-1}(\mathcal{L}(\theta^i)) \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta}(\theta^i)$$

donc $L(\tilde{\theta}) < L(\theta^i)$, et $\tilde{\theta}$ est un minimum local .

3. On cherche $\lambda / \mathcal{L}(\theta^i + \lambda(\tilde{\theta} - \theta^i)) \leq \mathcal{L}(\theta^i)$.

4. On calcule un critère d'arrêt. Si sa valeur est inférieure à un seuil ε fixé à l'avance alors θ est estimé par $\theta^i + \lambda(\tilde{\theta} - \theta^i)$. Sinon on retourne à l'étape 1 en posant $i = i + 1$.

Si \mathcal{L} n'est pas quadratique, on peut estimer itérativement θ à l'aide d'une méthode de descente (Antoniadis 1992, [3]), par exemple celle de Newton (tableau 4.2).

Pour arrêter l'algorithme itératif, on convient le plus souvent de ne plus faire d'itération si la valeur de \mathcal{L} ou de θ n'est pas sensiblement modifiée en valeur relative, c'est à dire si $\frac{|f(\theta^i) - f(\theta^{i+1})|}{|f(\theta^i)|}$ ou $\frac{|\theta^i - \theta^{i+1}|}{|\theta^i|}$ est inférieur à un seuil fixé à l'avance. Ces critères sont empiriques et ne sont pas des critères de convergence (Antoniadis *et al.* 1992, [3]). D'autre part, il est nécessaire qu'à chaque itération, la matrice $\text{Hess} \mathcal{L}(\theta^i)$ soit définie-positive. Sinon, l'algorithme n'a plus de sens, la matrice n'étant plus inversible (voir Hartley 1986, [68] pour une discussion de ce problème).

Parfois (Bard 1974, [8]), on peut être amené à considérer une approximation de la matrice hessienne pour éviter d'avoir à exprimer les dérivées d'ordre 2, c'est le cas de la méthode de Gauss-Newton. Considérons l'étape i de l'algorithme d'estimation des paramètres. Lorsqu'on effectue un ajustement par les moindres carrés non linéaires, nous

avons :

$$\mathcal{L}(\theta^i) = \sum_{u=1}^n (y_u - \hat{y}_u(\theta^i))^2 = \sum_{u=1}^n e_u^2(\theta^i). \quad (4.8)$$

Alors nous avons :

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\theta^i)}{\partial \theta_\alpha} = 2 \sum_{u=1}^n e_u(\theta^i) \frac{\partial e_u(\theta^i)}{\partial \theta_\alpha} = -2 \sum_{u=1}^n e_u(\theta^i) \frac{\partial \hat{y}_u(\theta^i)}{\partial \theta_\alpha} = -2^t \left(\frac{\partial \hat{y}(\theta^i)}{\partial \theta_\alpha} \right) \epsilon(\theta^i) \quad (4.9)$$

où $\hat{y}(\theta)$ est le n vecteur dont la $u^{\text{ième}}$ composante vaut $\hat{y}_u(\theta)$, et ϵ est le n vecteur dont la $u^{\text{ième}}$ composante vaut e_u . De plus, l'élément courant $H[\alpha, \beta]$ de $H = Hess(\mathcal{L}(\theta))$ s'écrit :

$$2 \sum_{u=1}^n \frac{\partial \hat{y}_u(\theta^i)}{\partial \theta_\alpha} \frac{\partial \hat{y}_u(\theta^i)}{\partial \theta_\beta} - 2 \sum_{u=1}^n e_u \frac{\partial^2 \hat{y}_u(\theta^i)}{\partial \theta_\alpha \partial \theta_\beta} \quad (4.10)$$

Si l'on néglige le second terme de l'équation précédente, alors on remplace dans l'algorithme précédent $Hess$ par $N / N[\alpha, \beta] = 2 \sum_{u=1}^n \frac{\partial \hat{y}_u(\theta^i)}{\partial \theta_\alpha} \frac{\partial \hat{y}_u(\theta^i)}{\partial \theta_\beta} = 2 \left(\frac{\partial \hat{y}(\theta^i)}{\partial \theta} \frac{\partial \hat{y}(\theta^i)}{\partial \theta} \right)$, nous obtenons :

$$\hat{\theta} = \theta^i - \left(\frac{\partial y(\theta^i)}{\partial \theta} \frac{\partial y(\theta^i)}{\partial \theta} \right)^{-1} \frac{\partial y(\theta^i)}{\partial \theta} \epsilon(\theta^i), \quad (4.11)$$

qui est l'estimation de θ lorsqu'on considère le modèle de régression suivant :

$$e(\theta) = - \left(\frac{\partial y(\theta^i)}{\partial \theta} \right) (\theta - \theta^i) + \epsilon. \quad (4.12)$$

4.3.3 Expression analytique du gradient

Nous cherchons à minimiser (cf paragraphe 4.2.2) le critère suivant :

$$\begin{aligned} L_p(\Theta) &= \sum_{e=1}^E p_e \frac{\|\hat{f}_e - \tilde{f}_e\|^2}{\|\tilde{f}_e - \tilde{f}_e\|^2} + \sum_{e=1}^E \sum_{k=1}^K p_{e,k} \frac{\|\hat{c}_{e,k} - \tilde{c}_{e,k}\|^2}{\|\tilde{c}_{e,k} - \tilde{c}_{e,k}\|^2} \\ &= \sum_{v=1}^{E+KE} a_v \|y_v - \tilde{y}_v\|^2 \\ &= \sum_{v=1}^{E+KE} \sum_{i=1}^n a_{v,t_i} (y_{v,t_i} - \tilde{y}_{v,t_i})^2 \\ &= \sum_{u=1}^{n(E+KE)} e_u^2. \end{aligned}$$

$$\text{où } a_v = \begin{pmatrix} \frac{p_1}{\|\tilde{f}_1 - \tilde{f}_1\|^2} \\ \vdots \\ \frac{p_e}{\|f_e - \tilde{f}_e\|^2} \\ \frac{p_{e,k}}{\|c_{e,k} - \tilde{c}_{e,k}\|^2} \\ \vdots \\ \frac{p_{E,K}}{\|c_{E,K} - \tilde{c}_{E,K}\|^2} \end{pmatrix}, \quad y_v = \begin{pmatrix} \tilde{f}_e \\ \vdots \\ \tilde{f}_E \\ \tilde{c}_{e,k} \\ \vdots \\ \tilde{c}_{E,K} \end{pmatrix}.$$

Nous sommes ainsi ramenés à l'expression 4.8 de $\mathcal{L}(\theta)$ donnée au paragraphe précédent. Nous avons donc maintenant à exprimer $\frac{\partial y_v}{\partial \theta} \forall \theta$ soit $\frac{\partial y_{v,t_i}}{\partial \theta} \forall \theta, \forall t_i$ ie :

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{y}_{v,t_i}}{\partial \theta} = \frac{\partial \hat{f}_{e,t_i}}{\partial \theta} \text{ lorsque } v = 1, \dots, E \\ \frac{\partial \hat{y}_{v,t_i}}{\partial \theta} = \frac{\partial \hat{c}_{e,k,t_i}}{\partial \theta} \text{ lorsque } v = E + 1, \dots, KE \end{cases},$$

$$\text{où : } \begin{cases} \hat{f}_{e,t_i} = \sum_{J \in \mathcal{E}^-(e)} f_{J,t_i} \\ \hat{c}_{e,k,t_i} = \frac{1}{\hat{f}_{e,t_i}} \sum_{J \in \mathcal{J}^-(e), k \in \mathcal{K}_{J(J)}} c_{J,k,t_i} f_{J,t_i} \end{cases}.$$

Nous en déduisons :

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{f}_{e,t_i}}{\partial \theta} = \sum_{J \in \mathcal{E}^-(e)} \frac{\partial f_{J,t_i}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \hat{c}_{e,k,t_i}}{\partial \theta} = \frac{1}{\hat{f}_{e,t_i}^2} \left\{ \sum_{J \in \mathcal{E}^-(e)} \left(\frac{\partial c_{J,k,t_i}}{\partial \theta} f_{J,t_i} + c_{J,k,t_i} \frac{\partial f_{J,t_i}}{\partial \theta} \right) \tilde{f}_{e,t_i} - \left(\sum_{J \in \mathcal{E}^-(e)} \frac{\partial f_{J,t_i}}{\partial \theta} \right) \left(\sum_{J \in \mathcal{E}^-(e), k \in \mathcal{K}_{J(J)}} c_{J,k,t_i} f_{J,t_i} \right) \right\} \end{cases}.$$

Nous avons à exprimer chacune des dérivées partielles intervenant dans les expressions de $\frac{\partial \hat{f}_{e,t_i}}{\partial \theta}$ et $\frac{\partial \hat{c}_{e,k,t_i}}{\partial \theta}$. Ces dérivées partielles s'expriment au temps t_i en fonction d'autres dérivées qui sont relatives aux variables intervenant dans le modèle. La figure 4.3.3 présente la procédure permettant l'expression de ces dérivées partielles. Quant aux expressions elles mêmes, nous les donnons dans l'annexe B.

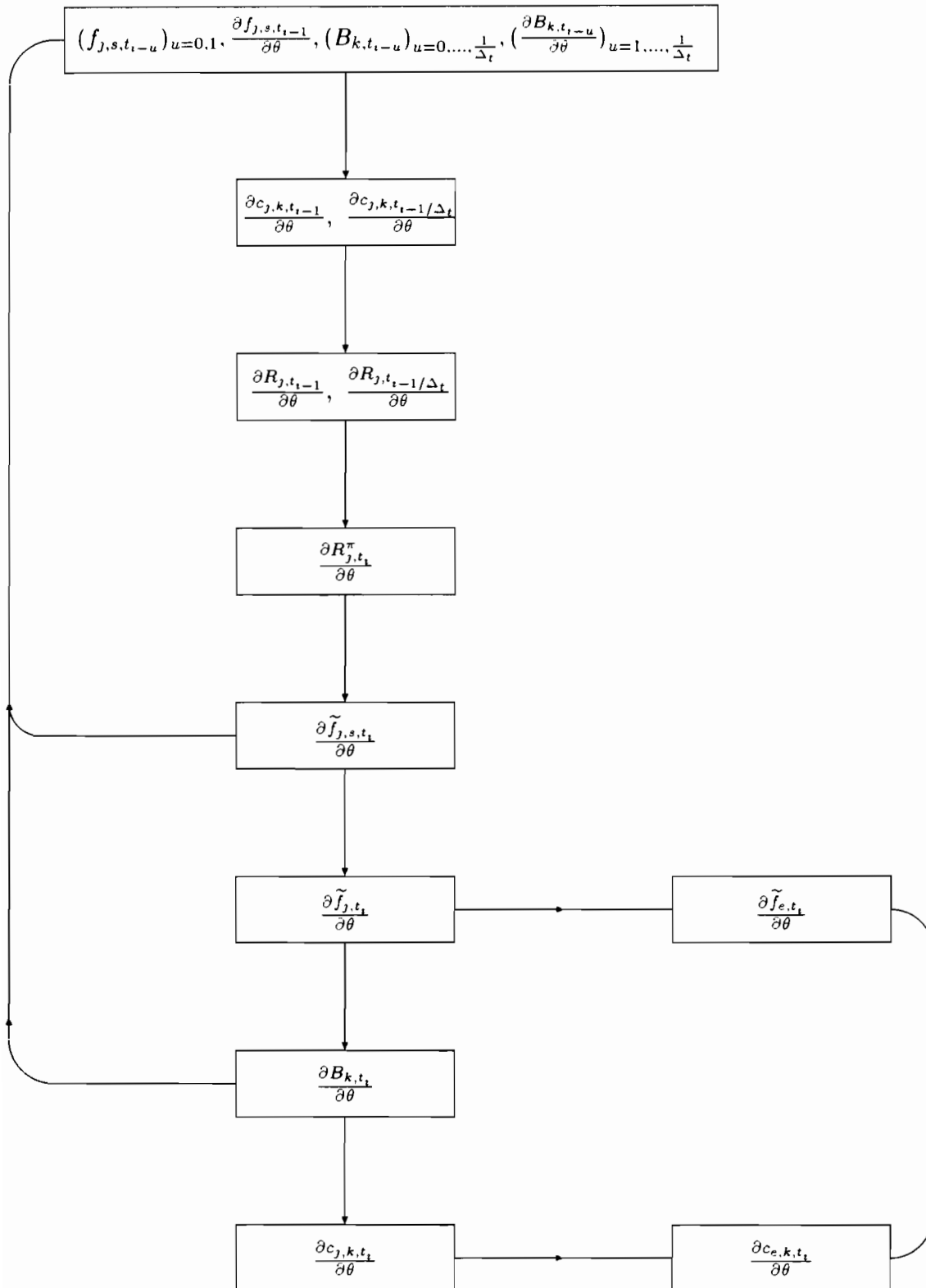


FIG. 4.2 – Schéma de la procédure de calcul des dérivées partielles.

4.4 Identification du modèle

La définition d'un modèle LS nécessite la caractérisation de chacune des trois composantes de l'exploitation qui est considérée. Nous devons donc disposer de typologies des actions de pêche (les tactiques), de la ressource (les stocks) et des unités de pêche (les stratégies).

Soit nous connaissons ces typologies et nous n'aurons à considérer qu'une structure de modèle, soit nous ne les connaissons pas ou mal. Dans ce dernier cas, se rajoute au problème de l'estimation des paramètres du modèle celui de la caractérisation de la structure à considérer, *ie* le problème de l'identification du modèle lui même.

Nous faisons ici l'analogie avec les méthodes de représentation de séries chronologiques à l'aide de modèles de type ARMA, où l'on distingue des paramètres à valeurs réelles (les coefficients des polynômes) que l'on estime, de paramètres à valeurs entières (les degrés des polynômes) qui sont identifiés. L'identification d'un modèle peut être rapprochée d'un problème de test ou de choix entre modèles (Gouriéroux 1995, [63]). Dans le cas de modèles ARMA, la procédure d'identification est basée sur la comparaison des propriétés empiriques du processus observé (fonctions d'autocorrélations et d'autocorrélations partielles) aux propriétés théoriques du modèle. Dans notre cas, de telles propriétés n'ont pu être établies. Nous ne pourrions donc proposer de procédure d'identification du modèle avant l'estimation des paramètres. Nous montrons cependant dans l'exemple suivant les conséquences qui peuvent résulter d'une mauvaise identification du modèle.

Nous considérons un jeu de données simulées représentant l'activité et les résultats de $N = 100$ unités de pêche supposées relever d'une unique stratégie de pêche. Ce jeu de données a été généré à l'aide du modèle LS en supposant pour chaque observation une erreur dont la variance est égale à 10 % de la vraie valeur (*ie* $\sigma_e^2 = \sigma_{e,k}^2 = 0.1$, dans la formule 4.5). Le tableau 4.3 et la figure 4.3 présentent respectivement le modèle considéré ainsi que les profils d'inaccessibilités des tactiques envers les stocks.

Chacune des tactiques cible un stock, mais son impact sur les autres composantes de la ressource n'est pas forcément nul. Une espèce (la quatrième) n'est visée par aucune des tactiques. Les accessibilités des stocks sont saisonnières (figure 4.3), chaque stock étant le plus accessible durant la même saison (disons la *saison froide*), mais le contraste est moins marqué pour le quatrième stock. En sortie du modèle, nous disposons donc de 24 séries chronologiques (4 séries d'efforts par tactique et 20 séries de captures par unité d'effort soit une par combinaison stock-tactique). Nous supposons ici que les quatre tactiques relèvent de l'utilisation d'un même engin de pêche. Les données similaires à celles qui seraient obser-

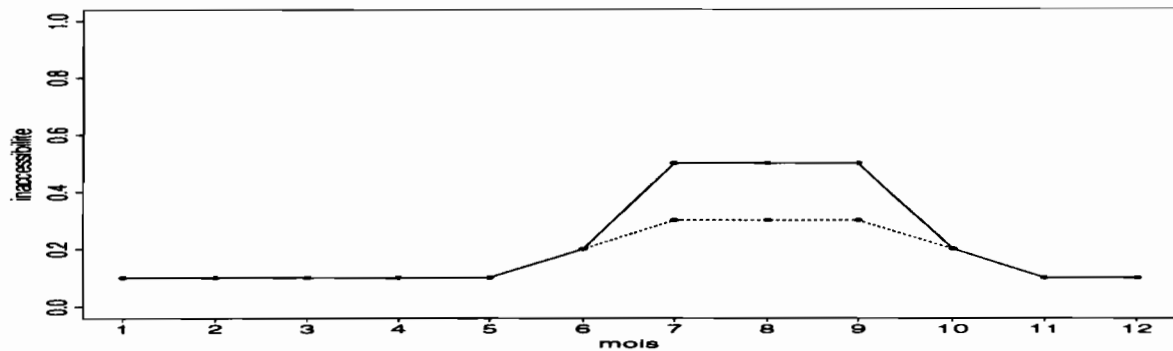


FIG. 4.3 – Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS : profils d'inaccessibilités pour le modèle ayant servi à générer les données. En trait plein les profils d'inaccessibilités des tactiques 1, 2, et 4 envers chacun des stocks. En pointillés les profils d'inaccessibilité de la tactique 3 envers le stock 4.

TAB. 4.3 – Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS : le modèle à quatre tactiques et cinq stocks ayant servi à générer les données.

tactiques \ stocks	stock 1	stock 2	stock 3	stock 4	stock 5
tactique 1	•	•	•	0	•
tactique 2	•	•	•	0	•
tactique 3	•	•	0	•	0
tactique 4	•	•	•	0	•

vées sont donc les efforts de pêche (égaux à la somme des efforts de chacune des tactiques et à l'erreur d'observation près à N), et les captures par unité d'effort de l'engin pour chacun des stocks considérés (*cf* équations 4.2).

Nous avons donc reconstitué les 6 séries chronologiques correspondant à celles qui pourraient être observées dans la réalité (figure 4.4). Nous pouvons alors remarquer que si les captures par unité d'effort relatives au quatrième stock sont bien périodiques, elles sont maximum durant la saison (disons la *saison chaude*) pendant laquelle cette espèce est le moins accessible aux pêcheurs. En effet, durant cette saison c'est le quatrième stock qui est le plus intéressant, les pêcheurs vont donc avoir tendance durant la *saison chaude* à utiliser la troisième tactique. Durant la *saison froide*, bien que plus accessible, le quatrième stock n'est pas visé car il est alors moins intéressant que les autres stocks.

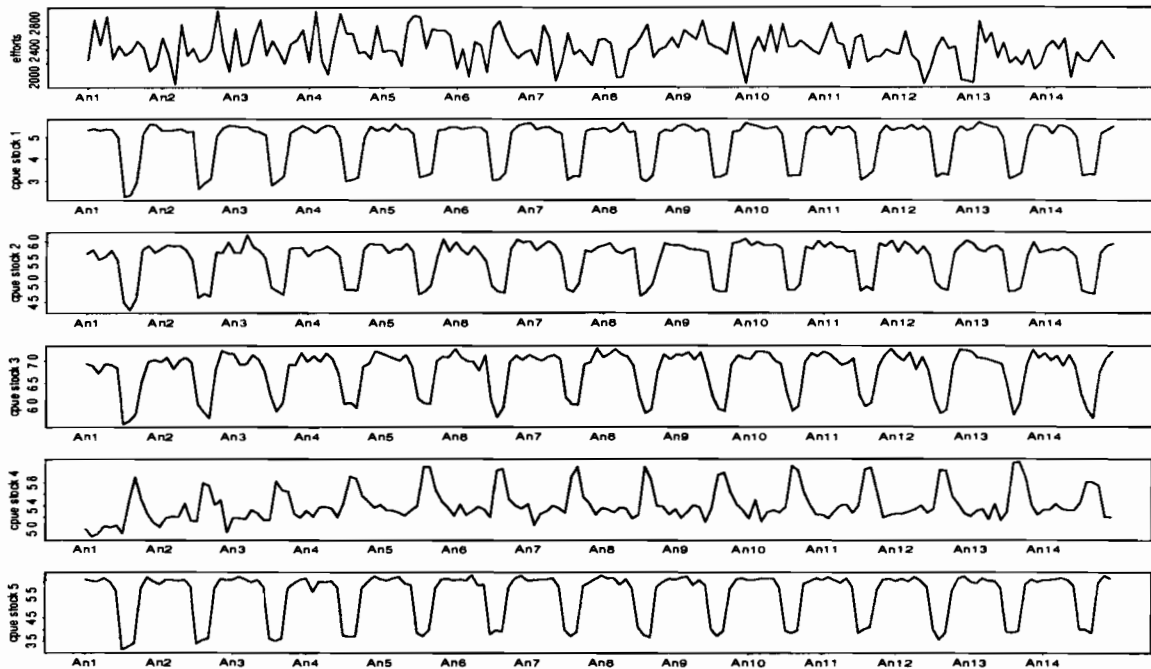


FIG. 4.4 – Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS: séries chronologiques analogues à celles qui seraient observées construites à partir des sorties du modèle considéré. De haut en bas, efforts “observés” et captures par unité d’effort correspondantes pour les stocks 1 à 5 (données transformées en $\ln(1+x)$).

Oublions maintenant l’origine de nos données et considérons le cas où l’on essaierait de représenter les “observations” à l’aide d’un modèle LS.

Si l’on ignore leur nature, nous pouvons alors être tentés de relier les profils d’inaccessibilités des stocks aux profils des captures par unité d’effort. Nous supposons alors que le quatrième stock est plus accessible en *saison chaude*, contrairement au “vrai” modèle. On peut donc proposer un modèle (modèle 1) comprenant une seule tactique, et où les stocks 1, 2, 3 et 5 seront supposés plus accessibles en *saison froide*, et le stock 4 plus accessible en *saison chaude*.

Si l’on connaît la véritable nature des inaccessibilités des stocks, alors on ne peut considérer un modèle ne comportant qu’une tactique. En effet, dans ce cas (*cf* définition du modèle) les captures sont égales à $qN(B_t - \alpha Bv)$: plus l’inaccessibilité est importante plus les captures par unité d’effort vont être faibles. Il est donc impossible de rendre compte des données “observées”. Nous pouvons alors considérer un modèle (modèle 2) à deux tactiques (une tactique capturant les espèces 1, 2, 3 et 5 et la seconde ciblant la quatrième espèce).

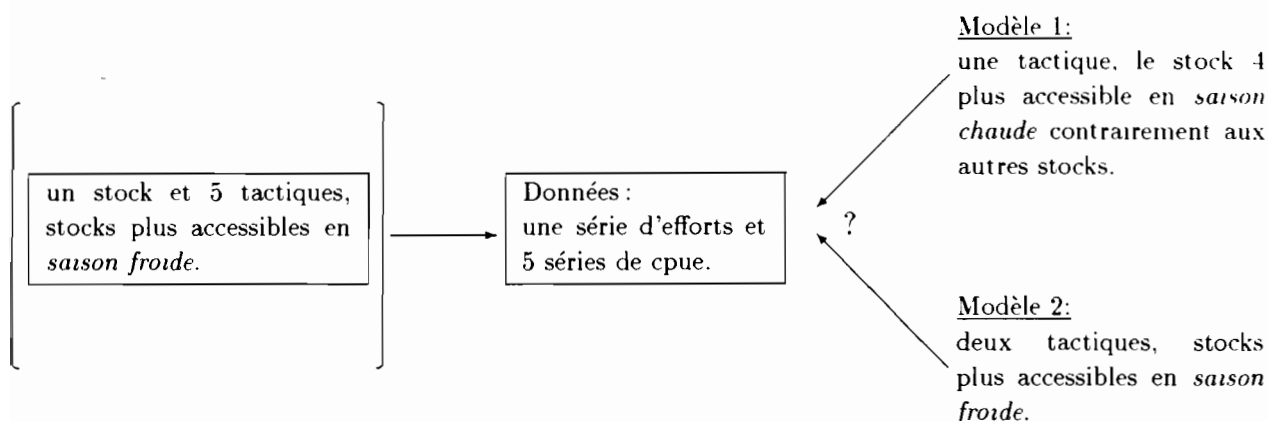


FIG. 4.5 – Schéma de l'exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS.

TAB. 4.4 – Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS: le modèle à une tactique considéré (modèle 1) pour ajuster les données générées par le modèle défini dans le tableau 4.3.

tactiques \ stocks	stock 1	stock 2	stock 3	stock 4	stock 5
tactique 1	•	•	•	•	•

Ce modèle n'est toujours pas le "vrai" modèle, il s'en approche cependant au sens où il tient compte d'une des caractéristiques biologiques des données.

Nous avons ajusté chacun des deux modèles définis (modèle 1 et modèle 2) sur les données observées en utilisant la fonction critère $\mathcal{L}(\Theta)$ définie au paragraphe 4.2.2. Pour le modèle 1, nous avons ajusté les capturabilités (5 paramètres) ainsi que le profil d'inaccessibilité de la tactique envers le quatrième stock (12 paramètres). Pour le second modèle, nous avons ajusté les capturabilités et le coût de mise en œuvre de la seconde tactique (6 paramètres). Lors de chacun des deux ajustements, les valeurs des paramètres fixés étaient supposées connues exactement.

Les résultats des ajustements (séries "observées" et séries ajustées) sont présentés figures 4.6 et 4.7. Nous constatons là que les ajustements obtenus pour les modèles 1 et 2 sont comparables. A ce stade, nous ne pouvons (si l'on ignore le déterminisme du "modèle" ayant servi à générer les données) départager les deux modèles considérés. On peut

TAB. 4.5 – Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS: le modèle à deux tactiques considéré (modèle 2) pour ajuster les données générées par le modèle défini dans le tableau 4.3.

tactiques \ stocks	stock 1	stock 2	stock 3	stock 4	stock 5
tactique 1	•	•	•	0	•
tactique 2	0	0	0	•	0

alors être tentés de conserver le modèle le plus simple suivant le principe de parcimonie (Lebreton *et al.* 1992, p. 79, [100]).

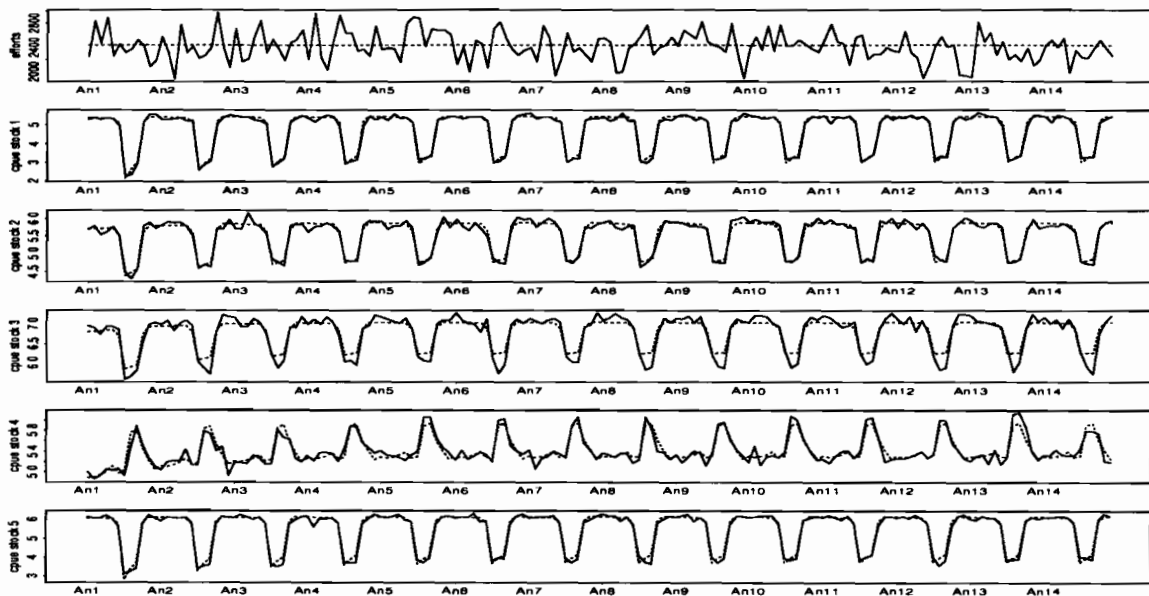


FIG. 4.6 – Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS: séries simulées (traits pleins) et séries ajustées (pointillés) en considérant le modèle 1. De haut en bas, efforts et captures par unité d'effort correspondantes pour les stocks 1 à 5 (données transformées en $\ln(1+x)$).

Considérons maintenant qu'à un moment donné, le prix à la vente des poissons du stock 4 soit multiplié par 2. Ceci est un cas pouvant réellement se produire. Par exemple, la dévaluation du franc CFA en 1994 a eu comme conséquence une augmentation des prix à la vente (en francs CFA) des poissons achetés pour l'exportation (A. Samba, comm. pers.). Nous présentons (figures 4.8) les séries que l'on obtient alors avant et après la modification

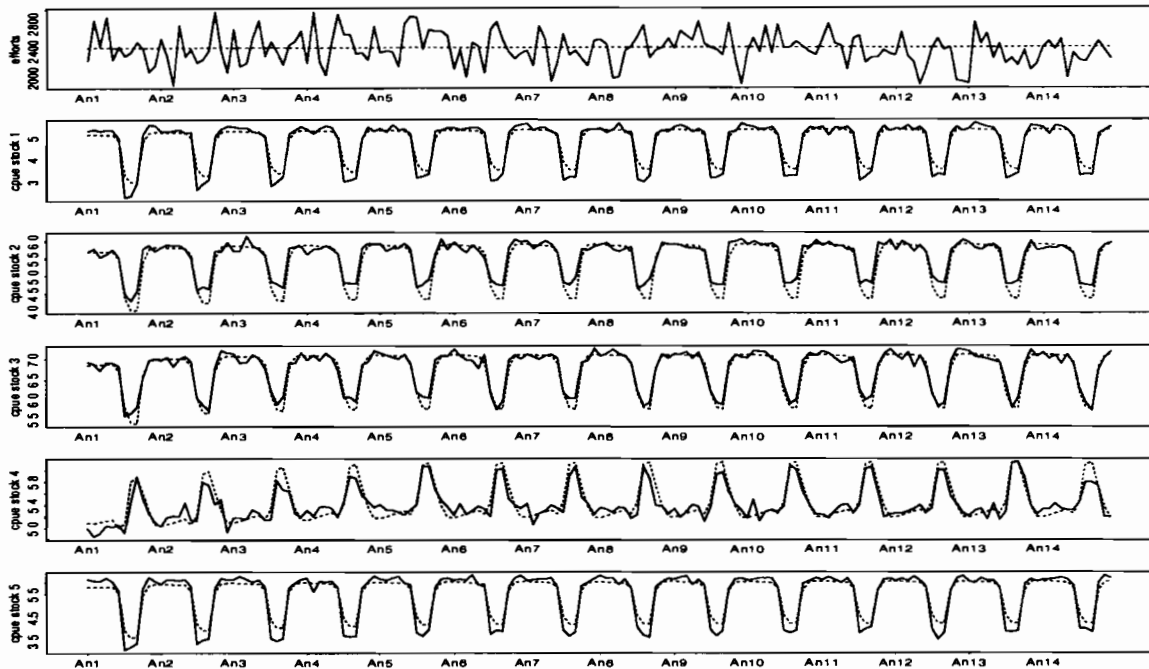


FIG. 4.7 – Exemple illustrant le problème de l’identification du modèle LS: séries simulées (traits pleins) et séries ajustées (pointillés) en considérant le modèle 2. De haut en bas, efforts et captures par unité d’effort correspondantes pour les stocks 1 à 5 (données transformées en $\ln(1+x)$).

des prix pour le “vrai” modèle et les modèles 1 et 2, lorsqu’on utilise les jeux de paramètres estimés à l’aide des données “avant changement”. Nous constatons alors que si le modèle 2 arrive à rendre compte des “observations”, ce n’est pas du tout le cas du premier modèle. En effet, l’augmentation du prix de la quatrième espèce a comme conséquence de rendre plus attractive la troisième tactique dont elle est l’espèce cible. Cela a comme conséquence une modification de la répartition des efforts parmi les tactiques, des mortalités engendrées par les pêcheurs et finalement des captures par unité d’effort qui sont observées.

Si le modèle 1 n’arrive pas à rendre compte d’une telle situation, c’est qu’il suppose que les pêcheurs utilisent toujours la même tactique de pêche. Une augmentation de prix ne modifie alors pas la répartition de leurs effectifs, d’où la différence entre les séries “observées” et celles prolongées en considérant le premier modèle. Ainsi est mise en défaut l’hypothèse concernant l’inaccessibilité du quatrième stock que nous avons été amenés à formuler afin de rendre vraisemblable le premier jeu de données “observé”.

Le second modèle est plus proche du “vrai” modèle. Il arrive ici à bien reconstituer les données observées avant et après l’augmentation de prix. Cependant, il serait bien sûr



FIG. 4.8 – Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS: de haut en bas efforts puis captures par unité d'effort pour les stocks 1 à 5. Séries "observées" en traits pleins, séries ajustées à l'aide du modèle 1 en pointillés et séries ajustées à l'aide du modèle 2 en traits pointillés. Représentation sur la période ayant servi à l'ajustement (an 1 à an14) et après la multiplication par 2 du prix du quatrième stock (an 15 à an 29).

possible de trouver un autre événement qui mette en défaut les capacités du second modèle à rendre compte des données observées: ces données sont générées à l'aide d'un modèle différent du modèle 2.

L'exemple que nous venons de présenter n'est pas une démonstration, mais une illustration des difficultés liées à l'identification du modèle LS. En effet, nous avons d'abord considéré deux modèles rendant vraisemblable un premier jeu de données. Nous aurions pu en considérer une infinité d'autres, en particulier tous ceux comportant un nombre plus important de tactiques qu'il n'est nécessaire d'en définir.

Le modèle LS fait intervenir les représentations conjointes de la ressource, des pêcheurs et de leur activité de pêche. Une hypothèse émise pour représenter une composante de l'exploitation a donc des conséquences sur les représentations des autres composantes. Dans l'exemple proposé, émettre l'hypothèse que les pêcheurs ne pratiquent qu'un type de pêche va nous amener à poser une hypothèse "biologique" (concernant l'accessibilité du quatrième stock) particulière. Si cette dernière est remise en cause, cela va donc remettre également en cause l'hypothèse concernant la manière dont les pêcheurs pratiquent leur activité.

4.5 Identifiabilité des paramètres

Nous avons défini (paragraphe 4.2 de ce chapitre) un critère en vue d'estimer les paramètres du modèle LS. Nous noterons désormais $S(\Theta)$ ce critère. A priori, l'estimation des paramètres est définie par $\hat{\theta} = \arg \min_{\theta \in \Theta} S(\theta)$. Encore faut-il qu'il y ait un unique jeu de paramètres nous permettant d'atteindre ce minimum. Nous retrouvons là le problème de l'identifiabilité des paramètres du modèle, problème déjà évoqué au chapitre 3.

Les paramètres $\theta \in \Theta$ peuvent être de trois types : fixés (ie $\theta = a$ où a est fixé et connu), contraints (ie pour un sous-ensemble $\theta \subset \Theta$, $f(\theta) = 0$), ou libres (θ peut parcourir tout son domaine de variation). L'état de l'ensemble des paramètres Θ définit une spécification des paramètres du modèle. Etant donnée une spécification, $E = \{\Theta / S(\Theta) = \min_{\theta \in \Theta} S(\Theta)\}$ n'est pas forcément réduit à un point. E définit alors une classe d'équivalence de points Θ minimisant la fonction objectif.

Définition 4.5.1 *Un élément $\theta \in \Theta$ est dit identifié si pour tout élément Θ de E , θ prend la même valeur. Si tous les paramètres du modèle sont identifiés, alors le modèle est dit identifié.*

Nous montrons maintenant à partir d'un exemple que les paramètres du modèle LS ne sont pas toujours identifiés.

Considérons un modèle LS représentant l'exploitation de deux stocks par des pêcheurs relevant d'une stratégie et qui peuvent employer deux tactiques de pêche. Nous supposons en outre que ces deux tactiques correspondent à l'utilisation d'un même engin de pêche.

L'expression du modèle est alors celle donnée en (4.2) où $j, k = 1, 2$ et $s = 1$. Les variables "observées" sont alors :

$$\begin{cases} f_{t_i} &= \sum_{j=1}^2 f_{j,1,t_i} + \varepsilon_{1,t_i} \quad \varepsilon_{1,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{f,t_i}) \\ c_{k,t_i} &= \frac{\sum_{j=1}^2 c_{j,k,t_i}}{f_{t_i}} + \varepsilon_{2,t_i} \quad \varepsilon_{2,t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{k,t_i}) \quad k = 1, 2 \end{cases}$$

Les données ont été simulées en supposant des erreurs de processus et d'observation dont la variance est égale à 10% de la valeur réalisée. Nous avons considéré deux cas. Nous supposons tout d'abord connus de façon exacte tous les paramètres du modèle exceptée la biomasse vierge du premier stock considéré. Alors nous estimons ce paramètre en utilisant le critère des moindres carrés précédemment défini. Dans le second cas, nous supposons connus tous les paramètres exceptées les capturabilités relatives au premier stock. Cependant la valeur de la biomasse vierge est supposée connue de manière inexacte (on suppose

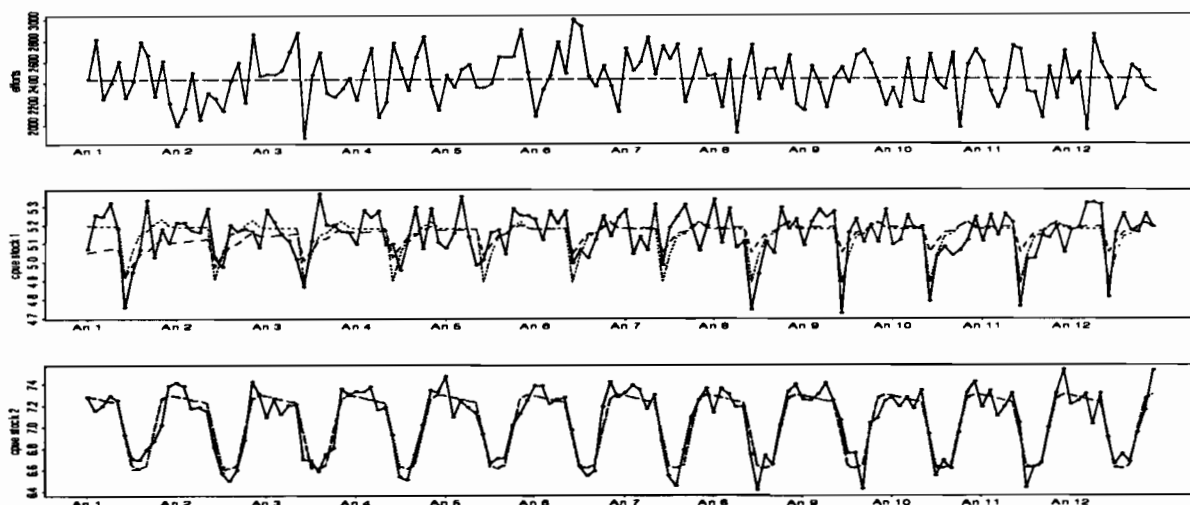


FIG. 4.9 – Exemple illustrant le problème de l'identifiabilité des paramètres du modèle LS : séries simulées (trait plein) et séries ajustées. Les traits pointillés (resp. les pointillés) correspondent à l'ajustement obtenu dans le premier cas (resp. dans le second cas). De haut en bas, efforts et captures par unité d'effort correspondantes pour les stocks 1 à 5 (données transformées en $\ln(1+x)$).

$Bv_1 = 6 \cdot 10^7$ kg alors qu'en "réalité" $Bv_1 = 3.3 \cdot 10^7$ kg). Nous ajustons alors sur les capturabilités de chacune des tactiques envers le premier stock (2 paramètres). La figure 4.9 présente respectivement les séries "observées" et ajustées dans chacun des deux cas.

Nous pouvons alors constater qu'en terme de minimisation du critère, les deux ajustements apparaissent équivalents. En effet nous obtenons un critère égal à 1.76 pour le premier ajustement, et égal à 1.85 dans le second. S'il existe une légère différence, nous pourrions dans le second cas ajuster sur d'autres paramètres et obtenir une valeur de critère égale à celle obtenue à l'issue du premier ajustement. Ainsi, même lorsque tous les paramètres sont fixés exceptés la biomasse de premier stock et les capturabilités qui lui sont associées, nous voyons que l'ensemble E n'est pas réduit à un point. Les paramètres du modèle LS ne sont donc toujours pas identifiables.

Pour appuyer notre propos, nous avons calculé pour 2 valeurs de biomasses vierges Bv_1 du premier stock (égales respectivement à $3.3 \cdot 10^7$ kg, et $4 \cdot 10^7$ kg), et sur une grille de valeurs des capturabilités de chacune des deux tactiques envers le premier stock, les valeurs du critère correspondantes. Nous pouvons alors constater (figure 4.10) que les valeurs des capturabilités qui correspondent au minimum dépendent de la valeur prise par la biomasse vierge de la première espèce. Ainsi, le minimum de la fonction critère n'est pas unique.

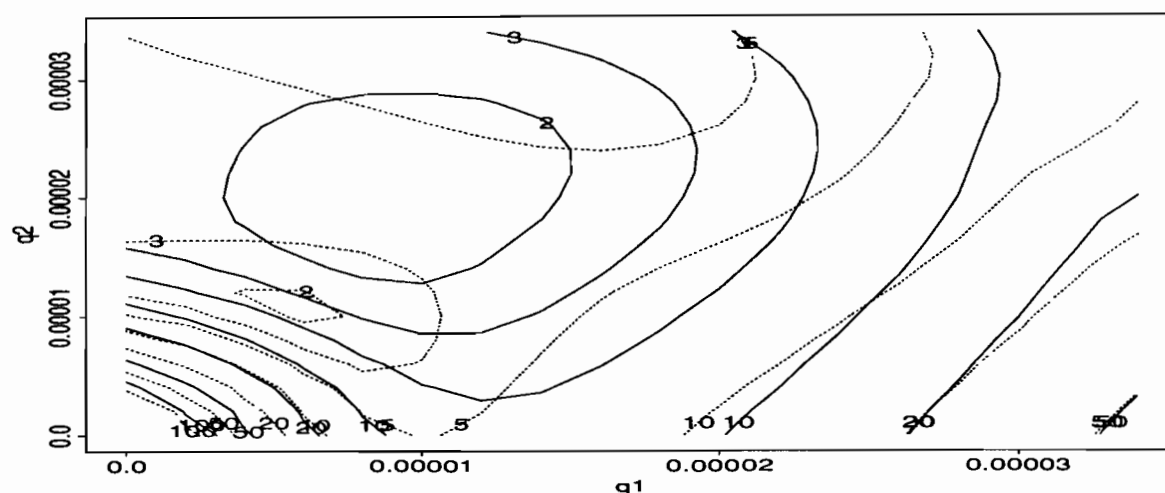


FIG. 4.10 – Exemple illustrant le problème de l'identifiabilité des paramètres du modèle LS : Tracé pour une valeur de la biomasse vierge de la première espèce fixée à $3.3 \cdot 10^7$ kg (traits pleins) et à $4 \cdot 10^7$ kg (traits pointillés) des courbes de niveau correspondant aux valeurs prises par la fonction objectif lorsque l'on fait varier les deux valeurs de capturabilités dans l'intervalle $[0, 3.5 \cdot 10^{-6}]$.

On dispose donc de plusieurs estimations de nos paramètres, correspondant chacune à un minimum du critère. Les paramètres de notre modèle ne sont pas tous identifiables.

4.6 Discussion

Les critères partiels ?

Il apparaît à l'issue de la présentation que nous venons de faire que le modèle LS n'est pas directement ajustable aux données observées. Il s'agit certainement là plus que d'un problème numérique, nous pouvons nous en convaincre en considérant le problème de l'identification du modèle. Des problèmes d'ordres similaires ont par ailleurs déjà été soulignés dans la littérature concernant notamment les problèmes de l'étalonnage de l'analyse des cohortes (Laurec 1993, [97]).

A ce stade nous pouvons être partagés entre d'une part l'envie de renoncer à représenter la dynamique de la pêche artisanale sénégalaise à l'aide d'un modèle qui serait "trop compliqué", et d'autre part celle de remettre en cause la nature des données collectées.

La dernière solution n'est bien sûr pas possible dans le cadre de notre étude, mais

peut-être n'est elle pas non plus envisageable en général. En effet toutes les variables du modèle ne peuvent pas être observées (par exemple l'état des biomasses). De plus, les variables définies dans le modèle, si elles nous permettent de bien appréhender la structure de la pêcherie n'en constituent pas moins une abstraction de la réalité et donc à ce titre ne peuvent être directement observées.

Il serait certainement possible de proposer une simplification du modèle. Cependant, on pourrait alors peut-être s'éloigner encore plus de la réalité, et obtenir un schéma qui soit faux, même s'il est plus simple. Par exemple, on pourrait poser que les pêcheurs pêchent toujours de la même manière (cela nous éviterait les difficultés dues à la considération des tactiques), et se ramener à une simple juxtaposition de modèles monospécifiques. Cependant, le modèle n'aurait alors plus aucun sens : nous savons que les unités de pêche changent de modes de pêche, et il faut bien en tenir compte.

Notre objet, puisque sans modification du modèle il existe plus d'une solution, va être la recherche de l'une d'entre elles. Pour cela, nous ne pouvons ajuster en considérant directement le critère considéré en 4.2.

Cependant, nous avons vu que dans le cas où on réduisait le nombre de séries et de paramètres nous nous retrouvons dans un cadre d'application plus raisonnable du modèle LS. Cela revient alors non plus à considérer le critère $\mathcal{L}(\theta)$ défini en 4.2, mais plutôt :

$$\mathcal{L}_p(\theta) = \sum_e p_e \frac{\|\hat{f}_e - \tilde{f}_e\|^2}{\|\tilde{f}_e - \tilde{f}_e\|^2} + \sum_{e,k} p_{e,k} \frac{\|\hat{c}_{e,k} - \tilde{c}_{e,k}\|^2}{\|\tilde{c}_{e,k} - \tilde{c}_{e,k}\|^2}, \quad (4.13)$$

ie une somme pondérée des séries intervenant dans le critère $\mathcal{L}(\theta)$ pour une partie de l'ensemble des paramètres que l'on cherche à estimer.

Proposition d'une procédure d'ajustement du modèle

Nous avons vu aux chapitres 3 et 4 que l'ajustement du modèle LS posait deux principaux problèmes relatifs :

- à l'identification du modèle,
- à l'identifiabilité des paramètres du modèle.

Nous avons alors illustré à partir d'exemples simples correspondant à des données simulées les conséquences engendrées par de tels problèmes. Pour essayer d'exposer notre cas, nous faisons ici l'analogie avec les modèles de modélisation des séries chronologiques de type ARMA (Box et Jenkins 1970, [16]). Dans le cas des modèles ARMA, on distingue

deux types de paramètres : les paramètres à valeurs réelles (*ie* les coefficients des polynômes) que l'on estime et les paramètres à valeurs entières (*ie* les degrés des polynômes) qui caractérisent le modèle et qui sont identifiés. Dans cette situation, il a été construit une procédure d'identification et d'estimation du modèle (figure 4.6)

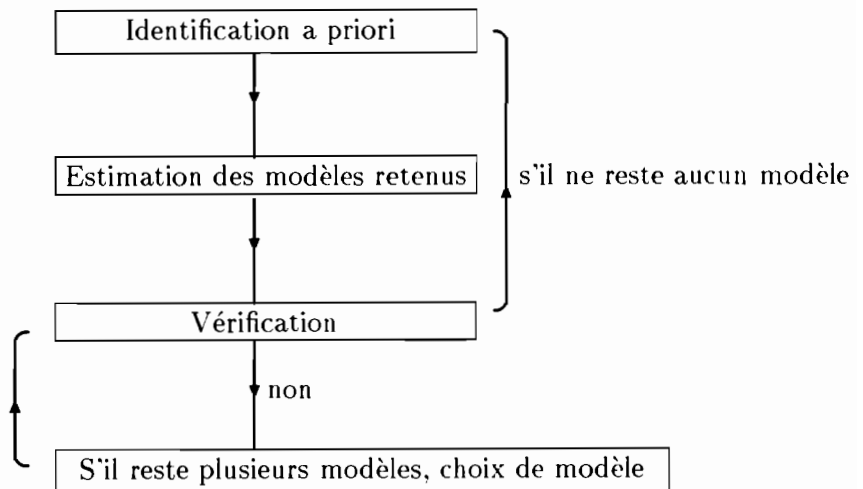


FIG. 4.11 – Schéma de prévision par la méthode de Box et Jenkins (d'après Gourieroux 1995, [63])

Ce qui va jouer le rôle des degrés des polynômes dans notre cas, ce vont être le nombre de tactiques, le nombre de stratégies, et leur définition (*ie* quelles sont les tactiques accessibles à chacune des stratégies, et quels sont les stocks capturables pour chacune des tactiques considérées). Nous ne sommes sans doute pas alors dans un cas plus simple que celui posé par les modèles ARMA. Les paramètres d'un modèle donné sont à estimer. Nous avons cependant vu que les estimateurs que nous utilisons ne sont pas consistants, à moins d'en contraindre un grand nombre.

Nous pouvons cependant essayer de proposer une procédure d'ajustement et d'identification inspirée de celle suivie dans le cas des modèles ARMA.

La procédure consiste à définir (étape $n=0$) un cadre représentant l'exploitation dont on cherche à représenter la dynamique (définition des tactiques, des stratégies, des stocks, des stocks accessibles à chaque tactique, des tactiques disponibles dans chaque stratégie). Nous cherchons ensuite à ajuster les séries en utilisant le critère $\mathcal{L}(p)$. Cela revient concrètement à choisir les termes de pondération $(p_e)_e$ et $(p_{e,k})_{e,k}$, à fixer des paramètres et à ajuster sur l'ensemble des paramètres restants. Notons alors que les estimations obtenues

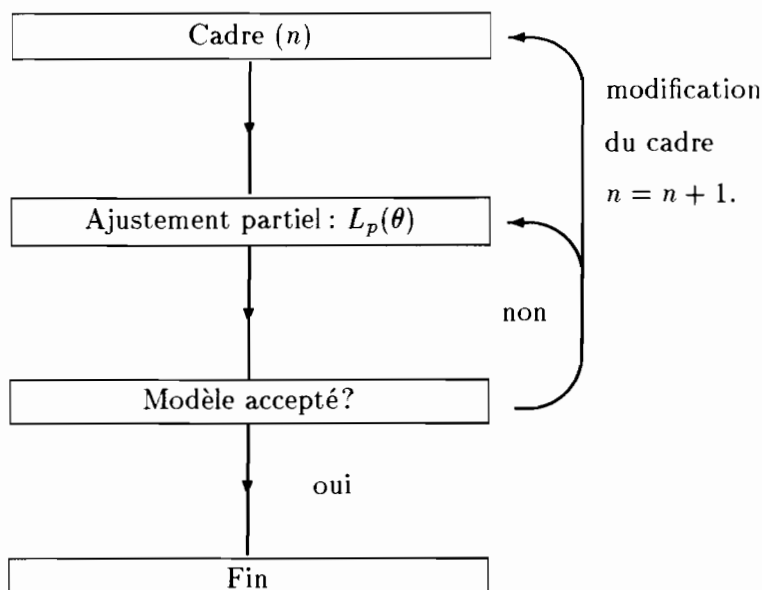


FIG. 4.12 – Schéma d’ajustement du modèle *LS* aux données échantillonnées

vont correspondre à une diminution de $\mathcal{L}(\theta)$, mais pas forcément à une diminution de $\mathcal{L}(\Theta)$. Nous itérons ensuite la procédure en définissant de nouveaux termes de pondération et en changeant ou pas les paramètres que l’on estime. Ces choix sont arbitraires (nous en présenterons quelques uns au chapitre 5), et nous ne disposons pas de règle pouvant nous aider dans ce sens.

Nous avons la possibilité, si l’on n’arrive plus à faire progresser le critère $\mathcal{L}(\Theta)$ de remettre en cause le modèle (par exemple en ajoutant une tactique, ou en modifiant la définition d’une stratégie), et on recommence (étape $n = 1$) une phase d’ajustement jusqu’à la prochaine modification du cadre, ou ... jusqu’à la fin si l’ajustement alors obtenu est “correct”.

Chapitre 5

Application à deux ports de la grande côte du Sénégal

L'objet de ce chapitre est de présenter des ajustements du modèle sur les données qui sont collectées et dont la nature a été décrite au paragraphe 1.3 du premier chapitre. Il est composé de quatre parties : présentation des caractéristiques de l'exploitation représentée, rappel de la méthode d'ajustement utilisée, mise en œuvre des ajustements et enfin description du dernier ajustement obtenu.

5.1 Dynamique des débarquements à St-Louis et Kayar, deux ports de la grande côte du Sénégal

5.1.1 Présentation

Nous cherchons à rendre compte de la dynamique observée des efforts et des débarquements de la pêche artisanale sénégalaise. Ceux-ci sont des observations d'une activité de pêche dont les caractéristiques ne sont pas toutes **identifiables** à partir des données disponibles. Nous rappelons maintenant quelles sont ces caractéristiques en essayant de montrer comment le modèle peut en rendre compte.

5.1.1.1 Plusieurs tactiques de pêche et une exploitation multispécifique

Les débarquements de la pêche artisanale sénégalaise sont multispécifiques (la liste des espèces exploitées retenue pour l'échantillonnage des débarquements comprend 199 noms et une catégorie divers), et correspondent à une exploitation menée à l'aide de plusieurs engins (Ferraris 1993a [47]; Ferraris 1993b, [48]).

Plutôt que de parler d'engins, il est plus juste de parler de *types de pêche*. C'est d'ailleurs la dénomination généralement employée en particulier dans le document de présentation de la base de données "pêche artisanale" (on y distingue 24 codes de *types de pêche*, Ferraris 1993a, [47]). En effet, si au débarquement il est aisé de distinguer le pêcheur ayant utilisé une *pirogue ligne moteur < 12 cv*, de celui ayant utilisé un *filet dormant général*, et si l'on peut encore distinguer les *filets dormants à sole* des *filets dormants à poisson*, toutes les sorties correspondant à une utilisation d'une *pirogue ligne < 12 cv* seront codées de la même manière. On regroupe dans ce dernier cas des débarquements pouvant recouvrir plusieurs utilisations d'un même engin de pêche soit plusieurs *types de pêche*.

Laloë *et al.* (1981, [95]) ont analysé les résultats de sorties quotidiennes réalisées par les ligneurs à Kayar sur cinq espèces, les données ayant été obtenues au cours d'un suréchantillonnage mené à Kayar du 10 au 16 avril 1978. Ils mettent à cette occasion en évidence l'existence de plusieurs *types de pêche*, en reliant les captures à différents *facteurs* relatifs à l'activité de pêche. En particulier, ils distinguent deux groupes d'espèces (le groupe tassergal et sarda d'une part et le groupe tiofs, pageots et chinchards d'autre part) qu'ils associent à deux ensembles de lieux de pêche différents. Ces *types de pêche* ont ensuite été dénommés *tactiques de pêche* (Laloë et Samba, 1989 [93]). Nous avons présenté cette notion au paragraphe 3.1 du chapitre 3.

Gérard et Gréber (1985, [61]) en analysant des données de sorties de pêche obtenues lors de deux suréchantillonnages menés à Hann du 28 novembre au 4 décembre 1983 et à Yoff du 13 au 19 février 1984 mettent en évidence l'existence d'associations d'espèces dans les débarquements que l'on peut également relier à la pratique de types de pêche différents.

Ferraris (1992, [49]) a étudié des sorties échantillonnées pour l'évaluation des débarquements des pirogues lignes à Kayar en 1989. Elle caractérise à cette occasion trois tactiques principales: " *On distingue trois grandes tendances: les classes de "tactique-thiof", "tactique-dentés/brotule" et "tactique-pageot"*". L'auteur identifie également des tactiques intermédiaires pour lesquelles on peut se demander si elles correspondent à de véritables tactiques ou à des choix occasionnels.

Ferraris (1995, [45], 1996, [46]) a cherché à identifier et à formaliser les tactiques de pêche pratiquées. Pour cela, un ensemble d'unités de pêche originaires de la grande côte a été suivi du 15 décembre 1991 au 15 décembre 1992. L'auteur distingue alors (Ferraris 1995, [45]) les tactiques *pageot*, *denté à gros yeux*, et un groupe de tactiques correspondant au *tiof*, à la *dorade grise* et au *denté à tâches rouges*. Ferraris (1996, [46]) donne également une description des différentes tactiques de pêche mises en évidence. Elle note bien que les résultats obtenus à partir de son échantillon, parce que celui-ci a été choisi sur une base

non aléatoire en ciblant plus particulièrement les pêcheurs de la grande côte, ne permet pas de tirer de généralités sur les comportements tactiques des pêcheurs artisans sénégalais. L'analyse menée permet cependant de fournir des indications précieuses quant aux différents types de pêche pratiqués par les pêcheurs de la grande côte.

Nous avons vu (paragraphe 3.1 du troisième chapitre) que le modèle est basé sur le principe d'une exploitation d'une ressource multispécifique par des pêcheurs ayant accès à plusieurs tactiques de pêche. Il tient donc là bien évidemment compte de cette caractéristique. Nous devons cependant souligner deux difficultés. La première est relative à la définition des tactiques. Nous avons (chapitre 3) défini une tactique comme un ensemble d'actions de pêche équivalentes au sens où elles ont les mêmes probabilités de capture de tout ensemble de poissons. Ces probabilités sont dénommées capturabilités. Si l'on veut estimer lors de l'ajustement ces capturabilités, nous avons vu (paragraphe 4.5 du quatrième chapitre) qu'on avait intérêt à définir le plus grand nombre de contraintes possibles. Celles-ci vont dans notre cas s'exprimer sous la forme de la nullité de certaines des capturabilités. Sur quel critère allons-nous alors baser notre choix ?

La seconde difficulté est liée à l'identification du modèle, par exemple à la détermination des tactiques que nous devons considérer. Ce problème est important car on sait qu'il existe plusieurs tactiques de pêche. Laloë et Samba (1991, [94]) soulignent que si l'on ignorait leur existence, on pourrait alors difficilement rendre compte de certaines des variabilités observées dans les données. Cependant, nous ignorons souvent leur nombre et dans certains cas leurs définitions.

5.1.1.2 Modes d'utilisation des tactiques de pêche

Une des conséquences de l'existence de plusieurs tactiques de pêche est l'aptitude des pêcheurs à les utiliser successivement. Laloë et Samba (1989, [93]) soulignent que cette aptitude semble constituer "*le moteur des activités de pêche sur la côte sénégalomauritanienne*". Ils insistent sur le fait que cette capacité permet ainsi aux pêcheurs de maintenir leur activité rémunératrice. Les choix des pêcheurs vont ainsi correspondre à des reports d'efforts entre les tactiques, voire entre engins de pêche. Il faudrait au moins disposer d'un ensemble de tactiques exhaustif pour être capable de décrire entièrement la nature de ces reports. Ceux-ci peuvent avoir lieu à différentes échelles de temps. Ainsi Laloë *et al* (1981, [95]) décrivent un report de pêcheurs en moins d'une semaine d'une tactique ligne visant du tassergal vers une tactique ligne visant des poissons démersaux.

Dans une autre étude (Laloë et Samba 1989, [93]), ces mêmes auteurs décrivent (pour la période qu'ils étudient, ie 1974-1987) les principaux reports d'efforts saisonniers qui sont

également appelés campagnes de pêche :

- pour la pêche à la ligne : les campagnes visant successivement le tiof, le tassergal, le pageot, le pagre et plus récemment le voilier et le denté à gros yeux.
- pour la pêche à la senne tournante, les campagnes visant successivement la sardinelle ronde, le chincharde jaune et récemment le tassergal.
- pour le filet dormant, la campagne visant la sole.

Bakhayokho et Kebe (1991a, [6]), et Kebe (1993, [84]) signalent la reconversion temporaire d'unités de pêche à la senne tournante en pirogue glacière durant l'hivernage. Ferraris (1992, [49]) décrit également les principales campagnes menées par les pêcheurs kayarais durant l'année 1989.

Les causes de ces reports sont multiples, liées non seulement à la disponibilité de la ressource (Bakhayokho et Kebe 1991a, [6]), mais aussi à des facteurs autres que biologiques en particulier ceux liés aux conditions socio-économiques (Laloë et Samba 1989, [93]; Ferraris 1992, [49]; Samba 1995, [126]). Les reports d'efforts sont traduits dans le modèle par des reports d'efforts entre les différentes tactiques considérées. Ceci peut recouvrir des changements d'espèces cibles, des changements d'engins et des migrations liées ou non à des campagnes de pêche.

Nous avons vu au chapitre 3 que la distribution des efforts parmi les différentes tactiques était conditionnelle aux revenus qui sont espérés de leurs emplois. Ces revenus s'expriment comme des fonctions de paramètres relatifs aux aspects "biologiques" (capturabilités, inaccessibilités) et "économiques" (prix, coûts) de la pêcherie. En modifiant¹ les valeurs de ces paramètres, on peut rendre compte à l'aide du modèle des types de reports d'efforts précédemment décrits. En particulier, les captures réalisées par les pêcheurs artisans sénégalais sont marquées par une très importante saisonnalité (*cf* Laloë et Samba, 1989 [93], et chapitre 2). Ces saisonnalités sont généralement reliées à celles des espèces (Champagnat *et al.* 1983, [24]; Fréon 1986, [52]; Cury 1988, [31]; Laloë et Samba 1989, [93]; Barry-Gérard 1993, [9]; Samba et Laloë 1991, [128]). Dans ce cas, les profils d'inaccessibilité saisonniers des espèces pour les tactiques permettent de rendre compte de ce phénomène.

Les conséquences des reports effectués sont des modifications de la distribution des efforts parmi les engins observés lorsqu'ils concernent des tactiques ne correspondant pas à l'utilisation d'un même engin de pêche. Ils engendrent une variabilité des mortalités induites par les unités de pêche (Laloë et Samba 1989, [93]; Laloë 1991, [94]; Laloë 1993, [89]; Ferraris 1995, [45]), et donc une modification des compositions spécifiques des captures.

1. Nous précisons au paragraphe 5.3 comment nous avons défini ces modifications.

5.1.1.3 Des événements conditionnant l'activité de la pêche

Une autre caractéristique de la pêche artisanale sénégalaise soulignée par les auteurs (Laloë et Samba 1991, [94]; Chaboud et Charles-Dominique 1991, [22]; Kebe 1993, [84]; Kebe et Bakhayokho 1995, [85]; Samba, 1995 [126], Lefur 1995, [102]) est le fait que cette activité est régulièrement soumise à des modifications plus ou moins brusques pouvant concerner les conditions de l'exploitation. Il peut s'agir de modifications de prix (dont un exemple parlant -même s'il ne rentre pas dans le cadre de notre étude- concerne la dévaluation du franc CFA en janvier 1994 dont une des conséquences a été une augmentation du prix à la vente des espèces exportées), de modifications relatives aux coûts d'utilisation du matériel, à des modifications environnementales. . . Ces modifications peuvent parfois être engendrées par les pêcheurs lorsqu'ils adoptent de nouvelles techniques de pêche par exemple la senne tournante au cours des années 1970 (Laloë et Samba 1989, [93]; Kebe 1993, [84]), la palangre à la fin de l'année 1987 et les années suivantes (Samba et Fontana 1989, [127]), ou plus récemment le trémail (Charles-Dominique 1996, [26]).

Les origines de ces modifications peuvent être connues, mais ce n'est pas toujours le cas. Ainsi, dans leur thèse, Laloë et Samba (1989, [93] pages 215 et 216) émettent plusieurs hypothèses relatives à la disparition du tassergal des captures des lignes au début des années 1980. Ces "changements" ont comme conséquence l'adoption par les pêcheurs de nouvelles tactiques de pêche (par exemple, à l'"apparition" du poulpe à la fin des années 80 (Samba 1993, [124]) correspond l'adoption par les pêcheurs de cette espèce comme nouvelle espèce cible). Nous donnons dans le tableau 5.1 une liste des principaux événements intervenus sur la grande côte du Sénégal qui est la zone que nous étudierons. Nous utiliserons, par la suite, certains de ces changements (parfois supposés et parfois réels) pour conduire nos ajustements.

Enfin, nous devons souligner ici que ce sont des débarquements qui sont observés. Ainsi, des variations dans les débarquements peuvent aussi correspondre à des reports de débarquement. Ce peut être par exemple le cas d'une pirogue ligne glacière ayant pêché au large de Saint-Louis et qui va vendre son produit dans le port de Hann.

5.1.2 Les données considérées

Notre objet n'est pas de fournir à l'aide du modèle une représentation exhaustive de la pêche artisanale Sénégalaise, mais d'étudier la "capacité" du modèle à restituer des données observées, en respectant les principales caractéristiques de la pêche artisanale sénégalaise rappelées au paragraphe précédent.

TAB. 5.1 – *Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal : une liste d'événements intervenus dans la pêche de 1974 à 1992.*

Date	Événement	Observation	Source
1977	Apparition des lignes glacières à Saint-Louis		[93], p. 212. [84] p.47
1978	Conflit relatif à l'utilisation des filets dormants par les Saint-Louisiens à Kayar	Augmentation des efforts lignes à Kayar durant la saison froide et baisse des efforts correspondants à Saint-Louis	[93], p 149
1979	Apparition des sennes tournantes à Kayar		[93], p 212; [84] p.48
1981	Apparition des sennes tournantes à Saint-Louis		[93], p 212; [84] p.47
1982	Baisse de l'activité des sardiniers basés à Dakar		[53], [33]
1983	Apparition des bateaux ramasseurs à Saint Louis Augmentation de la capturabilité du chinchard par les industriels	Baisse des effectifs lignes	[93], p 213.
	Pénurie de moteurs hors-bord et pièces détachées	Baisse des effectifs lignes	[93], p 146
	Augmentation du prix des dorades profondes	Modification de la saisonnalité des captures moyennes relatives à cette espèce	[23]
1985	Démarrage de la pêche des soles avec des filets dormants à kayar Accroissement des captures par les chalutiers des espèces de hauts fonds	Augmentation des efforts de filet dormant à Kayar	[93], p 218; [102], p 91. [141]
1986	Reprise des importations de moteurs hors-bord et de pièces détachées		[93], p 146
1987	Offre des mareyeurs à Saint-Louis pour les sardinelles	Augmentation de la durée de la saison des sardinelles rondes par les sennes	A. Samba, comm. pers.
1987/1988	Les glacières et les lignes adoptent la palangre (cette année et puis les suivantes)	Augmentation des efforts lignes glacières à Saint-Louis	[93], p 213-214.
1989		Apparition du poulpe dans les captures des lignes à Kayar	[124]
1989	Augmentation des prix des espèces nobles (tiof et dorades) ainsi que du poulpe		[23]
	Conflit Sénégal-Mauritanie, qui va être latent au cours des années suivantes	Chute des efforts lignes glacières à St-Louis, augmentation des efforts lignes et des filets dormant à St-Louis	[124], [84]
1990	Augmentation des prix des requins-raies	Augmentation des efforts filets dormants à Kayar	A. Samba, comm. pers.
1991		Augmentation des efforts lignes à Kayar durant la saison froide Apparition du poulpe dans les captures des lignes à Kayar	

Pour cela, nous avons choisi (arbitrairement) de nous intéresser aux débarquements réalisés dans les deux principaux ports de la Grande Côte du Sénégal : Saint-Louis et Kayar. Nous essayerons ainsi de tenir compte des relations pouvant exister entre ces deux lieux de débarquement par exemple les migrations d'unités Saint-Louisiennes à Kayar. Comme on ne peut ignorer les relations liant l'ensemble "Kayar-Saint Louis" avec l'"extérieur", nous essayerons de tenir compte des migrations d'unités de pêche hors de notre zone d'étude, (par exemple des unités Saint-Louisiennes partant en campagne sur la Petite Côte) et de l'impact sur l'exploitation d'une activité de pêche "extérieure" : c'est à dire de celle menée par des navires industriels (Deme et Levenez, 1991 [33]; Bakhayokho et Kebe, 1991b [7]; Fréon, 1993 [53]; Thiam et Gascuel, 1993 [141]).

Nous avons défini les jeux de données à considérer avec l'aide de A. Samba. Nous avons vu (chapitre 1, paragraphe 1.3) que les strates du plan d'échantillonnage étaient respectivement le lieu de débarquement, l'engin utilisé et la quinzaine. Les quinzaines vont nous permettre de définir la structure temporelle de nos séries qui seront chacune définie comme une combinaison lieu de débarquement \times engin. Nous considérerons l'ensemble des combinaisons des deux lieux de débarquement Saint-Louis et Kayar et des quatre engins ligne, ligne glacière, senne tournante et filet dormant, exceptée Kayar \times ligne glacière. En effet cet engin ne débarque pas à Kayar, les pirogues glacières étant plutôt basées dans la région de la presqu'île du Cap-Vert pour bénéficier de la proximité de l'agglomération dakaroise.

Chaque engin regroupe un ensemble de codes engins utilisés lors des enquêtes (tableau 5.2). Il en est de même pour les espèces : nous avons défini 13 groupes dont les compositions sont fournies dans le tableau 5.3. Puisque l'on sait que certains groupes sont associés à certains engins et que l'association peut dépendre du port considéré, nous avons alors à chaque combinaison port \times engin associé les groupes concernés (tableau 5.4).

Nous disposons alors de 43 séries chronologiques (7 d'efforts et 36 de captures par unité d'effort) sur lesquelles nous allons essayer d'ajuster le modèle LS. Les données de capture par unité d'effort ont été transformées par la fonction $\ln(1 + x)$.

5.2 Méthode d'ajustement

Nous avons proposé au paragraphe 4.6 du chapitre 4 une procédure en vue d'ajuster le modèle LS aux données observées. Nous allons maintenant essayer de la mettre en œuvre sur le jeu de données défini au paragraphe précédent.

La première étape consiste à choisir un modèle initial (*ie* définitions des tactiques, des

TAB. 5.2 – Ajustement du modèle LS pour deux ports de la grande côte au Sénégal : définition des engins considérés pour définir le jeu de données. Les codes et les dénominations sont ceux employés par Ferraris et al. (1993a, [47]).

Engin	Code	Dénomination
Ligne	1	Pirogue ligne voile
	2	Pirogue ligne (< 12 cv)
	3	Pirogue ligne (> 12 cv)
Ligne glacière	4	Pirogue ligne glacière
Senne tournante	6	Senne tournante
Filet dormant	5	Filet dormant général
	19	Filet dormant à poisson
	20	Filet dormant à sole
	21	Filet dormant à ethmalose et sardinelle
	22	Filet dormant à langouste
	23	Filet dormant à Yett

stratégies ainsi que leur articulation) et à fixer des valeurs initiales des paramètres. Il s'agit là de définir le cadre général à partir duquel vont être menés les ajustements. Ce cadre nous est donné par A. Samba en tant qu'expert de la pêche. Notre ajustement sera donc mené sous les "bons auspices" de l'expert qui interviendra de nouveau lors de chacune des étapes, guidant ainsi l'ajustement.

La seconde étape consiste, au vu de l'"écart" entre le modèle et les observations, à ajuster certains paramètres auxquels nous associons certaines séries en choisissant les termes de pondération associés au critère $\mathcal{L}_p(\theta)$.

La troisième partie consiste à accrédi-ter ou non les valeurs estimées des paramètres. Ces valeurs correspondent à une baisse de la valeur du critère $\mathcal{L}_p(\theta)$, mais pas forcément à une diminution du critère global $\mathcal{L}(\Theta)$. On examine, pour accrédi-ter les estimations obtenues, les évolutions des variables du modèle (biomasses, revenus, répartition des efforts par tactique) pour lesquelles nous ne disposons pas d'observations mais de certaines informations. On considère également l'adéquation des valeurs estimées des paramètres avec certains ordres de grandeur connus ou supposés. Par exemple, on sait que le coût de mise en œuvre d'une pirogue pratiquant la senne tournante (qui est une pirogue ayant une grande capacité nécessitant un puissant moteur et dont la senne est un filet onéreux) est plus important que celui d'une pirogue ligne.

TAB. 5.3 – Ajustement du modèle LS pour deux ports de la grande côte au Sénégal : définition des groupes d'espèces considérés pour définir le jeu de données. Les codes et noms sont ceux employés par Ferraris et al. (1993a, [47]).

Groupe	Codes	Noms scientifiques	Groupe	Codes	Noms scientifiques
1 Tiofs	49	<i>Epinephelus aenus</i>	7 Poulpe	183	<i>Octopus vulgaris</i>
	50	<i>Epinephelus guaza</i>	8 Voiliers	178	<i>Istiophorus platypterus</i>
	51	<i>Epinephelus gorensis</i>		179	<i>Makaira nigricans</i>
	52	<i>Epinephelus caninus</i>		180	<i>Xiphias gladius</i>
	53	<i>Epinephelus fasciatus</i>			
2 Dorades côtières	115	<i>Dentex gibosus</i> <i>Dentex</i> spp.	9 Sardinelle ronde	2	<i>Sardinella aurita</i>
	118	<i>Dentex canariensis</i>	10 Sardinelle plate	3	<i>Sardinella maderensis</i>
	125	<i>Pagellus bellottii</i>			
	127	<i>Sparus auriga</i>	11 Caranx	87	<i>Caranx senegallus</i>
	128	<i>Sparus pagrus</i>		88	<i>Caranx crysos</i>
	129	<i>Sparus caeruleostictus</i>		89	<i>Caranx carangus</i>
3 Dorades profondes	116	<i>Dentex macrophthalmus</i>	104	<i>Carangidae divers</i>	
	117	<i>Dentex</i> spp.			
4 Chinchards	86	<i>Decapterus rhonchus</i>	12 Soles	152	<i>Synaptura</i> spp.
	101	<i>Trachurus trecae</i>		153	<i>Scyacium micrurum</i>
	102	<i>Trachurus</i> spp.		154	<i>Cynoglossus</i> spp.
5 Tassergal	105	<i>Pomatomus saltator</i>	13 Requins-Raies	158	<i>Carcharhinus</i> spp.
6 Poissons filets dormants	19	<i>Arius gambiensis</i>		159	<i>Sphyrna</i> spp.
	20	<i>Arius heudelotii</i>		160	<i>Sphyrnidae divers</i>
	21	<i>Arius mercatoris</i>		161	<i>Mustelus mustelus</i>
	22	<i>Ariidae divers</i>		162	<i>Triakidae divers</i>
	29	<i>Sphyrna sphyraena</i>		163	<i>Rhincobatus lubberti</i>
	30	<i>Sphyrna dubia</i>		164	<i>Rhizoprionod. acutus</i>
	31	<i>Sphyrna piscatorum</i>		165	<i>Rhinobatos rhinobatos</i>
	32	<i>Sphyrna barracuda</i>		166	<i>Carcharhinidae</i>
	33	<i>Sphyrna</i> spp.		167	<i>Torpedo</i> spp.
	41	<i>Galeoides decadactylus</i>	168	<i>Centrophorus</i> spp.	
	42	<i>Pentanemus quinquarius</i>	169	<i>Dasyatis margarita</i>	
	43	<i>Polydactylus quadrifilis</i>	170	<i>Taenura grabata</i>	
	71	<i>Plectorh. mediterraneus</i>	171	<i>Squalidae</i>	
78	<i>Pseudolith. typus</i>	172	<i>Raja miraletus</i>		
79	<i>Pseud. brachygnathus</i>	173	<i>Rajidae divers</i>		
80	<i>Pseus. senegalensis</i>	174	<i>Pteromylaeus bovinus</i>		
81	<i>Pseud. elongatus</i>	175	<i>Mobula mobular</i>		
83	<i>Argyrosomus regius</i>	176	<i>Gymnura altavela</i>		
84	<i>Miracorvina angolensis</i>	177	<i>Manta birostris</i>		
85	<i>Sciaenidae divers</i>	198	<i>Pleurotrèmes divers</i>		
99	<i>Trachinotus gorensis</i>	199	<i>Hypotremes divers</i>		
100	<i>Trachinotus maxillosus</i>				
107	<i>Psettodes belcheri</i>				

TAB. 5.4 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal : composition des groupes d'espèces pour chacune des combinaisons lieu de débarquement \times engin.

Groupe	Lignes		Lignes glacières	Sennes tournantes		Filets dormants	
	St-Louis	Kayar	St-Louis	St-Louis	Kayar	St-Louis	Kayar
Tiofs	•	•	•				
Dorades ctres	•	•	•				
Dorades pfdes		•					
Chinchards	•	•	•	•	•		
Tassergal	•	•	•	•	•		
Poissons fts dts	•	•	•			•	•
Poulpe	•	•	•				
Voiliers		•					
Sardinelle ronde				•	•		
Sardinelle plate				•	•		
Caranx				•	•		
Soles						•	•
Requins-Raies						•	•

Dans le cas où l'on n'accrédite pas les valeurs obtenues à l'issue d'un ajustement, nous pouvons :

- soit redéfinir directement un autre jeu de paramètres et de séries sur lesquelles nous ajusterons,
- soit, avant cela, modifier le modèle lui même par exemple en ajoutant ou supprimant une ou plusieurs tactiques, en modifiant leur définition, ou encore en changeant la nature des contraintes portant sur les paramètres.

Nous décrivons dans le paragraphe suivant les principales étapes de l'ajustement. Nous avons choisi, pour ne pas alourdir le texte, de ne pas décrire la liste exhaustive des ajustements menés. Néanmoins nous essayerons d'illustrer par quelques exemples certains "passages" caractéristiques, et nous fournirons les principaux modèles que nous avons considérés.

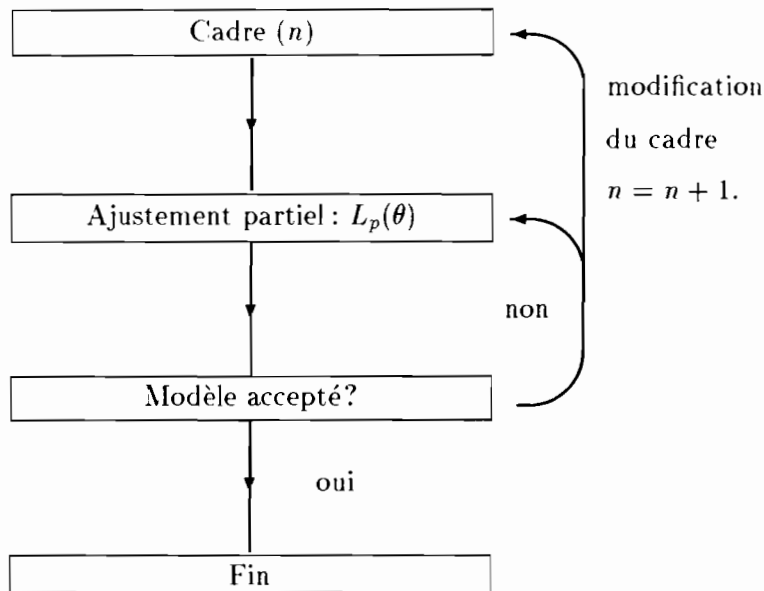


FIG. 5.1 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal : schéma d'ajustement du modèle LS aux données observées.

5.3 Mise en œuvre de l'ajustement.

5.3.1 Choix d'un modèle initial et des valeurs des paramètres

5.3.1.1 Choix du modèle initial

Nous avons demandé à A. Samba de choisir, pour le jeu de données que nous considérons, un modèle LS réaliste qui soit le plus simple possible. Ce modèle distingue 6 stratégies qui font intervenir 19 tactiques (tableaux 5.5 et 5.6).

La sixième stratégie ou **stratégie "industriels"** ne concerne pas les pêcheurs artisans mais les industriels. Nous avons alors fixé arbitrairement à 100 l'effectif de la stratégie, ce chiffre n'ayant en soi aucune signification. En effet nous ne cherchons pas ici à représenter l'activité industrielle, mais à rendre compte de son impact sur l'état de la ressource exploitée par les pêcheurs artisans. Les cinq autres stratégies concernent des unités de pêche artisanale.

La **stratégie filet dormant** comprend deux tactiques correspondant à l'emploi du

TAB. 5.5 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal : définition des tactiques du premier modèle considéré.

tactique \ stock	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
a ligne tassergal à Saint-Louis	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0	0	0
b ligne tiof à Saint-Louis	•	•	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c ligne dorade côtière à Saint-Louis	•	•	0	•	0	•	0	0	0	0	0	0	0
d ligne poulpe à Saint-Louis	0	0	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0
e ligne tassergal à Kayar	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0	0	0
f ligne dorades profondes à Kayar	0	0	•	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
g ligne voilier à Kayar	0	0	0	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0
h ligne tiof à Kayar	•	•	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i ligne dorades côtières à Kayar	0	•	0	•	0	•	0	0	0	0	0	0	0
j ligne poulpe à Kayar	0	0	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0
k ligne glacière à Saint-Louis	•	•	0	•	•	•	•	0	0	0	0	0	0
l senne tassergal à Saint-Louis	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0	0	0
m senne petits pélagiques à Saint-Louis	0	0	0	•	0	0	0	0	•	•	•	0	0
n senne tassergal à Kayar	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0	0	0
o senne petits pélagiques à Kayar	0	0	0	•	0	0	0	0	•	•	•	0	0
p filets dormants à Saint-Louis	0	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	•	•
q filets dormants à Kayar	0	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	•	•
r industriels	•	•	•	•	•	•	•	0	•	•	•	•	•
s activité H G C.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. 5.6 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal : définition des stratégies pour le premier modèle. (L. gl. = lignes glacières, Fts dts = filets dormants, Ind.=industriels, H.G.C=hors grande côte, St-L.=Saint-Louis, K.=Kayar)

Stges \ tactiques	Lignes										L gl	Sennes				Fts dts		Ind	H G C
	St-L					K					St-L	St-L		K					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q		
Fts dts																•	•		
L K					•	•	•	•	•	•									•
L St-L	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•									•
Gl /Snes											•	•	•	•					•
Snes												•	•	•	•				•
Inds																		•	

filet dormant à Saint-Louis et à Kayar. Cette stratégie est censée représenter des pêcheurs Saint-Louisiens qui pratiquent la pêche au filet dormant et dont une partie migre aux alentours du mois de mai à Kayar durant la saison de la pêche à la sole. En effet, les pêcheurs Kayarois pratiquent peu la pêche au filet dormant.

La stratégie **ligne Kayar** est caractérisée par six tactiques lignes pratiquées à Kayar et dont les stocks principaux ciblés sont respectivement : le tassergal, les dorades profondes, le voilier, les tiofs, les dorades côtières et le poulpe. Cependant, les captures réalisées à l'occasion d'une sortie de pêche visant une espèce principale peuvent également comprendre un certain nombre d'autres espèces qui sont appelées espèces associées. C'est la raison pour laquelle les probabilités de capture d'une tactique peuvent ne pas être nulles pour plusieurs stocks.

La stratégie **ligne Saint-Louis** a accès à l'ensemble des tactiques accessibles à la stratégie ligne Kayar ainsi qu'à quatre tactiques caractéristiques de la pêche à la ligne pratiquée à partir de Saint-Louis (*ligne tassergal*, *ligne tiof*, *ligne dorades côtières* et *ligne poulpe*). Cette stratégie est censée représenter les pêcheurs ligneurs originaires de Saint-Louis dont une bonne partie pratique la migration hors de leur port d'origine dans l'ensemble du Sénégal (Chauveau et Samba 1989, [28]) et donc à Kayar pour ce qui est de notre zone d'étude.

La stratégie **senne tournante** a accès à deux tactiques de pêche à la senne (une visant le tassergal et la seconde les sardinelles) pratiquées à partir de Kayar et à leurs homologues à Saint-Louis.

La stratégie **ligne glacière-senne tournante** a accès aux mêmes tactiques que la stratégie senne mais a en outre accès à la *tactique ligne glacière*. Cette stratégie a pour objet de rendre compte de la pratique par des unités Saint-Louisiennes de la ligne glacière. Ces unités peuvent être des unités pratiquant la senne reconverties en ligne glacière durant l'hivernage (de la fin du mois de juin jusqu'au mois de septembre, Laloë et Samba 1989, [93]; Bakhayoko et Kebe 1991, [6]; Kebe 1993, [84]).

A chacune des stratégies (exceptée la stratégie "industriels") nous avons rajouté une tactique que nous appellerons *activité autre que la pêche sur la Grande Côte*. Cette tactique a pour but de rendre compte de l'activité pratiquée par les unités de pêches lorsque ces dernières ne débarquent ni à Saint-Louis ni à Kayar. En effet lorsqu'une pirogue n'est pas comptabilisée dans les efforts, soit elle n'est pas sortie en mer, soit elle est sortie en mer à partir d'un autre port où elle a migré. Cette activité apporte un revenu à l'unité de pêche dont nous tenons compte en attribuant un coût de mise en œuvre négatif à la tactique ou coût d'opportunité (le revenu engendré étant alors positif, voir la définition du modèle, chapitre 3, paragraphe 3.1). Pour la stratégie ligne Kayar qui est supposée être pratiquée par des unités non migrantes, la tactique *activité autre que la pêche sur la Grande Côte* pourra correspondre à la pratique d'une activité agricole (Laloë et Samba 1989, [93]). Pour les autres stratégies l'emploi de cette tactique est censée correspondre à une migration, à une autre activité ou à une absence d'activité.

La définition des capturabilités (tableau 5.5) nous a permis de définir quelles sont les stocks capturables pour chacune des tactiques considérées. Nous avons donc à cette occasion défini un ensemble de contraintes sur les capturabilités (aux stocks non capturables étant imposées des capturabilités nulles) et en conséquence sur les inaccessibilités associées (l'inaccessibilité d'une espèce relative à une tactique n'ayant pas lieu d'être définie si l'espèce n'est pas capturable par la tactique).

5.3.1.2 Choix des valeurs initiales des paramètres

Nous avons choisi des valeurs des paramètres qui soient les plus vraisemblables possibles. Nous distinguons ici les paramètres pour lesquels on dispose de certaines informations (voire d'estimations, par exemple pour les prix) de ceux pour lesquels de telles informations ne sont pas disponibles (par exemple les inaccessibilités des stocks aux tactiques).

Les valeurs des paramètres μ et ρ ont été fixées arbitrairement. En effet, nous avons vu (paragraphe 3.1 du chapitre 3) que le paramètre ρ avait été introduit pour des questions de dérivabilité de la fonction critère. D'autre part, si le paramètre μ peut lui avoir une interprétation plus claire, nous avons souligné que nous ne disposons pas d'étude quant à la manière dont s'effectuaient les reports d'effort des pêcheurs artisans. Nous ne pouvons guère mener de telles études à partir de nos données "par engin" qui correspondent à des agrégations de tactiques (paragraphe 4.2 du chapitre 4).

Concernant les **biomasses vierges ou capacités de charge du milieu**, Samba (1993, [125]) signale en conclusion de l'atelier "l'évaluation des ressources exploitables par la pêche artisanale au Sénégal" qui s'est tenu à Dakar du 8 au 13 février 1993, qu'il "*paraît difficile d'avoir une estimation des biomasses dans les zones côtières*". Nous avons pris pour les stocks qui étaient communs, les évaluations de B_v et de r données par Laloë et Samba dans leur thèse.

Pour chacun des stocks, nous avons considéré les moyennes des **prix** estimés par Chaboud et Kébé (1982, [23]; 1990 [20]) dans leurs enquêtes. Nous considérerons ici que les mêmes prix sont pratiqués au débarquement à Saint-Louis et à Kayar, même si l'on sait qu'il peut exister des différences en faveur de Kayar dues à la proximité de l'agglomération dakaroise et aux difficultés d'acheminement du poisson depuis Saint-Louis (A. Samba, comm. pers.).

Concernant les **coûts de mise en œuvre des tactiques**, nous avons repris lorsque les tactiques correspondaient les valeurs données par Laloë et Samba (1989, [93]). Nous avons alors fixé arbitrairement les autres coûts en respectant les ordres de grandeur connus entre les tactiques et/ou engins, soit, dans l'ordre croissant : *lignes poissons à Kayar, lignes poissons à Saint-Louis, lignes dorades profondes, filet dormant à Kayar, filet dormant à Saint-Louis, glacières, sennes tournantes*.

Nous avons pour les **capturabilités** principalement considéré les valeurs utilisées par Laloë et Samba dans leur thèse (1989, [93]), et celles données par A. Samba (comm. pers.) en respectant la contrainte que pour un même engin, la capturabilité d'un stock donné est

la plus élevée pour la tactique dont il est le stock cible.

Nous avons décrit (paragraphe 3.1. chapitre 3) l'**inaccessibilité** d'un stock k pour une tactique j à l'aide d'un certain nombre de paramètres $(\alpha_{j,k,m})_{j,k,m}$. En considérant un pas de temps de 15 jours, cela revient à définir 24 paramètres. Si l'on multiplie 24 par le nombre de combinaisons tactique \times stock qui ont été définies alors nous obtenons un nombre important² de paramètres. Ce nombre peut être réduit en décrivant chaque profil d'inaccessibilité comme une fonction indexée par un nombre plus restreint de paramètres. Cette fonction doit être à valeurs dans $[0, 1]$ et étant donnée la forme sinusoïdale des profils de captures moyennes (paragraphe 2.2.1 du chapitre 2), nous l'exprimerons comme fonction d'harmoniques de périodes 24 et 12. Nous avons donc posé :

$$\begin{aligned} h_0(t) &= 1, & h_1(t) &= \sin(\pi \Delta_t t), & h_2(t) &= \cos(\pi \Delta_t t), \\ h_3(t) &= \sin(2\pi \Delta_t t), & h_4(t) &= \cos(2\pi \Delta_t t), \end{aligned}$$

$$\text{et } \alpha_{j,k,m} = \frac{1}{1 + e^{-\sum_{i=0}^4 u_i h_i(m)}}, \quad m = 1, \dots, \frac{1}{\Delta_t}. \quad (5.1)$$

Ainsi, nous exprimons les inaccessibilités comme transformées, par la fonction logistique, d'une combinaison linéaire de fonctions sinus et cosinus de périodes respectives $\frac{1}{\Delta_t}$ et $\frac{1}{2\Delta_t}$, où $\Delta_t = \frac{1}{24}$. Nous réduisons ainsi pour chaque tactique le nombre de paramètres de 24 à 5. Le gain en nombre de paramètres est bien évidemment compensé par une perte de souplesse.

Un autre problème est celui de la détermination des profils d'inaccessibilité. Il peut être tentant de relier ces profils aux profils saisonniers des captures (paragraphe 2.2.1, chapitre 2). Cependant, il n'existe pas forcément de relation directe entre ces deux types de profils. Par exemple, considérons la série des captures moyennes du stock de dorades profondes à Kayar (figure 5.2).

Avant 1983, les captures ont principalement lieu durant la saison chaude. Si l'on faisait une correspondance directe entre le profil des captures moyennes et le profil d'inaccessibilité, on pourrait avoir tendance à en conclure que les dorades profondes ne sont pas accessibles aux lignes durant la saison froide. Or, à partir de 1983 (Chaboud 1990, [20]) le cours des dorades profondes augmente. Les années suivantes on observe une modification du profil des captures par unité d'effort avec deux pics : un en saison chaude et un en saison froide. Ainsi, le stock de dorades profondes était peut-être accessible aux pêcheurs durant la saison froide avant 1983 mais n'était pas assez rémunérateur par rapport aux autres

2. Le modèle comporte 51 capturabilités non nulles, 13 stocks et 19 tactiques. Le nombre de paramètres est de 1348 dont 1224 (51×24) sont relatifs aux profils d'inaccessibilités.

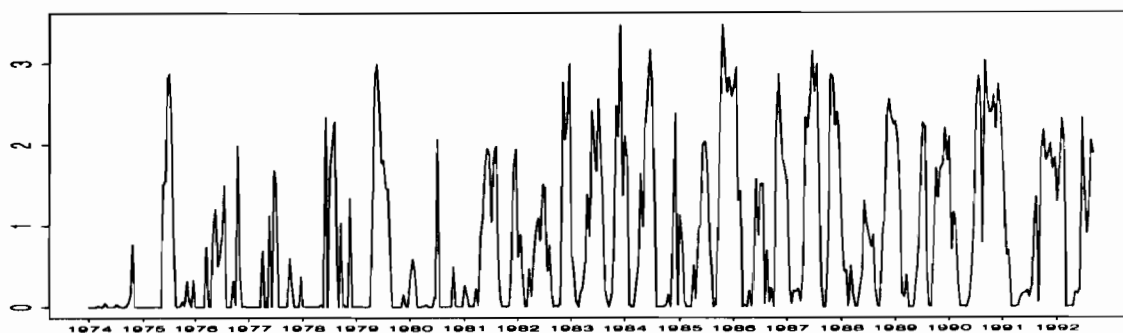


FIG. 5.2 – *Capture par unité d'effort du stock de dorades profondes par les lignes à Kayar de 1974 à 1992 (transformation logarithmique des données).*

stocks attrapées durant cette saison. Ceci est confirmé lorsqu'on considère la répartition des captures suivant les zones de pêche et suivant les saisons. Nous voyons alors (figure 5.3) qu'après 1983, les pêcheurs vont en saison froide chercher la dorade profonde dans des zones de pêche connues (puisque précédemment visitées en saison chaude) et où ce stock devait vraisemblablement se trouver dès avant 1983. Ceci correspond aux hypothèses selon lesquelles cette espèce effectuerait plutôt des déplacements verticaux (A. Samba comm. pers.).

Nous voyons donc qu'il n'existe pas forcément de lien direct entre les profils des captures moyennes et les profils d'inaccessibilité. D'autre part, nous ne disposons en général d'aucune autre information relative à la nature des profils d'inaccessibilité. Nous avons donc choisi, sauf exception, d'estimer les profils d'inaccessibilité en ajustant à l'aide de l'équation (5.1) les profils par quinzaine des captures moyennes de chaque série type de pêche \times lieu de débarquement. Les valeurs obtenues ont été normalisées de manière à appartenir à l'intervalle $[0.5, 0.9]$. Cette normalisation évite en effet dans les cas où l'on ignore les véritables profils de supposer une espèce totalement inaccessible au vu de captures inexistantes.

Nous en déduisons ainsi pour chacune des combinaisons tactique \times stock, un profil. Ces profils initiaux sont donc les mêmes pour deux tactiques relevant d'une même combinaison type de pêche \times lieu de débarquement. A cette règle générale, nous nous sommes autorisés certaines exceptions lorsque nous disposons d'informations supplémentaires. C'est le cas lorsque :

1. Nous connaissons l'existence de profils ne pouvant être décrits à l'aide de la fonction (5.1). Par exemple, il est connu que les tassergals sont ciblés par les sennes tour-

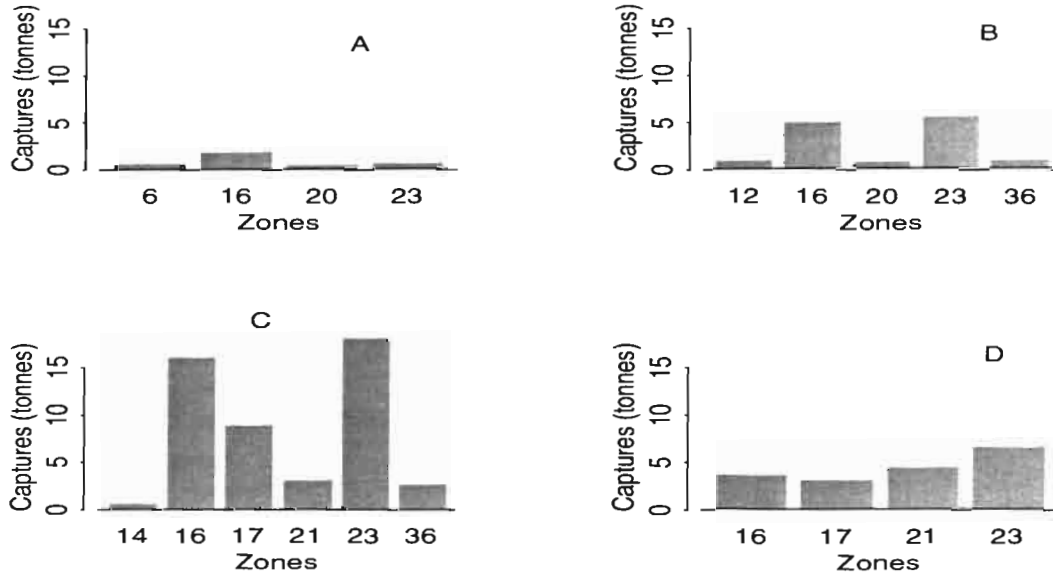


FIG. 5.3 – Captures pour le stock de dorades profondes pour chacun des lieux de pêche de Kayar, par période (1974-1982 et 1983-1992) et par saison de pêche (saison froide : novembre à mai, saison chaude : mai à octobre). A : saison froide de 1974 à 1982. B : saison chaude de 1974 à 1982. C : saison froide de 1983 à 1992. D : saison chaude de 1983 à 1992. Les codes des zones de pêche sont ceux utilisés par Ferraris et al. (1993a, [47]). On trouvera une carte des zones de pêche dans Laloë et Samba (1989, [93]) p. 50 et 52.

nantes durant une courte période de quelques quinzaines lorsque les tassergals se réunissent en bancs de préonte (Laloë et Samba 1989, p 215, [93]). Dans ce cas là, nous avons défini l'inaccessibilité des tassergals par les sennes tournantes en posant respectivement pour Saint-Louis et Kayar :

$$\begin{aligned}
 \alpha_{*,5,m_{t_i}} &= 1 \quad i \neq 10, 11 & \alpha_{*,5,m_{t_i}} &= 1 \quad i \neq 9, 10, 11 \\
 & & \alpha_{*,5,m_{t_i}} &= a \quad i = 9 \\
 \alpha_{*,5,m_{t_i}} &= a \quad i = 10 & \alpha_{*,5,m_{t_i}} &= b \quad i = 10 \\
 \alpha_{*,5,m_{t_i}} &= b \quad i = 11 & \alpha_{*,5,m_{t_i}} &= c \quad i = 11.
 \end{aligned}$$

2. Nous connaissons pour certaines combinaisons tactique \times lieu de débarquement, la nature du profil :

- Nous supposons ainsi que l'inaccessibilité du stock de dorades profondes pour

les lignes à Kayar est constante tout au long de l'année, parce que ce stock est supposé effectuer des déplacements verticaux.

- Etant donné que les glacières sont des embarcations à plus large rayon d'action que les unités traditionnelles et donc, ont un accès aux stocks qui est plus homogène, nous supposons que les accessibilités de cet engin envers les stocks qu'elle exploite sont constantes.
 - Parce que l'on suppose que les captures des navires industriels sont homogènes tout au long de l'année, nous imposerons également à la tactique *industriels* une accessibilité constante envers les stocks qu'elle exploite.
3. Le comportement migratoire de certains stocks étant connu, nous avons pour le tas-sergal, le caranx, le voilier et les soles déterminé un profil d'inaccessibilité compris entre 0 et 1.

Concernant les valeurs initiales des biomasses B_0 et les probabilités d'adoption des tactiques pour chacune des stratégies nous avons posé $B_0 = \frac{B_v}{2}$ et $p_{j,k,t_i} = \frac{1}{\text{card}(\mathcal{J}(s))}$ où $\mathcal{J}(s)$ désigne le nombre de tactiques accessibles à la stratégie s .

Le dernier ensemble de valeurs initiales à définir concerne les effectifs des stratégies. Nous avons pour les stratégies qui correspondent considéré les valeurs proposées par Laloë et Samba (1989, [93]) dans leur thèse, et A. Samba nous a donné un ordre de grandeur pour les stratégies restantes. Cependant, il n'y a aucune raison pour que les effectifs des stratégies restent constants au cours du temps. En fait, ce qui va être comptabilisé comme effort de pêche va être la part de l'effectif de la stratégie utilisant des tactiques de pêche, le complémentaire employant la tactique "autre activité que la pêche sur la grande côte".

Par exemple, l'apparition à partir de 1983 des bateaux ramasseurs (tableau 5.1, voir également Laloë et Samba 1989, [93], p 213) a eu comme conséquence un détournement des pirogues lignes Saint-Louisiennes sur cette nouvelle activité et de fait une baisse du nombre d'unités de pêche employant la ligne à Saint-Louis. On peut très bien traduire à l'aide du modèle ce phénomène en augmentant le coût d'opportunité de la tactique *Hors Grande Côte*.

Le premier modèle que nous considérerons contient 298 paramètres. Nous pouvons constater (tableau 5.7) que les contraintes introduites ont nettement fait diminuer le nombre de paramètres.

TAB. 5.7 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal : nombre de paramètres pour le modèle considéré avant l'ajustement sans et avec les contraintes introduites : I. Aucune contrainte; II. nullité de certaines capturabilités; III. modèle initial.

	B_0	B_v	M	Prix	Coûts	q	α	μ	ρ	total
I	13	13	13	13	19	19×13	$19 \times 13 \times 24$	1	1	6248
II	13	13	13	13	19	51	51×24	1	1	1348
III	13	13	13	13	19	51	174	1	1	298

5.3.2 Les principales étapes des ajustements

Une fois fixés les valeurs des paramètres au vu des connaissances disponibles sur la pêcherie que nous étudions, nous pouvons commencer la procédure d'ajustement. La valeur du critère correspondant aux valeurs initiales des paramètres est $\mathcal{L}(\Theta) = 227.4$.

La "méthode" d'ajustement consiste en une série d'allers retours entre :

1. Un choix de paramètres sur lesquels ajuster et de variables sur lesquelles faire porter l'ajustement.
2. Les résultats des ajustements.

L'étape 1 est arbitraire. Elle est menée en considérant les résultats des ajustements obtenus à l'étape 2 précédente. Par exemple considérons (figures 5.4 à 5.10) les ajustements obtenus après un vingtaine d'étapes d'ajustement. La valeur du critère $\mathcal{L}(\Theta)$ vaut 59.2. Nous considérons alors chacune des 43 séries dont nous pouvons commenter les représentation à l'aide du modèle.

Les lignes à Saint-Louis (figure 5.4)

La série des efforts n'est pas très bien restituée, en particulier en début et en fin de période. De 1974 à 1982, il y a en fin de saison froide un pic ponctuel d'activité. Ce pic correspondrait à un retour à Saint-Louis pour la fête de la tabaski des unités migrantes Saint-Louisiennes. En fin de période, (1989-1992), le modèle surestime les sorties.

La série des captures moyennes de tiof est assez bien représentée jusqu'en 1981. A partir de 1982, le modèle ne rend pas compte d'une baisse des captures moyennes de tiof. Cette baisse s'accroît à partir de 1986/1987. Peut-être cette série peut-elle être reliée à la série du tassergal qui elle aussi est en forte diminution à partir de 1982. Ne pourrait-on

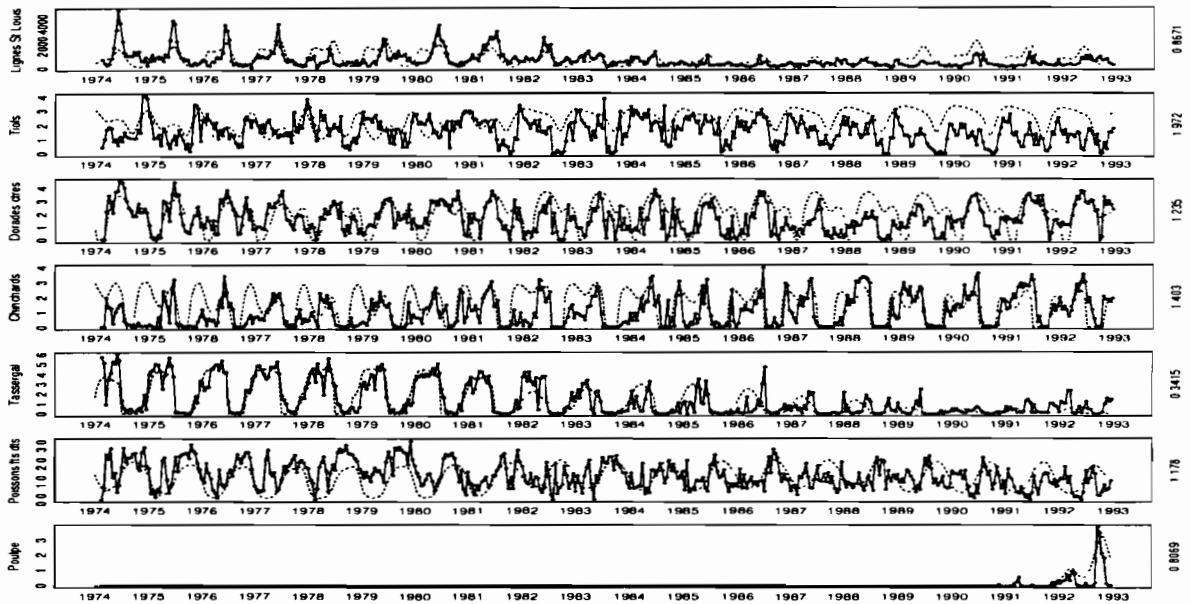


FIG. 5.4 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes à Saint-Louis : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas : efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, chinchards, tassergal, poissons filet dormant et poulpe.

pas rendre compte de la chute du tiof en l'exprimant comme la conséquence d'un report d'effort de lignes visant le tassergal vers le tiof? Nous rendons assez bien compte des captures par unité d'effort des dorades côtières excepté de 1987 à 1990 où on note une forte chute. Quelle en est la cause? Si de 1988 à 1992 nous rendons à l'aide du modèle assez bien compte de la série relative aux chinchards, ce n'est pas le cas plus tôt où il apparaît que la saisonnalité des captures par unité d'effort est différente avec une saison de pêche démarrant plus tard. Quelle peut être la cause de cette modification de saisonnalité observée? La remarque est à peu près la même concernant le stock poissons filets dormants à ceci près qu'ici la modification a lieu aux alentours des années 1983, et que manifestement soit la capturabilité soit le niveau de biomasses du stock sont sous estimés de 1974 à 1981. Nous rendons compte de la série du poulpe de manière assez satisfaisante.

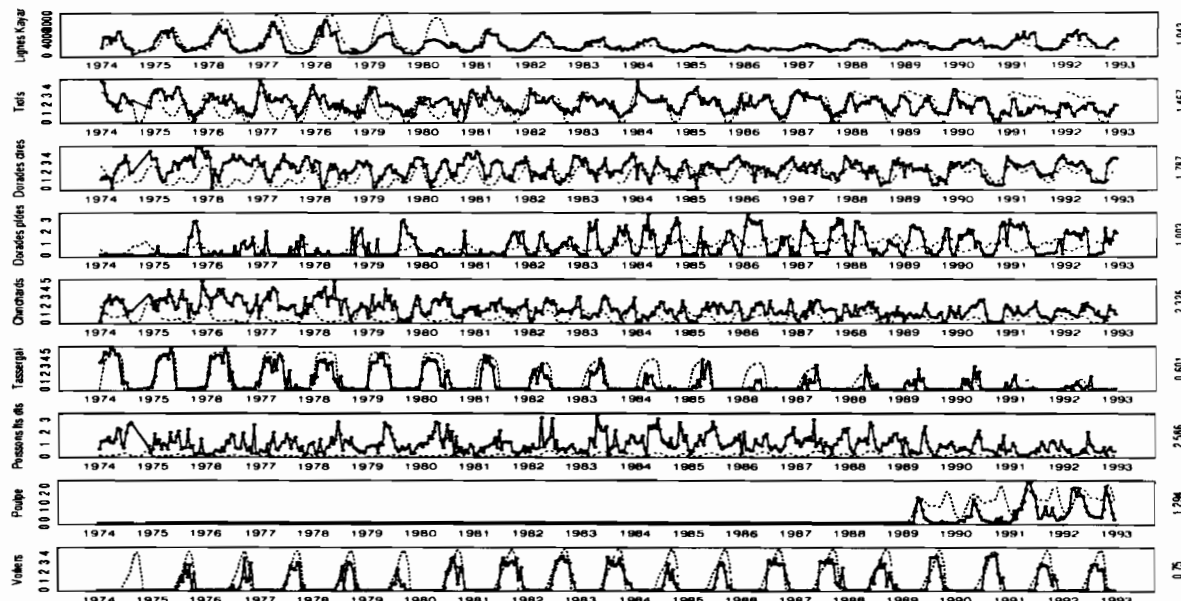


FIG. 5.5 – Ajustement du modèle *LS* à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes à Kayar : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas : efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, dorades profondes, chinchards, tassergal, poissons filet dormant, poulpe et voiliers.

Les lignes à Kayar (figure 5.5)

Les efforts des lignes à Kayar sont surestimés de 1976 à 1980. En fait, on note une augmentation des efforts en fin de saison froide de 1976 à 1978. Cette augmentation correspond au conflit (Laloë et Samba 1989, [93]) qui ces années là a opposé des pêcheurs Saint-Louisiens, voulant utiliser le filet dormant, aux Kayarois opposés à ce type de pêche. Cela a entraîné un afflux d'unités Saint-Louisiennes venues contre les Kayarois (A. Samba, comm. pers.).

Excepté pour les poissons filet dormant et les chinchards, les niveaux moyens des séries sont relativement bien restitués. La saisonnalité des captures par unité d'effort du tiof est correcte pour les années 1982 à 1987. Après 1987, la chute des captures par unité d'effort n'est pas restituée par le modèle et, avant 1982, la saisonnalité de la série ajustée par le modèle est mauvaise. Le groupe des dorades côtières est assez mal restitué jusqu'en 1989. A compter de cette date la série est plus régulière, cela correspondrait-il au fait que

d'accessoire ce stock est ciblé à partir de cette date? Le groupe des dorades profondes est mal restitué par le modèle. Cependant, alors que l'on a supposé constante l'inaccessibilité de cette espèce, nous pouvons noter, d'une part l'existence d'un pic en saison chaude avant 1983, et d'autre part une modification de la saisonnalité après cette date (suite à l'augmentation de prix). La série du tassergal est assez bien restituée avec cependant une surestimation des niveaux maximum des captures par unité d'effort de 1977 à 1980. La saisonnalité de la série du poulpe est mal restituée. Enfin, les maximum des captures par unité d'effort du voilier, espèce ciblée durant la saison chaude depuis le début des années 1980 (Diouf 1994, [36]) sont surestimés.

Les lignes glacières à Saint-Louis (figure 5.6)

Les captures par unité d'effort ajustées par le modèle n'ont pas de saisonnalité. Ceci est dû au fait que nous avons supposé que cet engin dispose d'un plus grand rayon d'action que les autres techniques de pêche, et donc a un accès plus homogène à la ressource. Nous rendons ainsi juste compte des moyennes des séries de captures par unité d'effort. Etant donné la forme de ces séries, il semble, *a priori*, difficile de faire mieux.

Nous rendons bien compte de la nullité des efforts des glacières de la fin 1989 jusqu'au début 1990, suite au conflit sénégal-mauritanien, puis de la reprise d'activité les années suivantes. Par contre, pour la période 1986-1989, le modèle ne rend pas compte d'une activité durant la saison chaude qui est loin d'être négligeable. On sait que l'emploi des lignes glacières a débuté à la fin des années 1970 (Laloë et Samba 1989, [93], p. 212). L'"explosion" de l'activité des glacières à partir de 1986 peut être reliée à l'introduction de la palangre (augmentant les capturabilités des glacières, donc les captures par unité d'effort puis les revenus associés), encore que celle-ci ait plutôt démarré fin 1987 (Samba et Fontana 1989, [127]). Elle peut également être reliée à l'augmentation de prix des espèces nobles (tiof et dorades côtières) enregistrées ces années là suite au développement d'une filière à l'exportation (A. Samba, comm. pers.). Une autre hypothèse serait également l'installation à Saint-Louis d'usines absorbant la production des glacières (A. Samba, comm. pers.).

Les sennes tournantes à Saint-Louis (figure 5.7)

Les sorties sennes tournantes étant exceptionnelles avant 1979, nous restreindrons pour cet engin la période d'étude aux années 1979-1992. Jusqu'en 1985, la série des efforts est relativement bien restituée avec en particulier un pic d'activité en fin de saison froide correspondant à celui des captures par unité d'effort du tassergal. La nette diminution des captures par unité d'effort du tassergal à partir de 1985 correspond à une disparition de ce pic d'efforts. Le modèle n'arrive pas à rendre compte de ce phénomène surestimant les efforts de 1986 à 1990. Peut-être cela correspond-il à l'abandon d'une tactique *tassergal senne*

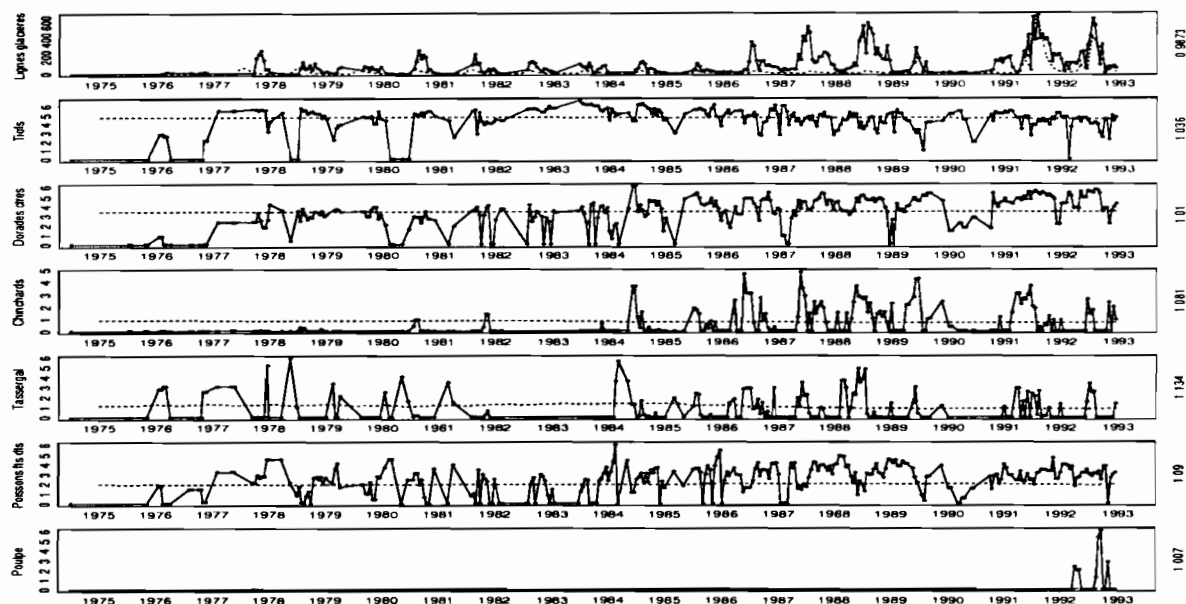


FIG. 5.6 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes glacières Saint-Louis: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas: efforts des lignes glacières et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, tassergal, poissons filet dormant et poulpe.

tournante suite à la raréfaction de cette espèce (Laloë et Samba 1989, [93], p. 214-217)? Si les captures par unité d'effort des deux sardinelles sont relativement bien restituées, ce n'est pas le cas pour le chinchard. Enfin, les captures par unité d'effort du caranx, espèce inféodée aux eaux chaudes, sont mal restituées par le modèle. Peut-être faudrait-il revoir l'accessibilité que nous avons définie pour cette espèce?

Les sennes tournantes à Kayar (figure 5.8)

Les efforts des sennes tournantes à Kayar sont largement surestimés en particulier pour la période 1979-1990. Peut-être faudrait-il alors revoir le coût d'opportunité des différentes tactiques sennes. En tout cas, le pic d'activité qui correspond selon le modèle à l'emploi d'une *tactique senne tassergal* n'est pas observé pour les efforts réels. D'autre part, nous pouvons observer une hausse graduelle du niveau d'emploi de la senne tournante ainsi que d'un accroissement de la saison de pêche.

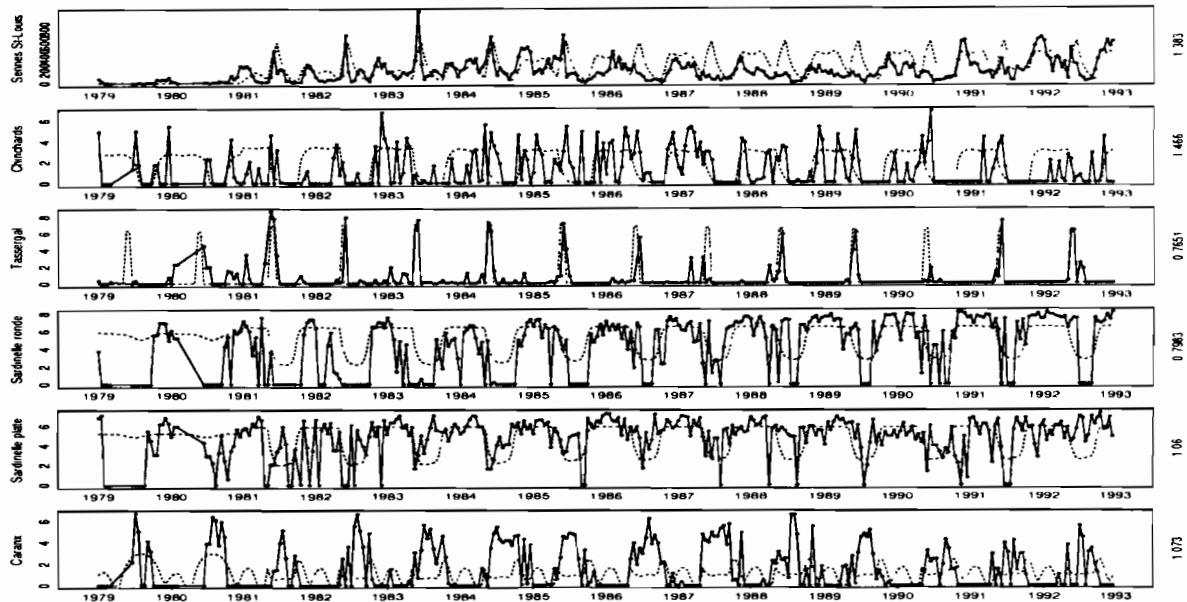


FIG. 5.7 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les sennes tournantes à Saint-Louis : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas : efforts des sennes tournantes et captures par unité d'effort pour les stocks de chinchards, tassergal, sardinelle ronde, sardinelle plate et caranx.

Ici, la série des captures par unité d'effort des chinchards est mieux restituée que son homologue à Saint-Louis. Cependant, nous pouvons noter que le niveau des captures par unité d'effort durant la saison de pêche est sous-estimée. Les captures par unité d'effort des sardinelles et surtout de la sardinelle plate sont assez mal restituées. Pour cette dernière, l'irrégularité de la série peut être reliée au fait que cette espèce est plus inféodée aux embouchures des fleuves (Fréon 1986, [52], p. 38). C'est pour cette raison que les captures par unité d'effort observées sont plus faibles à Kayar qu'à Saint-Louis (A. Samba, comm. pers.). Ici également, la saisonnalité des caranx est mal restituée par le modèle.

Les filets dormants à Saint-Louis (figure 5.9)

Chacune des quatre séries relative à l'exploitation des filets dormants à Saint-Louis est mal représentée à ce stade de l'ajustement. Pour la série des efforts, nous ne rendons compte que du niveau moyen occultant ainsi la saisonnalité de la série qui semble correspondre à celle des captures par unité d'effort réalisées sur les soles. Ici, nous ne considérons qu'une

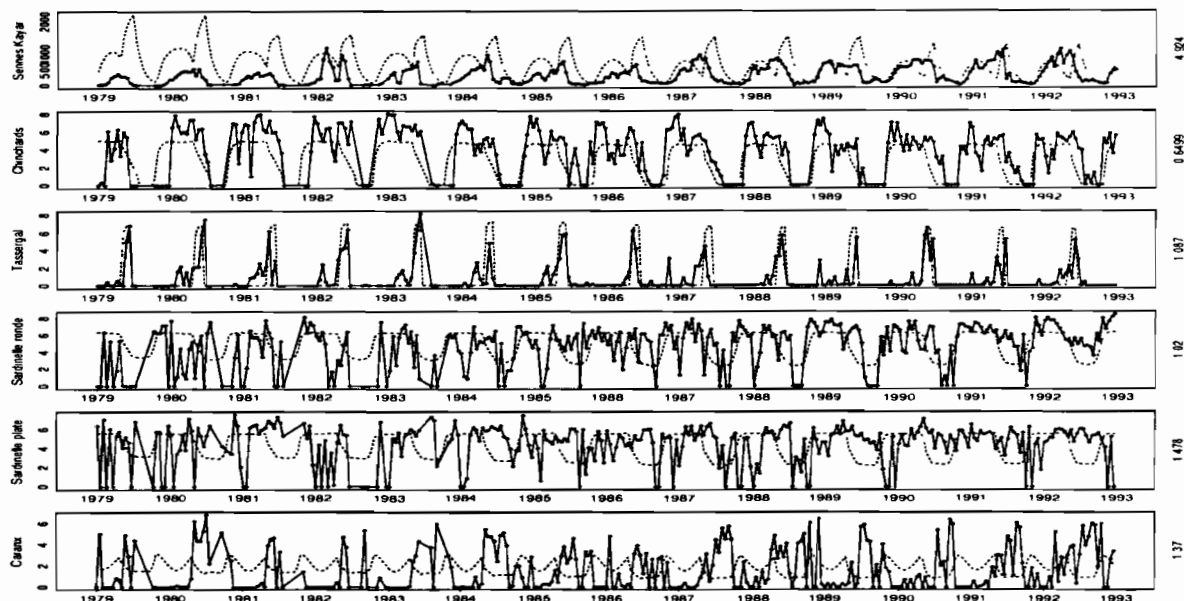


FIG. 5.8 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les sennes tournantes à Kayar: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas: efforts des sennes tournantes et captures par unité d'effort pour les stocks de chinchards, tassergal, sardinelles rondes et sardinelles plates.

seule tactique de pêche au filet dormant. Ainsi, alors que les captures de soles ont lieu plutôt en fin de saison froide, les maximums de captures par unité d'effort concernant les stocks de poissons filet dormant et de requins-raies sont réalisés durant la saison froide. Ces deux faits rendent alors difficilement compatibles la saisonnalité des efforts observée au moins de 1977 à 1984.

Les filets dormants à Kayar (figure 5.10)

Nous avons rendu compte du démarrage de la pratique du filet dormant par les Saint-Louisiens à partir de 1985 en interdisant avant cette date l'accès à cette tactique. Après 1985, nous rendons relativement bien compte des saisonnalités des captures par unité d'effort relatives au stock de soles. Par contre, ceci est moins net pour les séries des stocks poissons filet dormant et requins-raies où il est vrai que la saisonnalité est moins évidente. Notons enfin (et cela vaut également pour les filets dormants à Saint-Louis) la forte augmentation des efforts des filets dormants à compter de 1990. Nous avons ici essayé de

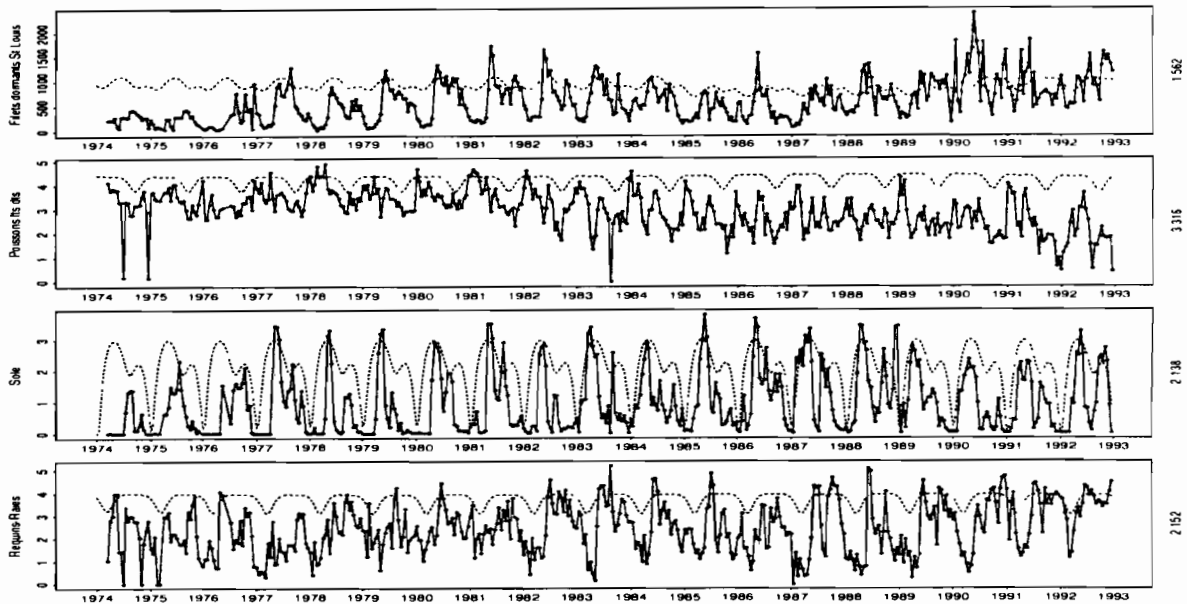


FIG. 5.9 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les filets dormants à Saint-Louis: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas: efforts des filets dormants et captures par unité d'effort pour les stocks de poissons filet dormant, sole et requins-raies.

rendre compte de ce phénomène en le reliant à l'augmentation des prix des requins-raies suite au développement d'une demande en ailerons de requins ou de raies par certains pays d'Asie (A. Samba, comm. pers.). Nous pourrions également relier cette augmentation avec l'interdiction faite aux pêcheurs sénégalais de pêcher dans les eaux mauritaniennes suite au conflit sénégal-mauritanien. Ces événements auraient peut-être favorisé un redéploiement de l'activité des lignes glacières sur les filets dormants (A. Samba, comm. pers.).

En comparant *de visu* données observées aux données ajustées, nous avons repéré plusieurs "insuffisances" dans les courbes représentées. Pour certains cas, nous avons une idée de la nature de ces "insuffisances". Dans tous les cas, les remarques faites s'appuient sur notre "compréhension" du fonctionnement du modèle que l'on essaie de relier à notre connaissance de la pêche artisanale. Elles demandent à être confirmées d'une manière plus affirmée. C'est ce que nous essayerons de faire en choisissant un cas parmi ceux repérés, en sélectionnant certains paramètres et séries associées et en "réalisant" l'ajustement correspondant.

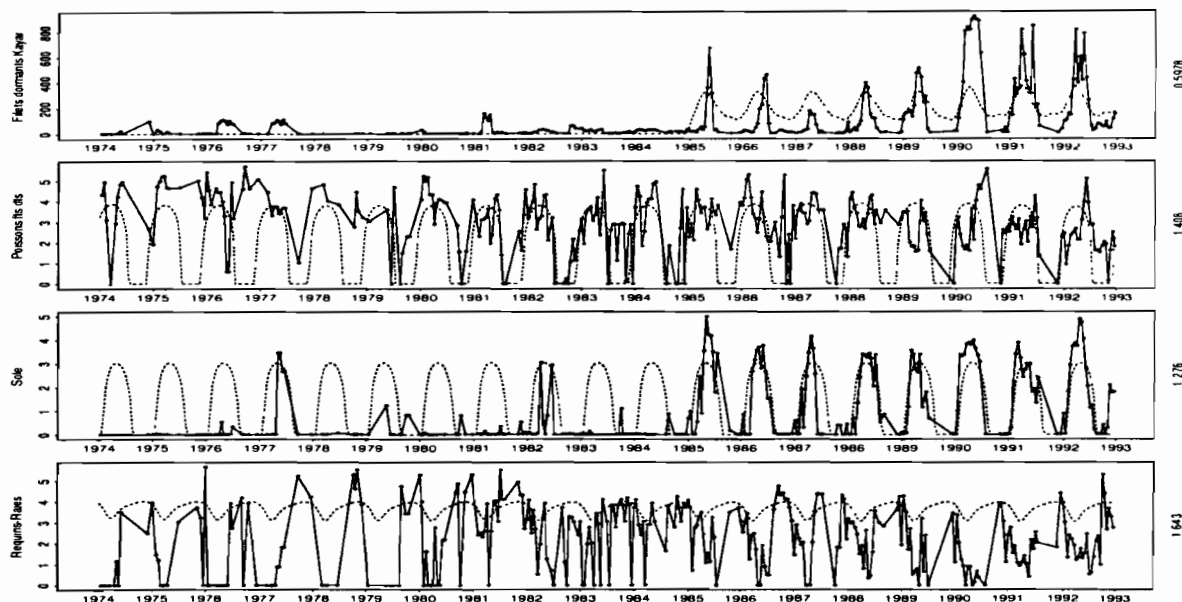


FIG. 5.10 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les filets dormants à Kayar : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas : efforts des filets dormants et captures par unité d'effort pour les stocks de poissons filet dormant, sole et requins-raies.

Pour l'étape considérée, nous avons choisi de nous intéresser à la série des efforts lignes glacières pour lesquelles il faudrait que le modèle arrive à rendre compte de la nette augmentation des sorties à partir de 1986. Pour cela, nous avons choisi de considérer le coût de mise en œuvre de la tactique glacière et le coût de mise en œuvre de la tactique *activité en dehors de la grande côte*. On sait (Chaboud 1990, [20]) qu'à partir de 1989 il y a une augmentation du prix des espèces nobles dont fait partie le tiof. Nous avons également considéré le paramètre relatif au changement de prix sur le stock de tiof introduit dans le modèle cette année là. D'autre part, on sait qu'à partir de 1987 (Samba et Fontana 1989, [127]) l'utilisation de la palangre a été adoptée par les unités de pirogues glacières. Nous avons donc introduit à partir de 1986 (bien que cela précède d'une année l'introduction de la palangre) un changement concernant la capturabilité des pirogues glacières envers le tiof. Nous avons également ajusté sur ce paramètre. Les termes de pondération valent 1 pour la série des efforts lignes glacières et 0 pour toutes les autres séries.

Le critère passe alors de 0.86 à 0.68 pour la série considérée (figure 5.11). Cependant le critère général relatif à la somme des écarts des 43 séries remonte alors de 59.17 à 60.15.

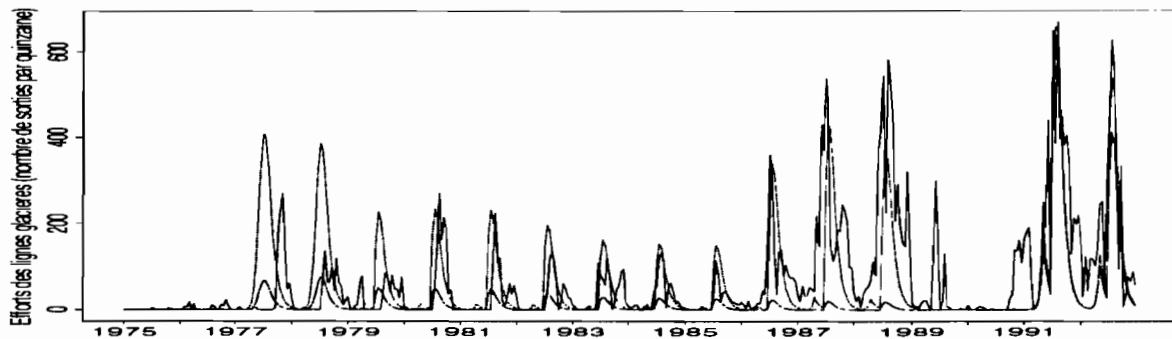


FIG. 5.11 - Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Ajustement du paramètre relatif à l'augmentation de la capturabilité du tiof pour la tactique ligne glacière à partir de 1986. Représentation de la série des efforts des lignes glacières (traits pleins) et des reconstitutions par le modèle LS avant (traits pointillés) et après (pointillés) l'ajustement.

Pourtant, si l'on modifie les termes de pondération, par exemple en donnant un même poids à chacune des séries, nous observons une "détérioration" de la série des glacières (en fonction de laquelle nous avons *a priori* choisi les valeurs des paramètres), même si le critère global s'en trouve amélioré.

A l'expérience, nous nous sommes aperçus qu'il était illusoire de vouloir ajuster tous les paramètres sur toutes les séries. Principalement à cause de la longueur du temps de calcul, des difficultés d'interprétation des résultats, et de problèmes algorithmiques qui surgissent alors (plus on considère de paramètres, plus la matrice du gradient qui leur est associée a de chances de ne pas être de plein rang).

Nous avons donc choisi de réduire le nombre de nos paramètres à ajuster afin d'obtenir des estimateurs "consistants". Mais alors, si l'on considérait toutes les séries dans l'expression de la fonction critère, cette dernière ne progressait pas. Ceci doit pouvoir s'expliquer par la forme de la fonction critère (plus le nombre de séries est élevé, plus la fonction critère doit être "plane").

Finalement, la réduction du nombre de paramètres sur lesquels on ajuste, et du nombre de variables sur lesquelles on fait porter l'ajustement, nous permet de nous retrouver dans des conditions d'application d'un modèle de régression non linéaire plus raisonnables.

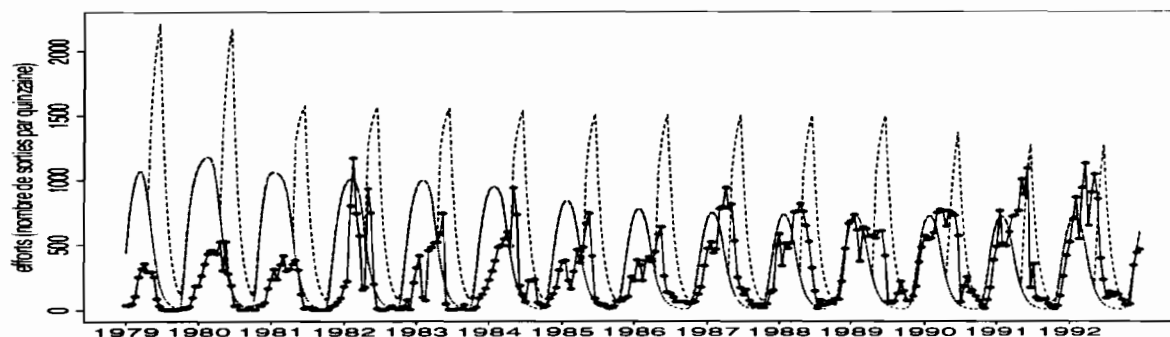


FIG. 5.12 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Re-présentation de la série des efforts des sennes tournantes à Kayar (trait plein) et de ses reconstitutions à l'aide du modèle LS avant et après la suppression de la tactique senne tassergal à Kayar (resp. en traits pointillés et en pointillés).

Après avoir poursuivi nos ajustements, nous arrivons à une valeur de critère égale à 52. Les sennes tournantes ont alors accès à deux tactiques dans chacun des deux ports de Kayar et Saint-Louis: une tactique *senne tournante petits pélagiques* qui vise principalement les sardinelles rondes durant la saison froide et le caranx durant la saison chaude, et une tactique *senne tassergal*. Nous décidons alors de supprimer la tactique *senne tassergal* à Saint-Louis. Le critère, sans effectuer d'ajustement, passe alors de 52 à 48.2 (figure 5.12). Nous décidons alors de conserver cette modification de la structure du modèle, que nous compléterons en supprimant également la tactique *senne tournante* à Kayar.

Nous avons ainsi poursuivi nos ajustements jusqu'au modèle retenu que nous présentons maintenant.

5.4 Description de l'ajustement retenu

Nous présentons maintenant l'ajustement du modèle que nous avons retenu. Rappelons que nous ne disposons pas là "du" modèle, mais d'un modèle parmi d'autres. La "solution" proposée ici ne doit être considérée que comme une représentation possible de l'activité des débarquements à Saint-Louis et à Kayar de 1974 à 1991. De plus, nous ne disposons pas de critère d'"arrêt" du processus d'ajustement mis en œuvre. Remarquons que déjà dans le cas d'un modèle non linéaire "classique" Antonadis *et al.* (1992, [3]) soulignent que les

critères d'arrêt utilisés sont empiriques et ne sont pas des critères de convergence. Les tableaux 5.8 et 5.9 ainsi que les figures 5.13 à 5.19 présentent respectivement le dernier modèle retenu ainsi que les ajustements qui lui correspondent. La valeur du critère vaut alors 30.98.

TAB. 5.8 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal : définition des tactiques pour modèle retenu.

tactique \ stocks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
a ligne tassergal a Saint-Louis	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0	0	0
b ligne tiof a SaintLouis	•	•	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c ligne dorade côtiere a Saint-Louis	•	•	0	•	0	•	0	0	0	0	0	0	0
d ligne poulpe a Saint-louis	0	0	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0
e ligne tassergal a Kayar	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0	0	0
f ligne dorades profondes a Kayar	0	0	•	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
g ligne voilier à Kayar	0	0	0	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0
h ligne tiof a Kayar	•	•	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i ligne dorades côtières à Kayar	0	•	0	•	0	•	0	0	0	0	0	0	0
j ligne poulpe a Kayar	0	0	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0
k ligne glaciere à Saint-Louis	•	•	0	•	•	•	0	0	0	0	0	0	0
m senne petits pélagiques a Saint-Louis	0	0	0	•	•	0	0	0	•	•	•	0	0
o senne petits pélagiques a Kayar	0	0	0	•	•	0	0	0	•	•	•	0	0
p filets dormants a Saint-Louis soles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	•	0
q filet dormants à Saint-Louis	0	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0	•
r filets dormants à Kayar soles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	•	0
s filets dormants à Kayar	0	0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0	•
t industriels	•	•	•	•	•	•	•	0	•	•	•	•	•
u activité H.G.C. pour la stratégie filets dormants	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v activité H G C pour la stratégie lignes Kayar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
w activité H G C pour la stratégie lignes Saint-Louis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x activité H G C pour la stratégie glacière/sennes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y activité H G C pour la stratégie sennes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. 5.9 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal : définition des stratégies pour modèle retenu. (L. gl. = lignes glacières, Fts dts = filets dormants, Ind.=industriels, H.G.C=hors grande côte, St-L.=Saint-Louis, K.=Kayar)

Stgies	Lignes										L gl	Sennes				Fts dts				Ind	H G C									
	St-L				K						St-L	St-L		K		St L		K			t	u	v	w	x	y				
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s											
Fts dts					•	•	•	•	•	•						•	•	•	•							•				
L K					•	•	•	•	•	•																				
L St-L	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•																				
Gl /Snes											•																			
Snes												•																		
Inds																														

Si le modèle final contient autant de stratégies que le modèle initial, ce n'est pas le cas pour le nombre de tactiques. Nous avons en effet découpé la tactique *activité autre que la pêche sur la grande côte* pour chacune des stratégies de pêche. Le rôle de cette tactique est de définir un coût d'opportunité en deçà duquel les unités de pêche ont plus intérêt à effectuer une autre activité que la pêche. La définition de ce coût d'opportunité nous sert en particulier à rendre compte des migrations des unités de pêche. Mais les revenus ne sont pas forcément du même ordre d'une stratégie à l'autre, il n'y a donc pas de raison qu'il

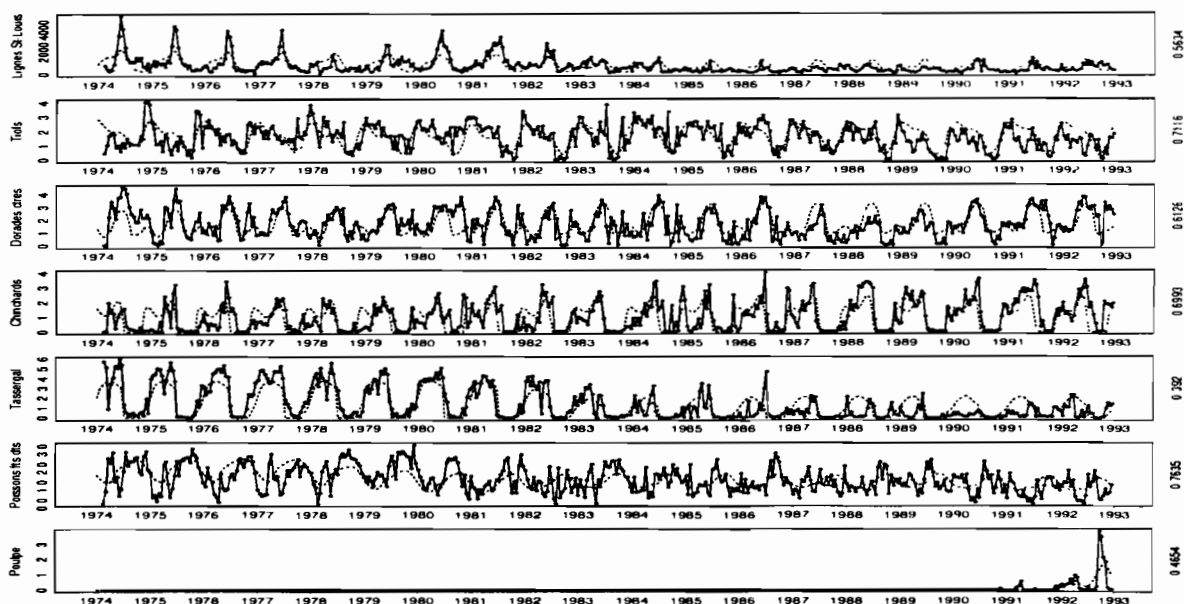


FIG. 5.13 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes à Saint-Louis : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas : efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, chinchards, tassergal, poissons filets dormants et poulpe.

n'en soit pas de même pour les coûts d'opportunité.

Nous avons déjà évoqué la suppression des tactiques *sennes tournantes tassergal* à Saint-Louis et à Kayar. Concernant les filets dormants, nous avons découpé la tactique unique en une tactique *filet dormant sole* et une tactique *filet dormant poisson filet dormant*. En effet, il existe plusieurs types de filets dormants. Le filet dormant utilisé pour pêcher les soles a des mailles plus fines qui seraient abîmées s'il était utilisé pour pêcher d'autres espèces que les soles (A. Samba, comm. pers.). Enfin, nous avons élargi l'emploi de la tactique *filet dormant à sole* à la stratégie lignes Saint-Louis. En effet, l'utilisation combinée ou simultanée de ces deux engins de pêche existe et il fallait bien en tenir compte.

Nous avons également introduit dans le modèle un ensemble de changements concernant plusieurs aspects de la pêcherie et établis à partir du tableau 5.1. Nous distinguons ici :

1. Des modifications correspondant à une rupture de certaines composantes de la pêcherie, par exemple une modification de prix.

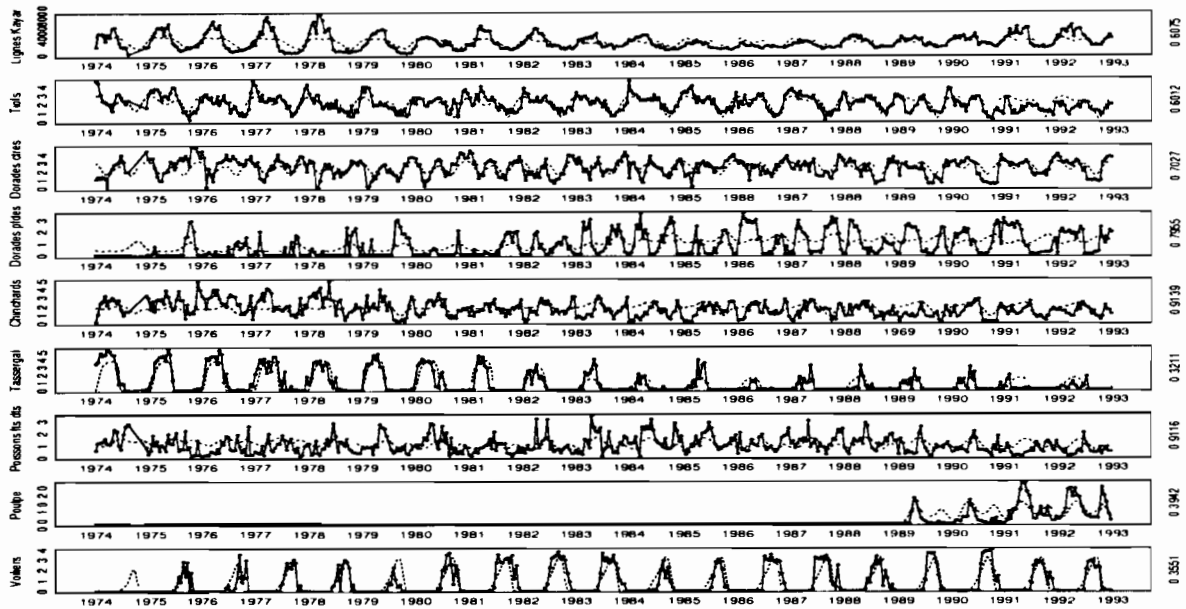


FIG. 5.14 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes à Kayar : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas : efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, dorades profondes, chinchards, tassergal, poissons filets dormants, poulpe et voiliers.

2. Des modifications qui se sont produites de manière moins brusque (par exemple l'apparition des sennes tournantes a eu lieu de façon graduelle à partir de la fin des années 1970).

Notons de manière schématique $y_t = f(x_t, y_t, \theta_1, \Theta \setminus \theta_1)$ le modèle LS où θ_1 représente le paramètre, ou l'ensemble des paramètres, à l'aide desquels nous allons traduire le changement qui est intervenu et $\Theta \setminus \theta_1$ l'ensemble des autres paramètres.

1. Nous posons alors :

$$\begin{cases} y_t = f(x_t, y_t, \theta_1^a, \Theta \setminus \theta_1) & \text{si } t \leq t^* \\ y_t = f(x_t, y_t, \theta_1^b, \Theta \setminus \theta_1) & \text{si } t > t^* \end{cases}$$

Ici t^* représente la date de la rupture. Lorsque cette date est inconnue, ce terme est un paramètre que l'on peut estimer si t^* est à valeurs réelles (Tomassone *et al.* 1992,

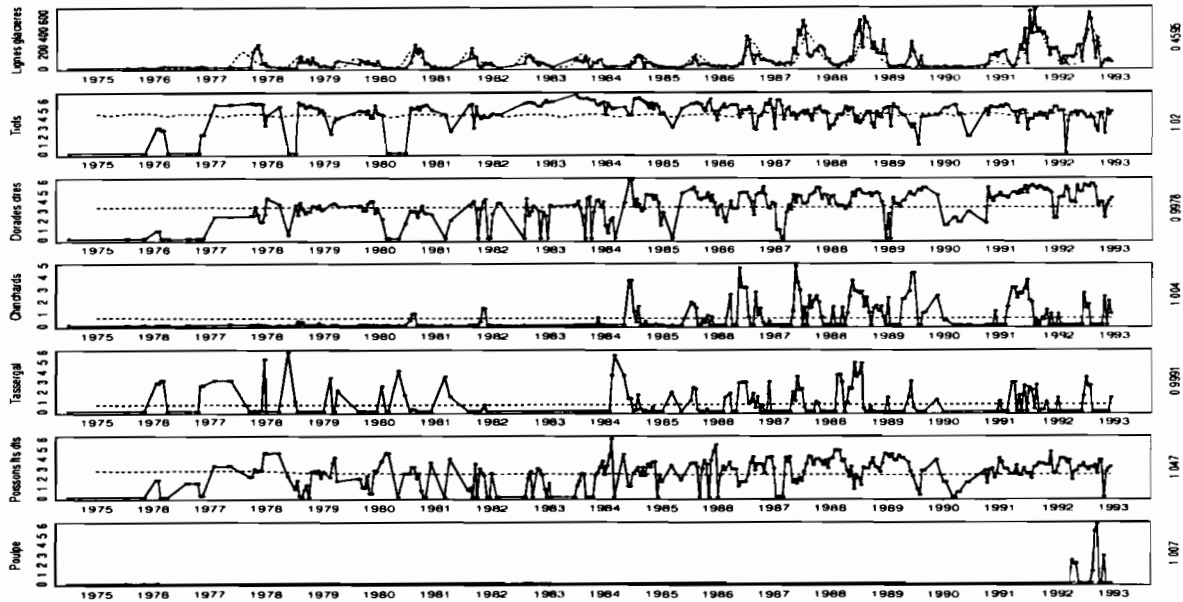


FIG. 5.15 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes glacières : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas : efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, chinchards, tassergal, poissons filets dormants, et poulpe.

[142], p. 120-123) Dans notre cas, t^* prend des valeurs discrètes. Nous ne pouvons donc pas ajuster la date de rupture comme les autres paramètres du modèle.

2. Nous posons $y_t = f(x_t, y_t, g_t(\theta_1), \Theta \setminus \theta_1)$, ie nous paramétrons le changement à l'aide d'une fonction g_t que nous fixerons arbitrairement dans notre cas.

Nous avons ainsi choisi de décrire l'adoption progressive par certains pêcheurs artisans sénégalais de la senne tournante en écrivant l'effectif de chacune des stratégies (donc des stratégies senne et glacière-senne) comme une fonction logistique dépendant du temps :

$$N(t) = N_0 + (N_\infty - N_0) \frac{1}{1 + e^{4t^*p^*/(1-t/t^*)}}$$

où N_0 est l'effectif de la stratégie en $t = 0$, N_∞ l'effectif de la stratégie lorsque t tend vers l'infini, t^* le temps où la dérivée seconde de $N(t)$ s'annule et p^* la valeur de la pente en t^* . Si $N_\infty = N_0$, l'effectif est constant. Cette formulation est inspirée de celle donnée par Gaertner et Laloë (1986, [54]) pour décrire la croissance d'une espèce de crabe. Dans ce cas, l'effectif de la stratégie n'est plus décrit à l'aide d'un paramètre, mais de quatre

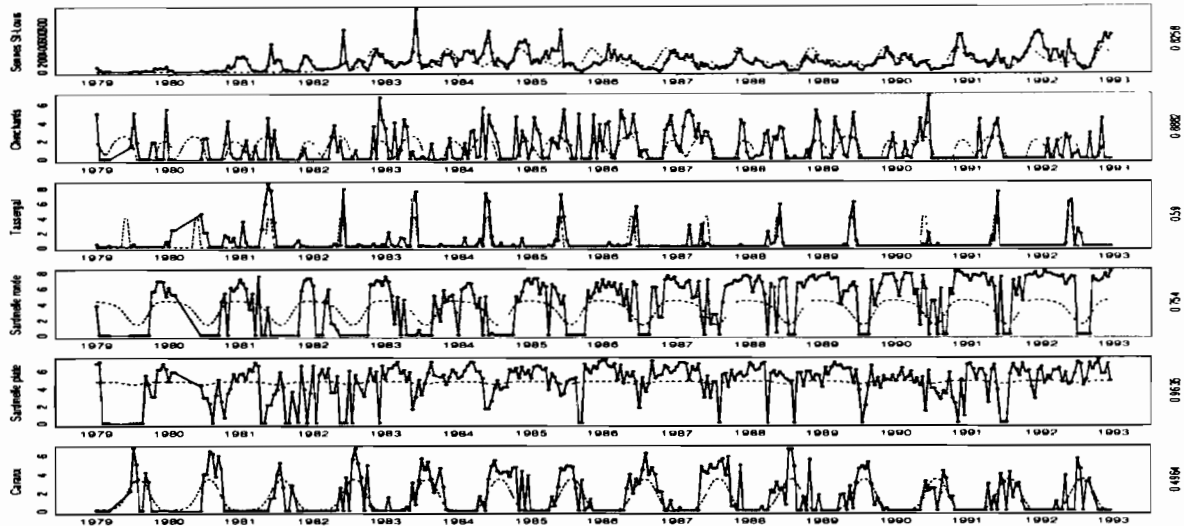


FIG. 5.16 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les sennes tournantes à Saint-Louis : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas : efforts des sennes tournantes et captures par unité d'effort pour les stocks de chinchards, tassergal, sardinelle ronde, sardinelle plate et caranx.

(N_0, N_∞, t^*, p^*). La fonction choisie est restrictive, mais elle nous a semblé suffisante pour décrire l'évolution de l'effectif des stratégies sennes de 1974 à 1992. Bien sûr, il faudrait considérer une autre fonction comprenant plus de paramètres si l'effectif de la stratégie venait à chuter.

Nous avons également été amenés à considérer le cas des navires industriels dont l'exploitation a subi des évolutions (Deme et Levenez, 1991 [33]; Bakhayokho et Kebe, 1991b [7]; Fréon, 1993 [53]; Thiam et Gascuel, 1993 [141]) dont nous ne pouvons rendre compte en jouant seulement sur l'effectif de la stratégie puisque les captures lui sont alors proportionnelles. Nous avons alors choisi de décrire la capturabilité q_k de la tactique industrielle envers le $k^{\text{ième}}$ stock ainsi :

$$q_k(t) = q_{k_0} + (q_{k_\infty} - q_{k_0}) \frac{1}{1 + e^{4t^*p^* - 4p^*t + b_k t^2 + c_k t^3}}.$$

La capturabilité est ainsi exprimée sous la forme d'une transformation logistique d'un polynôme de degré 3, les coefficients de ce polynôme étant respectivement $4t^*$, $a_k = -4t^*p^*$, b_k et c_k .

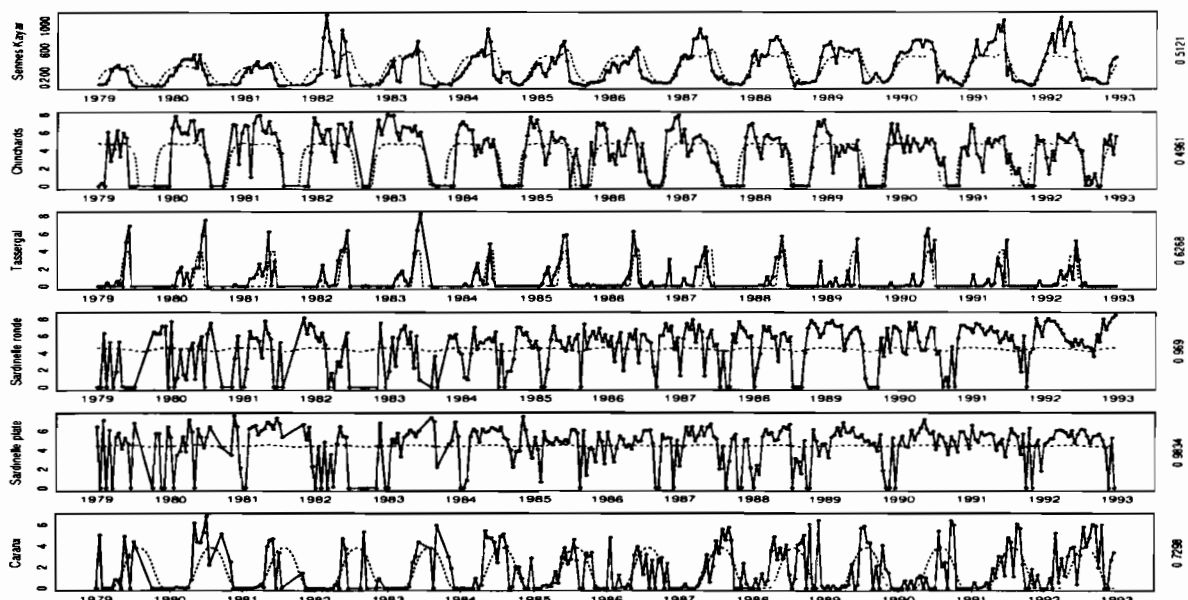


FIG. 5.17 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les sennes tournantes à Kayar : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas : efforts des sennes tournantes et captures par unité d'effort pour les stocks de chinchards, tassergal, sardinelle ronde, sardinelle plate et caranx.

Nous savons que les migrations hors de la zone d'étude (par exemple celles des sennes tournantes sur la petite côte durant la saison froide) correspondent à l'emploi de tactiques qui sont, à ces moments là, plus attractives sur la petite côte que sur la grande côte. Le revenu espéré, que nous calculons sur la grande côte, est bien entendu variable au cours de la saison (dépendant des captures qui ne sont pas constantes). Ces revenus sont à comparer au coût d'opportunité de la tactique *hors grande côte*. Ce qui importe est donc le contraste entre les revenus des tactiques de pêche et ceux de la tactique *hors grande côte*. Ce contraste peut être accentué si l'on considère pour la tactique *hors grande côte* un coût d'opportunité variable au cours de l'année. Nous avons ainsi décrit le coût d'opportunité sous la forme d'une combinaison linéaire d'harmoniques de périodes 24 et 12 :

$$C(t) = a + b \sin(\pi \Delta_t t) + c \cos(\pi \Delta_t t) + d \sin(2\pi \Delta_t t) + e \cos(2\pi \Delta_t t), \quad \text{avec } \Delta_t = \frac{1}{24}.$$

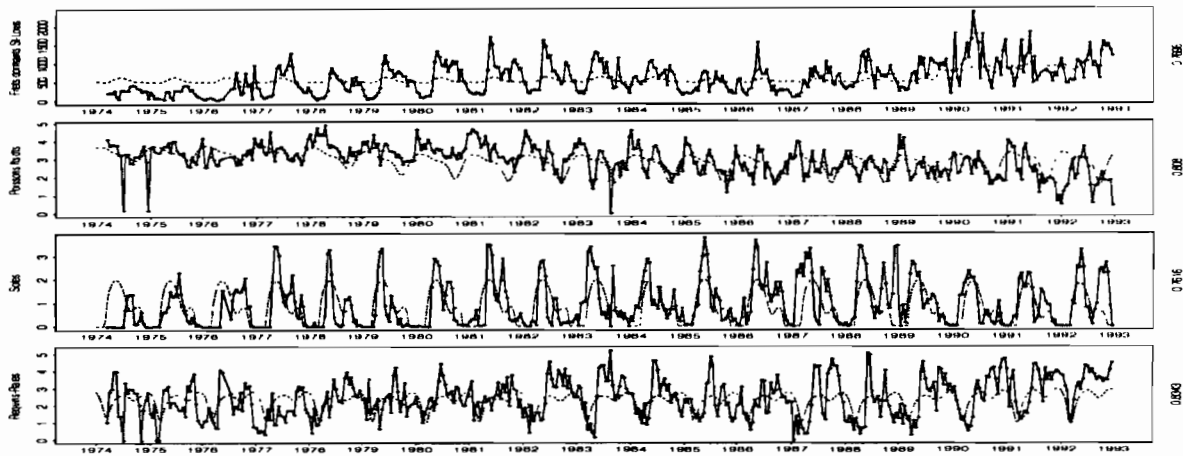


FIG. 5.18 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les filets dormants à Saint-Louis: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas: efforts des filets dormants à Saint-Louis et captures par unité d'effort pour les stocks de poissons filets dormants, sole et requins-raies.

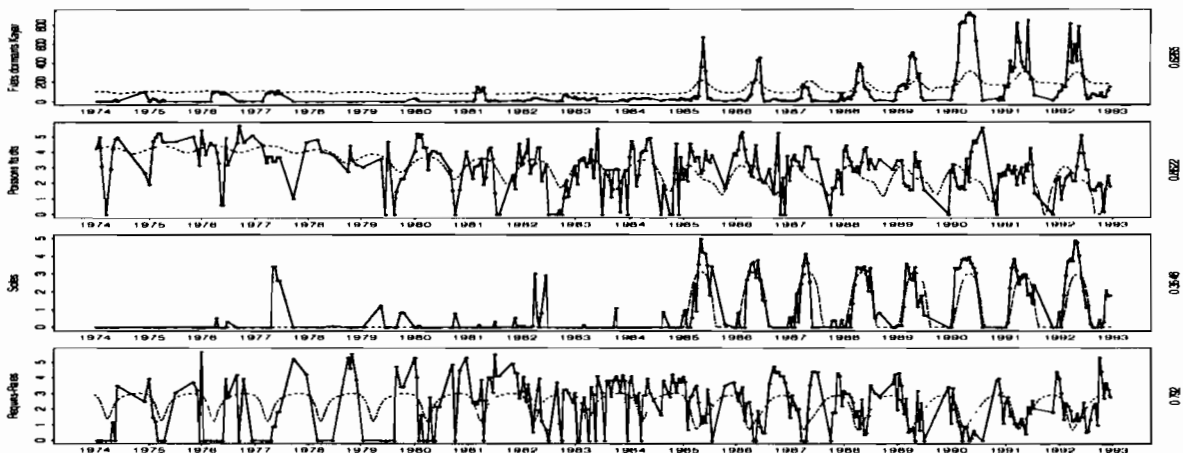


FIG. 5.19 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les filets dormants à Kayar: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas: efforts des filets dormants à Kayar et captures par unité d'effort pour les stocks de poissons filets dormants, sole et requins-raies.

5.5 Discussion

Ajuster le modèle LS aux données collectées de l'activité et des débarquements dans deux ports de la grande côte du Sénégal peut apparaître comme une suite d'ajustements s'apparentant plus à du "tuning parameters" qu'à une procédure rigoureuse. Nous essayerons dans le chapitre suivant de juger de la validité statistique des résultats obtenus, et critiquerons l'approche "statistique" que nous avons eu du problème dans la conclusion générale.

Malgré tous ses défauts, la mise en œuvre de la procédure a cependant le mérite de nous amener à formuler des questions relatives au fonctionnement de l'exploitation étudiée. C'est par exemple le cas lorsque, considérant la série des captures par unité d'effort des dorades profondes, nous avons noté une modification de la nature de la saisonnalité de cette série. Sa périodicité, qui était annuelle avant 1983, devient bis-annuelle après cette date. La question se pose alors du lien qui peut être fait entre les captures et l'accessibilité du stock aux unités de pêche. Nous avons posé la question relative aux migrations effectuées par ce stock au biologiste (A. Samba) qui a émis l'hypothèse suivante : l'espèce serait présente toute l'année à Kayar effectuant des déplacements verticaux. Nous avons ensuite relié cette hypothèse aux événements "économiques" qui se sont produits au début des années 80 (augmentation du prix des dorades profondes (Chaboud 1990, [20])). Bien entendu nous avons posé une question et nous y avons apporté non pas une réponse, mais une hypothèse. Cette dernière peut-être vraie ou fause. Une manière de juger de sa cohérence avec celles par ailleurs introduites est de regarder son impact sur les ajustements obtenus. En l'occurrence, en supposant une inaccessibilité constante du stock de dorades profondes, nous notons (figure 5.14) que avant 1983 les captures par unité d'effort restituées par le modèle présentent bien une saisonnalité en saison chaude, et que cette saisonnalité est modifiée après l'introduction d'une augmentation de prix. Nous avons rendu compte de ce changement de manière qualitative, montrant ainsi que les captures par unité d'effort d'une espèce peuvent être la conséquence d'une interaction entre la ressource exploitée et les conditions de son exploitation.

L'ajustement que nous avons mené du modèle LS aux données observées nécessite un travail de synthèse des connaissances relatives à différents aspects de la pêcherie. Il nécessite également une collaboration étroite avec les personnes qui connaissent l'exploitation étudiée afin de formuler les hypothèses associées aux ajustements. Nous aurions pu mener les ajustements "dans notre coin" et obtenir des résultats correspondant à une valeur de critère voisine ou même inférieure à celle obtenue. Ces résultats auraient peut-être eu un intérêt "académique", mais n'auraient eu aucune signification réelle, ce qui aurait considérablement réduit leur portée. Nous ne prétendons pas que la synthèse que nous avons été

amenés à formuler soit correcte ou complète. Nous pouvons cependant espérer associer aux ajustements obtenus un ensemble cohérent d'hypothèses concernant l'exploitation étudiée.

Chapitre 6

Evaluation du modèle

“Modelling in science remains, partly at least, an art. Some principles exist, however, to guide the modeler. The first is that all models are wrongs: some, though, are better than others and we can search for the better ones. At the same time we must recognize that eternal truth is not within our grasp. The second principle (which applies also to artists!) is not to fall in love with one model, to the exclusion of alternatives. Data will often point with almost equal emphasis at several possible models and it is important that the analyst accept this. A third principle involves checking thoroughly the fit of the model to the data, for example by using residuals and other quantities derived from the fit to look for outlying observations, and so on. Such procedures are not yet fully formalized (and perhaps never will be), so that imagination is required of the analyst here as well as in the original choice of models to fit” (MacCullagh et Nelder 1983 [104]).

Une étape indispensable de la construction d'un modèle statistique consiste donc en l'étude de sa validité. Par “validité” nous n'entendons pas ici la mise en œuvre d'une procédure dont l'objet serait de rejeter ou d'accepter de façon catégorique le modèle défini. Le modèle considéré est fondé sur des hypothèses, il a été ajusté selon une “méthode” et il fournit un ensemble de variables à partir desquelles nous pouvons construire des variables analogues à celles observées. Nous allons ici essayer d'apprécier les qualités du modèle relativement à chacun de ces aspects.

6.1 Etude des résidus

Nous noterons désormais ε le vecteur des résidus associé à l'une des 43 séries modélisées. A ε , nous associons le résidu réduit ε_r , dont le $i^{\text{ième}}$ élément sera égal à :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{r,t_i} = \frac{\varepsilon_{t_i}}{\widehat{\sigma}_{j_e}(1+f_{e,t_i})} \quad \text{lorsque le résidu est associé à une série d'efforts.} \\ \varepsilon_{r,t_i} = \frac{\varepsilon_{t_i}}{\widehat{\sigma}_{\varepsilon_e,k}} \quad \text{lorsque le résidu est associé à une série de captures par unité d'effort.} \end{array} \right.$$

Si le modèle que nous avons choisi est correct, les quantités $(\varepsilon_{r,t_i})_{t_i \in T \subset \mathbf{N}}$ doivent “ressembler” à une suite de variables aléatoires indépendantes, de même loi centrée et de variance égale à 1. Il ne s’agit que d’une ressemblance car les résidus que nous considérons sont des estimations, dont les estimateurs associés ne vérifient (sous réserve que nos suppositions soient vérifiées) qu’asymptotiquement ces propriétés.

Les figures 6.1, 6.2 et 6.3 contiennent respectivement, et pour chacune des 43 séries, les graphiques résidus/prédits, les graphes $\varepsilon_{r,t_i}/\varepsilon_{r,t_{i-1}}$, et les histogrammes des résidus réduits. Considérons d’abord les graphiques des résidus réduits en fonction des valeurs prédites pour chacune des 43 séries modélisées (figure 6.1). Il est ici difficile de déterminer de manière rigoureuse si les résidus estimés sont indépendants des valeurs prédites par le modèle, et on ne peut certainement pas raisonnablement supposer cette indépendance. Nous allons plutôt nous attacher ici à décrire les principaux “types” de graphiques obtenus.

Une caractéristique du modèle tient au fait que les variables modélisées (efforts et captures par unité d’effort) sont à valeurs positives ou nulles, ce que l’on peut schématiquement représenter par $y = \hat{y} + \hat{\varepsilon} > 0$. En conséquence, tous les points tracés sont situés au dessus de la droite d’équation $\hat{\varepsilon} = y - \hat{y}$.

Nous laissons pour l’instant de côté les séries des efforts et considérons les 36 séries de captures par unité d’effort qui leur sont associées (figure 6.1). Parmi ces 36 graphiques résidus/prédits nous pouvons schématiquement distinguer trois groupes. Le premier groupe contient les séries dont les variances résiduelles estimées ne sont pas homogènes. Il s’agit pour les lignes de la série du tiof à Kayar, du tassergal à Saint-Louis et à Kayar; pour les filets dormants des poissons filet dormant et des requins raies à Saint-Louis. Il est à noter que le maximum de la variabilité résiduelle correspond aux niveaux de la variable prédite pour lesquels on a le plus de valeurs. Remarquons qu’il en serait ainsi même s’il y avait homogénéité de variance: plus on a de réalisations d’une même variable aléatoire, plus l’intervalle des réalisations a de chances d’être étendu. Mais ce cas correspond également à des séries dont on ne rend pas compte des variations extrêmes. C’est le cas de l’ensemble des séries de captures par unité d’effort associées aux lignes glacières parce qu’elles ont été modélisées par la moyenne. Il est alors important de savoir si les variations dont on ne rend pas compte peuvent être considérées comme les réalisations d’un bruit blanc ou pas (c’est

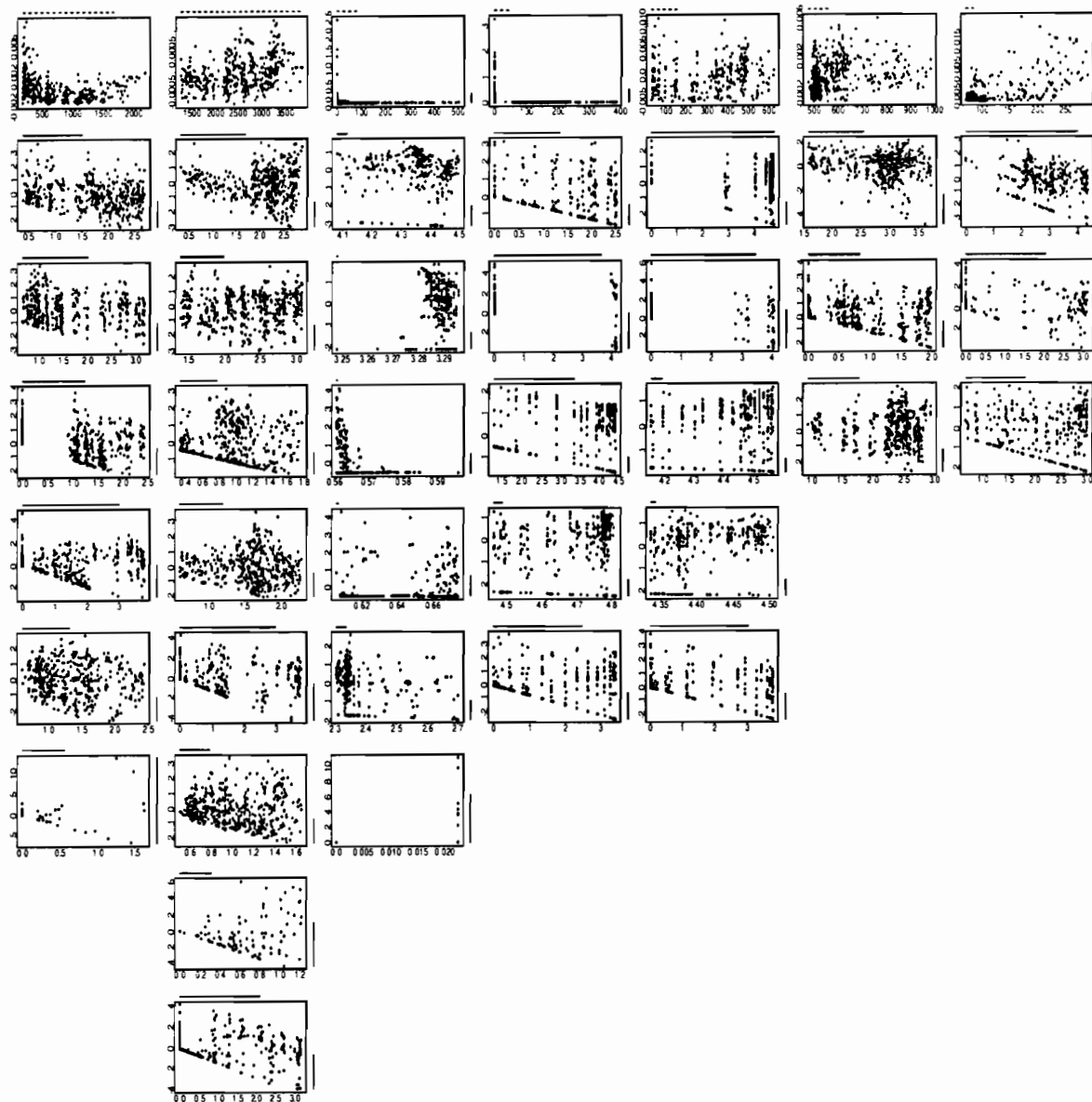


FIG. 6.1 – Tracé pour chacune des 43 séries des résidus réduits en fonction des valeurs prédites. Chaque colonne correspond à une combinaison lieu de débarquement \times engin, soit de gauche à droite les lignes à Saint-Louis, les lignes à Kayar, les lignes glacières, les sennes-tournantes à Saint-Louis, les sennes tournantes à Kayar, les filets dormants à Saint-Louis, les filets dormants à Kayar. La première ligne correspond à la série des efforts, les lignes suivantes aux séries des captures par unité d'effort associées. Le trait vertical à la droite de chaque graphique indique l'importance de l'intervalle de variation des résidus rapporté à l'intervalle maximum pour l'ensemble des séries. Le trait horizontal au dessus des graphiques relatifs aux efforts (resp. aux captures par unité d'effort) indique l'importance de l'intervalle de variation des valeurs prédites rapporté à l'intervalle maximum pour l'ensemble des séries des efforts en pointillés (resp. pour l'ensemble des séries des captures par unité d'effort en trait plein).

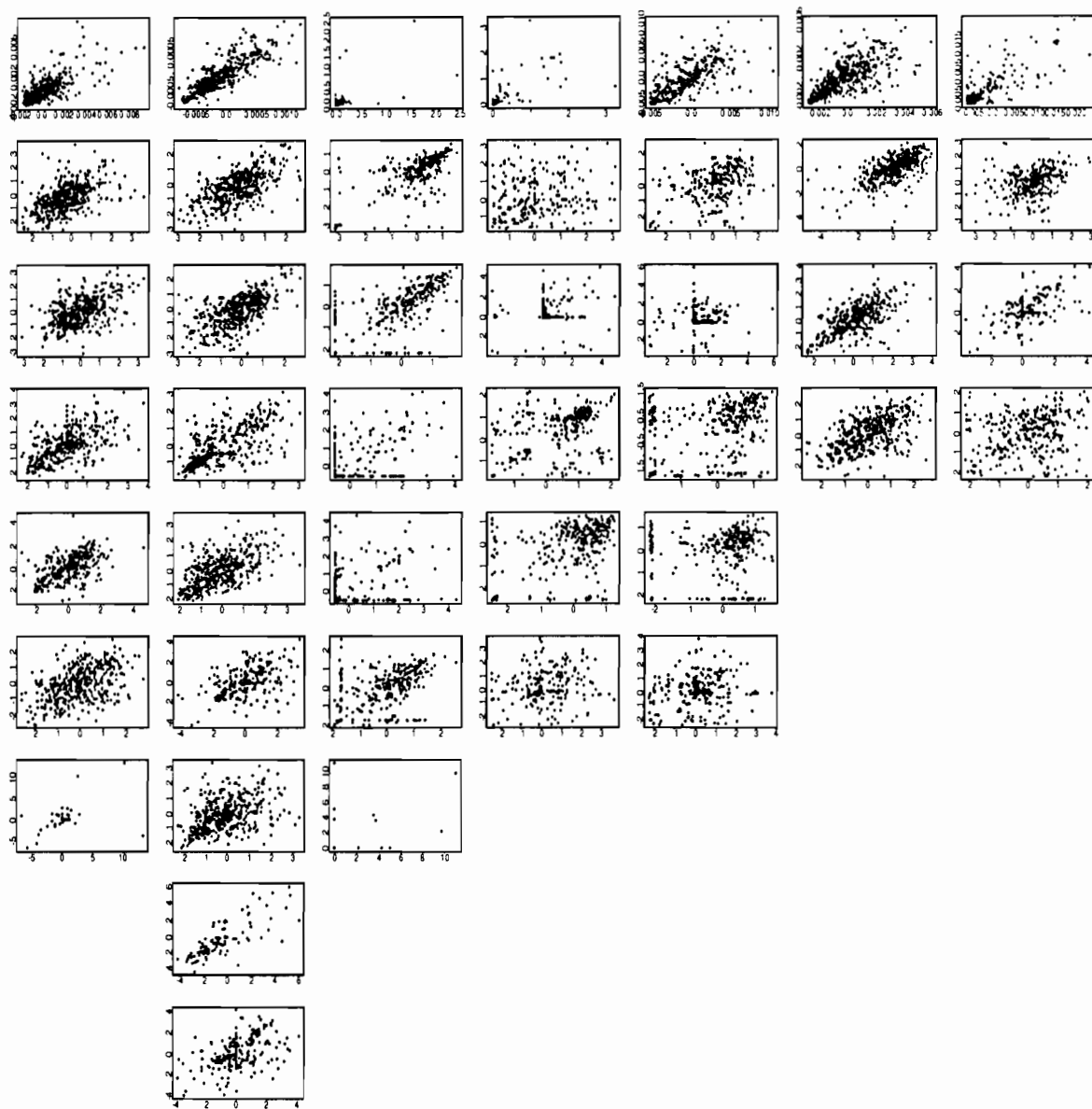


FIG. 6.2 – Tracé pour chacune des 43 séries des des résidus réduits en fonction du même résidu un pas de temps auparavant. Chaque colonne correspond à une combinaison lieu de débarquement \times engin, soit de gauche à droite les lignes à Saint-Louis, les lignes à Kayar, les lignes glacières, les sennes-tournantes à Saint-Louis, les sennes tournantes à Kayar, les filets dormants à Saint-Louis, les filets dormants à Kayar. La première ligne correspond à la série des efforts, les lignes suivantes aux séries des captures par unité d'effort associées.

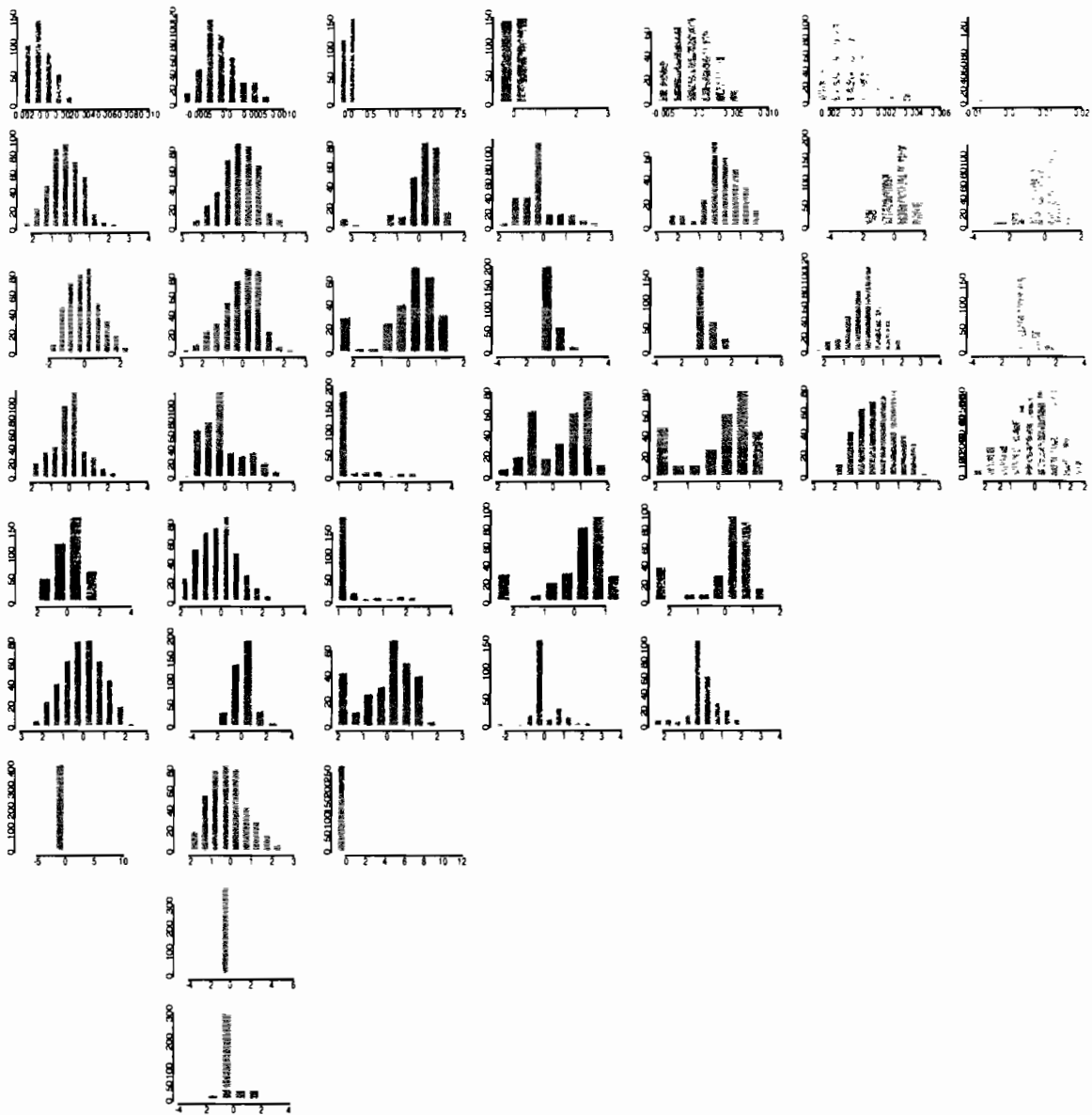


FIG. 6.3 – Tracé pour chacune des 43 séries des histogrammes des résidus réduits. Chaque colonne correspond à une combinaison lieu de débarquement \times engin, soit de gauche à droite les lignes à Saint-Louis, les lignes à Kayar, les lignes glacières, les sennes-tournantes à Saint-Louis, les sennes tournantes à Kayar, les filets dormants à Saint-Louis, les filets dormants à Kayar. La première ligne correspond à la série des efforts, les lignes suivantes aux séries des captures par unité d'effort associées.

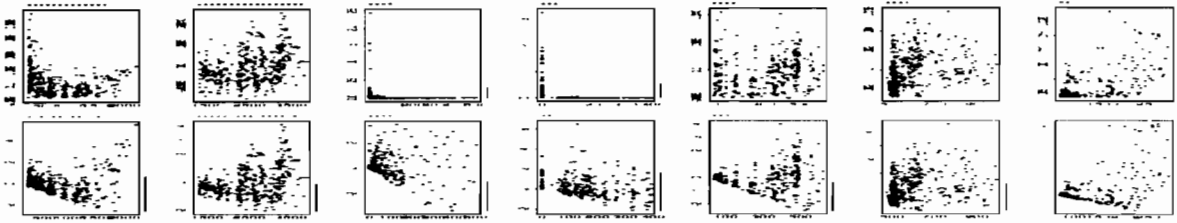


FIG. 6.4 – Tracé pour chacune des 7 séries d'efforts des résidus réduits en fonction des variables prédites par le modèle dans le cas où on émet l'hypothèse de non homogénéité des variances des résidus suivant le niveau pris par la variable prédictrice (cas 1, première ligne) et dans le cas où l'on fait l'hypothèse d'homogénéité (cas 2, seconde ligne). En colonne, et de gauche à droite les lignes à Saint-Louis, les lignes à Kayar, les lignes glacières, les sennes tournantes à Saint-Louis, les sennes tournantes à Kayar, les filets dormants à Saint-Louis, les filets dormants à Kayar.

l'objet des graphes 6.2).

Un deuxième groupe correspond à des séries qui sont estimées par des variables prenant un nombre restreint de valeurs (c'est le cas des séries du tassergal par les sennes à Saint-Louis et à Kayar), ou qui sont à valeurs dans $[a, b] \cup 0$, l'intervalle $[a, b]$ étant disjoint de 0 (c'est le cas de la série du tassergal à Kayar).

Le troisième groupe recouvre l'ensemble des autres séries, pour lesquelles on peut d'une façon assez générale noter une relation entre les valeurs résiduelles et les variables prédites : plus les variables prédites sont proches de zéro (resp. plus elles ont des valeurs supérieures à zéro), plus les résidus ont tendance à prendre des valeurs positives (resp. négatives). Cela met peut être en évidence une tendance du modèle à surestimer les faibles valeurs et à sous-estimer les grandes valeurs (voir par exemple la série des soles par les filets dormants à Saint-Louis) : la plage de variation "proposée" par le modèle a tendance à être plus restreinte que la plage de variation observée.

Nous avons supposé pour le modèle un schéma commun à tous les types de variables (cf équation 4.5) : pour chacune des séries de capture par unité d'effort, nous avons posé un modèle lognormal et pour chacune des séries d'effort nous avons posé une même relation entre la moyenne des efforts observés et leur variance.

En procédant ainsi, nous avons proposé un modèle finalement assez général à diffé-

rentes composantes de la pêche artisanale. Les caractéristiques communes ainsi supposées n'ont peut-être pas lieu d'être. Nous pouvons nous rendre compte de ce phénomène en considérant les séries des efforts. La figure 6.4 représente respectivement pour chacune des séries d'efforts modélisées les résidus réduits en fonction des valeurs prédites, lorsqu'on suppose que la variance des observations croît avec leur moyenne (cas 1), et lorsqu'on émet l'hypothèse d'homogénéité des variances (cas 2)

$$\begin{cases} \tilde{f}_{e,t_i} = f_{e,t_i}(1 + \varepsilon_{t_i}) + \varepsilon_{t_i}, & \varepsilon_{t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \text{ cas 1,} \\ \tilde{f}_{e,t_i} = f_{e,t_i} + \varepsilon_{t_i}, & \varepsilon_{t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \text{ cas 2.} \end{cases}$$

Les résidus réduits valent alors $\varepsilon_{t_i}^r = \frac{\tilde{f}_{e,t_i} - \hat{f}_{e,t_i}}{(1 + \hat{f}_{e,t_i})\hat{\sigma}}$ dans le cas 1 (celui que nous avons initialement adopté) et par $\varepsilon_{t_i}^r = \frac{\tilde{f}_{e,t_i} - \hat{f}_{e,t_i}}{\hat{\sigma}}$ dans le cas 2, avec $\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{f}_{e,t_i} - \hat{f}_{e,t_i})^2}{n-1}$.

Nous pouvons constater (figure 6.4) que pour une combinaison engin \times lieu de débarquement donnée, le graphique le plus cohérent avec les hypothèses ne correspond pas toujours au même cas. Ainsi, la modélisation de l'effort dans le cas 1 semble la plus adaptée pour les séries des efforts lignes à Kayar, sennes tournantes à Kayar et filets dormants à Kayar, alors que le cas 2 semble préférable pour les séries lignes glacières et sennes à Saint-Louis.

Pour finir, les figures 6.2 qui représentent les résidus au temps t_i en fonction des résidus au temps t_{i-1} nous montrent qu'il existe généralement une autocorrélation de rang 1. Ainsi, si le modèle caractérise une certaine partie de la structure de nos données, tout n'est pas expliqué par le modèle. Les histogrammes des résidus (figures 6.3) sont donnés ici à titre indicatif.

6.2 Comparaison des données observées aux données ajustées

Puisque toute la structure contenue dans nos données n'est pas restituée par le modèle, pourquoi ne pas chercher à caractériser la partie qui a pu être modélisée? Pour cela, nous pouvons faire une analyse descriptive des données observées et comparer la synthèse obtenue avec celle correspondant aux données restituées par le modèle. Notons $(Y_i)_{i=1,\dots,7}$ les 7 tableaux de données que nous avons considérés depuis le chapitre 5. Chacun de ces tableaux est associé à une combinaison engin \times lieu de débarquement soit respectivement lignes \times Saint-Louis, lignes \times Kayar, lignes glacières \times Saint-Louis, sennes-tournantes \times Saint-Louis, sennes-tournantes \times Kayar, filet dormant \times Saint-Louis, et filet dormant \times

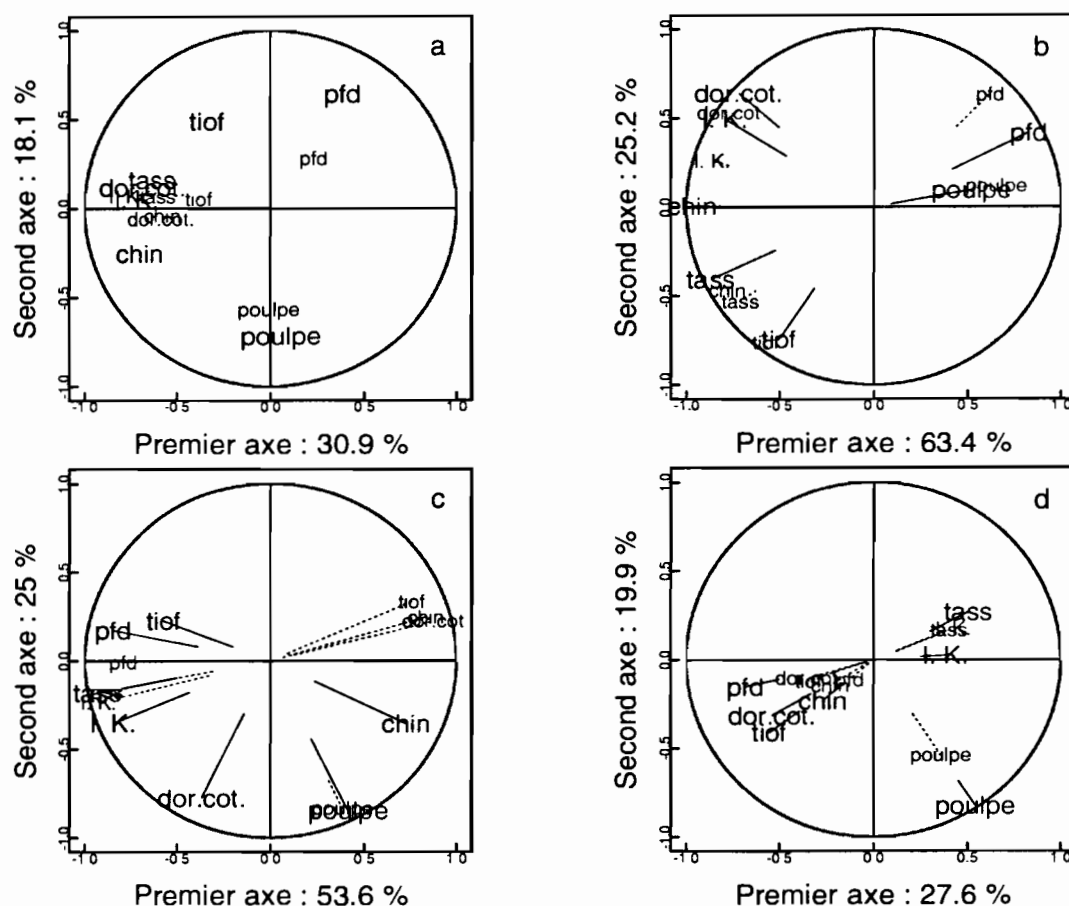


FIG. 6.5 – Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison lignes × Saint-Louis soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année × Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires.

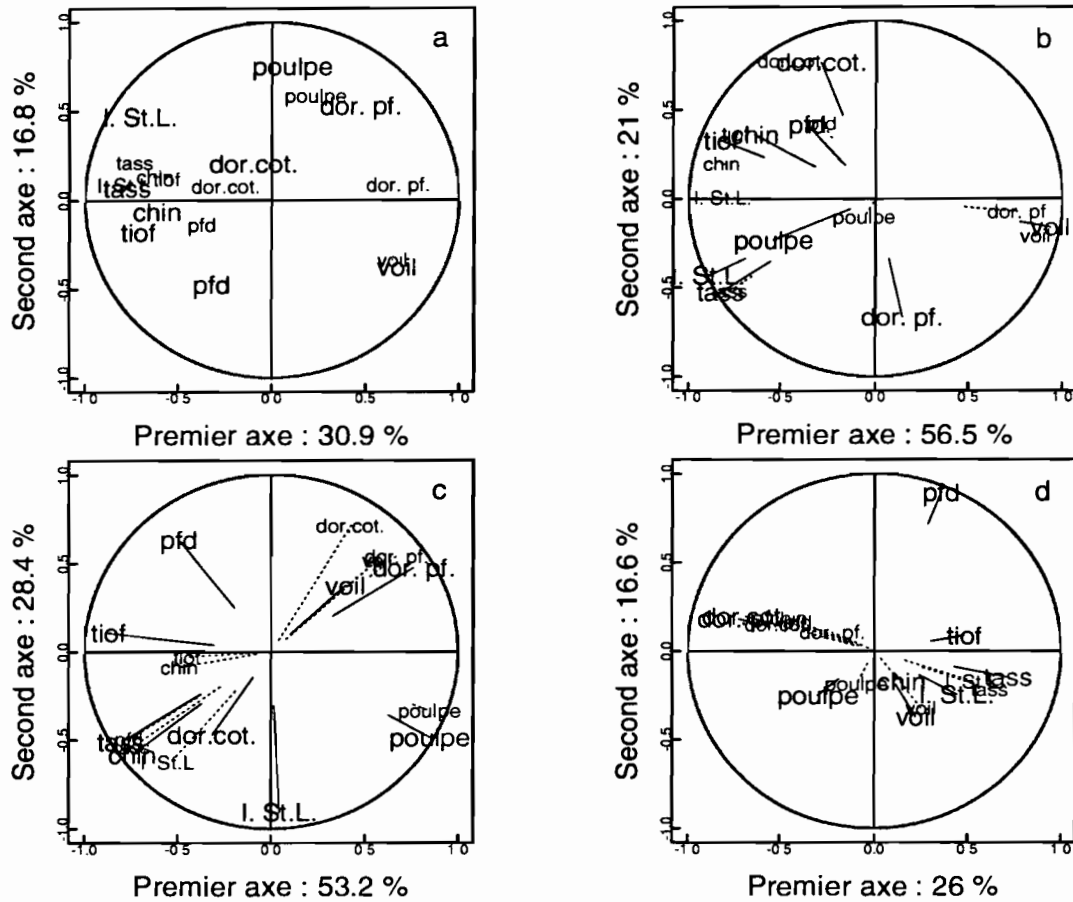


FIG. 6.6 – Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison lignes × Kayar soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année×Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires.

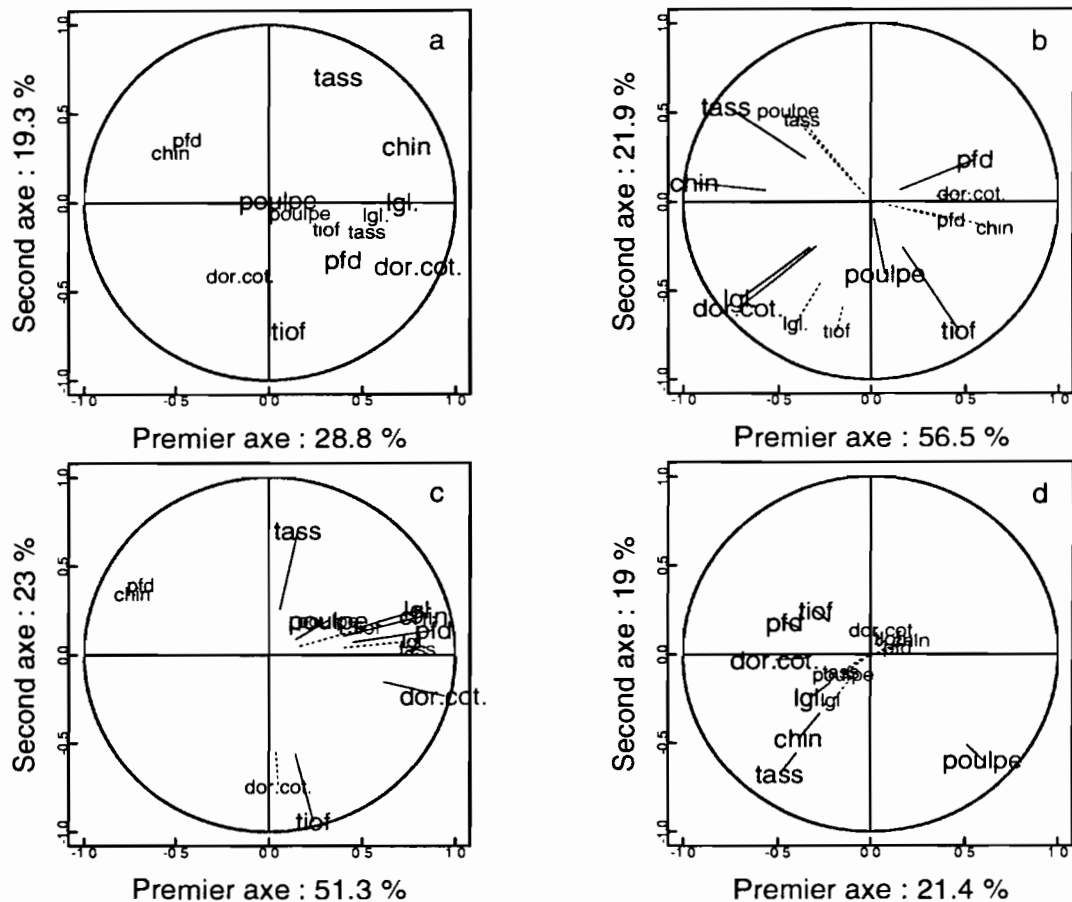


FIG. 6.7 – Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison lignes glacières \times Saint-Louis soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année \times Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires.

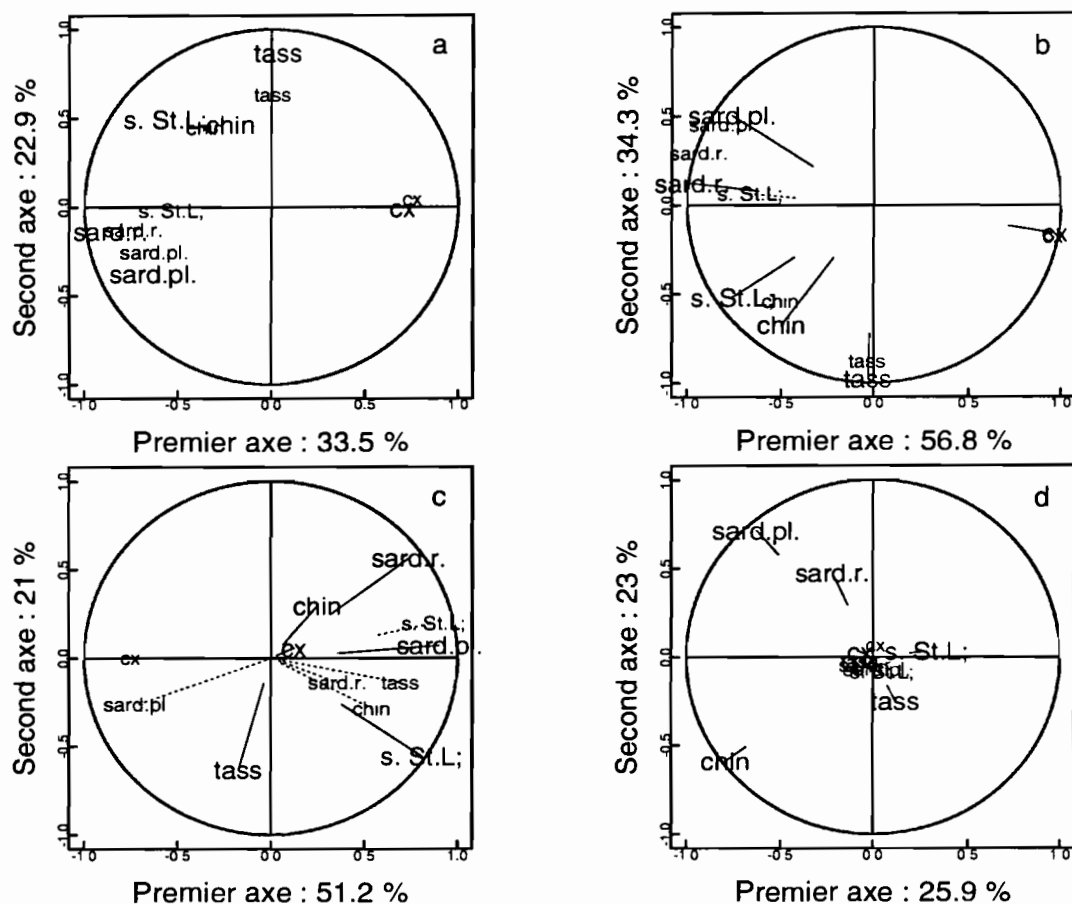


FIG. 6.8 – Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison sennes tournantes × Saint-Louis soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année × Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires.

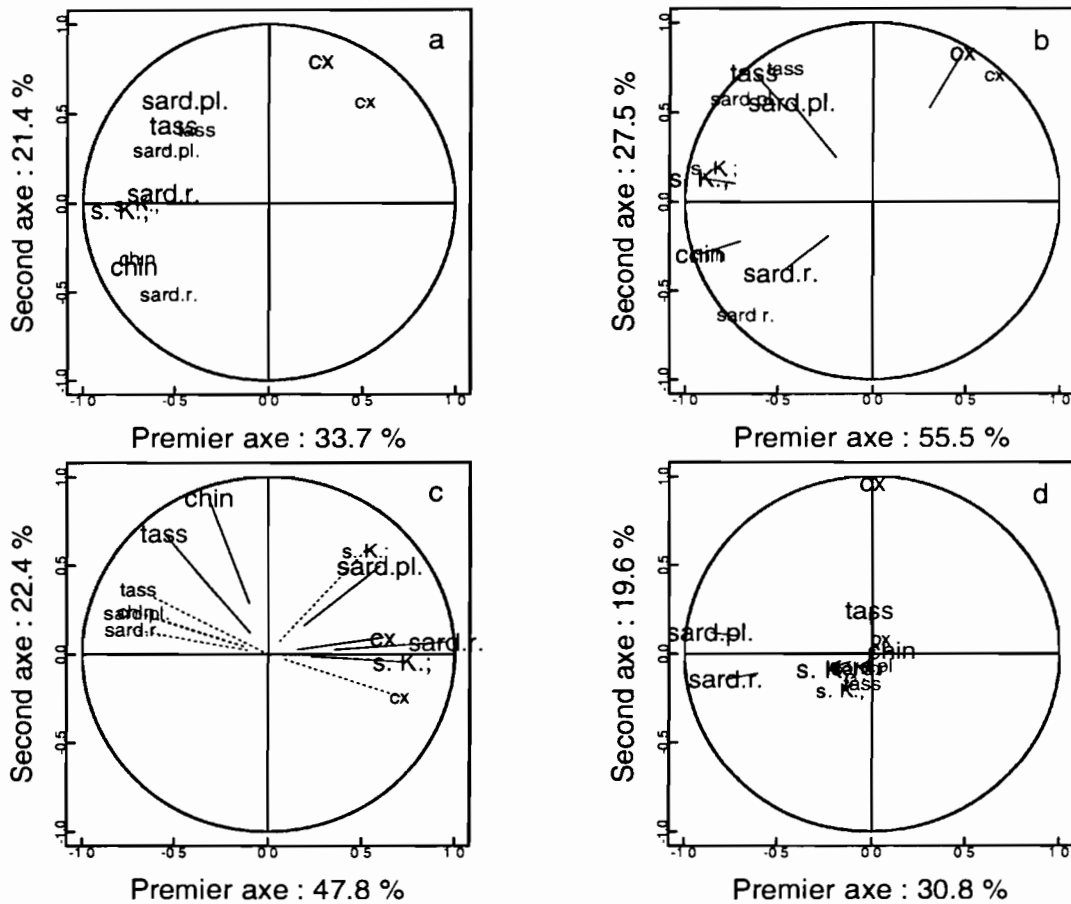


FIG. 6.9 – Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison sennes tournantes \times Kayar soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année \times Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires.

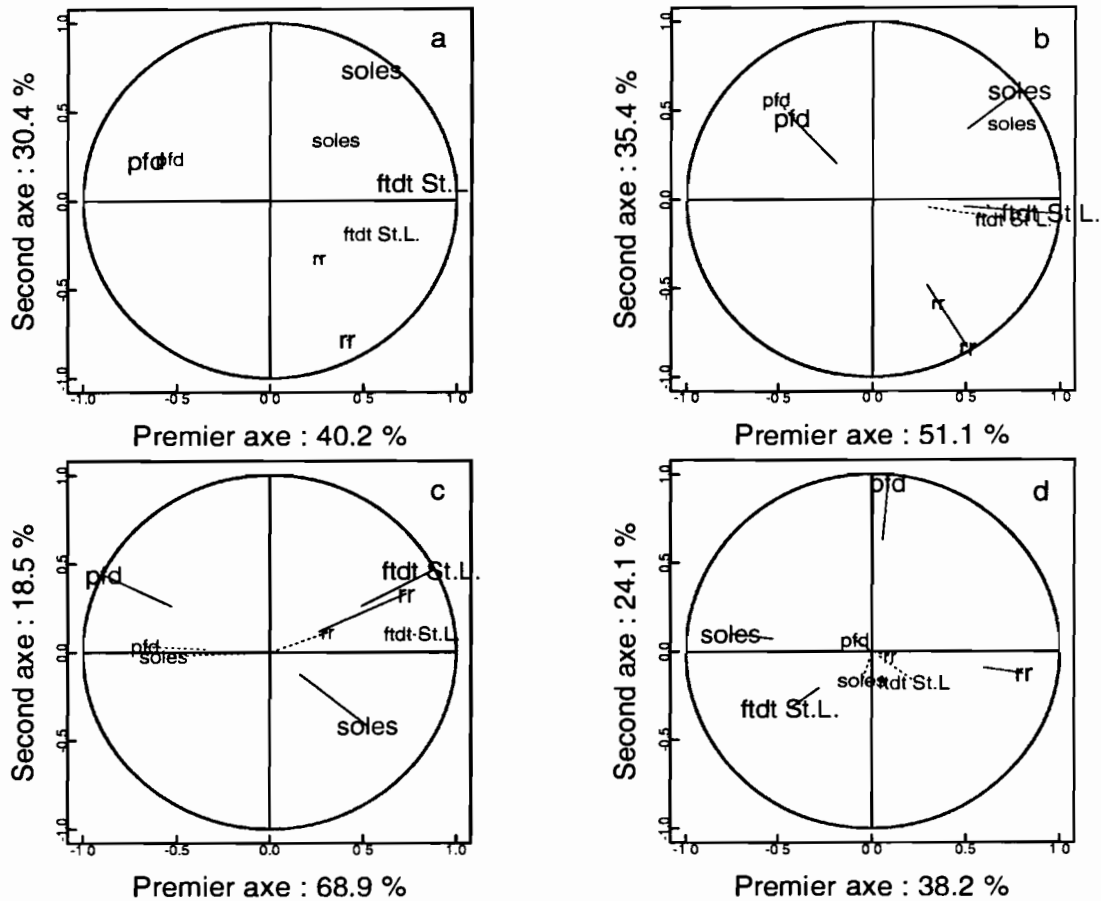


FIG. 6.10 – Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison filet dormant \times Saint-Louis soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année \times Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires.

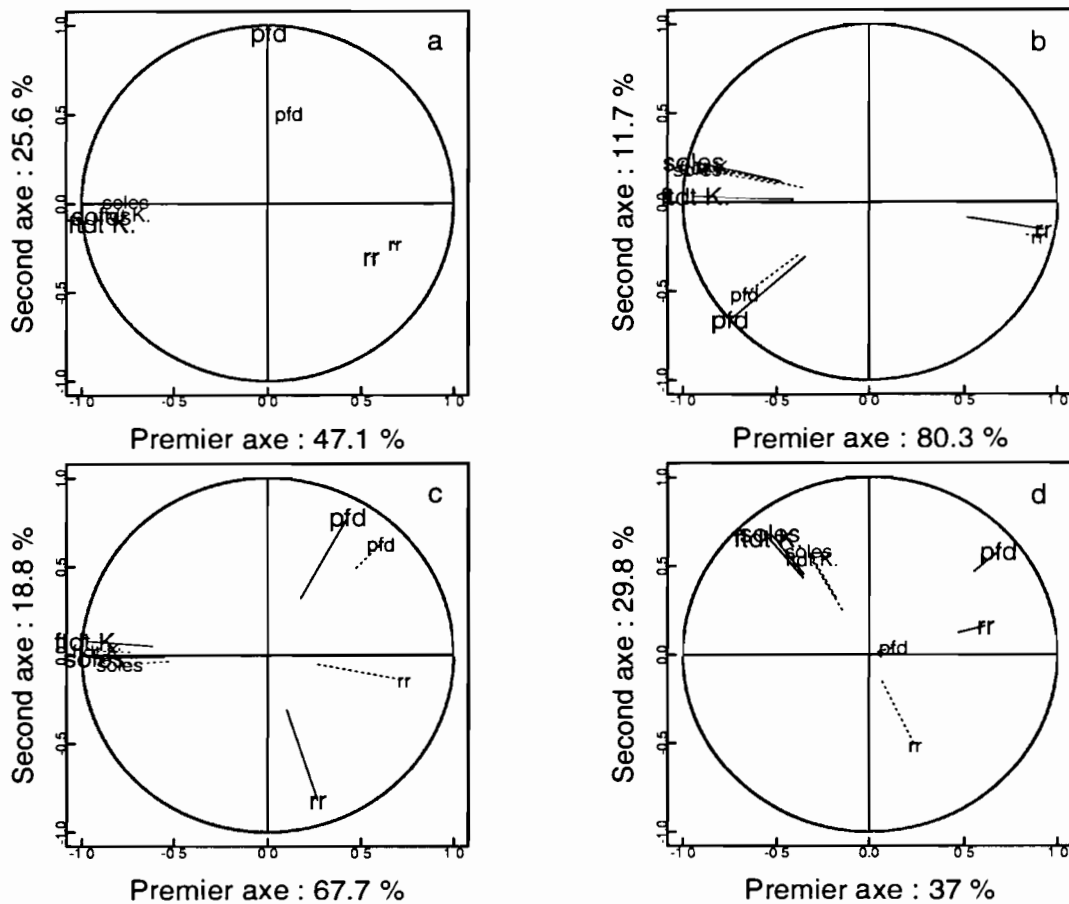


FIG. 6.11 – Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison filet dormant \times Kayar soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année \times Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires.

Kayar. Il contient en colonne une série des efforts de l'engin correspondant et les captures par unité d'effort pour les espèces qui lui sont associées (voir tableau 5.4). Les unités statistiques correspondent donc à des observations réalisées en une quinzaine d'une année donnée. D'autre part, nous pouvons avoir des données manquantes.

Nous avons réalisé l'ACP de chacun de ces tableaux ainsi que les ACPVI correspondantes pour les effets année, quinzaine et interaction année \times quinzaine. A chacune de ces analyses nous avons ajouté en variables supplémentaires les variables estimées à l'aide du modèle ou leur composante s'il s'agit d'une ACPVI. Nous pouvons ainsi apprécier la ressemblance entre les composantes (lorsqu'il s'agit d'une ACPVI) ou les variables (lorsqu'il s'agit de l'ACP) en comparant les positions respectives de la variable ayant participé à l'analyse factorielle avec son homologue restituée par le modèle. Considérons l'ACPVI du tableau relatif aux lignes à Kayar (figure 6.6). Pour l'effet quinzaine, les séries des voiliers sont très ressemblantes entre elles contrairement aux séries des dorades profondes qui apparaissent orthogonales. Si on considère leurs effets interannuels, les séries des voiliers et des dorades profondes apparaissent par contre assez bien restituées par le modèle. D'autre part, nous pouvons juger de l'importance des variabilités restituées par le modèle en considérant les longueurs respectives des "traits" (*cf* chapitre2).

De manière générale, les effets saisonniers sont les caractéristiques des variables dont on rend le mieux compte à l'aide du modèle. Cela peut sembler assez évident dans le cas de séries au comportement intra-annuel assez stable (par exemple les voiliers précédemment décrits) qui sont assez faciles à modéliser à l'aide des profils saisonniers d'inaccessibilité. Cependant, lorsque les effets saisonniers sont moins réguliers (comme celui des dorades côtières pour les lignes à Saint-Louis), nous arrivons généralement à en rendre assez bien compte. L'intérêt de ce type de décompositions peut être apprécié en considérant les analyses relatives au tableau des lignes à Kayar (6.6). Si l'on considère la série du tiof, nous pouvons comprendre la différence entre séries observées et estimées que l'on observe lorsqu'on réalise l'ACP du tableau. En effet, si l'on restitue bien l'effet intra-annuel des captures par unité d'effort des tiofs, celui-ci représente presque toute la variabilité de la série ajustée. En conséquence, l'effet interannuel des captures par unité d'effort des tiofs par les lignes à Kayar sera mal restitué (*cf* ACPVI sur effet année).

6.3 Etude des variables internes au modèle

Une manière d'aborder l'étude des résultats du modèle peut consister également à considérer les variables internes au modèle. Par variable interne, nous entendons les variables définies dans le modèle et qui ne sont pas observées. C'est le cas des biomasses des stocks,

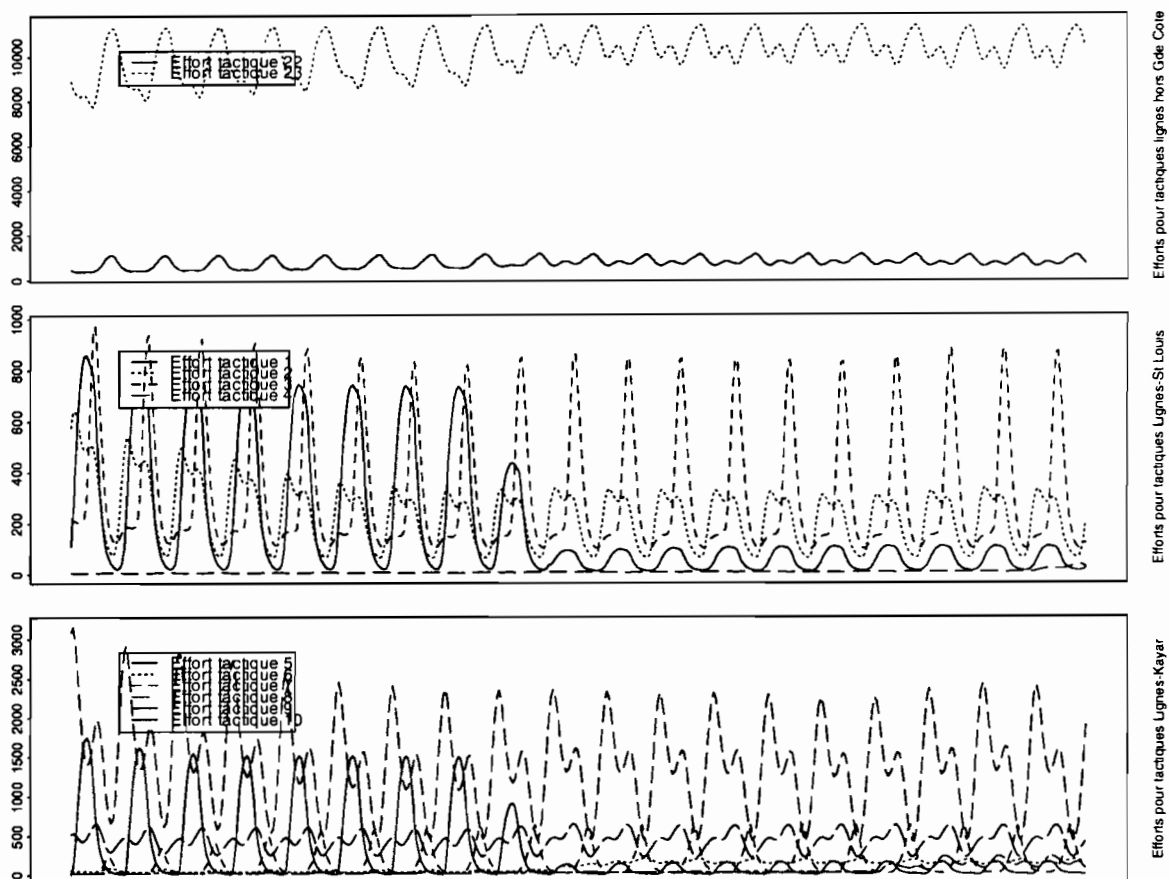


FIG. 6.12 – Répartition par tactique des efforts lignes à Saint-Louis et des efforts de la tactique ligne hors grande côte pour la stratégie “ligne Saint-Louis”. Les données correspondent au modèle obtenu après ajustement.

des efforts et des revenus par tactique. Si ces variables ne sont pas observées, nous pouvons cependant disposer de connaissances concernant leur “allure”. Considérons par exemple les efforts des lignes à Saint-Louis. Nous pouvons tracer, conjointement aux graphiques observés/ajustés, les effectifs par tactique en fonction du temps, pour les tactiques correspondant à l’emploi de l’engin ligne ie l’ensemble des tactiques lignes à Saint-Louis, des tactiques lignes à Kayar et des tactiques lignes hors Grande Côte (figure 6.13). (figure 6.12). Nous pouvons alors relier les évolutions des efforts suivant les tactiques fournies par le modèle à des connaissances par ailleurs existantes des comportements des pêcheurs. Nous avons signalé paragraphe 5.1.1 que Laloë et Samba (1989, [93]) avaient identifié pour les pêcheurs à la ligne exerçant sur la grande côte des campagnes visant successivement le tiof, le tassergal et le pageot. Nous voyons que dans ce cas, la figure 6.12 nous permet de

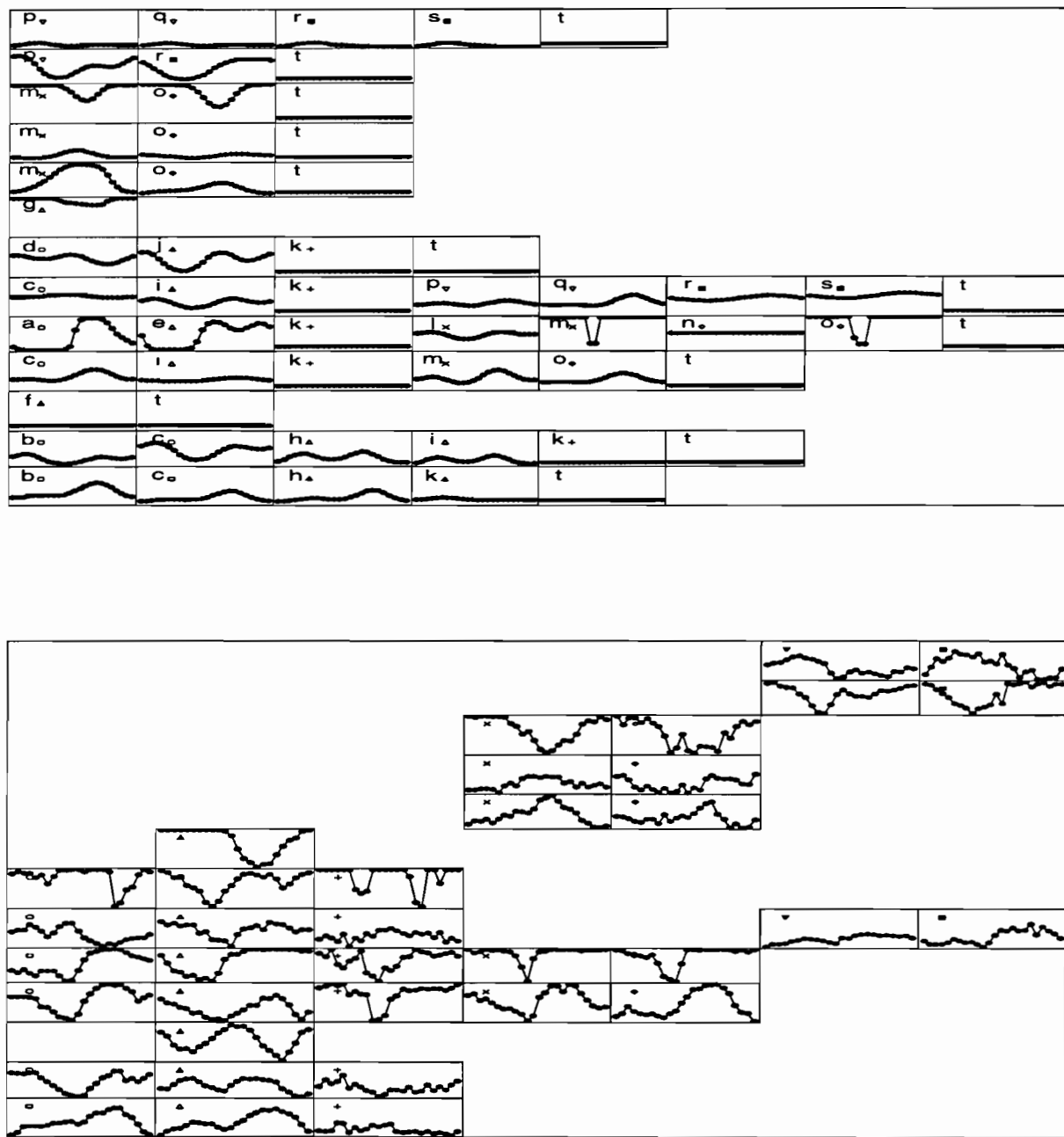


FIG. 6.13 – Graphe du haut : profils d'inaccessibilité des tactiques. Graphe du bas : profils correspondants pour les captures par sorties observées (voir texte) De bas en haut, les stocks considérés (voir tableau 5.3). De gauche à droite, les tactiques (graphe du haut) ou les strates du plan d'échantillonnage (graphe du bas) associées au stock considéré. Voir tableau 5.8 pour la dénomination des tactiques.

retrouver l'allure générale des évolutions des efforts proposée par les auteurs. Nous pouvons également relier l'augmentation à partir de 1982 du nombre d'unités de pêche employant la tactique "ligne hors grande côte" avec la pénurie de moteurs qui a eu lieu à cette époque, ou encore avec le développement à partir de 1983 des bateaux ramasseurs (cf tableau 5.1).

Nous avons également tracé les profils d'inaccessibilités de chaque tactique envers chacun des stocks qu'elle capture (figure 6.13). Nous mettons en regard ces profils avec ceux qui peuvent être formés à partir des moyennes par quinzaine des captures par sortie, dans chaque strate engin \times lieu de débarquement du plan d'échantillonnage. Ces derniers profils sont définis de la manière suivante, où l'on note t_i le pas de temps considéré et q_i la quinzaine de l'année correspondant à t_i :

$$prof(q) = 1 - \frac{\sum_{\{t_i/q_i=q\}} c_{e,k,t_i}}{\max_q(\sum_{\{t_i/q_i=q\}} c_{e,k,t_i})}$$

Nous pouvons alors noter qu'il n'existe pas forcément une correspondance entre l'accessibilité biologique du stock et les profils de captures par sortie (c'est par exemple le cas des dorades profondes capturées par les lignes à Kayar). Nous pouvons donc exprimer ces dernières comme le résultat d'une interaction entre la ressource et la dynamique de l'effort de pêche. Remarquons qu'il existe généralement une correspondance entre les profils pour les espèces cibles, par exemple pour le tiof. Cependant lorsqu'il s'agit d'espèces attrapées en même temps qu'une espèce cible (par exemple le chinchard pour les lignes), il n'existe pas forcément une adéquation entre les profils d'inaccessibilité et les moyennes saisonnières des captures par unité d'effort.

6.4 Discussion

La modélisation de la dynamique de la pêche artisanale sénégalaise se heurte à plusieurs difficultés. Le nombre de variables à considérer ne facilite une approche tenant compte de processus dépendants les uns des autres. La modification de la structure du modèle (disparitions et apparitions de tactiques) comme la non stationnarité des variables modélisées rajoute une difficulté. De plus les processus ne sont pas directement observables et ce qui est observé est le résultat d'un échantillonnage. Cet ensemble de contraintes ne facilite donc pas l'évaluation de notre modèle. En effet nous devons alors essayer de juger de la qualité de notre modèle relativement à chacune des différentes caractéristiques précédemment évoquées. C'est ce que nous avons essayé de faire ici.

Chapitre 7

Apports du modèle

Les apports du modèle, et donc le modèle lui-même, peuvent être évalués en étudiant ses capacités à apporter des éléments de réponse à des questions relatives à l'exploitation. Ces questions peuvent en particulier concerner l'aménagement de la pêcherie. Précisons ici que nous n'entendons pas par aménagement une quelconque mesure de type contrôle de l'activité de pêche ayant pour but l'obtention de quelque hypothétique optimum. Nous considérons plutôt le contexte où l'on aurait à évaluer les conséquences de mesures ou événements affectant la pêcherie dans le but sinon de les prédire de manière "précise", mais au moins d'avoir une idée de la gamme de leurs conséquences éventuelles. Bien entendu, cette idée sera conditionnée par le modèle qui a été posé de l'exploitation et de l'ensemble des hypothèses émises à cette occasion.

L'exemple que nous présenterons dans cette partie n'est donc pas à prendre au pied de la lettre, mais il peut cependant être utile pour comprendre ce que pourrait être une des finalités d'une telle approche de représentation de l'activité de la pêche artisanale sénégalaise.

Lorsque des changements affectent l'activité de la pêcherie, on peut naturellement s'interroger sur les conséquences qui vont en découler. Ces interrogations peuvent être de différentes natures et être formulées de façon assez concrète. Par exemple, si l'on accorde de nouvelles licences d'exploitation à des navires industriels exploitant du tiof, on peut se poser les questions suivantes :

- Quelles vont être les conséquences de cette augmentation de l'effort de pêche sur la ressource ?
- Comment vont évoluer les captures des pêcheurs artisans ?
- Quelles vont être les conséquences sur l'activité des unités de pêche artisanale ? En d'autres termes, le tiof va-t-il rester assez attractif pour les pêcheurs artisans pour

qu'ils continuent à le rechercher? Dans la négative, que vont faire les unités de pêche artisanale? Se reporter sur d'autres espèces? Lesquelles? Changer d'activité? Aller pêcher ailleurs? Où?

Dans une approche consistant à étudier l'état de la ressource conditionnellement à l'activité de pêche, l'accord de licences à des bateaux recherchant le tiof conduit à identifier le changement de mortalité sur l'espèce recherchée et à en estimer les conséquences sur l'état du stock. Les résultats de la pêche concernant les autres secteurs d'activité (par exemple la pêche artisanale) pourront donc être actualisés, mais en supposant qu'il n'y a pas eu de changement dans leur activité (par exemple qu'il n'y a pas de réaction des pêcheurs artisans à la variabilité des captures ou des revenus conséquents de la modification de l'activité de la pêche industrielle).

Nous avons souligné qu'une des caractéristiques du modèle LS était de tenir compte de la souplesse des unités de pêche à adapter leur activités à leurs conditions. Cette souplesse se traduit par des reports d'efforts des pêcheurs entre les tactiques disponibles, dont une des conséquences est qu'il n'existe pas de relation directe entre les efforts nominaux (le nombre de pirogues lignes ayant été pêcher) et les efforts effectifs (*ie* les mortalités engendrées par ces unités envers les divers stocks qu'elles exploitent). Nous pouvons illustrer ce fait en considérant l'impact d'une augmentation de prix. Par exemple, nous pouvons légitimement penser que l'augmentation du prix du tiof suite à la dévaluation du franc CFA peut conjointement entraîner une augmentation de la proportion d'usage de la *tactique tiof* parmi les sorties lignes et une baisse de la biomasse exploitée de tiof. La combinaison de ces deux modifications peut engendrer une augmentation, une diminution ou ... une stabilité des captures par sortie ligne. Mais une diminution de la recherche d'autres espèces suite au report sur la *tactique tiof* peut également conduire à une chute des captures par sortie des lignes pour ces autres espèces. Il n'est donc pas invraisemblable que les conséquences de l'augmentation du prix d'une espèce particulière puissent, en terme de captures par sortie, être principalement observées sur des espèces *a priori* non concernées.

Pour pouvoir répondre aux questions que nous venons de poser, il faut que l'activité des diverses composantes de l'exploitation soit elle-même une variable "expliquée". Il est alors nécessaire de disposer de modèles couplant les dynamiques de l'exploitation et de la ressource.

Un tel modèle, la définition et la mise en œuvre d'une procédure d'ajustement à des données issues de l'exploitation, la participation à cette procédure des experts de l'exploitation, nous permet peut-être maintenant de pouvoir répondre à ce type de questions. Bien entendu, nous ne préjurons pas ici de la qualité des réponses que nous apporterons, étant

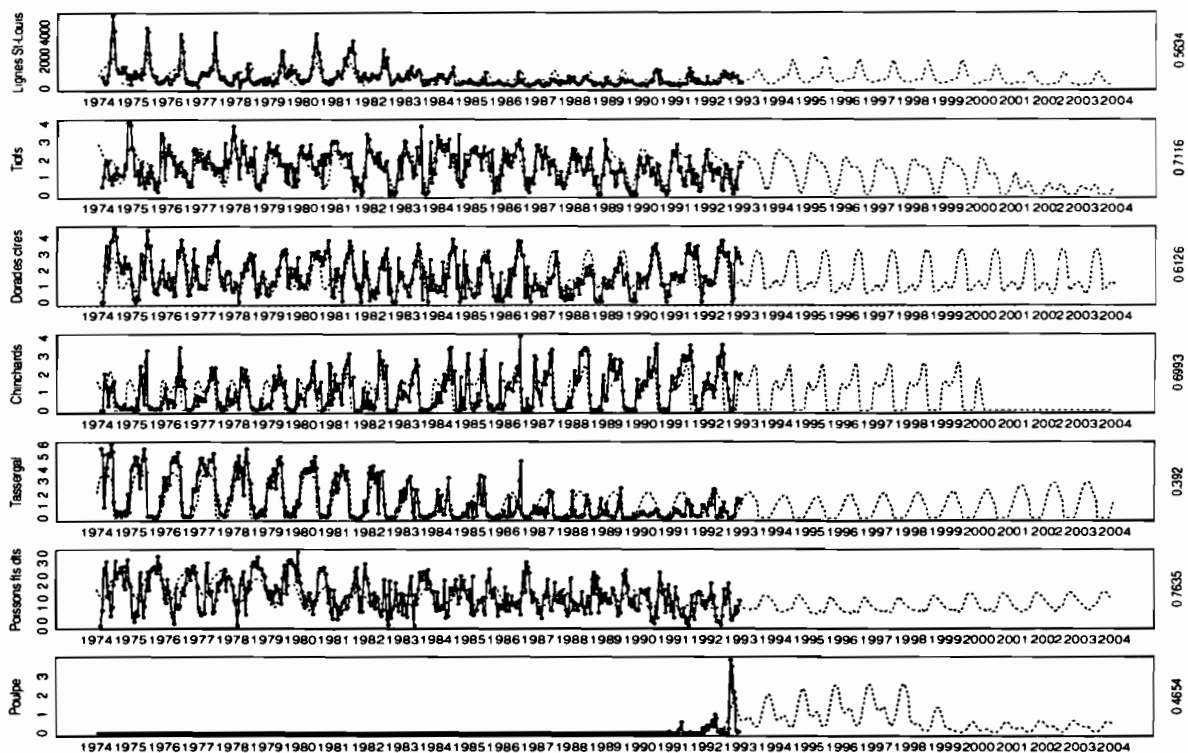


FIG. 7.1 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes à Saint-Louis: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l’ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas: efforts des lignes et captures par unité d’effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, chinchards, tassergal, poissons filets dormants et poulpe.

données en particulier les difficultés à établir les qualités de nos estimateurs. Soulignons cependant que notre modèle a été ajusté sur des données, les estimations des paramètres sont donc fonctions de ces données. En conséquence, les réponses que nous pourrions apporter ont au moins le mérite d’être des fonctions des observations réalisées suivant le plan d’échantillonnage.

Nous considérons donc notre modèle tel que nous l’avons “quitté” à l’issue du chapitre 5 *ie* muni de sa structure et de son ensemble de paramètres fixés ou estimés. Nous simulons alors le comportement de la pêcherie durant 11 années après 1992, dernière année ajustée, en introduisant trois changements. Ceux-ci sont censés représenter différentes sources de variabilité pouvant affecter les conditions de l’exploitation. Il s’agit en l’occurrence d’une

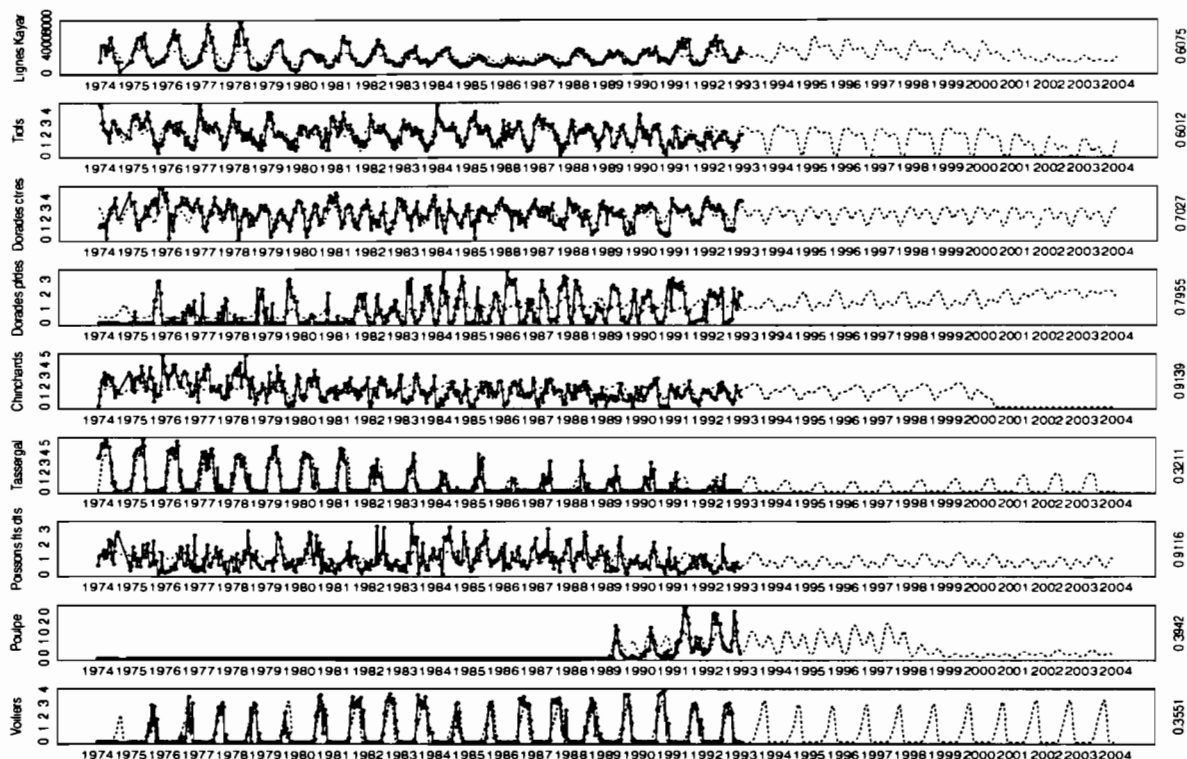


FIG. 7.2 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes à Kayar : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas : efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, dorades profondes, chinchards, tassergal, poissons filets dormants, poulpe et voiliers.

mesure économique *a priori* extérieure à la pêche, d'un événement concernant une modification de l'état de la ressource, et d'un changement relatif à une mesure de gestion.

Le premier changement que nous avons introduit se produit en 1994, c'est la dévaluation du franc CFA. Nous savons que cette dévaluation a eu comme conséquence une augmentation du prix à la vente des espèces exportées (A. Samba, comm. pers.). Nous avons ici traduit ce phénomène en multipliant par 1.5 les prix relatifs aux stocks de tiof, dorades côtières et profondes, poulpe et sole. En 1998, nous divisons la biomasse vierge du poulpe par 3 pour traduire une éventuelle raréfaction de cette espèce des eaux sénégalaises. Enfin, en 2000, le troisième événement concerne une multiplication par trois de la capturabilité des

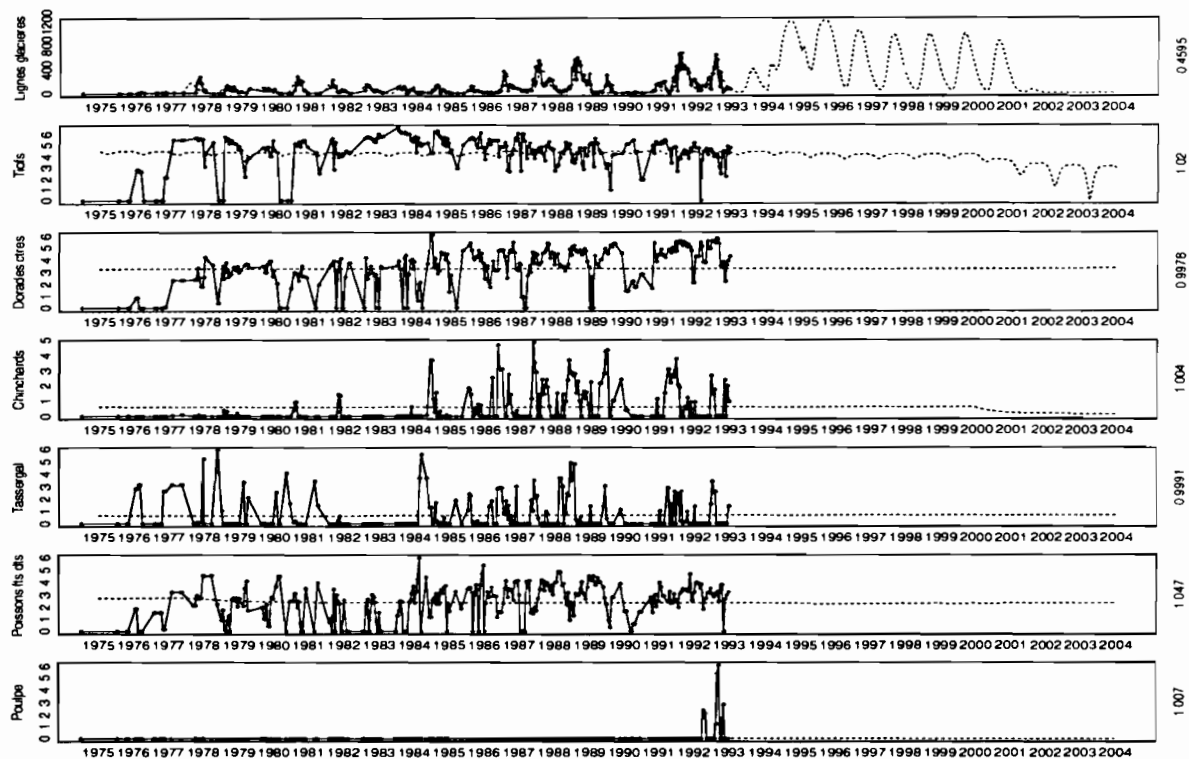


FIG. 7.3 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes glacières : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l’ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas : efforts des lignes et captures par unité d’effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, chinchards, tassergal, poissons filets dormants, et poulpe.

navires industriels envers les stocks de tiofs et de chinchards. Cette dernière modification pourrait par exemple correspondre à l’accord de licences de pêche à deux types de navires industriels. Nous pouvons alors, en simulant les données à l’aide du modèle, observer les impacts des modifications introduites.

La dévaluation du franc CFA a comme conséquence de rendre plus attractives les espèces exportées, à haute valeur marchande, et qui sont capturées par les lignes, lignes glacières et filets dormants (pour les soles). On note ainsi une augmentation des efforts lignes à Kayar et Saint-Louis et des lignes glacières. Ces augmentations correspondent à des hausses de captures par unité d’effort pour le tiof et le poulpe. Cependant, à partir de 1996, les rendements de tiof diminuent, ce qui a comme conséquence un report vers le tas-

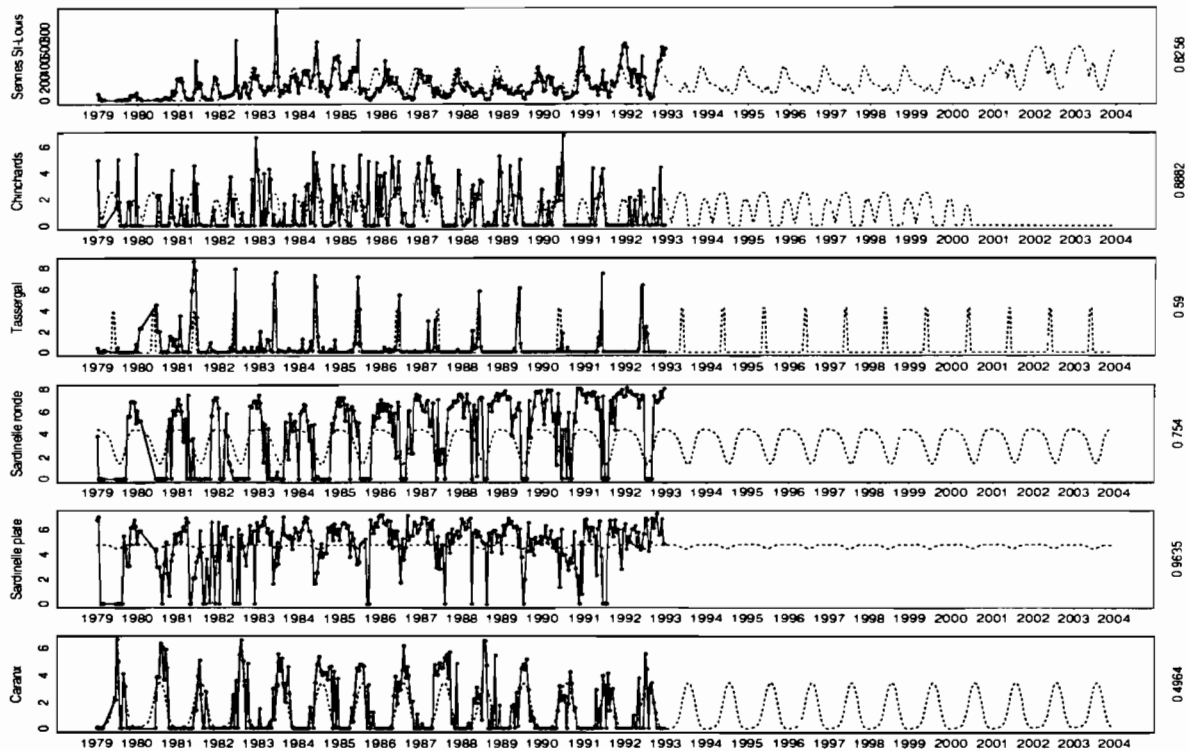


FIG. 7.4 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les sennes tournantes à Saint-Louis : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l’ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas : efforts des sennes tournantes et captures par unité d’effort pour les stocks de chinchards, tassergal, sardinelle ronde, sardinelle plate et caranx.

sergal (lignes Saint-Louis), vers les dorades profondes (Kayar), ou vers la tactique *activité autre que la pêche sur la Grande Côte* (lignes glacières). Concernant les filets dormants, on note une augmentation des efforts à Kayar et pas à Saint-Louis. Peut-être le rôle de la *tactique sole* est-il moins important dans ce port où l’on note par ailleurs des captures par unité d’effort inférieures à celles observées à Kayar.

Si l’on considère les séries des efforts lignes de 1995 à l’an 2000, on ne note aucune modification du nombre de sorties de pêche au cours de ces années. Cependant, nous avons divisé par 3 en 1998 la biomasse vierge du stock de poulpe. Cette modification, si elle n’entraîne pas de changement au niveau de l’effort global des lignes, engendre néanmoins des reports d’efforts entre les tactiques d’une même strate engin \times lieu de débarquement.

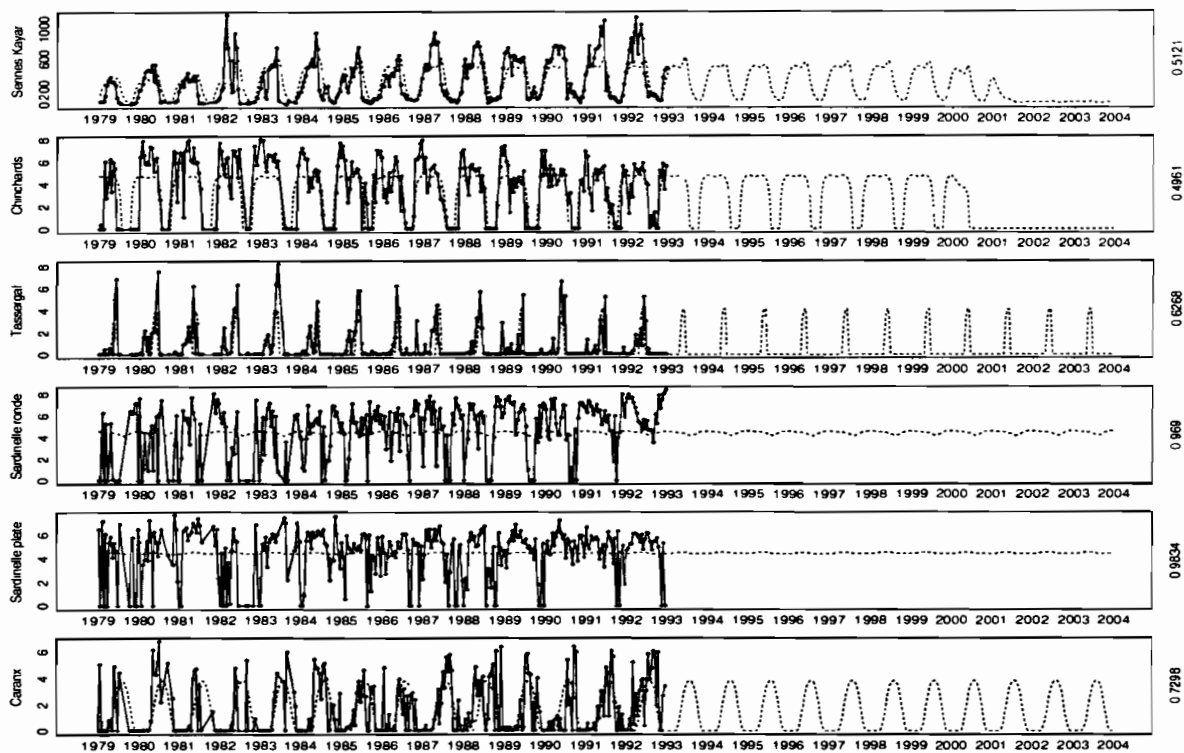


FIG. 7.5 – Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les sennes tournantes à Kayar: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l’ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas: efforts des sennes tournantes et captures par unité d’effort pour les stocks de chinchards, tassergal, sardinelle ronde, sardinelle plate et caranx.

En effet, si la biomasse du poulpe est divisée par trois, les captures par unité d’effort le sont d’un facteur nettement supérieur à Saint-Louis et surtout à Kayar. Par exemple à Saint-Louis, les reports des lignes s’effectuent vers les tactiques tiof et tassergal. Pour cet “événement” les autres dynamiques sont peu touchées. En effet, les sennes et filets dormants n’exploitent pas le poulpe qui n’est d’autre part pas la principale espèce ciblée par les unités de pêche employant la ligne glacière.

Le troisième événement introduit (*ie* la multiplication par 3 de la capturabilité des navires industriels envers les stocks de tiof et de chinchard en l’an 2000) entraîne une diminution des captures par unité d’effort pour le tiof (lignes et lignes glacières) et le chinchard (lignes, lignes glacières et sennes tournantes). Ces chutes correspondent cependant

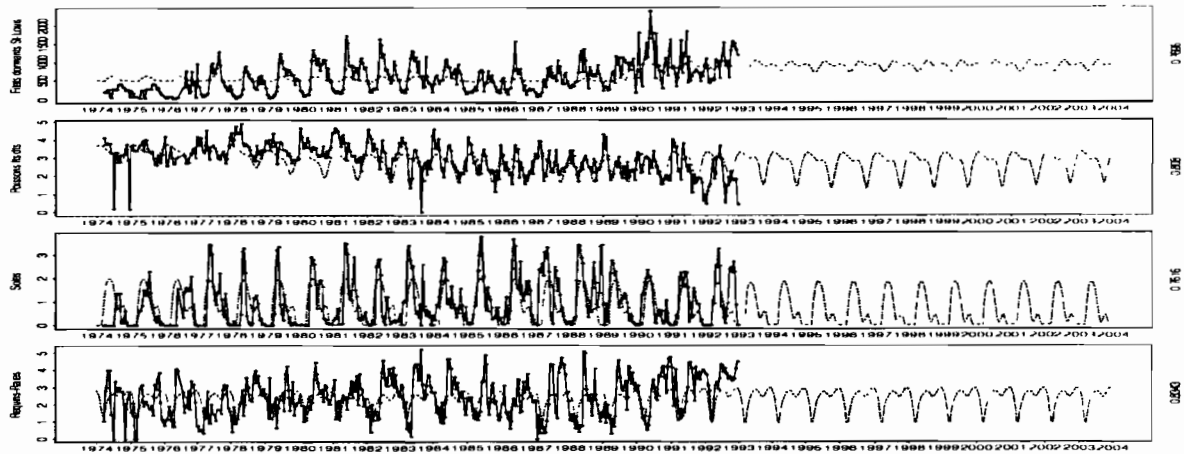


FIG. 7.6 – Ajustement du modèle *LS* à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les filets dormants à Saint-Louis: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas: efforts des filets dormants à Saint-Louis et captures par unité d'effort pour les stocks de poissons filets dormants, sole et requins-raies.

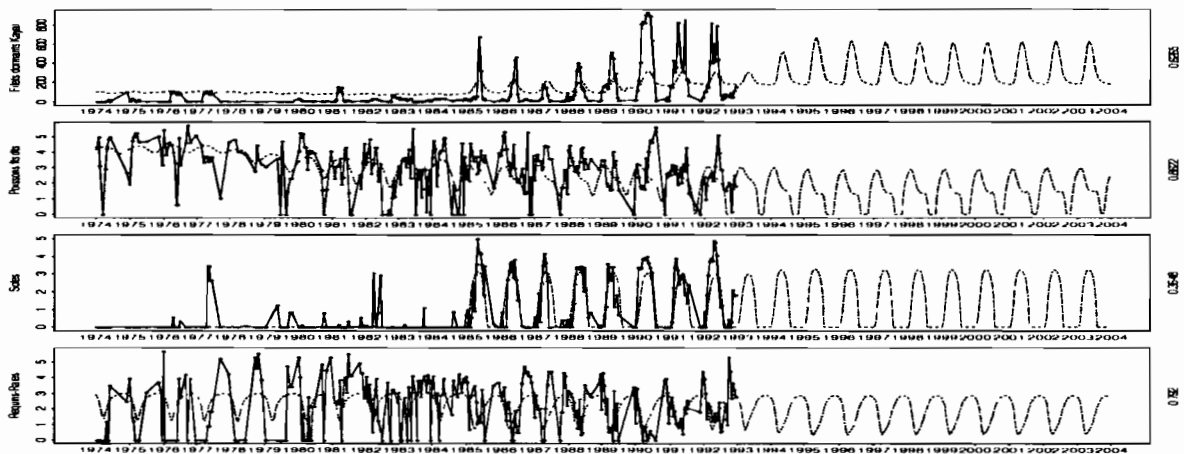


FIG. 7.7 – Ajustement du modèle *LS* à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les filets dormants à Kayar: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas: efforts des filets dormants à Kayar et captures par unité d'effort pour les stocks de poissons filets dormants, sole et requins-raies.

à des modifications d'efforts de pêche de diverses natures. Il s'agit soit d'un arrêt (lignes glacières, sennes à Kayar), d'une diminution (les lignes à Saint-Louis et à Kayar) ou d'un accroissement de l'activité de pêche (les sennes à Saint-Louis).

Les conséquences observées à l'aide du modèle des modifications introduites dans l'exploitation ne peuvent être raisonnablement considérées en tant que prédictions de l'activité. Une raison simple en est que nous ignorons les événements qui conditionneront l'activité de la pêche artisanale sénégalaise dans le futur, et qui pourront être prises en compte lorsqu'ils seront identifiés (par exemple l'adoption de nouvelles tactiques de pêche à la suite d'innovations). Ainsi il est très peu probable que l'on observera un arrêt de l'activité des pirogues glacières après l'an 2000, du moins pour les raisons fournies dans notre exemple. De plus notre modèle, s'il était statistiquement valable (*ie* si les estimateurs qui lui sont associés possédaient de "bonnes qualités"), ne le serait que conditionnellement à l'ensemble de suppositions que nous avons été amenés à émettre sur divers aspects de la pêcherie au cours de notre ajustement mené au chapitre 5. Cet ensemble de suppositions est conditionné par l'identification qui a été faite du modèle (*cf* paragraphe 4.4 du chapitre 4), et les suppositions relatives à une partie du système peuvent avoir un très grand impact sur la perception qu'on aura des autres composantes du même système (Laloë *et al.* 1997, [92]).

Ainsi, le fait que l'on observe conjointement une augmentation de l'effort de pêche des sennes tournantes à Saint-Louis et un arrêt à Kayar n'a pas tant un intérêt quant au résultat lui-même que pour les interrogations qu'il peut susciter : qu'en est-il des migrations des unités sennes tournantes ? Peut-on préciser certaines caractéristiques des stocks qu'elles exploitent ? Un report d'unités lignes glacières vers les sennes tournantes est-il vraisemblable au niveau donné par le modèle ? ...

Nous disposons avec le modèle ajusté à l'issue du chapitre 5 d'un outil de représentation conjointe de la dynamique de la ressource et de celle de l'effort de pêche. Cet outil, malgré ses défauts que nous devons garder à l'esprit, rend néanmoins assez vraisemblables les observations disponibles sur l'activité de pêche. Les "prédictions" faites à l'aide de ce modèle sont donc, via les estimations des paramètres, des fonctions des observations. Sous les hypothèses faites pour construire et ajuster le modèle, cet outil permet donc de traiter un ensemble élargi de questions. La critique des hypothèses peut présenter par ailleurs l'intérêt de soulever d'autres questions dans un contexte interdisciplinaire. La participation des spécialistes des exploitations étudiées est donc essentielle pour construire les modèles et pour les critiquer.

Conclusion

Notre travail n'avait pas pour objet l'étude de problèmes statistiques en tant que tels. Il s'agissait plutôt de considérer la question de la représentation d'une exploitation halieutique à l'aide de l'outil statistique. C'est en abordant ce problème qu'ont alors surgi des difficultés d'ordre statistique. Si ces dernières peuvent parfois sembler assez éloignées du sujet, elles ont leurs intérêts propres. De plus, on peut penser qu'apporter des solutions à ces problèmes nous aiderait à mieux répondre à la question initiale.

Nous ne perdrons pas de vue que notre travail repose sur l'analyse de données issues d'un plan d'échantillonnage. L'importance de la conception comme de la mise en œuvre concrète de ce plan sont à souligner. L'échantillonnage des données constitue un problème sans cesse actualisé à cause des nouvelles questions auxquelles on cherche à répondre mais aussi en raison de l'évolution de la pêcherie qui est suivie (Morand et Ferraris 1997, [106]). Dans notre cas, nous avons considéré les données collectées parce qu'elles avaient le mérite d'exister et qu'elles pouvaient ainsi être utiles même dans un cadre de représentation différent de celui en cours au moment de la mise en place du système de collecte. On peut bien entendu étudier la représentation conjointe de l'activité et de la ressource en modifiant la nature des données collectées. Les travaux de J. Ferraris (1995, [45]; 1996, [46]) concernant le suivi d'unités de pêche en sont une illustration.

De manière générale, trois points ont plus particulièrement été abordés au cours de notre travail :

- Le premier concerne la synthèse qui peut être faite de nos données. Ces dernières peuvent être considérées comme étant soumises à un ensemble de sources de variabilité que nous ne maîtrisons pas : variabilité environnementale, conditions économiques, évolutions technologiques, ... L'analyse de nos variables conditionnellement à celles utilisées pour stratifier le plan d'échantillonnage nous a permis de décomposer l'inertie totale en parts plus aisément interprétables. Bien entendu, les variables utilisées pour la stratification ne peuvent être directement assimilées aux sources de variabilité que l'on cherche à identifier. Ce problème débouche alors sur celui de l'analyse des interactions entre les facteurs du plan d'échantillonnage.

- Le second point concerne la définition du modèle. Nous avons considéré comme acquis le principe du modèle dès l'introduction du sujet. Il ne s'agissait donc pas ici d'étudier les mécanismes de la pêche artisanale, principalement parce que ce travail a déjà été réalisé (Laloë et Samba 1989, [93]; Ferraris 1992, [49]; 1995, [45]; 1996, [46]). Un problème qui nous concerne par contre est celui de la spécification du modèle. Ce problème est décrit ainsi par Gauthiez (1997, [58]): " *De façon générale, l'inférence statistique permet d'estimer les paramètres d'un modèle ou de choisir entre plusieurs modèles possibles. La qualité de l'inférence sera d'autant plus grande que la spécification du modèle sera précise. En revanche, la pertinence du modèle et son adéquation à la réalité font l'objet d'un « pari », d'autant plus risqué que la spécification du modèle sera précise. Il est donc nécessaire de trouver un équilibre entre les deux aspects antagonistes suivants :*
 - *Augmenter le degré de spécification d'un modèle pour assurer une précision suffisante dans l'inférence.*
 - *Augmenter la généralité du modèle pour diminuer le risque d'inadéquation à la réalité.*

Ce dilemme n'est pas propre à l'halieutique , tout statisticien appliqué y est confronté. Reste à trouver un compromis satisfaisant dans le cadre de chaque application"

Nous avons dans notre cas essayé d'associer une distribution à chacun des processus considérés dans le modèle. Les choix correspondaient soit à celui de distributions communément employées dans le domaine halieutique (la distribution log-normale pour les captures par unité d'effort) soit à des distributions les plus "neutres" possibles (la distribution multinomiale pour les répartitions des efforts par tactique). Peut-être conviendrait-il d'aborder par des études plus fines les processus mis en jeu, afin sinon d'en caractériser complètement les distributions du moins d'en dégager certaines propriétés, par exemple celles relatives aux relations moyenne-variance dans une démarche semi-paramétrique (voir Gauthiez 1997, [58]).

La spécification choisie pour le modèle a bien entendu une importance sur la méthode d'ajustement. Etant donné la confiance toute relative que nous pouvons avoir en les distributions définies, le critère le plus naturel était celui des moindres carrés. Se pose alors le problème des qualités des estimateurs ainsi proposés. Les solutions analytiques ne semblent pas faciles à obtenir. Quant à l'étude des propriétés par simulation, la solution est difficilement envisageable étant donnée la lourdeur des calculs alors demandés.

Dès lors, l'objet devient celui de la recherche d'une solution plausible au vu des données observées. Nous avons vu qu'il n'existe pas de solution unique et que le

choix du modèle revêt une importance cruciale (c'est le problème de l'identification). Nous avons proposé une procédure d'ajustement. Malgré ses défauts, cette procédure a cependant le mérite de nécessiter la formalisation d'hypothèses concernant plusieurs aspects de la pêcherie représentée, puis d'en permettre la critique à partir des ajustements obtenus.

- Le troisième point concerne l'évaluation statistique du modèle, une fois celui-ci ajusté. Notons dans notre cas qu'une analyse des résidus souligne le défaut de spécification du modèle ou du moins le fait qu'une spécification commune (à tous les types d'efforts par exemple) n'est à l'évidence pas toujours valable. En général, si le modèle rend compte d'une bonne part des effets annuels et surtout interannuels (*cf* comparaisons des ACPVI observés/ajustés), il est pris en défaut lorsque des valeurs "extrêmes" sont observées. Certains aspects concernant l'évaluation du modèle sont encore à étudier, même si ces études n'apparaissent pas toujours faciles. Il s'agit de celles liées au choix du modèle, et à l'appréciation de ces capacités prédictives. Il existe des résultats concernant certains aspects (voir par exemple Wallach et Goffinet (1987, [145]) concernant la décomposition d'un critère de prédiction en différentes contributions quantifiant les biais dus à la modélisation, aux variables prédictives ou aux erreurs d'échantillonnage) mais qui ne sont pas directement transposables à notre cas. Il s'agit enfin de l'étude des qualités des estimateurs proposés.

Les modèles usuels en halieutique décrivent l'impact de l'activité de pêche sur la ressource. De manière générale, et en supposant que les estimateurs qui leur sont associés soient au minimum asymptotiquement sans biais, on ne peut répondre à l'aide de ces modèles à des questions relatives à la dynamique de l'exploitation. C'est logique, ils ne sont pas faits pour ça. Le principal apport des modèles relatifs à la dynamique conjointe de l'exploitation et de la ressource exploitée consiste en la prise en compte du déterminisme de l'effort de pêche. En cela, ils semblent plus en phase avec les dynamiques de pêcheries comme les pêcheries artisanales ouest-africaines. Ces derniers modèles ont certainement ajouté des difficultés statistiques à celles des modèles usuels. Ils ont cependant le mérite d'élargir considérablement la gamme des questions auxquelles ils peuvent apporter des éléments de réponse, sans préjuger cependant pour l'instant de la qualité de ces éléments. Par exemple, considérons le cas où des navires industriels se verraient accorder de nouvelles licences de pêche. On peut alors s'intéresser à plusieurs aspects des conséquences de cet accord, en dépassant le cadre strict des conséquences sur l'état du stock :

- Comment vont réagir les stocks à ce surcroît d'effort?
- Quelles vont être les conséquences sur les captures réalisées par les pêcheurs artisans?

- Si les intérêts relatifs des espèces pour les pêcheurs artisans sont modifiés, quels reports d'efforts pourraient être mis en œuvre?
- Cet accord aura-t-il comme conséquence l'arrêt par certaines unités de l'activité de pêche et/ou des migrations dans d'autres zones de pêche?

Typiquement les modèles classiques peuvent répondre à la première question, ils peuvent (en faisant de fortes hypothèses sur la nature des efforts de pêche) répondre à la seconde. Mais il est nécessaire de représenter conjointement les dynamiques de la ressource et de l'exploitation pour pouvoir répondre aux autres questions, c'est le cas de notre modèle (cf chapitre 7). Bien entendu notre modèle est lui aussi limité, et ne peut répondre à une question du type: quelles seront les évolutions des prix des espèces au débarquement? Il y a peut-être là aussi un compromis à trouver entre l'éventail des questions auxquelles on voudrait répondre et notre capacité à fournir ces réponses.

L'intérêt de questions comme celles que nous venons d'évoquer est maintenant largement reconnu. Si plusieurs modèles ont été développés en ce sens, il ne sont cependant que rarement confrontés aux données issues des exploitations qu'ils représentent. Notre contribution a donc consisté à étudier ce problème pour l'un de ces modèles. Cela nous a amené à préciser un cadre de représentation de la pêche artisanale et à proposer une procédure d'ajustement. Ainsi les paramètres de notre modèle sont-ils fonctions de données observées. Nous avons mis en évidence les difficultés qui se posent alors, étant données les observations qui peuvent être raisonnablement effectuées de l'activité et des résultats de la pêche artisanale.

Bibliographie

- [1] Allen (P.M.) et McGlade (J.M.). 1986. Dynamics of discovery and exploitation : the case of scotian shelf groundfish fishery. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 43, pp. 1187-1200.
- [2] Anonyme. 1982. *Les enquêtes sur la pêche artisanale sénégalaise au centre de recherches océanographiques Dakar-Thiaroye*. Arch. Scient. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye, 112. 28 p.
- [3] Antionadis (A.), Berruyer (J.) et Carmona (R.). 1992. *Regression non-linéaire et applications*. Economica (Ed.), Paris, 248 p.
- [4] Arnold (S.F.). 1981. *The theory of linear models in multivariate analysis*. John Wiley & Sons (Ed.), New-York.
- [5] Arrowsmith (D.K.) et Place (C.M.). 1992. *Dynamical Systems*. Chapman & Hall (Ed.), Londres, 330 p., première édition.
- [6] Bakhayokho (M.) et Kébé (M.). 1991a. *Réactions des pêcheurs face aux variations d'abondance et de disponibilité des ressources : approche méthodologique*. In: La recherche face à la pêche artisanale. Symp. Int. Orstom-Ifremer, Montpellier, France, 3-7 juillet 1989. J.R. Durand, J. Lemoalle et J. Weber (Eds.). Orstom, Paris, tome II : 943-956.
- [7] Bakhayokho (M.) et Kébé (M.). 1991b. *Problématique des relations entre la pêche artisanale et la pêche industrielle : cas des ressources démersales*. In: La recherche face à la pêche artisanale. Symp. Int. Orstom-Ifremer, Montpellier, France, 3-7 juillet 1989, J.R. Durand, J. Lemoalle et J. Weber (Eds.). Orstom, Paris, tome II : 933-941.
- [8] Bard (Y.). 1974. *Non linear parameter estimation*. Academic Press (Ed.), New-York, 341 p.
- [9] Barry-Gérard (M.). 1993. *Migrations des poissons le long du littoral sénégalais*. In: L'évaluation des ressources exploitables par la pêche artisanale sénégalaise. Sympo-

- sium de Dakar du 8 au 13 février 1993. M. Barry-Gérard, T. Diouf, A. Fonteneau (Eds). Orstom, Paris: 215-234.
- [10] Barry-Gérard (M.), Bakhayokho (M.), Laloë (F.), Samba (A.), Diadhiou (H.) et Levenez (J.J.). 1991. *Hétérogénéité et variabilité de la pêche artisanale : méthodologie d'étude de l'activité de pêche et mortalité induite*. In: La recherche face à la pêche artisanale. Symp. Int. Orstom-Ifremer, Montpellier, France, 3-7 juillet 1989. J.R. Durand, J. Lemoalle et J. Weber (Eds). Orstom, Paris, tome II: 551-558.
- [11] Bartels (R.). 1985. Identification in econometrics. *The American Statistician*, vol. 39, n° 2, pp. 102-104.
- [12] Bates (D.M.) et Watts (D.G.). 1988. *Non linear Regression Analysis and its Applications*. John Wiley & Sons (Ed.), New-York. 365 p..
- [13] Bedrick (E.J.) et Tsai (C.L.). 1994. Model selection for multivariate regression in small samples. *Biometrics*, vol. 50, pp. 226-231.
- [14] Biseau (A.) et Gondeaux (E.). 1988. Apport des méthodes d'ordination en typologie des flottilles. *Journal du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, vol. 44, pp. 286-296.
- [15] Bouso (T.). 1994. *Typologie des engins et techniques de pêche artisanale utilisés au Sine-Saloum (Sénégal)*. Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye, 141, 111 p.
- [16] Box (G.) et Jenkins (G.). 1970. *Time series analysis: forecasting and control*. Holden-Day (Eds).
- [17] Breen (P.A.). 1991. *Assesment of the red rock lobster (Jassus edwardsii) North and South island stock*. New-Zealand fisheries assesment, Res. Doc. 91/16., 36 p. Document available at Ministry of Agriculture and Fishery library, Greta Point, Wellington, N.Z.
- [18] Brockwell (P.J.) et Davis (R.A.). 1987. *Times series: theory and methods*. Springer-Verlag (Ed.) New-York.
- [19] Browne (M.W.). 1970. Robustness of statistical inference in factor analysis and related models. *Biometrika*, vol. 74, n° 2, pp. 375-384.
- [20] Chaboud (C.). 1990. *Prix du poisson frais au débarquement et sur le marché de Gueule-Tapée à Dakar. Synthèse des enquêtes de 1977 à 1990*. Document inédit, non publié.

- [21] Chaboud (C.). 1995. *Risques et incertitudes dans les pêches: le point de vue de l'économiste*. In: Questions sur la dynamique de l'exploitation halieutique. Table ronde Orstom-Ifremer. Montpellier, 6-8 septembre 1993. F. Laloë, H. Rey et J.L. Durand (Eds). Orstom. Paris: 297-330.
- [22] Chaboud (C.) et Charles-Dominique (E.). 1991. *Les pêches artisanales en Afrique de l'ouest: état des connaissances et évolution de la recherche*. In: La recherche face à la pêche artisanale. Symp. Int. Orstom-Ifremer. Montpellier, France, 3-7 juillet 1989. J.R. Durand, J. Lemoalle et J. Weber (Eds.). Orstom. Paris, tome I: 99-141.
- [23] Chaboud (C.), Kebe (M.), Barbe (F.), Fall (M.) et Diop (M.). 1982. *Prix du poisson au débarquement et sur le marché de Gueule-Tapée. 1977-1982*. Arch. Scient. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye, 107, 200 p.
- [24] Champagnat (C.), Caverivière (A.), Conand (C.), Cury (P.), Durand (J.R.), Fontana (A.), Fonteneau (A.), Fréon (P.) et Samba (A.). 1983. *Pêche, biologie et dynamique du tassergal (Pomatomus Saltator, Linnaeus, 1766) sur les côtes sénégalomauritaniennes*. Trav. Doc. ORSTOM (Ed.), Paris, 168, 279 p.
- [25] Charles-Dominique (E.). 1991. *Halieutique et pêches artisanales: anciennes méthodes, nouvelles problématiques?* In: La recherche face à la pêche artisanale. Symp. Int. Orstom-Ifremer, Montpellier, France, 3-7 juillet 1989, J.R. Durand, J. Lemoalle et J. Weber (Eds.). Orstom, Paris, tome II: 965-972.
- [26] Charles-Dominique (E.) et Diallo (M.). 1996. *Le trémail, une innovation dans la pêche artisanale sénégalaise: processus de diffusion et fonctionnement*. Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye, 145, 22 p.
- [27] Chauveau (J.P.). 1984. *La navigation et la pêche maritime artisanale au Sénégal. Méthodologie et opérations de recherche en cours*. In: Aspects de la recherche en socio-économie de la pêche artisanale maritime sénégalaise, Dakar, Sénégal. Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye, 84: 25-36.
- [28] Chauveau (J.P.) et Samba (A.). 1989. *Market development, Government Interventions and the Dynamics of the Small-scale Fishing Sector: An Historical Perspective of the Senegalese Case*. In: Development and Change. SAGE (Ed.), Londres, Vol. 20: 599-620.
- [29] Cleroux (R.). 1976. Analyse de données unidimensionnelles provenant d'une expérience planifiée. Cours de statistique-Informatique IFT6660, 306 p.

- [30] Cleveland (R.B.), Cleveland (W.S.), McRae (J.E.) et Terpenning (I.). 1990. Stl: a seasonal trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, vol. 6, n° 1, pp. 3-73.
- [31] Cury (P.) et Roy (C.). 1988. Migration saisonnière du thiof (*epinephelus acinus*) au sénégal: influence des upwellings sénégalais et mauritaniens. *Oceanologica Acta*, vol. 11, pp. 25-36.
- [32] Cury (P.) et Roy (C.). 1991. *Pêcheries Ouest Africaines. Variabilité, instabilité, changement*. ORSTOM (Ed.), Paris, 525 p.
- [33] Deme (M.) et Levenez (J.J.). 1991. *L'exploitation des petits pélagiques côtiers au Sénégal: réponse de la recherche à la crise sardinière*. In: La recherche face à la pêche artisanale. Symp. Int. Orstom-Ifremer, Montpellier, France, 3-7 juillet 1989, J.R. Durand, J. Lemoalle et J. Weber (Eds.). Orstom, Paris, tome II: 657-669.
- [34] Destanques (C.). 1982. *Etude de la qualité des estimations à vue du poids des prises débarquées par les pêcheurs artisans sénégalais*. Rapport Interne Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye. 19 p.
- [35] Diaw (M.C.). 1994. *La portée du partage. Les implications théoriques et épistémologiques du système de parts pour l'étude de l'altérité en économie. Une référence particulière aux pêcheries côtières ouest-africaines*. Thèse de l'Université de Laval, faculté des sciences sociales, Québec. 561 p.
- [36] Diouf (T.). 1994. Les istiophoridés en atlantique-est: étude des pêcheries et quelques aspects de la biologie du voilier au sénégal. *Report of the second ICCAT billfish workshop, Coll. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, vol. XLI, pp. 442-457.
- [37] Draper (N.) et Smith (H.). 1981. *Applied regression analysis*. John Wiley & Sons (Ed.), New-York.
- [38] Durand (J.F.). 1993. Generalized principal component analysis with respect to instrumental variables via univariate spline transformations. *Computational statistics and data analysis*, vol. 16, pp. 423-440.
- [39] Durand (J.L.) et Lobry (C.). 1993. *Modèles mathématiques de croissance d'une espèce structurée en deux stades dans un environnement variable*. In: Les recherches françaises en évaluation quantitative et modélisation des ressources et des systèmes halieutiques. Premier forum halieumétrique, Rennes 29-31 juillet 93, D. Gascuel, J.L. Durand et Fonteneau A. (Eds). ORSTOM, Paris: 75-84.

- [40] Ecoutin (J.M.). 1991a. *Adaptabilité d'une flottille de pêche artisanale ivoirienne à la variabilité des ressources instables*. In: Pêcheries Ouest-Africaines, variabilité, instabilité et changement. Cury P. Roy C. (Eds). ORSTOM, Paris : 466-476.
- [41] Edgington (E.S.). 1987. *Randomization tests*. Marcel Dekker (Ed.), New-York.
- [42] Fay (C.). 1994. *Organisation sociale et culturelle de la production de pêche : morphologie et grandes mutations*. In: La pêche dans le delta central du Niger. J. Quensièrre (Ed.). I.E.R/ORSTOM/KARTHALA, Paris : 191-207.
- [43] Feller (W.). 1940. On the logistic law of growth and its empirical verifications in biology. *Acta Biotheorica. Ser. A*, vol. 5, pp. 51-65.
- [44] Ferraris (J.). 1992. *La pêche artisanale au Sénégal. Description de la variabilité spatio-temporelle*. Document interne, Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye.
- [45] Ferraris (J.). 1995. *Démarche méthodologique pour l'analyse des comportements tactiques et stratégiques des pêcheurs artisans sénégalais*. In: Questions sur la dynamique de l'exploitation halieutique. Table ronde ORSTOM/IFREMER Montpellier du 6 au 8 septembre 1993, F. Laloë, H. Rey et J.L. Durand (Eds). ORSTOM, Paris : 155-190.
- [46] Ferraris (J.). 1996. *Analyse des données du suivi des unités de pêche artisanale au Sénégal*. ORSTOM. Rapport de recherche ORSTOM, 32 p.
- [47] Ferraris (J.), Fonteneau (V.) et Bo (A. Sy). 1993a. *Structuration de la base de données 'pêche artisanale' et chaîne de traitement informatique*. Arch. Scient. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye, 208 p.
- [48] Ferraris (J.), Samb (B.) et Thiam (M.). 1993b. *Les statistiques de pêche du CRODT : description des systèmes de collecte et de traitement des données*. In: L'évaluation des ressources exploitables par la pêche artisanale sénégalaise. Symposium de Dakar du 8 au 13 février 1993, M. Barry-Gérard T. Diouf et A. Fonteneau (Eds). ORSTOM, Paris, tome II : 73-93.
- [49] Ferraris (J.) et Samba (A.). 1992. *Variabilité de la pêche artisanale Sénégalaise et statistique exploratoire*. In: Séminfor 5, Statistique Impliquée. Cinquième séminaire informatique de l'ORSTOM, Montpellier 2,3 et 4 septembre 1991, F. Laloë (Ed.). ORSTOM, Paris : 169-190.
- [50] Fine (J.). 1993. Problèmes d'indétermination en analyse en facteurs et analyse en composantes principales optimale. *Revue de Statistique Appliquée*, vol. XLI, n° 4, pp. 45-72.

- [51] Fox (W.W.). 1970. An exponential surplus yield model for optimizing exploited fish population. *Trans. Amer. Fish. Soc.*, vol. 99, pp. 80-88.
- [52] Fréon (P.). 1986. *Réponses et adaptation des stocks de cupléidés d'Afrique de l'Ouest à la variabilité du milieu et de l'exploitation. Analyse et réflexion à partir de l'exemple du Sénégal*. Thèse de doctorat d'état, tome I, Université Aix-Marseille II, 271 p.
- [53] Fréon (P.). 1993. *Trois décennies de pêche sardinière semi-industrielle au Sénégal : analyses multivariées de la pêcherie, des puissances de pêche et des rendements*. In: L'évaluation des ressources exploitables par la pêche artisanale sénégalaise. Symposium de Dakar du 8 au 13 février 1993. M. Barry-Gérard T. Diouf et A. Fonteneau (Eds). ORSTOM, Paris, tome II: 265-312.
- [54] Gaertner (D.) et Laloë (F.). 1986. Etude biométrique de la taille à première maturité sexuelle de geryon maritae manning et holtus, 1981 du Sénégal. *Acta Oecanologica*, vol. 9, n° 4, pp. 479-487.
- [55] Gallant (A.R.). 1987. *Non Linear Statistical Models*. John Wiley & Sons (Ed.), New-York, 610 p.
- [56] Garrod (D. J.). 1969. Empirical assessments of catch effort relationships in north atlantic cod stock. *Res. Bull. ICNAF*, vol. 6, pp. 26-34.
- [57] Garrod (D. J.). 1973. Management of multispecies resource. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, vol. 30, pp. 1977-1985.
- [58] Gauthiez (F.). 1997. *Structuration spatiale des populations de poissons marins démersaux. Caractérisation, conséquences biométriques et halieutiques*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I, 251 p.
- [59] Gavaris (S.). 1980. Use of multiplicative model to estimate catch rate and effort from commercial data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 37, pp. 2272-2275.
- [60] Gay (D.M.). 1983. Algorithm 611. subroutines for unconstrained minimization using a model/trust-region approach. *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 9, pp. 503-524.
- [61] Gerard (M.) et Gréber (P.). 1985. *Analyse de la pêche artisanale au Cap-Vert : description et étude critique du système d'enquête*. Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye, 98, 77 p.
- [62] Goodwin (C.G.) et Sang Sin (K.). 1984. *Adaptive filtering prediction and control*. Prentice Hall Inc. (Ed.), Englewoods Cliffs, New-Jersey.

- [63] Gourieroux (C.) et Monfort (A.). 1995. *Séries temporelles et modèles dynamiques*. Economica, Paris, seconde édition.
- [64] Graham (M.). 1935. Modern theory of exploiting a fishery, and application to north sea trawling. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, vol. 10, pp. 264–274.
- [65] Gérard (M.). 1985b. *Contribution à la connaissance de la pêche artisanale sur la petite côte. Description et étude critique du système d'enquête à Mbour et à Joal*. Arch. Scient. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye, 137, 40 p.
- [66] Grillenzoni (C.). 1994. Optimal recursive estimation of dynamics models. *Journal of the American Statistical Association*, vol. 89, n° 427, pp. 777–787.
- [67] Gulland (J.) et Garcia (S.). 1984. *Observed patterns in multispecies fisheries*. In: Exploitation of marine communities. R.M. May (Ed.). Dahlem Konferenzen, Springer Verlag (Ed.), New-York : 155-190.
- [68] Hartley (M.J.). 1986. Calibration of macroeconomic models with incomplete data - a systems approach. *Comp & Maths with Appls*, vol. 12A, n° 6, pp. 769–775.
- [69] Hilborn (R.). 1985. Fleet dynamics and individual variations: why some people catch more fish than others. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 42, pp. 2–13.
- [70] Hilborn (R.) et Ledbetter (M.). 1979. Analysis of the british colombia salmon purse seine fleet. dynamic of movement. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 36, pp. 384–391.
- [71] Hilborn (R.) et Walters (C. J.). 1992. *Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics, and Uncertainty*. Chapman & Hall (Ed.), New-York, 570 p.
- [72] Hilborn (R.) et Walters (C.J.). 1987. A general model for simulation of stock and fleet dynamics in spatially heterogeneous fisheries. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 44, pp. 1366–1369.
- [73] Hills (S.E.). 1987. Reference priors and identifiability problems in non linear models. *The Statistician*, vol. 36, pp. 235–240.
- [74] Hitier (S.). 1993. Quelques éléments pour tester l'indépendance de deux tableaux de données. Rapport de D.E.A. Montpellier, 36 p.
- [75] Huet (S.), Jolivet (E) et Messean (A.). 1991. *La regression non-linéaire : Méthodes et applications en biologie*. Inra éditions, Paris.
- [76] Hurvitch (C.M.) et Tsai (C.L.). 1989. Regression and times series model selection in small samples. *Biometrika*, vol. 76, pp. 297–307.

- [77] Inzenman (A.J.). 1980. *Assessing dimensionality in Multivariate regression*. In: Handbook of statistics, Vol. 1, Analysis of variance. P.R. Krishnaiah (Ed.). Amsterdam, North-Holland: 571-591.
- [78] Ito (P.K.). 1985. *Robustness of ANOVA and MANOVA test procedures*. In: Handbook of statistics, Vol. 1, Analysis of variance. Krishnaiah P.R. (Ed.). Amsterdam, North-Holland: 199-236.
- [79] Johnston (J.). 1984. *Econometrics Methods*. McGraw-Hill Book Co.(Ed.). New-York, 568 p.
- [80] Jolivet (E.). 1983. *Introduction aux modèles mathématiques en biologie*. INRA Actualités Scientifiques et Agronomiques, Masson (Ed.), Paris.
- [81] Kazi-Aoual (F.).1993. *Approximations to permutation tests for data analysis*. Rapport de recherche n° 93-06. Unité de biométrie, Montpellier.
- [82] Kazi-Aoual (F.), Hitier (S.), Sabatier (R.) et Lebreton (J.D.). 1995. Refined approximations to permutation tests for multivariate inference. *Computational statistics & Data Analysis*, vol. 20, pp. 643-656.
- [83] Kazi-Aoual (F.), Sabatier (R.) et Lebreton (J.D.). 1992. *Approximation of permutation tests for multivariate inference. Applications to species environment relationships*. Proc. 2nd French-Japanese Statistical Meeting.
- [84] Kébe (M.). 1993. *Principales mutations de la pêche artisanale maritime sénégalaise*. In: L'évaluation des ressources exploitables par la pêche artisanale sénégalaise. Symposium de Dakar du 8 au 13 février 1993, M. Barry-Gérard, T. Diouf et A. Fonteneau (Eds.). ORSTOM, Paris: 43-58.
- [85] Kébe (M.). 1995. *Evolution de la recherche halieutique face au dynamisme de la pêche artisanale maritime sénégalaise*. In: Questions sur la dynamique de l'exploitation halieutique. Table ronde ORSTOM/IFREMER Montpellier du 6 au 8 septembre 1993. F. Laloë, H. Rey et J.L. Durand (Eds.). ORSTOM, Paris: 413-431.
- [86] Laloë (F.). 1985. *Etude de la précision des estimations de captures et prises par unité d'effort obtenues à l'aide du système d'enquête de la section "pêche artisanale" du CRODT au Sénégal*. Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye, 100, 35 p.
- [87] Laloë (F.). 1988. Un modèle global avec quantité de biomasse inaccessible liée aux conditions environnementales. application aux données de la pêche ivoiro-ghanéenne de *sardinella aurita*. *Aquat. Living Resour.*, vol. 1, pp. 289-298.

- [88] Laloë (F.). 1992. *Collecte d'informations sur la pêche artisanale au Sénégal*. informatique de l'ORSTOM. Montpellier 2. 3 et 4 septembre 1991. F. Laloë (Ed). ORSTOM. Paris.
- [89] Laloë (F.). 1993. *Efforts effectifs-Efforts nominaux. Quelques questions de traduction*. In: Les recherches françaises en évaluation quantitative et modélisation des ressources halieutiques. Premier forum halieumétrique: Rennes 29-31 Juillet 1993. D. Gascuel, J.L. Durand et A. Fonteneau (Eds.). ORSTOM Paris: 189-201.
- [90] Laloë (F.). 1995. Should surplus production models be fishery description tools rather than biological models. *Aquat. Living Resour.*, vol. 8, pp. 1-16.
- [91] Laloë (F.). 1997. *Modélisation de systèmes d'exploitation. Quelques considérations statistiques*. In: Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement. Journées du Programme Environnement, Vie et Sociétés du CNRS (textes sélectionnés), Elsevier (Ed.), Paris: 311-317.
- [92] Laloë (F.), Pech (N.), Sabatier (R.) et Samba (A.). Model identification for flexible multifleet-multispecies fisheries. a simulation study. *Fisheries Research*. Sous presse.
- [93] Laloë (F.) et Samba (A.). 1989a. *La pêche artisanale au Sénégal: ressource et stratégies de pêche*. Thèse de doctorat, Université d'Orsay-Paris Sud, ORSTOM (Ed.), Paris, 411 p.
- [94] Laloë (F.) et Samba (A.). 1991. A simulation model of artisanal fisheries of senegal. *ICES Mar. Sci. Symp.*, vol. 193, pp. 281-286.
- [95] Laloë (F.), Samba (A.) et Bergerard (P.). 1981. *Contribution à l'étude de la pêcherie de Kayar. Etude d'une partie des résultats du suréchantillonnage de 1978 concernant les pirogues motorisées pêchant à la ligne*. Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye, 79, 45 p.
- [96] Lane (D.E.). 1992. Management science in the control and management of fisheries: an annotated bibliography. *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, vol. 12. n° 2 & 3, pp. 101-152.
- [97] Laurec (A.). 1993. *Etalonnage de l'analyse des cohortes en halieutique*. In: Biométrie et environnement, J. D. Lebreton & B. Asselain (Eds.), Masson. Paris: 205-239.
- [98] Laurec (A.), Biseau (A.) et Charuau (A.). 1991. Modelling technical interactions. *ICES Mar. Symp.*, vol. 193, pp. 225-234.
- [99] Laurec (A.) et Le Guen (J.C.). 1981. *Dynamique des populations marines exploitées*. CNEXO. Rapports scientifiques et techniques, 45, 117 p.

- [100] Lebreton (J.D.), Burnham (K.P.), Clobert (D.) et D.R. (Anderson). 1992. Modelling survival and testing biological hypotheses using marked animals: a unified approach with case studies. *Ecological Monographs*, vol. 62, pp. 67–118.
- [101] Lebreton (J.D.), Sabatier (R.), Banco (R.) et A.M. (Bacou). 1991. *Principal component and Correspondances analyses with respect to Instrumental Variables: an overview of their role in studies of structure -activity and species-environment relationships*. In: Applied multivariate analysis in SAR and Environmental studies. J. Devillers and W. Karcher (Eds.). Kluwer, Dordrecht : 85-114.
- [102] Lefur (J.). 1995. Modeling adaptative fishery activities facing fluctuating environment: an AI approach. *AI applications*, vol. 9, pp. 85–97.
- [103] Ljung (L.) et Soderstrom (T.). 1984. *Theory and practice of recursive estimation*. MIT Press (Ed.), Cambridge (USA).
- [104] McCullagh (P.) et A. (Nelder J.). 1983. *Generalized linear models*. Chapman & Hall (Ed.), New-York, 511 p.
- [105] Meinhold (R.) et Singpurwalla (N.D.). 1983. Understanding the Kalman filter. *The American Statistician*, vol. 37, n° 2, pp. 123–127.
- [106] Morand (P.) et Ferraris (J.). 1997. *Les systèmes d'enquête des pêches artisanales en afrique: une co-évolution entre représentation du monde réel et méthodologie d'observation*. Communication présentée lors des XXIXèmes journées de statistique de l'A.S.U. 26-30 mai 1997.
- [107] Murawski (S.A.). 1984. Mixed species yield per recruit analyses accounting for technological interactions. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 41, pp. 897–916.
- [108] Murawski (S.A.) et Finn (J.T.). 1986. Optimal effort allocation among competing mixed-species fisheries, subject to fishing mortality constraints. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 43, pp. 90–100.
- [109] Pella (J.J.) et Tomlinson (P.K.). 1969. A generalized stock production model. *Bull IATTC*, vol. 13, pp. 419–496.
- [110] Persat (H.) et Chessel (D.). 1989. Typologies de distributions en classes de taille : intérêt dans l'étude des populations de poissons et d'invertébrés. *Acta Œcologica*, vol. 10, pp. 175–195.
- [111] Polachek (T.), Hilborn (R.) et Punt (E.). 1993. Fitting surplus production models : comparing methods and measuring uncertainty. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 50, pp. 2597–2607.

- [112] Pope (J.G.). 1979. *Stock assesment in multispecies fisheries with special reference to the trawl fishery in the gulf of Thailand*. SCS/DEV/79/19. 106p.
- [113] Prodon (R.) et Lebreton (J.D.). 1994. Analyses multivariées des relations espèces-nilieu : structure et interprétation écologique. *Vie Milieu*, vol. 44, n° 1, pp. 69-91.
- [114] Quensière (J.). 1993. De la modélisation halieutique à la gestion systémique des pêches. *Natures-Sciences-Sociétés*, vol. 1, n° 3, pp. 211-220.
- [115] Rao (C.R.). 1964. The use and interpretation of principal component analysis in applied research. *Sankhya Series*, vol. 26, pp. 329-358.
- [116] Rébert (J.P.). 1983. *Hydrobiologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais*. Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye, 89, 99 p.
- [117] Reed (W.J.) et Clement (M.S.). 1996. Analysing catch-effort data by means of the kalman filter. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 53, n° 10, pp. 2157-2166.
- [118] Robson (D.S.). 1966. Estimation of the relative fishing power of individual ships. *ICNAF res. bull.*, vol. 3, pp. 5-13.
- [119] Ross (J.S.). 1990. *Nonlinear estimation*. Springer Verlag, New-York, 189 p.
- [120] Roy (C.). 1991. *Le cadre physique des pêcheries côtières ouest africaines*. In : Pêcheries Ouest Africaines. Variabilité, instabilité, changement. P. Cury et C. Roy (Eds.), ORSTOM, Paris : 38-66.
- [121] Sabatier (R.). 1988. *Méthodes factorielles en analyse des données : approximations et prise en compte de variables concomitantes*. Thèse de doctorat d'état, Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- [122] Sabatier (R.), Lebreton (J.D.) et Chessel (D.). 1989. *Principal component analysis with instrumental variables as a tool for modelling composition data*. In: Multiway data analysis, pp. 341-352. R. Coppi and S. Bolasco (eds). Elsevier, Amsterdam, Holland.
- [123] Sakamoto (Y.), Ishiguro (M.) et Kitagawa (G.). 1986. *Akaike information criterion statistics*. KTK Scientific Publishers, Tokyo.
- [124] Samba (A.). 1993a. *Présentation sommaire des différentes pêcheries sénégalaises*. 1993a. In: L'évaluation des ressources exploitables par la pêche artisanale sénégalaise. Symposium de Dakar du 8 au 13 février 1993. M. Barry-Gérard T. Diouf et A. Fonteneau (Eds.), ORSTOM, Paris: 1-9.

- [125] Samba (A.). 1993b. *Evaluation des ressources exploitables par le pêche artisanale au Sénégal: bilan des recherches effectuées*. In: L'évaluation des ressources exploitables par la pêche artisanale sénégalaise. Symposium de Dakar du 8 au 13 février 1993. M. Barry-Gérard T. Diouf et A. Fonteneau (Eds.), ORSTOM, Paris: 419-424.
- [126] Samba (A.). 1995. *Actions de recherche et de développement. La place du pêcheur artisan*. Questions sur la dynamique de l'exploitation halieutique. Table ronde Orstom-Ifremer Montpellier du 6 au 8 septembre 1993 F. Laloë, H. Rey et J.L. Durand (Eds.). ORSTOM, Paris: 489-506.
- [127] Samba (A.) et Fontana (A.). 1989. *Expérimentation d'un vire-ligne adapté à la pirogue sénégalaise: résultats et perspectives*. Document interne Centre Rech. Océanogr. Dakar-Thiaroye, 15 p.
- [128] Samba (A.) et Laloë (F.). 1991. *Upwelling sénégal-mauritanien et pêche du tassergal (Pomatomus saltator) sur la côte nord du Sénégal*. In: Pêcheries Ouest-Africaines. variabilité, instabilité et changement. Cury P. et C. Roy (Eds.). ORSTOM, Paris: 307-319.
- [129] Saporta (G.). 1990. *Probabilités, analyse des données et statistique*. Editions Technip (Ed.), Paris, 493 p.
- [130] Schaefer (M.B.). 1954. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries. *Bull. IATTC*, vol. 1, pp. 25-56.
- [131] Schnute (J.). 1977. Improved estimates from the schaefer production model: theoretical considerations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 34, pp. 583-603.
- [132] Schnute (J.). 1985. A general theory for analysis of catch and effort data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 42, pp. 414-429.
- [133] Schnute (J.). 1989. *The influence of statistical error on stock assesment: illustration from Schaefer's model*. In: Effects of ocean variability on recruitment and an evaluation of parameters used in stock assesment models. R.J. Beamish & G.A. McFarlane (Eds.). *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.*, 108.
- [134] Sciandra (A.) et Lobry (C.). 1996. *Modèles de croissance d'une population de filtres*. In: Méthodes d'étude des systèmes halieutiques et aquacoles. Second forum Halieumétrique. Nantes 26-28 Juin 1995, J. Ferraris, D. Pelletier et M.J. Rochet (Eds), ORSTOM, Paris: 241-245.
- [135] Seck (P.A.). 1980. *Catalogue des engins de pêche artisanale du Sénégal*. CO-PACE/PACE Series, FAO (Ed.), Rome. 111 p.

- [136] Silvert (W.) et Dickie (L.M.). 1982. Multispecies interactions between fish and fishermen. *in: m.c. mercer (ed.) multispecies approaches to fishing management advice. Can. Spec. Pub. Aquat. Sci.*, vol. 59, pp. 163–169.
- [137] Statistical-Sciences. 1995. *S-PLUS Guide to Statistical and Mathematical analysis. Version 3.3*. Seattle: StatSci, a division of MathSoft, Inc. (Ed.).
- [138] Stephenson (R.L.) et Lane (D.E.). 1995. Fisheries management science: a plea for conceptual change. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 52, pp. 2051–2056.
- [139] Sullivan (P.J.). 1992. A kalman filter approach to catch at length analysis. *Biometrics*, vol. 48, pp. 237–247.
- [140] Theil (H.). 1971. *Principles of Econometrics*. John Wiley & Sons, Inc. (Ed.), New-York.
- [141] Thiam (M.) et Gascuel (D.). 1993. *L'évolution de la pêche chalutière démersale du plateau continental sénégalais. In: L'évaluation des ressources exploitables par la pêche artisanale sénégalaise. Symposium de Dakar du 8 au 13 février 1993*, M. Barry-Gérard, T. Diouf et A. Fonteneau (Eds), ORSTOM, Paris : 143-161.
- [142] Tomassone (R.), Audrain (S.), de Turckheim (E. Lesquoy) et Millier (C.). 1992. *La régression : nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique*. Masson (Ed.), Paris, 188 p., seconde édition.
- [143] Touzeau (S.). 1997. *Modèle de contrôle en gestion des pêches*. Université de Nice Sophia-Antipolis, 266 p.
- [144] Tu (N.V.). 1994. *Dynamical Systems*. Springer-Verlag (Ed.), New-York, 314 p., seconde édition.
- [145] Wallach (D.) et Goffinet (B.). 1987. Mean squared error of prediction in models for studying ecological and agronomics systems. *Biometrics*, vol. 43, pp. 561–573.
- [146] Walters (C.J.) et Hilborn (R.). 1976. Adaptive control of fishing systems. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 33, pp. 145–159.
- [147] Womer (N.K.). 1985. Identification and least squares in simultaneous equations. *The American Statistician*, vol. 39, n° 4 (Pt. 1), pp. 295–297.

Liste des tableaux

1.1	Couverture spatiale et temporelle du système de collecte de statistiques de pêche artisanale (d'après Ferraris 1993a, [47])	24
1.2	Récapitulatif des diverses valeurs estimées à partir du plan d'échantillonnage (d'après Laloë 1985, [86])	27
1.	Principales espèces marines capturées par les ligneurs sénégalais.	33
2.	Décomposition de l'inertie suivant les sous-espaces orthogonaux engendrés par les variables instrumentales.	33
3.	Décomposition de l'inertie suivant les sous-espaces orthogonaux engendrés par les composantes principales.	43
4.	Décomposition de l'inertie suivant les sous-espaces orthogonaux engendrés par le modèle retenu.	44
5.	Correlations pour chacune des espèces et pour les deux modèles entre les variables ajustées et les variables initiales.	45
2.1	Résultats des tests de permutation relativement à chacun des effets simples.	50
2.2	Expression des termes de la somme décomposant $E(tr(AW)^2)$ sous l'hypothèse de permutabilité (première partie).	53
2.3	Expression des termes de la somme décomposant $E(tr(AW)^2)$ sous l'hypothèse de permutabilité (seconde partie)	54
3.1	Valeurs des paramètres pour l'exemple 1 : un modèle à une tactique exploitant un stock.	73
3.2	Valeurs des paramètres pour le second exemple : un modèle à deux tactiques exploitant un stock.	77
3.3	Exemple d'un modèle LS à une stratégie, une tactique et un stock : ajustement des captures par unité d'effort de rock-lobster (<i>Jassus edwardii</i>). Pour chacun des trois critères considérés : estimations et intervalles de confiance pour un coefficient de sécurité de 95 %.	81

3.4	Exemple d'un modèle LS exprimé comme un modèle à équations simultanées linéaires : ajustement par les moindres carrés récursifs sur des données simulées. Estimations et intervalles de confiance pour un coefficient de sécurité de 95 %	85
4.1	Récapitulatif des composantes et variables du modèle LS.	96
4.2	Algorithme d'estimation des paramètres: méthode de Newton	103
4.3	Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS: le modèle à quatre tactiques et cinq stocks ayant servi à générer les données.	108
4.4	Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS: le modèle à une tactique considéré (modèle 1) pour ajuster les données générées par le modèle défini dans le tableau ??	110
4.5	Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS: le modèle à deux tactiques considéré (modèle 2) pour ajuster les données générées par le modèle défini dans le tableau ??	111
5.1	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal : une liste d'événements intervenus dans la pêcherie de 1974 à 1992.	126
5.2	Ajustement du modèle LS pour deux ports de la grande côte su Sénégal: définition des engins considérés pour définir le jeu de données. Les codes et les dénominations sont ceux employés par Ferraris <i>et al.</i> (1993a, [47]).	128
5.3	Ajustement du modèle LS pour deux ports de la grande côte su Sénégal: définition des groupes d'espèces considérés pour définir le jeu de données. Les codes et noms sont ceux employés par Ferraris <i>et al.</i> (1993a, [47]).	129
5.4	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal: composition des groupes d'espèces pour chacune des combinaisons lieu de débarquement × engin.	130
5.5	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal: définition des tactiques du premier modèle considéré.	132
5.6	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal: définition des stratégies pour le premier modèle. (L. gl. = lignes glacières, Fts dts = filets dormants, Ind.=industriels, H.G.C=hors grande côte, St-L.=Saint-Louis, K.=Kayar)	132
5.7	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal : nombre de paramètres pour le modèle considéré avant l'ajustement sans et avec les contraintes introduites : I. Aucune contrainte; II. nullité de certaines capturabilités; III. modèle initial.	139
5.8	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal: définition des tactiques pour modèle retenu.	150

5.9	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal : définition des stratégies pour modèle retenu. (L. gl. = lignes glacières, Fts dts = filets dormants, Ind.=industriels, H.G.C=hors grande côte, St-L.=Saint-Louis, K.=Kayar)	150
C.1	Ajustement du modèle Laloë-Samba à deux ports de la grande côte du Sénégal : valeurs des biomasses initiales, biomasses vierges, taux de croissance et prix par stock pour le modèle retenu.	225
C.2	Ajustement du modèle Laloë-Samba à deux ports de la grande côte du Sénégal : valeurs des capturabilités pour le modèle retenu.	226
C.3	Ajustement du modèle Laloë-Samba à deux ports de la grande côte du Sénégal : valeurs des coûts (FCFA) de mise en œuvre des tactiques pour le modèle retenu.	226
C.4	Ajustement du modèle Laloë-Samba à deux ports de la grande côte du Sénégal : liste des changements retenus.	227

Table des figures

1.1	Situation géographique de la zone d'étude. Réalisation : Barbara Chollet.	22
1.2	Débarquements de la pêche artisanale sénégalaise par type d'engin pour les années 1981 à 1991 (d'après Ferraris 1992, [44]). Div = divers, FME= filets maillants encerclants, ST= sennes tournantes, PGL= pirogues lignes glacières, FD= filets dormants, PML= pirogues motorisées lignes; PVL= pirogues voiles lignes.	23
1.3	Schéma du plan d'échantillonnage	25
1.	Analyse en composantes principales de <i>Y</i> relativement à l'effet quinzaine. Représentation des espèces dans le plan principal.	34
2.	Reconstitution de l'effet saisonnier de <i>Istiophorus albicans</i> par la première composante principale de l'ACPVI relativement à l'effet quinzaine.	35
3.	Reconstitution de l'effet saisonnier de <i>Alectis alexandrinus</i> et <i>Epinephelus guaza</i> par les composantes principales de l'ACPVI relativement à l'effet quinzaine. (a) par la première composante principale, (b) par la seconde composante principale, (c) par les deux premières composantes principales.	36
4.	Analyse en composantes principales de <i>Y</i> relativement à l'effet année. Représentation des espèces dans le plan principal.	37
5.	Analyse en composantes principales de <i>Y</i> . Représentation des espèces dans le plan principal.	38
6.	Analyse en composantes principales de <i>Y</i> relativement à l'interaction Port × Quinzaine. Représentation des espèces dans le plan principal.	39
7.	Reconstitution de l'interaction Port × Quinzaine pour <i>Coryphaena hippurus</i> par les premières composantes principales des ACPVI relatives aux effets simples et à l'interaction.	40
8.	Reconstitution de l'interaction Port × Quinzaine pour <i>Pomatomus saltatrix</i> par les premières composantes principales des ACPVI relatives aux effets simples et à l'interaction.	40
9.	Analyse en composantes principales de <i>Y</i> relativement à l'interaction Port × Année. Représentation des espèces dans le plan principal.	41

10. Analyse en composantes principales de Y relativement à l'interaction Année × Quinzaine. Représentation des espèces dans le plan principal.	42
11. Analyse en composantes principales de Y relativement à l'interaction Port × Année × Quinzaine. Représentation des espèces dans le plan principal. . .	43
12. (a) Captures par unité d'effort pour <i>Pomatomus saltatrix</i> , (b) Valeurs ajustées par les composantes principales et le modèle linéaire pour les trois sources de variation. (c) Valeurs ajustées par les composantes principales et le modèle linéaire pour les effets principaux et l'interaction Port × Quinzaine (d) Valeurs ajustées par les composantes principales et le modèle linéaire pour les effets principaux.	44
3.1 Principe du modèle.	60
3.2 Modèle à un stock et à une tactique où l'effort est fixé: graphe de B_t en fonction de t , pour 5 valeurs de biomasses initiales: a) 666660 kg, b) 3333300 kg, c) 6666600 kg, d) 16666500 kg, e) 33333000 kg. Simulation sur 15 années avec pas de temps mensuel.	74
3.3 Un modèle à deux tactiques exploitant un stock: tracé des effectifs de la première tactique en fonction du temps et en fonction de la biomasse du stock pour deux valeurs du paramètre μ ($\mu = 0.4$ et $\mu = 0.9$). Simulation sur 11 années avec pas de temps mensuel.	76
3.4 Exemple d'un modèle LS à une stratégie, une tactique et un stock: ajustement des captures par unité d'effort de rock-lobster (<i>Jassus edwardii</i>) pour chacun des critères considérés: a) données observées; b) moindres carrés; c) maximum de vraisemblance; d) transformation $\ln(1+x)$	80
3.5 Représentation sous la forme espace-état du modèle LS. Estimation récursive des quatre paramètres de capturabilité d'un modèle à deux tactiques, deux stocks et une stratégie. 1: estimations de q_1 ; 2: estimations de q_2 ; 3: estimations de q_3 ; 4: estimations de q_4	92
4.1 Confrontation du modèle LS aux données observées.	98
4.2 Schéma de la procédure de calcul des dérivées partielles.	106
4.3 Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS: profils d'inaccessibilités pour le modèle ayant servi à générer les données. En trait plein les profils d'inaccessibilités des tactiques 1, 2, et 4 envers chacun des stocks. En pointillés les profils d'inaccessibilité de la tactique 3 envers le stock 4. . .	108

4.4	Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS : séries chronologiques analogues à celles qui seraient observées construites à partir des sorties du modèle considéré. De haut en bas, efforts "observés" et captures par unité d'effort correspondantes pour les stocks 1 à 5 (données transformées en $\ln(1+x)$).	109
4.5	Schéma de l'exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS.	110
4.6	Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS : séries simulées (traits pleins) et séries ajustées (pointillés) en considérant le modèle 1. De haut en bas, efforts et captures par unité d'effort correspondantes pour les stocks 1 à 5 (données transformées en $\ln(1+x)$).	111
4.7	Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS : séries simulées (traits pleins) et séries ajustées (pointillés) en considérant le modèle 2. De haut en bas, efforts et captures par unité d'effort correspondantes pour les stocks 1 à 5 (données transformées en $\ln(1+x)$).	112
4.8	Exemple illustrant le problème de l'identification du modèle LS : de haut en bas efforts puis captures par unité d'effort pour les stocks 1 à 5. Séries "observées" en traits pleins, séries ajustées à l'aide du modèle 1 en pointillés et séries ajustées à l'aide du modèle 2 en traits pointillés. Représentation sur la période ayant servi à l'ajustement (an 1 à an14) et après la multiplication par 2 du prix du quatrième stock (an 15 à an 29).	113
4.9	Exemple illustrant le problème de l'identifiabilité des paramètres du modèle LS : séries simulées (trait plein) et séries ajustées. Les traits pointillés (resp. les pointillés) correspondent à l'ajustement obtenu dans le premier cas (resp. dans le second cas). De haut en bas, efforts et captures par unité d'effort correspondantes pour les stocks 1 à 5 (données transformées en $\ln(1+x)$).	115
4.10	Exemple illustrant le problème de l'identifiabilité des paramètres du modèle LS : Tracé pour une valeur de la biomasse vierge de la première espèce fixée à $3.3 \cdot 10^7$ kg (traits pleins) et à $4 \cdot 10^7$ kg (traits pointillés) des courbes de niveau correspondant aux valeurs prises par la fonction objectif lorsque l'on fait varier les deux valeurs de capturabilités dans l'intervalle $[0, 3.5 \cdot 10^{-6}]$	116
4.11	Schéma de prévision par la méthode de Box et Jenkins (d'après Gourieroux 1995, [63])	118
4.12	Schéma d'ajustement du modèle LS aux données échantillonnées	119
5.1	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal : schéma d'ajustement du modèle LS aux données observées.	131
5.2	Capture par unité d'effort du stock de dorades profondes par les lignes à Kayar de 1974 à 1992 (transformation logarithmique des données).	136

5.3	Captures pour le stock de dorades profondes pour chacun des lieux de pêche de Kayar, par période (1974-1982 et 1983-1992) et par saison de pêche (saison froide: novembre à mai, saison chaude: mai à octobre). A: saison froide de 1974 à 1982. B: saison chaude de 1974 à 1982. C: saison froide de 1983 à 1992. D: saison chaude de 1983 à 1992. Les codes des zones de pêche sont ceux utilisés par Ferraris <i>et al.</i> (1993a, [47]). On trouvera une carte des zones de pêche dans Laloë et Samba (1989, [93]) p. 50 et 52.	137
5.4	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes à Saint-Louis: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas: efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, chinchards, tassergal, poissons filet dormant et poulpe.	140
5.5	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes à Kayar: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas: efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, dorades profondes, chinchards, tassergal, poissons filet dormant, poulpe et voiliers.	141
5.6	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes glacières Saint-Louis: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas: efforts des lignes glacières et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, tassergal, poissons filet dormant et poulpe.	143
5.7	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les sennes tournantes à Saint-Louis: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas: efforts des sennes tournantes et captures par unité d'effort pour les stocks de chinchards, tassergal, sardinelle ronde, sardinelle plate et caranx.	144
5.8	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les sennes tournantes à Kayar: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas: efforts des sennes tournantes et captures par unité d'effort pour les stocks de chinchards, tassergal, sardinelles rondes et sardinelles plates.	145
5.9	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les filets dormants à Saint-Louis: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas: efforts des filets dormants et captures par unité d'effort pour les stocks de poissons filet dormant, sole et requins-raies.	146

- 5.10 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les filets dormants à Kayar : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) après 20 étapes d'ajustement. De haut en bas : efforts des filets dormants et captures par unité d'effort pour les stocks de poissons filet dormant, sole et requins-raies. 147
- 5.11 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Ajustement du paramètre relatif à l'augmentation de la capturabilité du tiof pour la tactique ligne glacière à partir de 1986. Représentation de la série des efforts des lignes glacières (traits plein) et des reconstitutions par le modèle LS avant (traits pointillés) et après (pointillés) l'ajustement. 148
- 5.12 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Représentation de la série des efforts des sennes tournantes à Kayar (trait plein) et de ses reconstitutions à l'aide du modèle LS avant et après la suppression de la tactique senne tassergal à Kayar (resp. en traits pointillés et en pointillés). 149
- 5.13 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes à Saint-Louis : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas : efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, chinchards, tassergal, poissons filets dormants et poulpe. 151
- 5.14 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes à Kayar : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas : efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, dorades profondes, chinchards, tassergal, poissons filets dormants, poulpe et voiliers. 152
- 5.15 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes glacières : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas : efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, chinchards, tassergal, poissons filets dormants, et poulpe. 153
- 5.16 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les sennes tournantes à Saint-Louis : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas : efforts des sennes tournantes et captures par unité d'effort pour les stocks de chinchards, tassergal, sardinelle ronde, sardinelle plate et caranx. 154

5.17	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les sennes tournantes à Kayar : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas : efforts des sennes tournantes et captures par unité d'effort pour les stocks de chinchards, tassergal, sardinelle ronde, sardinelle plate et caranx.	155
5.18	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les filets dormants à Saint-Louis : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas : efforts des filets dormants à Saint-Louis et captures par unité d'effort pour les stocks de poissons filets dormants, sole et requins-raies.	156
5.19	Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les filets dormants à Kayar : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu. De haut en bas : efforts des filets dormants à Kayar et captures par unité d'effort pour les stocks de poissons filets dormants, sole et requins-raies.	156
6.1	Tracé pour chacune des 43 séries des résidus réduits en fonction des valeurs prédites. Chaque colonne correspond à une combinaison lieu de débarquement × engin, soit de gauche à droite les lignes à Saint-Louis, les lignes à Kayar, les lignes glacières, les sennes-tournantes à Saint-Louis, les sennes tournantes à Kayar, les filets dormants à Saint-Louis, les filets dormants à Kayar. La première ligne correspond à la série des efforts, les lignes suivantes aux séries des captures par unité d'effort associées. Le trait vertical à la droite de chaque graphique indique l'importance de l'intervalle de variation des résidus rapporté à l'intervalle maximum pour l'ensemble des séries. Le trait horizontal au dessus des graphiques relatifs aux efforts (resp. aux captures par unité d'effort) indique l'importance de l'intervalle de variation des valeurs prédites rapporté à l'intervalle maximum pour l'ensemble des séries des efforts en pointillés (resp. pour l'ensemble des séries des captures par unité d'effort en trait plein).	161
6.2	Tracé pour chacune des 43 séries des des résidus réduits en fonction du même résidu un pas de temps auparavant. Chaque colonne correspond à une combinaison lieu de débarquement × engin, soit de gauche à droite les lignes à Saint-Louis, les lignes à Kayar, les lignes glacières, les sennes-tournantes à Saint-Louis, les sennes tournantes à Kayar, les filets dormants à Saint-Louis, les filets dormants à Kayar. La première ligne correspond à la série des efforts, les lignes suivantes aux séries des captures par unité d'effort associées.	162

- 6.3 Tracé pour chacune des 43 séries des histogrammes des résidus réduits. Chaque colonne correspond à une combinaison lieu de débarquement \times engin, soit de gauche à droite les lignes à Saint-Louis, les lignes à Kayar, les lignes glacières, les sennes-tournantes à Saint-Louis, les sennes tournantes à Kayar, les filets dormants à Saint-Louis, les filets dormants à Kayar. La première ligne correspond à la série des efforts, les lignes suivantes aux séries des captures par unité d'effort associées. 163
- 6.4 Tracé pour chacune des 7 séries d'efforts des résidus réduits en fonction des variables prédites par le modèle dans le cas où on émet l'hypothèse de non homogénéité des variances des résidus suivant le niveau pris par la variable prédictrice (cas 1, première ligne) et dans le cas où l'on fait l'hypothèse d'homogénéité (cas2, seconde ligne). En colonne, et de gauche à droite les lignes à Saint-Louis, les lignes à Kayar, les lignes glacières, les sennes tournantes à Saint-Louis, les sennes tournantes à Kayar, les filets dormants à Saint-Louis, les filets dormants à Kayar. 164
- 6.5 Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison lignes \times Saint-Louis soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année \times Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires. 166
- 6.6 Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison lignes \times Kayar soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année \times Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires. 167
- 6.7 Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison lignes glacières \times Saint-Louis soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année \times Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires. 168

6.8	Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison sennes tournantes × Saint-Louis soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année×Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires.	169
6.9	Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison sennes tournantes × Kayar soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année×Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires.	170
6.10	Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison filet dormant × Saint-Louis soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année×Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires.	171
6.11	Représentation dans le plan principal des variables relatives à la combinaison filet dormant × Kayar soit une série d'effort et les séries de captures par unité d'effort associées, pour a) l'ACP normée b) l'ACPVI / Quinzaine c) l'ACPVI / Année; d) l'ACPVI / Année×Quinzaine. En grands caractères et en trait plein les variables observées à partir desquelles ont été réalisées les analyses. En petits caractères et en pointillés les variables ajustées par le modèle considérées comme variables supplémentaires.	172
6.12	Répartition par tactique des efforts lignes à Saint-Louis et des efforts de la tactique ligne hors grande côte pour la stratégie "ligne Saint-Louis". Les données correspondent au modèle obtenu après ajustement.	174
6.13	Graphe du haut : profils d'inaccessibilité des tactiques. Graphe du bas : profils correspondants pour les captures par sorties observées (voir texte) De bas en haut, les stocks considérés (voir tableau 5.3). De gauche à droite, les tactiques (graphe du haut) ou les strates du plan d'échantillonnage (graphe du bas) associées au stock considéré. Voir tableau 5.8 pour la dénomination des tactiques.	175

- 7.1 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes à Saint-Louis: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas: efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, chinchards, tassergal, poissons filets dormants et poulpe. 179
- 7.2 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes à Kayar: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas: efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, dorades profondes, chinchards, tassergal, poissons filets dormants, poulpe et voiliers. 180
- 7.3 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les lignes glacières: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas: efforts des lignes et captures par unité d'effort pour les stocks de tiofs, dorades côtières, chinchards, tassergal, poissons filets dormants, et poulpe. 181
- 7.4 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les sennes tournantes à Saint-Louis: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas: efforts des sennes tournantes et captures par unité d'effort pour les stocks de chinchards, tassergal, sardinelle ronde, sardinelle plate et caranx. 182
- 7.5 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les sennes tournantes à Kayar: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas: efforts des sennes tournantes et captures par unité d'effort pour les stocks de chinchards, tassergal, sardinelle ronde, sardinelle plate et caranx. 183
- 7.6 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les filets dormants à Saint-Louis: données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas: efforts des filets dormants à Saint-Louis et captures par unité d'effort pour les stocks de poissons filets dormants, sole et requins-raies. 184

7.7 Ajustement du modèle LS à deux ports de la grande côte du Sénégal. Les filets dormants à Kayar : données observées (trait plein) et données ajustées par le modèle (pointillés) pour l'ajustement retenu, prolongées 11 années en introduisant trois événements (voir texte). De haut en bas : efforts des filets dormants à Kayar et captures par unité d'effort pour les stocks de poissons filets dormants, sole et requins-raies. 184

Annexe A

Proposition 1 du chapitre 3

Proposition A.0.1 *La solution de l'équation différentielle*

$$\begin{cases} \frac{dB_t}{dt} = r B_t \left(1 - \frac{B_t}{B_v}\right) - \sum_{j=1}^J q_j f_j(B_t - \alpha_{j,m} B_v) , \\ B_{t_0} = B_0 \end{cases}$$

$$\text{vaut : } B_t = \frac{r_1 \alpha K e^{-a\alpha t} - r_2}{\alpha K e^{-a\alpha t} - 1}$$

$$\text{où l'on pose: } \begin{cases} a = -\frac{r}{B_v}; & \Delta = b^2 - 4ac \geq 0 \text{ car } c \geq 0 \text{ et } a \leq 0 \\ b = r - \sum_{j=1}^J q_j f_j & r_1 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a} \\ c = \sum_{j=1}^J q_j f_j \alpha_{j,m} B_v & r_2 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a}. \\ \alpha = r_1 - r_2 = \frac{\sqrt{\Delta}}{a} \leq 0 \end{cases}$$

Démonstration (d'après Jolivet (1983, [80])):

$$\begin{aligned} \frac{dB_t}{dt} &= r B_t \left(1 - \frac{B_t}{B_v}\right) - \sum_{j=1}^J q_j f_j(B_t - \alpha_{j,m} B_v) \\ \Leftrightarrow \frac{dB}{dt} &= -\frac{r}{B_v} B_t^2 + (r - \sum_{j=1}^J q_j f_j) B_t + \sum_{j=1}^J q_j f_j \alpha_{j,m} B_v \quad (*) \end{aligned}$$

$$\text{Posons } \begin{cases} a = -\frac{r}{B_v} \\ b = r - \sum_{j=1}^J q_j f_j \\ c = \sum_{j=1}^J q_j f_j \alpha_{j,m} B_v. \end{cases}$$

Nous avons alors $\Delta = b^2 - 4ac \geq 0$ car $c \geq 0$ et $a \leq 0$.

$$\text{Notons } \begin{cases} r_1 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a} \\ r_2 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a} \\ \alpha = r_1 - r_2 = \frac{\sqrt{\Delta}}{a} \leq 0. \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
\text{Alors : } (*) &\iff \frac{dB_t}{dt} = a(B_t - r_1)(B_t - r_2) \\
&\iff \frac{dy}{dt} = a y (y + \alpha) && \text{si l'on pose } y = B_t - r_1 \\
&\iff \frac{1}{y^2} \frac{dy}{dt} = a(1 + \frac{\alpha}{y}) \\
&\iff \frac{-du}{dt} = a(1 + \alpha u) && \text{en posant } u = \frac{1}{y} \\
&\iff \frac{du}{dt} + a\alpha u = -a.
\end{aligned}$$

La solution de l'équation sans second membre est alors ($a\alpha \neq 0$)

$$u(t) = Ae^{-a\alpha t},$$

une solution particulière de l'équation sans second membre étant $-\frac{1}{\alpha}$, nous en déduisons l'expression de la solution générale:

$$u(t) = Ae^{-a\alpha t} - \frac{1}{\alpha}.$$

Expression de A suivant les conditions initiales (t_i):

Au temps t_i , nous avons:

$$\begin{aligned}
&u(t_i) = Ae^{-a\alpha t_i} - \frac{1}{\alpha} \\
\iff \frac{1}{B_{t_i} - r_1} &= Ae^{-a\alpha t_i} - \frac{1}{\alpha} \\
\iff Ae^{-a\alpha t_i} &= \frac{1}{B_{t_i} - r_1} + \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{B_{t_i} - r_1} + \frac{1}{r_1 - r_2}, \text{ le second membre sera noté } K, \\
\iff A &= Ke^{a\alpha t_i}
\end{aligned}$$

Ainsi, $u(t_{i+1}) = Ke^{-a\alpha\Delta t} - \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha}(\alpha Ke^{-a\alpha\Delta t} - 1)$ et en posant $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ on obtient :

$$y(t_{i+1}) = \frac{1}{u_{t_{i+1}}} = \frac{\alpha}{\alpha Ke^{-a\alpha\Delta t} - 1}.$$

Nous en déduisons

$$\begin{aligned}
&y(t_{i+1}) = B(t_{i+1}) - r_1 \\
\iff B(t_{i+1}) &= y(t_{i+1}) + r_1 \\
\iff B(t_{i+1}) &= r_1 + \frac{\alpha}{\alpha Ke^{-a\alpha\Delta t} - 1} \\
\iff B(t_{i+1}) &= \frac{r_1 \alpha Ke^{-a\alpha\Delta t} - r_2}{\alpha Ke^{-a\alpha\Delta t} - 1} = g(B_{k,t_i}, (f_{j,t_{i+1}})_j, \Theta) \quad \square
\end{aligned}$$

Annexe B

Expression des dérivées partielles relative à l'algorithme d'ajustement utilisé.

Proposition B.0.2 Pour tout $k = 1, \dots, K$, $j = 1, \dots, J$ et $t_i = t_1, \dots, t_n$ nous avons :

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_{j,k,t_i}}{\partial \theta} &= q_{j,k} \frac{\partial B_{k,t_i}}{\partial \theta} \quad \forall \theta \neq (B_{v_k})_k, (q_{j,k})_{j,k}, (\alpha_{j,k,m})_{j,k,m}, \\ \frac{\partial r_{j,k,t_i}}{\partial B_{v_{k_*}}} &= \begin{cases} q_{j,k} \frac{\partial B_{k,t_i}}{\partial B_{v_{k_*}}} & \text{si } k_* \neq k \\ q_{j,k} \left(\frac{\partial B_{k,t_i}}{\partial B_{v_k}} - \alpha_{j,k,m} \right) & \text{si } k_* = k \end{cases}, \\ \frac{\partial r_{j,k,t_i}}{\partial q_{j_*,k_*}} &= \begin{cases} q_{j,k} \frac{\partial B_{k,t_i}}{\partial q_{j_*,k_*}} & \text{si } (j_*, k_*) \neq (j, k) \\ B_{k,t_i} - \alpha_{j,k,m} B_{v_k} + q_{j,k} \frac{\partial B_{k,t_i}}{\partial q_{j,k}} & \text{si } (j_*, k_*) = (j, k) \end{cases}, \\ \frac{\partial r_{j,k,t_i}}{\partial \alpha_{j_*,k_*,m_*}} &= \begin{cases} q_{j,k} \frac{\partial B_{k,t_i}}{\partial \alpha_{j_*,k_*,m_*}} & \text{si } (j_*, k_*, m_*) \neq (j, k, m) \\ q_{j,k} \left(\frac{\partial B_{k,t_i}}{\partial \alpha_{j,k,m}} - B_{v_k} \right) & \text{si } (j_*, k_*, m_*) = (j, k, m) \end{cases}. \end{aligned}$$

Proposition B.0.3 Pour tout $j = 1, \dots, J$,

$$\frac{\partial f_{j,t_i}}{\partial \theta} = \sum_{s \in S} \frac{\partial f_{j,s,t_i}}{\partial \theta}.$$

Ces expressions sont fonction de $(\frac{\partial B_{k,t_i}}{\partial \theta})_k$ et de $(\frac{\partial f_{j,s,t_i}}{\partial \theta})_{j,s}$.

Proposition B.0.4 Pour tout $\theta \in \Theta$ nous avons :

$$\frac{\partial B_{k,t_i}}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{A}{B} \right) = \frac{1}{B^2} \left(\frac{\partial A}{\partial \theta} B - \frac{\partial B}{\partial \theta} A \right).$$

$$o\dot{u}^1 \quad A = r_1 \alpha K e^{-a\alpha} - r_2,$$

$$B = \alpha K e^{-a\alpha} - 1,$$

$$\frac{\partial A}{\partial \theta} = e^{-a\alpha} (r_1' \alpha K + r_1 \alpha' K + r_1 \alpha K' + r_1 \alpha K (-a'\alpha - a\alpha')) - r_2',$$

$$\frac{\partial B}{\partial \theta} = e^{-a\alpha} (\alpha' K + \alpha K' + \alpha K (-a'\alpha - a\alpha')),$$

$$r_1' = \frac{1}{2a^2} \left[(-b' + \frac{\Delta'}{2\sqrt{\Delta}}) a - a'(-b + \sqrt{\Delta}) \right],$$

$$r_2' = \frac{1}{2a^2} \left[(-b' - \frac{\Delta'}{2\sqrt{\Delta}}) a - a'(-b - \sqrt{\Delta}) \right],$$

$$\Delta' = 2bb' - 4a'c - 4c'a,$$

$$\alpha' = r_1' - r_2',$$

$$K' = \frac{r_1' - B'_{k,t_{i-1}}}{(B_{k,t_{i-1}} - r_1)^2} - \frac{\alpha'}{\alpha^2}.$$

Proposition B.0.5

$$\forall \theta \neq \mu \quad \frac{\partial f_{j,s,t_i}}{\partial \theta} = \mu \frac{\partial f_{j,s,t_{i-1}}}{\partial \theta} + N_s (1 - \mu) \frac{\frac{\partial R_{j,t_i}^\pi}{\partial \theta} \sum_{j \in \mathcal{J}(s)} R_{j,t_i}^\pi - R_{j,t_i}^\pi \sum_{j \in \mathcal{J}(s)} \frac{\partial R_{j,t_i}^\pi}{\partial \theta}}{(\sum_{j \in \mathcal{J}(s)} R_{j,t_i}^\pi)^2},$$

$$\frac{\partial f_{j,s,t_i}}{\partial \mu} = f_{j,s,t_{i-1}} - N_s \frac{R_{j,t_i}^\pi}{(\sum_{j \in \mathcal{J}(s)} R_{j,t_i}^\pi)^2} + \mu \frac{\partial f_{j,s,t_i}}{\partial \mu} + N_s (1 - \mu) \frac{\frac{\partial R_{j,t_i}^\pi}{\partial \mu} \sum_{j \in \mathcal{J}(s)} R_{j,t_i}^\pi - R_{j,t_i}^\pi \sum_{j \in \mathcal{J}(s)} \frac{\partial R_{j,t_i}^\pi}{\partial \mu}}{(\sum_{j \in \mathcal{J}(s)} R_{j,t_i}^\pi)^2}$$

$$o\dot{u} \quad \frac{\partial R_{j,t_i}^\pi}{\partial \theta} = 1/2 \left(\frac{\partial R_{j,t_{i-1}}}{\partial \theta} + \frac{\partial R_{j,t_{i-1}/\Delta t}}{\partial \theta} \right).$$

Ces expressions sont fonctions de $(\frac{\partial a_k}{\partial \theta})_k, (\frac{\partial b_k}{\partial \theta})_k, (\frac{\partial c_k}{\partial \theta})_k, (\frac{\partial R_{j,t_{i-1}}}{\partial \theta})_j$ et $(\frac{\partial R_{j,t_{i-1}/\Delta t}}{\partial \theta})_j$.

Proposition B.0.6

$$\frac{\partial a_k}{\partial \theta} = 0 \quad \forall \theta \neq (r_k)_k, (Bv_k)_k,$$

$$\frac{\partial a_k}{\partial Bv_{k_*}} = \begin{cases} 0 & \text{si } k_* \neq k \\ \frac{r_k}{(Bv_k)^2} & \text{si } k_* = k \end{cases},$$

$$\frac{\partial a_k}{\partial r_{k_*}} = \begin{cases} 0 & \text{si } k_* \neq k \\ \frac{-1}{Bv_k} & \text{si } k_* = k \end{cases}.$$

Proposition B.0.7

$$\frac{\partial b_k}{\partial \theta} = -\sum_j q_{j,k} \frac{\partial f_{j,t_1}}{\partial \theta} \quad \forall \theta \neq (q_{j,k})_{j,k}, (r_k)_k,$$

$$\frac{\partial b_k}{\partial q_{j_*,k_*}} = \begin{cases} -f_{j_*,t_1} - \sum_j q_{j,k} \frac{\partial f_{j,t_1}}{\partial q_{j_*,k_*}} & \text{si } k_* = k \\ -\sum_j q_{j,k} \frac{\partial f_{j,t_1}}{\partial q_{j_*,k_*}} & \text{si } k_* \neq k \end{cases},$$

$$\frac{\partial b_k}{\partial r_{k_*}} = \begin{cases} -\sum_j q_{j,k} \frac{\partial f_{j,t_1}}{\partial r_{k_*}} & \text{si } k_* \neq k \\ 1 - \sum_j q_{j,k} \frac{\partial f_{j,t_1}}{\partial r_k} & \text{si } k_* = k \end{cases}.$$

Proposition B.0.8

$$\frac{\partial c_k}{\partial \theta} = \sum_j q_{j,k} \alpha_{j,k,m} Bv_k \frac{\partial f_{j,t_1}}{\partial \theta} \quad \forall \theta \neq (Bv_k)_k, (q_{j,k})_{j,k}, (\alpha_{j,k,m})_{j,k,m}.$$

$$\frac{\partial c_k}{\partial Bv_{k_*}} = \begin{cases} \sum_j q_{j,k} \alpha_{j,k,m} (f_{j,t_1} + Bv_k \frac{\partial f_{j,t_1}}{\partial Bv_k}) & \text{si } k_* = k \\ \sum_j q_{j,k} \alpha_{j,k,m} Bv_k \frac{\partial f_{j,t_1}}{\partial Bv_{k_*}} & \text{si } k_* \neq k \end{cases},$$

$$\frac{\partial c_k}{\partial q_{j_*,k_*}} = \begin{cases} \sum_j q_{j,k} \alpha_{j,k,m} Bv_k \frac{\partial f_{j,t_1}}{\partial q_{j_*}^k} + f_{j_*,t_1} \alpha_{j_*,k_*,m} Bv_k & \text{si } k_* = k \\ \sum_j q_{j,k} \alpha_{j,k,m} Bv_k \frac{\partial f_{j,t_1}}{\partial q_{j_*}^k} & \text{si } k_* \neq k \end{cases},$$

$$\frac{\partial c_k}{\partial \alpha_{j_*,k_*,m_*}} = \begin{cases} \sum_j q_{j,k} \alpha_{j,k,m} Bv_k \frac{\partial f_{j,t_1}}{\partial \alpha_{j_*,k_*,m_*}} + f_{j_*,t_1} q_{j_*}^k Bv_k & \text{si } (k_*, m_*) = (k, m) \\ \sum_j q_{j,k} \alpha_{j,k,m} Bv_k \frac{\partial f_{j,t_1}}{\partial \alpha_{k_*,j_*,m_*}} & \text{si } (k_*, m_*) \neq (k, m) \end{cases}.$$

Proposition B.0.9 $\forall \theta \in \Theta,$

$$\frac{\partial R_{j,t_i}}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \exp(\rho(\sum_k P_k r_{j,k,t_i} - C_j)) = \frac{\partial \exp(A_{j,t_i})}{\partial \theta} = \frac{\partial A_{j,t_i}}{\partial \theta} \exp(A_{j,t_i}).$$

en posant $A_{j,t_i} = \rho(\sum_k P_k r_{j,k,t_i} - C_j)$.

Proposition B.0.10

$$\frac{\partial A_{j,t_i}}{\partial \theta} = \rho \sum_k P_k \frac{\partial r_{j,k,t_i}}{\partial \theta} \quad \forall \neq (P_k)_k, (C_j)_j, \rho,$$

$$\frac{\partial A_{j,t_i}}{\partial P_{k_*}} = \rho(r_{j,k_*,t_i} + \sum_k P_k \frac{\partial r_{j,k,t_i}}{\partial P_{k_*}}),$$

$$\frac{\partial A_{j,t_i}}{C_{j_*}} = \begin{cases} \rho \sum_k P_k \frac{\partial r_{j,k,t_i}}{\partial C_{j_*}} & \text{si } j_* \neq j \\ \rho(\sum_k P_k \frac{\partial r_{j,k,t_i}}{\partial C_j} - 1) & \text{si } j_* = j \end{cases},$$

$$\frac{\partial A_{j,t_i}}{\partial \rho} = \rho \sum_k P_k \frac{\partial r_{j,k,t_i}}{\partial \rho} + \frac{A_{j,t_i}}{\rho}.$$

Annexe C

Valeurs des paramètres du modèle à l'issue du dernier ajustement

On se reportera au texte (tableau 6.3) pour les profils d'inaccessibilités

TAB. C.1 – Ajustement du modèle Laloë-Samba à deux ports de la grande côte du Sénégal : valeurs des biomasses initiales, biomasses vierges, taux de croissance et prix par stock pour le modèle retenu.

Stock \ Paramètre	B_0 (tonnes)	B_v	M	Prix (FCFA)
Tiofs	30000	29447	0.0125	622
Dorades côtières	20000	43700	0.0208	311
Dorades profondes	10000	16142	0.0167	211
Chinchards	100000	200000	0.0208	211
Tassergal	33333	66666	0.0125	303
Poissons filet dormant	10000	15000	0.0167	29
Poulpe	0.25	0.5	2.0833	413
Voiliers	40000	50000	0.0083	231
Sardinelle ronde	50000	100000	0.0417	70
Sardinelle plate	25000	50000	0.0417	43
Caranx	10000	20000	0.0167	69
Soles	2500	3000	0.0208	448
Requins-Raies	27000	30000	0.0125	35

TAB. C.2 – Ajustement du modèle Laloë-Samba à deux ports de la grande côte du Sénégal : valeurs des capturabilités pour le modèle retenu.

tactique \ stocks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
a	0	0	0	0	2 4 e-6	0	0	0	0	0	0	0	0
b	2 5 e-6	5 9 e-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c	5 3 e-7	2 4 e-6	0	9 4 e-7	0	3 5 e-6	0	0	0	0	0	0	0
d	0	0	0	0	0	0	7 5 e-7	0	0	0	0	0	0
e	0	0	0	0	2 9 e-6	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	8 4 e-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
g	0	0	0	0	0	0	0	7 6 e-6	0	0	0	0	0
h	1 8 e-6	1 4 e-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i	0	1 5 e-6	0	1 4 e-6	0	2 2 e-6	0	0	0	0	0	0	0
j	0	0	0	0	0	0	5 8 e-7	0	0	0	0	0	0
k	8 e-6	1 7 e-6	0	1 6 e-8	3 7 e-8	1 3 e-6	5 e-10	0	0	0	0	0	0
m	0	0	0	3 6 e-7	3 3 e-6	0	0	0	9 4 e-7	3 2 e-6	3 5 e-6	0	0
o	0	0	0	3 9 e-6	2 5 e-6	0	0	0	1 e-6	2 3 e-6	3 7 e-6	0	0
p	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7 6 e-6	0
q	0	0	0	0	0	7 8 e-6	0	0	0	0	0	0	1 1 e-5
r	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 2 e-5	0
s	0	0	0	0	0	1 3 e-5	0	0	0	0	0	0	5 1 e-6
t	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
w	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. C.3 – Ajustement du modèle Laloë-Samba à deux ports de la grande côte du Sénégal : valeurs des coûts (FCFA) de mise en œuvre des tactiques pour le modèle retenu.

tactique	coût	tactique	coût
a	9049	o	17348
b	2800	p	2137
c	1001	q	2709
d	10538	r	17974
e	12462	s	7577
f	10752	t	0
g	7209	u	-3212
h	864	v	-12418
i	5588	w	-24413
j	6218	x	-45024
k	27248	y	-5778
m	5023		

TAB. C.4 – Ajustement du modèle Laloë-Samba à deux ports de la grande côte du Sénégal : liste des changements retenus.

Année	Mois	Modification
1974	1	Pas de tactique glacière (tactique k inaccessible)
	1	Pas de tactiques sennes (tactiques m et o inaccessibles)
	1	Pas de filets dormants soles à Kayar (tactique r inaccessible)
1977	1	Apparition des lignes glacières à Saint-Louis (tactique k)
1979	1	Apparition des sennes tournantes à Kayar (tactique m accessible)
1981	1	Apparition des sennes tournantes à Saint-Louis (tactique o accessible)
	1	Capturabilités des tactiques lignes envers le tassergal divisées par 2
1983	1	Le prix des dorades profondes est multiplié par 1.8
1985	1	Démarrage de la pêche des soles avec des filets dormants à Kayar (tactique r accessible aux stratégies filets dormants et lignes Saint-Louis)
1986	8	multiplication par 1.1 de la capturabilité des glacières sur les tiofs
1989	1	La biomasse du poulpe est multipliée par 100000, la capturabilité de la tactique poulpe à Kayar étant imposée à 0 avant 1989, celle de la tactique d l'étant jusqu'en 1992)
	1	Le prix du tiof est multiplié par 1.03, celui des dorades côtières par 1.03
	1	La tactique k est inaccessible
1990	20	La tactique k est de nouveau accessible
1992	1	Le poulpe devient accessible à Saint-Louis

Annexe D

Programmes sources S-PLUS

Nous donnons ci-dessous les différents programmes nécessaires pour ajuster le modèle LS aux données observées. Nous y distinguons les programmes servant à réaliser une simulation du modèle (*Pesca*, *calc.resp*, *calc.prop*, *calculs*, *calc.B*, *calc.cpue*, *calc.robt*, *maj.rev*), celui nécessaire pour exprimer la valeur de la fonction critère ainsi que les différentes sorties graphiques associées (*SCPesca*), ceux correspondant à l'expression du gradient (*f1*, *f2*, *f3*, *f4*, *f5*, *f6*, *f8*, *f9*, *gradientB*), et enfin le programme permettant de mener un ajustement (*ajust*).

Programme Pesca

```

# fonction Pesca qui réalise une simulation du modèle LS
function(Pa, kobsr=0,kobsf=0,kprocb=0,kprocf=0,gradient=F,
par=c(0),N=T){
#####
#
# Version modifiée du lundi 7 juillet 1997
#
#####
# 1 Liste des paramètres du programme
#
# Pa est une liste de paramètres, rangés dans le fichier Parametres
# Cette liste contient les éléments suivants
#
# Pa$D Liste des fichiers paramètres
#
# Pa$D$effectifs matrice nstrat*4 des coefficients relatifs
# a l'expression logistique des effectifs des stratégies
#
# Pa$D$stock matrice 2 colonnes et nstock lignes
# contenant respectivement M, Bv
# ' biomasses exprimées en kg
#
# Pa$D$prix matrice nstock*ntact dont la j-ième colonne contient
# les prix pratiques à l'encontre des K espèces
#
# Pa$D$cout matrice 5 colonnes et ntact lignes
# contenant les coefficients servant à l'expression des
# couts à chaque pas de temps
#
# Pa$D$se matrice 0/1 des tactiques disponibles
# par stratégie, et des effectifs par stratégie
# ntact+1 colonnes et nstrat lignes
#
# Pa$D$q matrice ntact lignes et nstock colonnes
# des capturabilités des tactiques envers les stocks
# ' capturabilités exprimées en kg/ue
#
# Pa$D$alpha matrice utemps colonnes et ntact*nstock lignes
# des accessibilités des tactiques envers les stocks
#
# Autres paramètres
#
# Pa$ncal nombre d'années de calibrage,
# en conséquence, le nombre d'année des fichiers de sortie
# est égal à Pa$nan-Pa$ncal
#
# Pa$nstrat nombre de stratégies, scalaire
# Pa$nstock nombre de stock considérés, scalaire
# Pa$ntact nombre de tactiques considérées, scalaire
# Pa$utemps nombre de pas de temps sur l'année,
# ex pour un pas de temps mensuel on a Pa$utemps=12
#
# Pa$mu valeur du paramètre Pa$mu, scalaire
# Pa$rho valeur du paramètre Pa$rho, scalaire
#
# Pa$nan nombre d'années de simulation, scalaire
# Pa$taux . taux de pêche, scalaire entre 0 et 1
#
# Pa$N (si présente) matrice des efforts par stratégie
# (numit lignes et Pa$nstrat colonnes)
#
# Pa$M matrice k*ntact des regroupements suivant les
# tactiques effectives ie la case k*tact=0 si la tactique
# n'appartient pas à la stratégie (engin) k
# ou si la tactique n'est pas une tactique de pêche
# (repos par exemple)
# k est le nombre d'engins considérés, ceci sert lors
# du calcul de l'effort effectif des éléments de la stratégie
# ayant utilisé une tactique de pêche
# k est le nombre d'engins considérés
#
# Pa$B0 matrice 1*nstock, des valeurs des biomasses en t0
#
# Pa$chgts vecteur d'éléments correspondants aux changements
#
# 2 entrees
#
# th vecteur indiquant les positions des paramètres sur lesquels
# on ajuste
#####
#####
# I Première partie, initialisation des paramètres et des tableaux
# de calcul courant, lus dans la liste Pa
#
#####
# Définition des prix réels par tactique et par stock
if (Pa$ntact !=1) {Pa$D$prix[,2 Pa$ntact]<-Pa$D$prix[,2 Pa$ntact]+
matrix(rep(Pa$D$prix[,1],(Pa$ntact-1)),ncol=(Pa$ntact-1),byrow=F)}

Pa$D$q <- abs(Pa$D$q)
Pa$mu <- abs(Pa$mu)
Pa$rho<-abs(Pa$rho)
# Déclaration des objets servant lors de l'étape courante

# Ceux relatifs à la simulation,

# Expression de la matrice Pa$ntact*Pa$utemps
# dont l'élément (i,j) est la valeur du coût de mise en oeuvre
# de la tactique i pour la j-ième modalité de la période considérée

SaisonCout<-Pa$D$cout%*%t(matrix(c(rep(1,Pa$utemps),
sin(2*pi*(1/Pa$utemps)*(1 Pa$utemps)),
cos(2*pi*(1/Pa$utemps)*(1 Pa$utemps)), sin(4*pi*(1/Pa$utemps)*(1 Pa$utemps)),
cos(4*pi*(1/Pa$utemps)*(1 Pa$utemps))),ncol=5,byrow=F))
nbreit <- Pa$nan * Pa$utemps
nbjours <- (Pa$taux * 365)/Pa$utemps
revh <- matrix(rep(0, Pa$utemps * Pa$ntact), ncol = Pa$utemps)
H <- matrix((-2 * Pa$D$stock[, 1])/Pa$D$stock[, 2]), ncol = 1)
if (N==T){effs<-matrix(Pa$N[1, ], ncol = 1) }
else {effs <- matrix(Pa$D$se[, (Pa$ntact+1)], ncol = 1)}
# effectifs par stratégie
Bprec <- matrix(Pa$B0, ncol = 1)
Bv <- matrix(Pa$D$stock[,2], ncol = 1)
ef <- rep(0, Pa$ntact)
uu <- 1/Pa$D$se[, 1 Pa$ntact]
# nbre de tactiques par stratégie

uu[uu == Inf] <- 0
ah <- uu
uu <- matrix(rep(uu, Pa$ntact), ncol = Pa$ntact, byrow = F)
Prop <- Pa$D$se[, 1 Pa$ntact] * uu

SCPUef<-matrix(NA,nbreit,Pa$ntact*Pa$nstock)
TCPUef<-matrix(NA,nbreit,Pa$ntact*Pa$nstock)
CPUef<-matrix(NA,nbreit,nrow(Pa$M)*Pa$nstock)
Propf<-matrix(NA,nbreit*Pa$nstrat,Pa$ntact)
Tef<-matrix(NA,Pa$ntact,nbreit)
efF<-matrix(NA,nrow(Pa$M),nbreit)
Revobt<-matrix(NA,Pa$ntact,nbreit)
Bm<-matrix(NA,Pa$nstock,nbreit)

if (gradient==T){

T1<-array(NA,dim=c(Pa$ntact,Pa$nstrat,2))
Td1<-array(NA,dim=c(Pa$ntact,Pa$nstrat,length(Pa$th)))
T2<-matrix(NA,(1+Pa$utemps),Pa$nstock)
Td2<-array(NA,dim=c(Pa$utemps,Pa$nstock,length(Pa$th)))
Derf<-matrix(NA,(Pa$nan-Pa$ncal)*Pa$utemps*nrow(Pa$M),length(Pa$th))
Derr<-matrix(NA,(Pa$nan-Pa$ncal)*Pa$utemps*Pa$nstock*nrow(Pa$M),
length(Pa$th))

# Expression de la correspondance vi k et j, vi
# correspondant au ième groupe de paramètres
# Les groupes définis sont
#
# v1 capacités biotiques
# v2 r=2M
# v3 q, ranges par tactiques/stocks
# v4 Prix
# v5 Cout
# v6 Pa$rho

```

Annexe D

```

# v7 mu ( aussi appele Lambda)
# v8 alpha, ranges par tactiques/stocks/mois

# 0 definitions des relations th j et k . . .

v1<-(1 Pa$stock)
v2<-((Pa$stock+1) (2*Pa$stock))
v3<-((2*Pa$stock+1) (Pa$stock*(2+Pa$ntact)))
v4<-((Pa$stock*(2+Pa$ntact)+1).(Pa$stock*(3+Pa$ntact)))
v5<-(((Pa$stock*(3+Pa$ntact)+1) (Pa$stock*(3+Pa$ntact)+Pa$ntact))
v6<-(((Pa$stock*(3+Pa$ntact)+Pa$ntact+1) (Pa$stock*(3+Pa$ntact)+Pa$ntact+1))
v7<-(((Pa$stock*(3+Pa$ntact)+Pa$ntact+2) (Pa$stock*(3+Pa$ntact)+Pa$ntact+2))
v8<-(((Pa$stock*(3+Pa$ntact)+Pa$ntact+3) (Pa$stock*(3+Pa$ntact)+Pa$ntact+2+ Pa$utemps*Pa$ntact*Pa$ntact)))

w0<-v1-v1
w1<-v1
V1<-matrix(c(v1,w0,w1,w0),ncol=4,byrow=F)

w0<-v2-v2
w2<-v2-Pa$stock
V2<-matrix(c(v2,w0,w2,w0),ncol=4,byrow=F)

w3<-matrix(rep(0,2*(Pa$ntact*Pa$ntact)),ncol=2)
w0<-c(w3-w3)[,1]
u<-0

for (j in (1 Pa$ntact)){
for (k in (1 Pa$ntact)){
u<-u+1
w3[u,]<-c(j,k) }
}

V3<-cbind(matrix(v3,ncol=1),w3,w0)
w4<-v4-(Pa$stock*(2+Pa$ntact))
w0<-w4-w4
V4<-matrix(c(v4,w0,w4,w0),ncol=4,byrow=F)

w5<-v5-(Pa$stock*(3+Pa$ntact))
w0<-w5-w5
V5<-matrix(c(v5,w0,w0),ncol=4,byrow=F)

V6<-matrix(c(v6,0,0),nrow=1)
V7<-matrix(c(v7,0,0),nrow=1)

w8<-matrix(rep(0,3*(Pa$ntact*Pa$ntact*Pa$utemps)),ncol=3)
u<-0

for (j in (1 Pa$ntact)){
for (k in (1 Pa$ntact)){
for (tt in (1 Pa$utemps)){ u<-u+1
w8[u,]<-c(j,k,tt) }
} }
V8<-cbind(matrix(v8,ncol=1),w8)
Ind<-rbind(V1,V2,V3,V4,V5,V6,V7,V8)
v<-list(v1=v1, v2=v2, v3=v3, v4=v4, v5=v5, v6=v6, v7=v7, v8=v8)
}

#####
#
# II Premiere iteration, ie initialisation des Cpue et Biomasses
# a l'aide de la peche du mois de decembre
#
#####

numan <- 1973

# Initialisation des effectifs constants

Pa$D$se[(Pa$ntact+1)]<-Pa$D$effectifs[,1]

# Introduction d'eventuels changements a l'aide de la fonction changements

Pa<-Changements(Pa,numan=1973,nummois=12)
nummois <- Pa$utemps
numit<- 1

#####
# Expression du cout du mois

Pa$D$cout<-matrix(SaisonCout[,nummois] ncol=1)
paule<-matrix(c(1,0,0,0),nrow=1)
marie<-paulePa$D$q[20,]<-Pa$D$captind[1,]*(1/(1+exp(-marie)))
C <- calculs(Prop, nummois, effs, nbjours, Pa$D Pa$ntact, H Bv, Pa$ntact, Bprec, revh, Pa$utemps.kprocB=0 Pa$rho)

# efforts par engin

ef <- Pa$M
# capture par tactique

PpS <- (C$CPUE) * matrix(rep(C$ef, Pa$ntact), byrow = F, nrow = Pa$ntact)
# Somme des captures par "engin"
PpS <- Pa$M # Matrice k*ntact des pps par "engin"
uu <- 1/ef
uu[uu == Inf] <- 1
C$CPUE <- t(PpS * matrix(rep(uu, Pa$ntact), byrow = F, nrow = nrow(Pa$M)))
# Initialisation des dérivées partielles
if (gradient==T){
T1[,1]<-C$ef
T2[1,2,]<-matrix(c(C$Bm,Pa$B0),ncol=2,byrow=T)
Td2[1,]<-matrix(rep(0,Pa$ntact*length(Pa$th)),nrow=Pa$ntact)
Td1[,]<-array(0,dim=c(Pa$ntact,Pa$ntact,length(Pa$th)))
f3T<-matrix(0,Pa$ntact,length(Pa$th))
f5T<-matrix(0,Pa$ntact,length(Pa$th))
f6T<-f6(T1,T2,TD2=TD2,f5T,
u=2,nummois=nummois,C,Pa$th.v.Pa.Ind)
Td2[2 Pa$utemps,]<-Td2[1 (Pa$utemps-1),,]
Td2[1,]<-f6T
}

#####
#
# III Debut de la peche, de 1 a nbreit
#
#####

numan<-(1974-Pa$ncal-1)

for(numit in (1 nbreit)) {
if(nummois < Pa$utemps) {
nummois <- nummois + 1
}
else {
nummois <- 1
numan<-numan+1
}
# Introduction d'eventuels changements a l'aide de la fonction
# changements
Pa<-Changements(Pa,numan,nummois)
# Expression des effectifs du mois
qo<-Pa$D$effectifs[,1]
qinf<-Pa$D$effectifs[,2]
tstar<-Pa$D$effectifs[,3]
ptstar<-Pa$D$effectifs[,4]

Pa$D$se[(Pa$ntact+1)]<-qo+(qinf-qo)*(1/(1+exp((4*tstar*ptstar)*(1-numit/tstar))))
# Expression des couts du mois
Pa$D$cout<-matrix(SaisonCout[,nummois],ncol=1)
# Expression des capturabilites industrielles du mois
Pa$D$q[20,]<-Pa$D$captind[1,]+(Pa$D$captind[2,]-Pa$D$captind[1,])*
(1/(1+exp(4*Pa$D$captind[3,]*Pa$D$captind[4,]-4*Pa$D$captind[4,]*numit

if (N==T) {effs <- matrix(Pa$N[numit, ], ncol = 1)}
else { effs <- matrix(Pa$D$se[(Pa$ntact+1)], ncol = 1)}
Resp <- calc resp(C$revh, Pa$ntact, numit, Pa$utemps)
Prop <- calc prop(Pa$D, Resp, Pa$mu, Prop, Pa$ntact, Pa$ntact,
ah, kprocf)

C <- calculs(Prop, nummois, effs, nbjours, Pa$D, Pa$ntact, H=matrix((-2*Pa$D$stock[,1])/Pa$D$stock[,2]),ncol=1), Bv=matrix(Pa$D$stock[,2],ncol=1),
Pa$ntact, C$Bprec, C$revh, Pa$utemps.kprocB,Pa$rho)

```

Annexe D

```

if (numit==1) {B00<-C$ef}

# Enregistrement eventuel des donnees

Bm[,numit]<- C$Bm
Revobt[,numit] <- C$Revobt
Cef <- Pa$M tef <- C$ef
tCPUE <- C$CPUE
sCPUE<-C$CPUE
PpS <- (C$CPUE) * matrix(rep(C$ef, Pa$stock), byrow = F, nrow
= Pa$ntact)
# Somme des captures par "engin".
PpS <- Pa$M # Matrice k*stock des pps par "engin"
uu <- 1/Cef
uu[uu == Inf] <- 0
C$CPUE <- t(PpS * matrix(rep(uu, Pa$stock), byrow = F, nrow =
nrow(Pa$M)))

# Matrice nstock*e des rendements par "engin"
Tef[,numit] <- tef
efF[,numit] <- Cef
SCPUef[numit,]<-matrix(sCPUE,nrow=1) # rdts par stocks
TCPUEf[numit,]<-matrix(t(tCPUE),nrow=1) # rdts par tactiques
CPUef[numit,]<-matrix(t(C$CPUE),nrow=1) # rdts par "engins"

Propf(((Pa$strat*(numit-1)+1) (numit*Pa$strat)),<-Prop # propor-
tions par tactiques dans chacune des strategies

#####
# IV Expression courante du gradient
#
#####

if( gradient==T) {

T1[,2]<-T1[,1]
T1[,1]<-tef
T2[(2 {Pa$utemps+1}),]<-T2[(1 Pa$utemps),]
T2[1,]<-C$Bm

f1T<-f1(T2,Td2,u1=1,u2=2,nummois=(nummois-1),Pa$th,v,Ind,Pa)

if (numit > 12) {
f1TP<-f1(T2,Td2,u1=Pa$utemps,u2=(Pa$utemps+1),
nummois=nummois,Pa$th,v,Ind,Pa)

if (numit <= 12) {f3T<-f2(T2,f1T,u=2,
nummois=(nummois-1),Pa$th,v,Ind,Pa)

f4T <- f4(f3T,T1,Td1,T2, u1=2, u2=2,
nummois=(nummois-1),Pa$th,v,Ind,Pa,numit=numit)
}
else

{
f2T<-f2(T2,f1T,u=1,nummois=(nummois-1),Pa$th,v,Ind,Pa)
f2TP<-f2(T2,f1T,u=Pa$utemps,nummois,Pa$th,v,Ind,Pa)
f3T<-f3(f2T,f2TP)
f4T<-f4(f3T,T1,Td1,T2,u1=1,u2=(Pa$utemps+1),
nummois=nummois,Pa$th,v,Ind,Pa)
if (numit==1) {print(f4T)}
Td1<-f4T
f5T<-f5(f4T,Pa$th,Pa)

f6T<-f6(T1,T2,Td2,f5T,u=2,nummois=nummois,C,Pa$th,v,Pa,Ind)
Td2[2 Pa$utemps,]<-Td2[(1 {Pa$utemps-1}),,]
Td2[1,]<-f6T
f7T<-f1(T2,Td2,u1=1,u2=2,nummois=nummois,Pa$th,v,Ind,Pa)
f8T<-f8(f5T,Pa$th,Pa)
f9T<-f9(T1,T2,f5T,f7T,f8T,Pa$th,u=1,nummois=nummois,Pa)
if (numit > (Pa$ncal*Pa$utemps)) {
num<-numit-(Pa$ncal*Pa$utemps)
neng<-nrow(Pa$M)
Derf{(neng*(num-1)+1) (neng*num )}<-f8T
Derr{((neng*Pa$stock)*(num-1)+1)
((neng*Pa$stock)*num)}<-f9T
}
}

}

#####
#
# V Sortie des donnees ie efforts et Cpue par tactique et par engin.
# ainsi que eventuellement de la matrice de gradient
#
#####

if (gradient==T) {
Grad<-rbind(Derf,Derr)
print(matrix(Grad,ncol=(nrow(Pa$M)+ncol(Pa$M)),byrow=F))

# On met Grad sous la "bonne" forme. ie la theme colonne
# contient les efforts de t1 a tn, puis les cpue etc

for(i in (1 length(Pa$th))){
u<-Grad[,i]
u<-matrix(u,ncol=(nrow(Pa$M)*(1+Pa$ntact)),byrow=T)
u<-as vector(u)
Grad[,i]<-u
}

}

c <- Pa$strat * nbreit
Bm <- Bm[, 1 nbreit]
Bm <- t(Bm)
Revobt <- matrix(Revobt[, 1 nbreit],ncol=nbreit)
Revobt<-t(Revobt)
ef <- efF[, 1 nbreit]
Tef <- matrix(Tef[, 1 nbreit],ncol=nbreit)
ef <- t(ef)
Tef <- t(Tef)
CPUef <- CPUef[1 nbreit, ]
# Ajout des bruits d'observation
# ! Qd on a une tactique cela ne marche pas
# et il faut poser n<-length(ef)
if (nrow(Pa$M)==1){n<-length(ef)}
else{ n<-nrow(ef)}
bruitf<-matrix(rnorm(n*nrow(Pa$M)),ncol=nrow(Pa$M))
ef<-matrix(ef,ncol=nrow(Pa$M))
ef<-ef*(1+kobsf*bruitf)
ef[ef<0]<-0
bruitr<-matrix(rnorm(Pa$stock*n*nrow(Pa$M)),
ncol=(Pa$stock*nrow(Pa$M)))
CPUef<-CPUef*(1+bruitr*kobsr)
CPUef[CPUef<0]<-0
SCPUef<-SCPUef[1 nbreit,]
TCPUEf <- TCPUEf[1 nbreit, ]
Propf <- matrix(Propf[1 nbreit, ],ncol=Pa$ntact)
ER <- cbind(ef, CPUef)
SER<-cbind(Tef,SCPUef)
TER <- cbind(Tef, TCPUEf)
ut <- Pa$utemps*Pa$ncal + 1
ER <- ER[ut nbreit, ]
SER<-SER[ut nbreit,]
TER <- TER[ut nbreit, ]

Bm<-Bm[ut nbreit,]
Revobt<-Revobt[ut nbreit,]

Propf<-Propf[ut nbreit,]

# Remise sous la forme de revenus reel ie non transformes, puis
# expression des revenus moyens par tactique de peche ainsi que du
revenu moyen total

Revmoytact<-log(Revobt)/Pa$rho #matrice n*ntact
Donnees<-list(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)
nbeng<-nrow(Pa$M)
neng<-(1.nrow(Pa$M))
for(i in (1 nbeng)){
eng<-seq(neng[i]+nbeng,(neng[i]+(Pa$stock)*nbeng),nbeng)
Donnees[[i]]<-cbind(matrix(ER[,i],ncol=1),ER[eng])}

#' En sortie, nous avons pour 2 tactiques et 2 stocks P1 P2 cpuea1
cpuea2 cpueb2 les uns au dessous des autres

if (gradient==T) {return(Donnees,TER,Bm,Revmoytact,Grad)}
else {return(Donnees,TER,Bm,Revmoytact)} }

```


Programme calc.resp

```
# fonction calc resp exprimant le revenu espéré
# étant donné les revenus obtenus précédemment
# (ie un pas de temps et une année auparavant)
```

```
function(revh, ntact, numit, utemps){
  if(numit < utemps) {Resp <- revh[, utemps]}
  else { Resp <- (revh[, 1] + revh[, utemps])/2}
  Resp <- matrix(Resp, ncol = 1)
  return(Resp)}

```

Programme calc.prop

```
# fonction calc prop exprimant les proportions d'utilisation des
différentes tactiques pour chacune des stratégies considérées
```

```
function(D, Resp, mu, Prop, nstrat, ntact, uu, kprocf){
# Calcul des revenus moyens par strategie

  P <- D$se[, 1 ntact] %%% Resp # Somme des revenus par strategie
  n <- (1 nstrat)[P == 0]
  M <- matrix(rep(Resp, nstrat), ncol = ntact, byrow = T)
  M1 <- matrix(rep(P, ntact), ncol = ntact, byrow = F)
  Prop <- mu * Prop + (1 - mu) * ((M/M1) * D$se[, 1 ntact])
  if(kprocf != 0) {
    al <- matrix(rnorm(ntact * nstrat), nrow = nstrat)
    Prop <- Prop * (1 + kprocf * al)
    Prop[Prop < 0] <- 0
    for(i in (1 nstrat)) {
      Prop[i,] <- Prop[i, ]/(sum(Prop[i,]))
    }
  }

  Prop[n, ] <- 0
  return(Prop)}

```

Programme calculs

```
# fonction qui actualise les états des biomasses, les captures par
unité d'effort et les revenus obtenus
```

```
function(Prop, nummois, effs, nbjours, D, nstock, H, Bv, ntact,
Bprec, revh, utemps, kprocB, rho){
  ef <- calc f(Prop, effs, nbjours)
  B <- calc B(D, nstock, H, Bv, ntact, nummois, ef, Bprec, kprocB)

  Bprec <- B$Bcour
  Bm <- B$Bmoy
  aa <- B$aa
  bb <- B$bb
  cc <- B$cc

  CPUE <- calc cpue(D, B, nstock, ntact, nummois, Bv)
  Revobt <- calc robt(nstock, CPUE, D, nummois, rho)
  revh <- maj rev(revh, Revobt, utemps)
  return(aa, bb, cc, Bm, Bprec, revh, CPUE, Revobt, ef) }

```

Programme calc.f

```
# fonction calc f exprimant les effectifs par tactique pour chaque
stratégie considérée
```

```
function(Prop, effs, nbjours){
  ef <- t(Prop) %%% effs * nbjours
  ef <- matrix(ef, ncol = 1)

```

```
return(ef)
}
```

Programme calc.B

```
# fonction calc B exprimant l'évolution de la biomasse courante
```

```
function(D, nstock = 12, H, Bv, ntact, nummois, ef, Bprec
kprocB) {
  Bcour <- matrix(rep(0, nstock), ncol = 1)
  Bmoy <- Bcour
  aa <- H
  bb <- (- H * Bv)
  cc <- matrix(rep(0, nstock), ncol = 1)
  u <- matrix(D alpha[, nummois], ncol = ntact, byrow = T)
  BBv <- matrix(rep(Bv, ntact), ncol = ntact, byrow = F)
  BBprec <- matrix(rep(Bprec, ntact), ncol = ntact, byrow = F) - u *
  BBv
  BBprec[BBprec < 0] <- 0
  BBprec[BBprec > 0] <- 1
  ef <- matrix(rep(ef, nstock), ncol = ntact, byrow = T)
  BBprec <- (BBprec * (t(D q) * ef))
  bb <- bb - BBprec %%% matrix(rep(1, ntact), ncol = 1)
  BBprec <- BBprec * (u * BBv)
  cc <- cc + BBprec %%% matrix(rep(1, ntact), ncol = 1)
  rdelta <- sqrt(bb * bb - 4 * aa * cc)
  r2 <- (- bb - rdelta)/(2 * aa)
  r1 <- (- bb + rdelta)/(2 * aa)
  expo <- exp(- aa * (r1 - r2) )
  K <- (Bprec - r2)/(Bprec - r1)
  n <- matrix((1 nstock), ncol = 1)
  eps <- matrix(rnorm(nstock), ncol = 1)
  Bcour[n, ] <- (r2[n, ] - r1[n, ] * K[n, ] * expo[n, ])/(1 - K[n, ] * expo[n,
  ]) * (1 + kprocB * eps)
  Bmoy <- Bcour
  #Bmoy <- (Bprec + Bcour)/2
  return(aa, bb, cc, Bmoy, Bcour)}

```

Programme calc.cpue

```
# fonction calc cpue exprimant les captures par unité d'effort
```

```
function(D, B, nstock, ntact, nummois, Bv){
  Bmoy <- matrix(rep(as vector(B $ Bmoy), ntact), ncol = nstock,
  byrow = T)
  u <- matrix(D $ alpha[, nummois], ncol = nstock, byrow = F)
  Bv <- matrix(rep(Bv, ntact), ncol = ntact, byrow = F)
  uBv <- t(u) * Bv)
  CPUE <- (Bmoy - uBv)
  CPUE[CPUE < 0] <- 0
  CPUE <- (CPUE * D $ q)
  # rendements des stocks par tactique pour le mois concerne
  return(CPUE)}

```

Programme calc.robt

```
# fonction calc robt exprimant les revenus par tactiques
```

```
function(nstock, CPUE, D, nummois, rho) {
  Prix <- D$prix # matrice des prix par espece
  RB <- CPUE %%% Prix # matrice ntact*ntact dont la diagonale
  contient
  #les revenus unitaires par tactique
  RB <- diag(RB)
  Rev <- exp(rho * (RB - D$cout)) # exp des revenus nets par tactique
  Rev <- matrix(Rev, ncol = 1) #revenu par tactique

  return(Rev)}

```

Programme maj.rev, exprimant les revenus espérés par tactique.

```
function(revh, Revobt, utemps)
{
  if(utemps == 1) {
    revh[, 1] <- Revobt
  }
  else {
    a <- utemps - 1
    revh[, 1 a] <- revh[, 2 utemps]
    revh[, utemps] <- Revobt
  }
  return(revh)
}
```

Programme f1

```
function(T2,TD2,u1,u2,nummois,th,v,Ind,Pa){
  rth <- (1 length(th))
  if (nummois == 0) {nummois <- 12}
  f1T <- array(NA, dim=c(Pa$ntact, Pa$stock, length(th)))
  alpha <- matrix(Pa$D$alpha[, nummois], ncol=Pa$stock, byrow=F)
  for (i in rth) {
    f1T[, , i] <- Pa$D$q * matrix(rep(TD2[u1,,i], Pa$ntact),
      nrow=Pa$ntact, byrow=T)
    if ( min(v[[1]]) <= th[i] & th[i] <= max(v[[1]]) ) {
      f1T[,i,i] <- f1T[,i,i] - alpha[,i] * Pa$D$q[,i]
    }
    if ( min(v[[3]]) <= th[i] & th[i] <= max(v[[3]]) ) { j <- Ind[th[i],2]
      k <- Ind[th[i],3]
      f1T[,k,i] <- f1T[,k,i] + (T2[u2,k]-alpha[,k] * Pa$D$stock[k,2]) }
    if ( min(v[[8]]) <= th[i] & th[i] <= max(v[[8]]) ) { j <- Ind[th[i],2]
      k <- Ind[th[i],3]
      m <- Ind[th[i],4]
      f1T[,k,i] <- f1T[,k,i] - Pa$D$q[,k] * Pa$D$stock[k,2] }
    return(f1T)
  }
}
```

Programme f2

```
function(T2,f1T,u,nummois,th,v,Ind,Pa){
  if (nummois == 0) {nummois <- 12}
  rth <- (1 length(th))
  f2T <- matrix(NA, Pa$ntact, length(th))
  alpha <- matrix(Pa$D$alpha[, nummois], ncol=Pa$stock, byrow=F)

  # expression de rjkt

  rev <- Pa$D$q * (matrix(rep(T2[u,], Pa$ntact),
    nrow=Pa$ntact, byrow=T)
    - alpha * matrix(rep(Pa$D$stock[,2], Pa$ntact), nrow=Pa$ntact, byrow=T))
  A <- Pa$rho * (rev % matrix(Pa$D$prix[,1], ncol=1)
    - matrix(Pa$D$cout[,1], ncol=1))
  for (i in rth) {
    dA <- Pa$rho * (f1T[,i] % matrix(Pa$D$prix[,1], ncol=1))

    if (min(v[[4]]) <= th[i] & th[i] <= max(v[[4]]) ) { k <- Ind[th[i],3]
      dA <- dA + Pa$rho * matrix(rev[,k], ncol=1) }

    if (min(v[[5]]) <= th[i] & th[i] <= max(v[[5]]) ) { j <- Ind[th[i],2]
      dA[,j] <- dA[,j] - Pa$rho }

    if (min(v[[6]]) <= th[i] & th[i] <= max(v[[6]]) ) {
      dA <- dA + A / pa$rho }

    f2T[,i] <- dA * exp(A) }

  return(f2T) }
}
```

Programme f3

```
function(f2T, f2TP)
{
  f3T <- (1/2) * (f2T + f2TP)
  return(f3T)
}
```

Programme f4

```
function(f3T, T1, Td1, T2, u1, u2, nummois, th, v, Ind, Pa, numit) {
  nbjours <- (Pa$taux * 365) / Pa$utemps
  rth <- (1 length(th))
  f4T <- array(NA, dim=c(Pa$ntact, Pa$strat, length(th)))
  if ( nummois == 0) {nummois <- 12}
  rev <- Pa$D$q * (matrix(rep(T2[u1,], Pa$ntact),
    nrow=Pa$ntact, byrow=T)
    - matrix(Pa$D$alpha[, nummois ], ncol=Pa$stock, byrow=F) *
    matrix(rep(Pa$D$stock[,2], Pa$ntact), nrow=Pa$ntact, byrow=T))

  if (numit <= 12 ) {revD <- rev}
  else {
    nump <- nummois + 1
    if (nump == 13) {nump <- 1}
    revD <- Pa$D$q * (matrix(rep(T2[u2,], Pa$ntact),
      nrow=Pa$ntact, byrow=T)
      - matrix(Pa$D$alpha[, (nump)], ncol=Pa$stock, byrow=F) *
      matrix(rep(Pa$D$stock[,2], Pa$ntact), nrow=Pa$ntact, byrow=T))
  }
  R <- exp(Pa$rho * (rev % matrix(Pa$D$prix[,1], ncol=1)
    - matrix(Pa$D$cout[,1], ncol=1)))
  RD <- exp(Pa$rho * (revD % matrix(Pa$D$prix[,1], ncol=1)
    - matrix(Pa$D$cout[,1], ncol=1)))

  RP <- matrix((1/2) * (R + RD), ncol=1)

  Js <- Pa$D$se[,1 Pa$ntact]

  for(i in rth) {
```

```
    a <- matrix(f3T[,i], ncol=1) % matrix(Js % RP, nrow=1)
    b <- RP % matrix(Js % matrix(f3T[,i], ncol=1), nrow=1)
    c <- matrix(rep(Js % RP, Pa$ntact), nrow=Pa$ntact, byrow=T)

    f4T[, , i] <- matrix(Td1[,i], nrow=Pa$ntact) * Pa$Lambda +
      (nbjours * Pa$D$effectifs[,1] * (1 - Pa$Lambda)) * ((a - b) / (c * c))

    if (min(v[[7]]) <= th[i] & th[i] <= max(v[[7]]) ) {

      f4T[,i] <- f4T[,i] + T1[,i,2]
      - nbjours * Pa$effectifs[,1] * (matrix(rep(RP, Pa$strat),
        nrow=Pa$ntact, byrow=F)) / (c * c)
    }

    return(f4T) }
}
```

Programme f5

```
function(f4T, th, Pa)
{
  rth <- (1 length(th))
  f5T <- matrix(NA, Pa$ntact, length(th))
  for(i in rth) {

    f5T[,i] <- f4T[, , i] % matrix(rep(1, Pa$strat), ncol=1)
  }
  return(f5T)
}
```

Programme f6

```
function(T1, T2, TD2, f5T, u, nummois=(nummois-1), C, th, v, Pa, Ind) {
  rth <- (1 length(th))
```

Annexe D

```
f6T<-matrix(NA,Pa$stock.length(th))
aa<-matrix(C$aa,ncol=1)
bb<-matrix(C$bb,ncol=1)
cc<-matrix(C$cc,ncol=1)
ap<-matrix(rep(0,Pa$stock*length(th)),ncol=length(th))
bp<-t(Pa$D$q)%*%f5T
cp<-t(Pa$D$q *matrix(Pa$D$alpha[,nummois],
ncol=Pa$stock,byrow=F))%*%f5T*
matrix(rep(Pa$D$stock[,2],length(th)),ncol=length(th),byrow=F)

for(i in rth){
  if(min(v[[1]])<=th[i] & th[i] <= max(v[[1]])){
    k<-Ind[th[i],3]
    ap[k,i]<-2*Pa$D$stock[k,1]/(Pa$D$stock[k,2]^2)

    if (min(v[[2]]) <=th[i] & th[i] <= max(v[[2]])){
      k<-Ind[th[i],3]
      ap[k,i]<-1/Pa$D$stock[k,2] }

    if (min(v[[2]]) <=th[i] & th[i] <= max(v[[2]])) {
      k<-Ind[th[i],3]
      bp[k,i]<-1+bp[k,i]

    if (min(v[[3]]) <=th[i] & th[i]<= max(v[[3]])){
      j<-Ind[th[i],2]
      k<-Ind[th[i],3]
      bp[k,i]<-bp[k,i]-T1[,,(u-1)]%*%matrix(rep(1,Pa$strat),ncol=1)[j]}

    if (min(v[[1]]) <=th[i] & th[i] <= max(v[[1]])){
      k<-Ind[th[i],3]
      mult<-matrix(rep(1,Pa$strat),ncol=1)
      cp[k,i]<-cp[k,i]+t(Pa$D$q*matrix(Pa$D$alpha[,nummois],
ncol=Pa$stock,byrow=F)) %*%matrix(T1[,,(u-1)]
%*%mult,ncol=1)[k]
    }

    if (min(v[[3]]) <=th[i] & th[i] <= max(v[[3]])){
      k<-Ind[th[i],3]
      j<-Ind[th[i],2]
      mult<-matrix(rep(1,Pa$strat),ncol=1)

      cp[k,i]<-cp[k,i]+(matrix(T1[,,(u-1)]%*%mult,
ncol=1)[j,]*matrix(Pa$D$alpha[,nummois],
ncol=Pa$stock,byrow=F)[j,k]*
Pa$D$stock[k,1])

    }

    if (min(v[[8]]) <=th[i] & th[i] <= max(v[[8]])){
      k<-Ind[th[i],3]
      j<-Ind[th[i],2]
      cp[k,i]<-cp[k,i]+( matrix(T1[,,(u-1)]%*%
matrix(rep(1,Pa$strat),ncol=1)
,ncol=1)[j,]* Pa$D$q[j,k]*
Pa$D$stock[k,1])
    }

f6T[,i]<-gradientB(a=aa,b=bb,cc=cc,matrix(T2[u,],ncol=1),
matrix(TD2[1,,i],ncol=1), matrix(ap[,i],ncol=1),matrix(bp[,i],ncol=1),
matrix(cp[,i],ncol=1) )
return(f6T)
}
```

Programme f8

```
function(f5T,th,Pa){
  f8T<-Pa$M%*%f5T
  return(f8T) }

```

Programme f9

```
function(T1,T2,f5T,f7T,f8T,th,u,nummois,Pa){
```

```
rth<-(1 length(th))
f9T<-array(NA,dim=c(nrow(Pa$M),Pa$stock.length(th)))

# expression de rkt
r<-Pa$D$q*(matrix(rep(T2[u,],Pa$ntact)
,nrow=Pa$ntact,byrow=T)
-matrix(Pa$D$alpha[,nummois],ncol=Pa$stock,byrow=F)*
matrix(rep(Pa$D$stock[,2],Pa$ntact),
nrow=Pa$ntact,byrow=T))

# expression de fj,ti
f<-T1[,1]%*%matrix(rep(1,Pa$strat),ncol=1)
den<-Pa$M%*%matrix(f,ncol=1)
den<-den*den
den<-matrix(rep(den,Pa$stock),ncol=Pa$stock,byrow=F)
dr<-f7T
df<-f5T

for(i in rth){
  u1<-dr[,i]^
matrix(rep(f,Pa$stock),nrow=Pa$ntact,byrow=F)
+r*matrix(rep(df[,i],Pa$stock),nrow=Pa$ntact,byrow=F)
u1<-Pa$M%*%u1
u1<-u1*matrix(rep(Pa$M%*%matrix(f,ncol=1),Pa$stock),
ncol=Pa$stock,byrow=F)
u2<-Pa$M%*%matrix(df[,i],ncol=1)
u2<-matrix(rep(u2,Pa$stock),ncol=Pa$stock,byrow=F)
u2<-u2*(Pa$M%*(r*matrix(rep(f,Pa$stock),
ncol=Pa$stock,byrow=F)))
f9T[,i]<-(u1-u2)/den
}

return(f9T)
}
```

Programme gradientB

```
function(a, b, cc, BK, derB, ap, bp, ccp)
{
  # aa est un vecteur K lignes et 1 colonne
  # b est un vecteur K lignes et 1 colonne
  # cc est un vecteur K lignes et 1 colonne
  # BK est un vecteur K lignes et 1 colonne, exprimant les valeurs des
  biomasses

  delt <- b * b - 4 * a * cc
  r1 <- ( - b + sqrt(delt))/(2 * a)
  r2 <- ( - b - sqrt(delt))/(2 * a)
  alpha <- (r1 - r2)
  K <- 1/(BK - r1) + 1/alpha
  deltp <- 2 * b * bp - 4 * ap * cc - 4 * ccp * a
  r1p <- (1/(2 * a*a)) * (( - bp + (deltp/(2 * sqrt(delt)))) * a - ap * ( -
  b + sqrt(delt)))
  r2p <- (1/(2 * a*a)) * (( - bp - (deltp/(2 * sqrt(delt)))) * a - ap * ( -
  b - sqrt(delt)))
  alphap <- r1p - r2p
  Kp <- ( - derB + r1p)/((BK - r1)^2) - (alphap/(alpha^2))
  A <- alpha * r1 * K * exp(- a * alpha ) - r2
  B <- alpha * K * exp(- a * alpha ) - 1
  AP <- (exp(- a * alpha )) * (r1p * K * alpha + r1 * K * alphap +
  alpha * r1 * Kp + r1 * alpha * K * ( - ap * alpha - a *
  alphap)) - r2p
  BP <- (exp(- a * alpha )) * (alphap * K + alpha * Kp + alpha * K *
  ( - ap * alpha - a * alphap))
  BKp <- (AP * B - BP * A)/(B * B)
  return(BKp)
}
```

Programme SCPesca

```
function(U, pare=c(0),Pa, SinCos, espec,Placetact,Placestock,
Pondvar, aa=1,ba=0,
ef1=ef18, ef2=ef28, ef3=ef38, ef4=ef48, ef5=ef58, ef6=ef68, mu1=mu18,
mu2=mu28, mu3=mu38, mu4=mu48, mu5=mu58, mu6=mu68, rho=rho8,
B0=B08, P1a=P1a8, P1b=P1b8, Plc=Plc8, P1d=P1d8, Ple=Ple8,
P1f=P1f8, P1g=P1g8, P1h=P1h8, P1i=P1i8, P1j=P1j8, P1k=P1k8,
```

Annexe D

P11=P118, P1m=P1m8, P1n=P1n8, P1o=P1o8, P1p=P1p8, P1q=P1q8, P1r=P1r8, P1s=P1s8, P1t=P1t8, P1u=P1u8, P1v=P1v8, P1w=P1w8, P1x=P1x8, P1y=P1y8, P2a=P2a8, P2b=P2b8, P2c=P2c8, P2d=P2d8, P2e=P2e8, P2f=P2f8, P2g=P2g8, P2h=P2h8, P2i=P2i8, P2j=P2j8, P2k=P2k8, P2l=P2l8, P2m=P2m8, P2n=P2n8, P2o=P2o8, P2p=P2p8, P2q=P2q8, P2r=P2r8, P2s=P2s8, P2t=P2t8, P2u=P2u8, P2v=P2v8, P2w=P2w8, P2x=P2x8, P2y=P2y8, P3a=P3a8, P3b=P3b8, P3c=P3c8, P3d=P3d8, P3e=P3e8, P3f=P3f8, P3g=P3g8, P3h=P3h8, P3i=P3i8, P3j=P3j8, P3k=P3k8, P3l=P3l8, P3m=P3m8, P3n=P3n8, P3o=P3o8, P3p=P3p8, P3q=P3q8, P3r=P3r8, P3s=P3s8, P3t=P3t8, P3u=P3u8, P3v=P3v8, P3w=P3w8, P3x=P3x8, P3y=P3y8, P4a=P4a8, P4b=P4b8, P4c=P4c8, P4d=P4d8, P4e=P4e8, P4f=P4f8, P4g=P4g8, P4h=P4h8, P4i=P4i8, P4j=P4j8, P4k=P4k8, P4l=P4l8, P4m=P4m8, P4n=P4n8, P4o=P4o8, P4p=P4p8, P4q=P4q8, P4r=P4r8, P4s=P4s8, P4t=P4t8, P4u=P4u8, P4v=P4v8, P4w=P4w8, P4x=P4x8, P4y=P4y8, P5a=P5a8, P5b=P5b8, P5c=P5c8, P5d=P5d8, P5e=P5e8, P5f=P5f8, P5g=P5g8, P5h=P5h8, P5i=P5i8, P5j=P5j8, P5k=P5k8, P5l=P5l8, P5m=P5m8, P5n=P5n8, P5o=P5o8, P5p=P5p8, P5q=P5q8, P5r=P5r8, P5s=P5s8, P5t=P5t8, P5u=P5u8, P5v=P5v8, P5w=P5w8, P5x=P5x8, P5y=P5y8, P6a=P6a8, P6b=P6b8, P6c=P6c8, P6d=P6d8, P6e=P6e8, P6f=P6f8, P6g=P6g8, P6h=P6h8, P6i=P6i8, P6j=P6j8, P6k=P6k8, P6l=P6l8, P6m=P6m8, P6n=P6n8, P6o=P6o8, P6p=P6p8, P6q=P6q8, P6r=P6r8, P6s=P6s8, P6t=P6t8, P6u=P6u8, P6v=P6v8, P6w=P6w8, P6x=P6x8, P6y=P6y8, P7a=P7a8, P7b=P7b8, P7c=P7c8, P7d=P7d8, P7e=P7e8, P7f=P7f8, P7g=P7g8, P7h=P7h8, P7i=P7i8, P7j=P7j8, P7k=P7k8, P7l=P7l8, P7m=P7m8, P7n=P7n8, P7o=P7o8, P7p=P7p8, P7q=P7q8, P7r=P7r8, P7s=P7s8, P7t=P7t8, P7u=P7u8, P7v=P7v8, P7w=P7w8, P7x=P7x8, P7y=P7y8, P8a=P8a8, P8b=P8b8, P8c=P8c8, P8d=P8d8, P8e=P8e8, P8f=P8f8, P8g=P8g8, P8h=P8h8, P8i=P8i8, P8j=P8j8, P8k=P8k8, P8l=P8l8, P8m=P8m8, P8n=P8n8, P8o=P8o8, P8p=P8p8, P8q=P8q8, P8r=P8r8, P8s=P8s8, P8t=P8t8, P8u=P8u8, P8v=P8v8, P8w=P8w8, P8x=P8x8, P8y=P8y8, P9a=P9a8, P9b=P9b8, P9c=P9c8, P9d=P9d8, P9e=P9e8, P9f=P9f8, P9g=P9g8, P9h=P9h8, P9i=P9i8, P9j=P9j8, P9k=P9k8, P9l=P9l8, P9m=P9m8, P9n=P9n8, P9o=P9o8, P9p=P9p8, P9q=P9q8, P9r=P9r8, P9s=P9s8, P9t=P9t8, P9u=P9u8, P9v=P9v8, P9w=P9w8, P9x=P9x8, P9y=P9y8, P10a=P10a8, P10b=P10b8, P10c=P10c8, P10d=P10d8, P10e=P10e8, P10f=P10f8, P10g=P10g8, P10h=P10h8, P10i=P10i8, P10j=P10j8, P10k=P10k8, P10l=P10l8, P10m=P10m8, P10n=P10n8, P10o=P10o8, P10p=P10p8, P10q=P10q8, P10r=P10r8, P10s=P10s8, P10t=P10t8, P10u=P10u8, P10v=P10v8, P10w=P10w8, P10x=P10x8, P10y=P10y8, P11a=P11a8, P11b=P11b8, P11c=P11c8, P11d=P11d8, P11e=P11e8, P11f=P11f8, P11g=P11g8, P11h=P11h8, P11i=P11i8, P11j=P11j8, P11k=P11k8, P11l=P11l8, P11m=P11m8, P11n=P11n8, P11o=P11o8, P11p=P11p8, P11q=P11q8, P11r=P11r8, P11s=P11s8, P11t=P11t8, P11u=P11u8, P11v=P11v8, P11w=P11w8, P11x=P11x8, P11y=P11y8, P12a=P12a8, P12b=P12b8, P12c=P12c8, P12d=P12d8, P12e=P12e8, P12f=P12f8, P12g=P12g8, P12h=P12h8, P12i=P12i8, P12j=P12j8, P12k=P12k8, P12l=P12l8, P12m=P12m8, P12n=P12n8, P12o=P12o8, P12p=P12p8, P12q=P12q8, P12r=P12r8, P12s=P12s8, P12t=P12t8, P12u=P12u8, P12v=P12v8, P12w=P12w8, P12x=P12x8, P12y=P12y8, P13a=P13a8, P13b=P13b8, P13c=P13c8, P13d=P13d8, P13e=P13e8, P13f=P13f8, P13g=P13g8, P13h=P13h8, P13i=P13i8, P13j=P13j8, P13k=P13k8, P13l=P13l8, P13m=P13m8, P13n=P13n8, P13o=P13o8, P13p=P13p8, P13q=P13q8, P13r=P13r8, P13s=P13s8, P13t=P13t8, P13u=P13u8, P13v=P13v8, P13w=P13w8, P13x=P13x8, P13y=P13y8, Couta=Couta8, Coutb=Coutb8, Coutc=Coutc8, Coutd=Coutd8, Coute=Coute8, Coutf=Coutf8, Coutg=Coutg8, Couth=Couth8, Couti=Couti8, Coutj=Coutj8, Coutk=Coutk8, Coutl=Coutl8, Coutm=Coutm8, Coutn=Coutn8, Couto=Couto8, Coutp=Coutp8, Coutq=Coutq8, Coutr=Coutr8, Couts=Couts8, Coutt=Coutt8, Coutu=Coutu8, Coutv=Coutv8, Coutw=Coutw8, Coutx=Coutx8, Couty=Couty8, Bv1=Bv18, Bv2=Bv28, Bv3=Bv38, Bv4=Bv48, Bv5=Bv58, Bv6=Bv68, Bv7=Bv78, Bv8=Bv88, Bv9=Bv98, Bv10=Bv108, Bv11=Bv118, Bv12=Bv128, Bv13=Bv138, M=M8, qa5=qa58, qb1=qb18, qb2=qb28, qc1=qc18, qc2=qc28, qc4=qc48, qc6=qc68, qd7=qd78, qe5=qe58, qf3=qf38, qg8=qg88, qh1=qh18, qh2=qh28, qi2=qi28, qi4=qi48, qi6=qi68, qj7=qj78, qk1=qk18, qk2=qk28, qk4=qk48, qk5=qk58, qk6=qk68, qk7=qk78, ql5=ql58, qm4=qm48, qm5=qm58, qm9=qm98, qm10=qm108, qm11=qm118, qn5=qn58, qo4=qo48, qo5=qo58, qo9=qo98, qo10=qo108, qo11=qo118, qp6=qp68, qp12=qp128, qp13=qp138, qq6=qq68, qr13=qr138, qr6=qr68, qr12=qr128, qr13=qr138, qs6=qs68, qs13=qs138, qzero1=qzero18, qnf1=qnf18, tstar1=tstar18, ptstar1=ptstar18, b1=b18, c1=c18, qzero2=qzero28, qnf2=qnf28, tstar2=tstar28, ptstar2=ptstar28, b2=b28, c2=c28, qzero3=qzero38, qnf3=qnf38, tstar3=tstar38, ptstar3=ptstar38, b3=b38, c3=c38, qzero4=qzero48, qnf4=qnf48, tstar4=tstar48, ptstar4=ptstar48, b4=b48, c4=c48, qzero5=qzero58, qnf5=qnf58, tstar5=tstar58, ptstar5=ptstar58, b5=b58, c5=c58, qzero6=qzero68, qnf6=qnf68, tstar6=tstar68, ptstar6=ptstar68, b6=b68, c6=c68, qzero7=qzero78, qnf7=qnf78, tstar7=tstar78, ptstar7=ptstar78, b7=b78, c7=c78, qzero8=qzero88, qnf8=qnf88, tstar8=tstar88, ptstar8=ptstar88, b8=b88, c8=c88, qzero9=qzero98, qnf9=qnf98, tstar9=tstar98, ptstar9=ptstar98, b9=b98, c9=c98, qzero10=qzero108, qnf10=qnf108, tstar10=tstar108, ptstar10=ptstar108, b10=b108, c10=c108, qzero11=qzero118, qnf11=qnf118, tstar11=tstar118, ptstar11=ptstar118, b11=b118, c11=c118, qzero12=qzero128, qnf12=qnf128, tstar12=tstar128, ptstar12=ptstar128, b12=b128, c12=c128, qzero13=qzero138, qnf13=qnf138, tstar13=tstar138, ptstar13=ptstar138, b13=b138, c13=c138, profa5c=profa5c8, profa5h=profa5h8, profb1c=profb1c8, profb1h=profb1h8, profb2c=profb2c8, profb2h=profb2h8, profc1c=profc1c8, profc1h=profc1h8, profc2c=profc2c8, profc2h=profc2h8, profc4c=profc4c8, profc4h=profc4h8, profc6c=profc6c8, profc6h=profc6h8, profd7c=profd7c8, profd7h=profd7h8, profe5c=profe5c8, profe5h=profe5h8, proff3c=proff3c8, proff3h=proff3h8, profg8c=profg8c8, profg8h=profg8h8, profh1c=profh1c8, profh1h=profh1h8, profh2c=profh2c8, profh2h=profh2h8, profi2c=profi2c8, profi2h=profi2h8, profi4c=profi4c8, profi4h=profi4h8, profi6c=profi6c8, profi6h=profi6h8, profj7c=profj7c8, profj7h=profj7h8, profk1c=profk1c8, profk1h=profk1h8, profk2c=profk2c8, profk2h=profk2h8, profk4c=profk4c8, profk4h=profk4h8, profk5c=profk5c8, profk5h=profk5h8, profk6c=profk6c8, profk6h=profk6h8, profk7c=profk7c8, profk7h=profk7h8, profs5c=profs5c8, profs5h=profs5h8, profm4c=profm4c8, profm4h=profm4h8, profm5c=profm5c8, profm5h=profm5h8, profm9c=profm9c8, profm9h=profm9h8, profm10c=profm10c8, profm10h=profm10h8, profm11c=profm11c8, profm11h=profm11h8, profn5c=profn5c8, profn5h=profn5h8, profo4c=profo4c8, profo4h=profo4h8, profo5c=profo5c8, profo5h=profo5h8, profo9c=profo9c8, profo9h=profo9h8, profo10c=profo10c8, profo10h=profo10h8, profo11c=profo11c8, profo11h=profo11h8, profp6c=profp6c8, profp6h=profp6h8, profp12c=profp12c8, profp12h=profp12h8, profp13c=profp13c8, profp13h=profp13h8, profq6c=profq6c8, profq6h=profq6h8, profq13c=profq13c8, profq13h=profq13h8, profr6c=profr6c8, profr6h=profr6h8, profr12c=profr12c8, profr12h=profr12h8, profr13c=profr13c8, profr13h=profr13h8, profs6c=profs6c8, profs6h=profs6h8, profs13c=profs13c8, profs13h=profs13h8, prof11c=prof11c8, prof11h=prof11h8, prof12c=prof12c8, prof12h=prof12h8, prof13c=prof13c8, prof13h=prof13h8, prof14c=prof14c8, prof14h=prof14h8, prof15c=prof15c8, prof15h=prof15h8, prof16c=prof16c8, prof16h=prof16h8, prof17c=prof17c8, prof17h=prof17h8, prof19c=prof19c8, prof19h=prof19h8, prof10c=prof10c8, prof10h=prof10h8, prof11c=prof11c8, prof11h=prof11h8, prof12c=prof12c8, prof12h=prof12h8, prof13c=prof13c8, prof13h=prof13h8, Dente83=Dente838, Qtassl81=Qtassl818, Qchininds83=Qchininds838, Qtiogf86=Qtiogf868, Qpfdinds86=Qpfdinds868, Qtiogf88=Qtiogf888, Bvpoulpe89=Bvpoulpe898, Tiof89=Tiof898, Daurades89=Daurades898, RR90=RR908, qd792=qd7928, qk792=qk7928,

Annexe D

```

graphe = T,Pg=Pg, Pond = T, N = T, gradient = F, Log = F, tr){

  nn <- Pautemps * Panan
  npar<-length(pare)
  JeuS1<-as.matrix(JeuS1)

  # Mise en "forme" des couts d'opportunité

  Couta<-c(Couta,0,0,0,0)
  Coutb<-c(Coutb,0,0,0,0)
  Coutc<-c(Coutc,0,0,0,0)
  Coutd<-c(Coutd,0,0,0,0)
  Coute<-c(Coute,0,0,0,0)
  Coutf<-c(Coutf,0,0,0,0)
  Coutg<-c(Coutg,0,0,0,0)
  Couth<-c(Couth,0,0,0,0)
  Couti<-c(Couti,0,0,0,0)
  Coutj<-c(Coutj,0,0,0,0)
  Coutk<-c(Coutk,0,0,0,0)
  Coutl<-c(Coutl,0,0,0,0)
  Coutm<-c(Coutm,0,0,0,0)
  Coutn<-c(Coutn,0,0,0,0)
  Couto<-c(Couto,0,0,0,0)
  Coutp<-c(Coutp,0,0,0,0)
  Coutq<-c(Coutq,0,0,0,0)
  Coutr<-c(Coutr,0,0,0,0)
  Couts<-c(Couts,0,0,0,0)
  Coutt<-c(Coutt,0,0,0,0)
  Coutu<-c(Coutu,0,0,0,0)
  Coutv<-c(Coutv,0,0,0,0)
  Coutw<-c(Coutw,0,0,0,0)
  Coutx<-Coutx
  Couty<-Couty

  # Definition des capturabilités contraintes

  qconstraints<-list(qa=c(qa5),
  qb=c(qb1,qb2),
  qc=c(qc1,qc2,qc4,qc6),
  qd=c(qd7),
  qe=c(qe5),
  qf=c(qf3),
  qg=c(qg8),
  qh=c(qh1,qh2),
  qi=c(qi2,qi4,qi6),
  qj=c(qj7),
  qk=c(qk1,qk2,qk4,qk5,qk6,qk7),
  ql=c(ql5),
  qm=c(qm4,qm5,qm9,qm10,qm11),
  qn=c(qn5),
  qo=c(qo4,qo5,qo9,qo10,qo11),
  qp=c(qp6,qp12,qp13),
  qq=c(qq6,qq13),
  qr=c(qr6,qr12,qr13),
  qs=c(qs6,qs13))

  q<-matrix(rep(0,Pantact * Panstock),ncol=Panstock)

  PaDcaptind<-matrix(c(qzero1,qinf1,tstar1,ptstar1,b1,c1,
  qzero2,qinf2,tstar2,ptstar2,b2,c2,
  qzero3,qinf3,tstar3,ptstar3,b3,c3,
  qzero4,qinf4,tstar4,ptstar4,b4,c4,
  qzero5,qinf5,tstar5,ptstar5,b5,c5,
  qzero6,qinf6,tstar6,ptstar6,b6,c6,
  qzero7,qinf7,tstar7,ptstar7,b7,c7,
  qzero8,qinf8,tstar8,ptstar8,b8,c8,
  qzero9,qinf9,tstar9,ptstar9,b9,c9,
  qzero10,qinf10,tstar10,ptstar10,b10,c10,
  qzero11,qinf11,tstar11,ptstar11,b11,c11,
  qzero12,qinf12,tstar12,ptstar12,b12,c12,
  qzero13,qinf13,tstar13,ptstar13,b13,c13),ncol=Panstock, byrow = F)

  for(i in (1 (Pantact - 6))) {q[i, Placetact[[i]], -qconstraints[[i]]}

  # Definition des inaccessibilités contraintes

  Profils<-list(profilsqa=matrix(c(profa5c,profa5h),
  ncol=length(Placetact$a)),
  profilsqb=matrix(c(profb1c,profb1h,profb2c,profb2h),
  byrow=F,ncol=length(Placetact$b)),
  profilsqc=matrix(c(profc1c,profc1h,profc2c,profc2h,profc3c,profc3h,profc4c,profc4h,profc5c,profc5h),
  byrow=F,ncol=length(Placetact$c)),
  profilsqd=matrix(c(profd7c,profd7h),byrow=F,ncol=length(Placetact$d)),
  profilsqe=matrix(c(profe5c,profe5h),byrow=F,ncol=length(Placetact$e)),
  profilsqf=matrix(c(proff3c,proff3h),byrow=F,ncol=length(Placetact$f)),
  profilsqg=matrix(c(profg8c,profg8h),byrow=F,ncol=length(Placetact$g)),
  profilsqh=matrix(c(profh1c,profh1h,profh2c,profh2h),byrow=F,ncol=length(Placetact$h)),
  profilsqi=matrix(c(profi2c,profi2h,profi4c,profi4h,profi6c,profi6h),byrow=F,ncol=length(Placetact$i)),
  profilsqj=matrix(c(profj7c,profj7h),byrow=F,ncol=length(Placetact$j)),
  profilsqk=matrix(c(profk1c,profk1h,profk2c,profk2h,profk4c,profk4h,profk5c,profk5h,profk6c,profk6h,profk7c,profk7h),byrow=F,ncol=length(Placetact$k)),
  profilsql=matrix(c(profl5c,profl5h),byrow=F,ncol=length(Placetact$l)),
  profilsqm=matrix(c(profm4c,profm4h,c(99),c(99.99,99.99),profm9c,profm9h,profm10c,profm10h,profm11c,profm11h),byrow=F,ncol=length(Placetact$m)),
  profilsqn=matrix(c(profn5c,profn5h),byrow=F,ncol=length(Placetact$n)),
  profilsqo=matrix(c(profo4c,profo4h,c(99),c(99.99,99.99),profo9c,profo9h,profo10c,profo10h,profo11c,profo11h),byrow=F,ncol=length(Placetact$o)),
  profilsqp=matrix(c(profp6c,profp6h,profp12c,profp12h,profp13c,profp13h),byrow=F,ncol=length(Placetact$p)),
  profilsqq=matrix(c(profq6c,profq6h,profq13c,profq13h),byrow=F,ncol=length(Placetact$q)),
  profilsqr=matrix(c(profr6c,profr6h,profr12c,profr12h,profr13c,profr13h),byrow=F,ncol=length(Placetact$r)),
  profilsqs=matrix(c(profs6c,profs6h,profs13c,profs13h),byrow=F,ncol=length(Placetact$s)),
  profilsqt=matrix(c(proft1c,proft1h,proft2c,proft2h,proft3c,proft3h,proft4c,proft4h,proft5h,proft6c,proft6h,proft7c,proft7h,proft9c,proft9h,proft10c,proft10h,proft11c,proft11h,proft12c,proft12h,proft13c,proft13h),byrow=F,ncol=length(Placetact$t)))

  IN<-matrix(rep(1,Pa$ntact*Pa$ntock*24),ncol=24)
  for(i in (1 (Pa$ntact-5))) {

    sc<-matrix(Profils[[i]],nrow=5)
    ine<-SinCos%*%sc
    ine<-1/(1+exp(-ine))
    IN[[(Placetact[[i]]-1)*Pa$ntact+i],]<-t(ine)

    # Special Senne Tassergal

    if (i==13) {IN[[(Placetact[[i]]-1)*Pa$ntact+i],(1 24)]<-profm5c}
    if (i==15) {IN[[(Placetact[[i]]-1)*Pa$ntact+i],(1 24)]<-profo5c}
  }

  Bv <- abs(c(Bv1,Bv2,Bv3,Bv4,Bv5,Bv6,Bv7,Bv8,Bv9,Bv10,
  Bv11,Bv12,Bv13))
  q<-abs(q)
  mu <- abs(matrix(c(mu1/(1+mu1),mu2/(1+mu2),mu3/(1+mu3),
  mu4/(1+mu4),mu5/(1+mu5),mu6/(1+mu6)),ncol=1))
  M <- abs(M)

  PaD$effectifs<-matrix(c(ef1,ef2,ef3,ef4,ef5,ef6),byrow=T,ncol=4)
  PaD$alpha <- IN
  PaD$rho <- rho
  PaD$stock <- matrix(c(M, Bv), byrow = F, ncol = 2)
  PaD$mu <- mu
  PaD$q <- q
  PaD$scout <- matrix(c(Couta, Coutb, Coutc, Coutd, Coute, Coutf,
  Coutg, Couth, Couti, Coutj,
  Coutk, Coutl, Coutm, Coutn, Couto, Coutp, Coutq, Coutr, Couts,
  Coutt, Coutu, Coutv, Coutw,Coutx,Couty), ncol = 5,byrow=T)

  PaD$prix<-matrix(c(P1a,P1b,P1c,P1d,P1e,P1f,P1g,P1h,P1i,P1j,
  P1k,P1l,P1m,P1n,P1o,P1p,P1q,P1r,P1s,P1t,P1u,P1v,P1w,P1x,P1y,
  P2a,P2b,P2c,P2d,P2e,P2f,P2g,P2h,P2i,P2j,P2k,P2l,
  P2m,P2n,P2o,P2p,P2q,P2r,P2s,P2t,P2u,P2v,P2w,P2x,P2y,
  P3a,P3b,P3c,P3d,P3e,P3f,P3g,P3h,P3i,P3j,P3k,P3l,
  P3m,P3n,P3o,P3p,P3q,P3r,P3s,P3t,P3u,P3v,P3w,P3x,P3y,
  P4a,P4b,P4c,P4d,P4e,P4f,P4g,P4h,P4i,P4j,P4k,P4l,
  P4m,P4n,P4o,P4p,P4q,P4r,P4s,P4t,P4u,P4v,P4w,P4x,P4y,
  P5a,P5b,P5c,P5d,P5e,P5f,P5g,P5h,P5i,P5j,P5k,P5l,
  P5m,P5n,P5o,P5p,P5q,P5r,P5s,P5t,P5u,P5v,P5w,P5x,P5y,
  P6a,P6b,P6c,P6d,P6e,P6f,P6g,P6h,P6i,P6j,P6k,P6l,
  P6m,P6n,P6o,P6p,P6q,P6r,P6s,P6t,P6u,P6v,P6w,P6x,P6y,
  P7a,P7b,P7c,P7d,P7e,P7f,P7g,P7h,P7i,P7j,P7k,P7l,
  P7m,P7n,P7o,P7p,P7q,P7r,P7s,P7t,P7u,P7v,P7w,P7x,P7y,
  P8a,P8b,P8c,P8d,P8e,P8f,P8g,P8h,P8i,P8j,P8k,P8l,
  P8m,P8n,P8o,P8p,P8q,P8r,P8s,P8t,P8u,P8v,P8w,P8x,P8y,
  P9a,P9b,P9c,P9d,P9e,P9f,P9g,P9h,P9i,P9j,P9k,P9l,
  P9m,P9n,P9o,P9p,P9q,P9r,P9s,P9t,P9u,P9v,P9w,P9x,P9y,
  P10a,P10b,P10c,P10d,P10e,P10f,P10g,P10h,P10i,P10j),

```

Annexe D

```

P10k,P10l,P10m,P10n,P10o,P10p,P10q,P10r,P10s,P10t,
P10u,P10v,P10w,P10x,P10y,
P11a,P11b,P11c,P11d,P11e,P11f,P11g,P11h,P11i,P11j,
P11k,P11l,P11m,P11n,P11o,P11p,P11q,P11r,P11s,P11t,
P11u,P11v,P11w,P11x,P11y,
P12a,P12b,P12c,P12d,P12e,P12f,P12g,P12h,P12i,P12j,
P12k,P12l,P12m,P12n,P12o,P12p,P12q,P12r,P12s,P12t,
P12u,P12v,P12w,P12x,P12y,
P13a,P13b,P13c,P13d,P13e,P13f,P13g,P13h,P13i,P13j,
P13k,P13l,P13m,P13n,P13o,P13p,P13q,P13r,P13s,P13t,
P13u,P13v,P13w,P13x,P13y),ncol=Pa$ntact,byrow=T)

Pa$B0 <- matrix(B0, ncol = 1)
Pa$cgts<-c(Qtassl81,Qchininds83,Dente83.0,Qtiofgl86, Qpfdinds86,
Qtuofinds88, Bvpoulpe89, Tiof89, Daurades89.RR90,qd792,qk792)

sink("Temp")
print(Pa)
sink()

# -----

Pesc <- Pesca(Pa, N = N, gradient = gradient, par = pare)

# Initialisation de parametres

decomp<-lst(T1=0,T2=0,T3=0,T4=0,T5=0,T6=0,T7=0)
CR<-c(0)
Res<-0
Autoc<-0

for (i in (1 (nrow(Pa$M)-2))) {

  UM<-JeuS1[,(Pa$nstock+3)*(i-1)+1 ((Pa$nstock+3)*i)]
  PM<-Pesc$Donnees[[i]]

  Obs<-UM[,.(ncol(UM)-1)]
  Obs<-Obs[Obs!=0]

  if (sum(Obs)==0) { print(c("Pas de donnees relatives a l'engin",
Pg[[i]][1])) }
  else {
  nomb<-ncol(UM)-2

  # Transformation logarithmique eventuelle des rendements

  if (Log==T) {
  UM[,.(2 nomb)]<-log(1+ UM[,.(2 nomb)])
  PM[,.(2 nomb)]<-log(1+ PM[,.(2 nomb)]) }

  # Ponderation sur les observations

  UMG<-UM[Obs,(1 nomb)] PMG<-PM[Obs,(1 nomb)]
  # Normalisation, pour les observations disponibles

  Un <- matrix(rep(1, nrow(UMG)))
  Moy <- (t(UMG) %>% V) / (nrow(Un))
  Moy <- matrix(rep(Moy, nrow(UMG)), ncol = ncol(UMG), byrow =
T)
  UMM <- UMG - Moy
  V <- diag(t(UMM) %>% V)
  V[V == 0] <- 1
  V <- diag(1/(sqrt(V)))

  UU<-((UMG-PMG)%>%V)[,esp[[i]]]

  # Expression pour chaque serie du tableau i de la decomposition
de sa somme de carres
# # Nous notons UMG la serie des observes
# ----- PMG ----- ajustes
# ----- Moy la moyennes des observes
# ----- PMoy----- ajustes

  PMoy<-(t(PMG)%>%Un)/(nrow(Un))
  PMoy<-matrix(rep(PMoy,nrow(PMG)),ncol=ncol(PMG),byrow=T)

  UU1<-diag(t(((Moy-PMoy)%>%V)[,esp[[i]])%>%
(((Moy-PMoy)%>%V)[,esp[[i]]]))
  UU2<-diag(t(((PMoy-PMG)%>%V)[,esp[[i]])%>%
(((PMoy-PMG)%>%V)[,esp[[i]]]))

  UU3<-2*diag(t(((UMG-Moy)%>%V)[,esp[[i]])%>%
(((PMoy-PMG)%>%V)[,esp[[i]]]))
  UU4<-2*diag(t(((UMG-Moy)%>%V)[,esp[[i]])%>%
(((Moy-PMoy)%>%V)[,esp[[i]]]))
  UU5<-2*diag(t(((Moy-PMoy)%>%V)[,esp[[i]])%>%
(((PMoy-PMG)%>%V)[,esp[[i]]]))

  decomp[[i]]<-matrix(c(rep(1,length(esp[[i]])),UU1,UU2,UU3,UU4,UU5) ncol=6,byrow=T)

  # Ponderation sur les variables, et expression

  # 1 Des sommes des autocorrelations de rang 24 des residus
# pour chaque serie

  autoc<-rep(0,ncol(UU))

  for (i in (1 ncol(UU))) {

    x<-ts(UU[,i])
    aut<-acf(x,lag max=24,type="correlation",plot=F)

    autoc[i]<-sum(aut[[1]][2]*aut[[1]][2])

  }

  # 2 Des sommes de carres pour chaque serie

  cr<-diag(t(UU)%>%UU)

  print(cr)

  CR<-c(CR,cr)
  Res<-Res + sum(cr*Pondvar[[i]])
  Autoc<-Autoc + sum(autoc) }

  if (i==(nrow(Pa$M)-2)) {print(c(Res,Autoc))}

  # Trace des graphes

  if (graphe==T){

    dev.set(which=i+1)
    par(xaxt="n")
    par(mfrow=c((length(esp[[i]]),1))
    par(mar=c(2,6,2,6))

    uuu<-1
    Pg$annee<-Pan

    if (i==3) {uuu<-25
    Pg$annee<-Pan[2 length(Pan)]}
    if (i==4) {uuu<-5*24+1
    Pg$annee<-Pan[6 length(Pan)]}
    if (i==5) {uuu<-5*24+1
    Pg$annee<-Pan[6 length(Pan)]}

    num<-0
    for(j in (esp[[i]])) {num<-num+1
    a<-max(c(UM[j],PM[j]))
    b<-min(c(UM[j],PM[j]))
    plot(Obs,UM[Obs,j],ylim=c(b,a),xlim=c(uuu,(24*(Pa$nan-Pa$ncal))),
type="o",xlab="",ylab="")
    par(new=T)
    plot((uuu nrow(PM)).PM[(uuu nrow(PM)).j],ylim=c(b,a),
xlim=c(uuu,(24*(Pa$nan-Pa$ncal))),type="l",xlab="",ylab="",lty=2)
    mtext( paste(signif(cr[num],4)),line=2,side=4)
    mtext(Pg[[i]][num],line=4,side=2)
    axis(1,seq(uuu,(Pa$nan-Pa$ncal+1)*24,24),Pg$annee)
    if(j==esp[[i]][1]) {title(tr,cex=0.5)}
    }
  }

  # trace des revenus moyens par tactique ainsi que la repartition
# correspondante des efforts par tactique pour chacune des "strategie"
# en regroupant les strategies LG-Sennes et Sennes

  # Les revenus par "strategie"

```

Annexe D

```

    if (graphe==T){
fdtsdts<-c(16,17,18,19,21)
ligneskayar<-c(5,6,7,8,9,10,22)
lignesStlouis<-c(1,2,3,4,23)
SennesGl<-c(11,12,13,14,15,24,25)
str<-list(fdtstdts=fdtsdts,ligneskayar=ligneskayar,
lignesStlouis=lignesStlouis,SennesGl=SennesGl)
dev set(which=(nrow(Pa$M)))
par(mfrow=c(4,1))
par(mar=c(2,6,2,6))
Rev <- Pesc$Revmoyact
noml<-c("Revenus pour tactiques filets dts","Revenus pour tactiques
Lignes-Kayar",
"Revenus pour tactiques Lignes-StLouis",
"Revenus pour tactiques Senne-Glacieres" )

    for(j in (1:4)){
a <- min(Rev[,str[[j]])
b <- max(Rev[,str[[j]])
par(xaxt = "n")
for(i in str[[j]]) {
plot((1:nrow(Rev)), Rev[, i], ylim = c(a, b), xlab = "", ylab = "", lty
= i, type = "l")
if(j==1){title(tr,cex=0.5)}
if(i == str[[j]][1]) {
legend((nrow(Rev)/20), ((9 * b)/10), c(paste("Revenus tactique",
str[[j]])), lty = str[[j]],cex=0.6)
axis(1, seq(1, (Pa$nan-Pa$ncal+1)*24, 24), Pg$annees)
mtext(noml[[j]],side=4,line=3)
}
if(i < max(str[[j]]) {par(new = T)}
} }

    for(j in (1:4)){

dev set(which=(nrow(Pa$M)+j)) #Pa.M + 1
par(mfrow = c(1,1))
par(mar = c(2,6,2,6))
par(xaxt = "n")

a <- min(Pesc$TER[,str[[j]])
b <- max(Pesc$TER[,str[[j]])

noml<-c("Efforts pour tactiques Filets dts","Efforts pour tac-
tiques Lignes-Kayar",
"Efforts pour tactiques Lignes-StLouis",
"Efforts pour tactiques Senne-Glacieres" )

    for(i in (str[[j]]) {

plot((1:nrow(Pesc$TER)), Pesc$TER[, i], ylim = c(a, b),
xlab = "", ylab = "", lty = i, type = "l")
if(j==1){title(tr,cex=0.5)}
if(i == str[[j]][1]) {

legend((nrow(Pesc$TER)/20), ((9 * b)/10), c(paste(
"Effort tactique", str[[j]])), lty = str[[j]],cex=0.6)
axis(1, seq(1, (Pa$nan-Pa$ncal+1)*24, 24), Pg$annees)
mtext(noml[[j]],side=4,line=3)
}
if(i ;max(str[[j]])) {
par(new = T)
}
}

}

# Trace des valeurs courantes des biomasses au cours de la simu-
lation

dev set(which = (5+nrow(Pa$M)))

a <- min(Pesc$Bm)
b <- max(Pesc$Bm)
par(xaxt = "n")
for(i in (1:Pa$stock)) {
plot((1:nrow(Pesc$Bm)), Pesc$Bm[, i], ylim = c(a, b), xlab = "",
ylab = "", lty = i, type = "l",col=i)
if(i ,(Pa$stock)) {
par(new = T)
}
}

if(i == 1) {
title(tr,cex=0.5)
legend((nrow(Pesc$Bm)/20), ((9 * b)/10), c("Tiofs","Daurades cotieres","Daurades
profondes",
"Chinchards","Tassergal","Poulpe","Poissons filets dormants",
"Voiliers","Sardinelle ronde","Sardinelle plate",
"Caranx","Soles","Requins-Raires"), lty = (1:Pa$ntact),cex=0.6)
}
axis(1, seq(1, (Pa$nan-Pa$ncal+1)*24, 24), Pg$annees)
if(i ,(Pa$stock)) {
par(new = T)
}
}

# Trace des profils saisonniers de chaque stock pour chaque tac-
tique

maxtact<-8 # maxtact est le nombre maximum de tactiques pour
une espece

dev set(which = (6+nrow(Pa$M)))

nom <-c("a","b","c","d","e","f","g","h","i","j","k","l","m","n","o","p","q",
"r","s","t","u","v","w","x","y")

for(i in (1:Pa$stock)){
U<-matrix(Pa$D$alpha[((i-1)*Pa$ntact+Placestock[[i]]),],ncol=Pa$utemps)
p<-nrow(U)

for(j in (1:p)){
y1<-signif((1/Pa$stock)^(i-1),2)
y2<-signif(((1/Pa$stock)^i),2)
x1<-signif((1/maxtact)^(j-1),2)
x2<-signif((1/maxtact)^j),2)
par(fig=c(x1,x2,y1,y2))
par(mar=c(0,0,0,0))
par(xaxt="n",yaxt="n")
plot((1:Pa$utemps),U[,j],type="o",xlab="",ylab="",axes=F,ylim=c(0,1))
points(4,0.8,pch=nom[Placestock[[i]][j]])
box()
}
}

# Trace du cumul des sommes de carres

dev set(which = (7+nrow(Pa$M)))
CR<-CR[2:length(CR)]
CRR<-CR
nom<-paste(c(1,11,12,13,14,15,16,2,21,22,23,24,25,26,27,28,3,
31,32,33,34,35,36,4,41,42,43,44,45,5,51,52,53,54,55,6,61,62,63,7,71,72,73))
a<-rep(0,length(CR))
u<-c(1.43)
v<-rep(0.43)
for(i in (1:length(CR))) {
if (i==1){a[i]<-min(CR)}
else {a[i]<-min(CR[CR'=0])+a[i-1]}
v[i]<-u[CR==min(CR[CR'=0])]
CR[CR==min(CR[CR'=0])]<-0
}

plot((1:length(a)),(1:length(a)),xlim=c(1,length(a)),
type="l",ylim=c(min(a,(1:length(a))),max(a,(1:length(a)))),
xlab="",ylab="Cumul des sommes de carres")
par(new=T)

for(i in (1:length(a))) {
plot(i,a[i],xlim=c(1,length(a)),ylim=c(min(a,(1:length(a))),
max(a,(1:length(a)))),xlab="",ylab="",pch=nom[v[i]])
if (i'=length(a)) { par(new=T) }
}
}

# Sortie des decompositions

sink("decomposition")
print(decomp)
sink()
if (graphe==F)CRR<-CR[2:length(CR)]

```

Annexe D

```
print(c(sum(CRR),c(as*Res+bs*Autoc)))
# print(as*Res+bs*Autoc)
return(as*Res+bs*Autoc)
}
```

Programme ajust

```
#####
#
# Ajustement sur le modele initial dont on a decouple
# les tactiques "autres activites"
# pour chaque strategie,
# ie les tactiques s, t, u, v et w correspondent respectivement a
# l'"autre activite" des filets dormants, Lignes kayar,
# Lignes Saint-Louis, Glacieres/Sennes et Industriels
#
#####
#
# 1 Definition des parametres relatifs a la taille de la memoire
#
#####
options(object size=1000000)
options(memory size=4000000)

#####
#
# 2 Lecture des fonctions intervenant dans l'ajustement
#
#####

# ----- Fonctions relatives a la simulation-----

calc B<-dget("calc B S")
calc cpue<-dget("calc cpue S")
calc f<-dget("calc f.S")
calc prop<-dget("calc prop S")
calc resp<-dget("calc resp S")
calc robt<-dget("calc robt S")
calculs<-dget("calculs S")
maj.rev<-dget("maj rev S")
gradientB<-dget("gradient B S")

Pesca<-dget("Blaba S")

#----- Fonction relative a l'ajustement-----

SC<-dget("SCBlaba2 S")

#----- Fonction relative aux changements-----

Changements<-dget("Changements S")

#####
#
# 3 Lecture des harmoniques et avant des parametres necessaires a
leur expression
#
#####

# Placetact est une liste dont chaque element est un vecteur in-
diquant
# les positions des stocks auxquels a acces ladite tactique

Placetact<-list(a=c(5),
b=c(1,2),
c=c(1,2,4,6),
d=c(7),
e=c(5),
f=c(3),
g=c(8),
h=c(1,2),
i=c(2,4,6),
j=c(7),
k=c(1,2,4,5,6,7),
l=c(5),

m=c(4,5,9,10,11),
n=c(5),
o=c(4,5,9,10,11),
p=c(6,12,13),
q=c(6,13),
r=c(6,12,13),
s=c(6,13),
t=c(1,2,3,4,5,6,7,9,10,11,12,13))

# Placestock est une liste dont chaque element est un vecteur
indiquant
# les positions des tactiques qui ont acces au dit stock

Placestock<-list(un=c(2,3,8,11,20),
deux=c(2,3,8,9,11,20),
trois=c(6,20),
quatre=c(3,9,11,13,15,20),
cinq=c(1,5,11,12,13,14,15,20),
six=c(3,9,11,16,17,18,19,20),
sept=c(4,10,11,20),
huit=c(7),
neuf=c(13,15,20),
dix=c(13,15,20),
onze=c(13,15,20),
douze=c(16,18,20),
treize=c(16,17,18,19,20))

#####
#
# 4 Lecture et mise en forme des jeux de donnees sur lesquels on
ajuste
#
#####

# a Lecture des jeux de donnees sur lesquels nous allons ajuster
# -----Les lignes a St-Louis et a Kayar-----
Lignes<-matrix(scan("/home/laloe/S/pb/Lignes96 dat"), ncol=16, by-
row=T)
KLignes<-Lignes[Lignes[,5]==31,]
SLignes<-Lignes[Lignes[,5]==11,]
SLignes<-SLignes[2 nrow(SLignes),]
SLignes<-cbind(SLignes[,1:10],SLignes[,12:15])
# -----Les lignes glaciers a Kayar et a St-Louis-----
LignesGl<-matrix(scan("/home/laloe/S/pb/LignesGl96 dat"), ncol=16,
byrow=T)
LignesGl<-cbind(LignesGl[,1:10],LignesGl[,12:15])
# -----Les Sennes a Kayar et a Saint-Louis-----
KSennes<-rbind(KSennes[1:33,],KSennes[37:88,],KSennes[91 nrow(KSennes),])
SSennes<-Sennes[Sennes[,5]==11,]
# -----Les Filets dormants a Kayar et a St-Louis-----
FiletsDts<-matrix(scan("/home/laloe/S/pb/FiletsDts96 dat"), ncol=11,
byrow=T)
KFiletsDts<-FiletsDts[FiletsDts[,5]==31,]
KFiletsDts<-rbind(KFiletsDts[1:45,],KFiletsDts[48:78,],KFiletsDts[80 nrow(KFiletsDts),])
SFiletsDts<-FiletsDts[FiletsDts[,5]==11,]
SFiletsDts<-rbind(SFiletsDts[2:25,],SFiletsDts[27:43,],SFiletsDts[45 nrow(SFiletsDts),])
JeuS1<-list(SLignes=SLignes,KLignes=KLignes,LignesGl=LignesGl,KSennes=SSennes,
KSennes=KSennes,SFiletsDts=SFiletsDts,KFiletsDts=KFiletsDts)
# b Definition d'eventuels termes de ponderation, en sortie on a un
fichier contenant
#
# -Les efforts de l'engin
# -Les rendements par espece
# -Les numeros des observations disponibles
# -Les eventuels termes de ponderation (egaux pour la ieme observa-
tion a ni/n ou
# ni est le nombre de sorties et n le nombre de sorties totales
# Nous pourrions envisager d'autres termes de ponderation
#
# L'ensemble des 7 fichiers est range dans la liste JeuS1

andeb<-1974
anfin<-1992

for(i in (1:7)){
U<-JeuS1[[i]]
```


Annexe D

```

0 P1o8<-0 P1p8<-0 P1q8<-0 P1r8<-0 P1s8<-0 P1t8<-0 P1u8<-0 P1v8<-0 Coutp8<-2137
0 P1w8<-0 P1x8<-0 P1y8<-0          Coutq8<-2709
          Coutr8<-17974
          Couta8<-7577
          P2a8<-311 32955 P2b8<-0 P2c8<-0 P2d8<-0 P2e8<-0 P2f8<-0
P2g8<-0 P2h8<-0 P2i8<-0 P2j8<-0 P2k8<-0 P2l8<-0 P2m8<-0 P2n8<-0
0 P2o8<-0 P2p8<-0 P2q8<-0 P2r8<-0 P2s8<-0 P2t8<-0 P2u8<-0 P2v8<-0 Coutt8<-0 000000e+00
0 P2w8<-0 P2x8<-0 P2y8<-0          Coutu8<-3212
          Coutv8<-12418
          Coutw8<-24413 94020
          P3a8<-211 15917 P3b8<-0 P3c8<-0 P3d8<-0 P3e8<-0 P3f8<-0
P3g8<-0 P3h8<-0 P3i8<-0 P3j8<-0 P3k8<-0 P3l8<-0 P3m8<-0 P3n8<-0
0 P3o8<-0 P3p8<-0 P3q8<-0 P3r8<-0 P3s8<-0 P3t8<-0 P3u8<-0 P3v8<-0
0 P3w8<-0 P3x8<-0 P3y8<-0          Coutx8<-c(-4 502437e+04.1 000001e-01,-9 093892e+03,-9 999936e-02,-
          Couty8<-c(-5 778162e+03,2 000348e-01,1 380228e+04,2 299413e-
          01,3 000128e-01)
          # -----Biomasses vierges-----
          Bv18<-2 944756e+07
          Bv28<-4.370011e+07
          Bv38<-1 614180e+07
          Bv48<-200000000
          Bv58<-66666000
          Bv68<-15000000
          Bv78<-500
          Bv88<-50000000
          Bv98<-100000000
          Bv108<-50000000
          Bv118<-200000000
          Bv128<-3000000
          Bv138<-30000000
          # -----M-----
          M8<-matrix(c(0 3, 0 5, 0 4, 0 5, 0 3, 0 4, 50, 0 2, 1, 1, 0 4, 0 5,
          0 3),ncol=1)
          # -----Mise en place des contraintes relatives-----
          # -----aux capturabilites et aux inaccessibilites-----
          # -----Les capturabilites-----
          # tactique a
          qa58<-2 408733e-06
          # tactique b
          qb18<-2 517863e-06
          qb28<-5 927946e-07
          # tactique c
          qc18<-5 283743e-07
          qc28<-2 422761e-06
          qc48<-9 425474e-07
          qc68<-3 451792e-06
          # tactique d
          qd78<-7 469473e-07
          # tactique e
          qe58<-2 903413e-06
          # tactique f
          Couta8<-9049 22175
          Coutb8<-2800
          Coutc8<-1001 27971
          Coutd8<-10538 48002
          Coute8<-12462 66975
          Coutf8<-10752
          Coutg8<-7209
          Couth8<-864
          Couti8<-5588
          Coutj8<-6218
          Coutk8<-27248 23
          Coutl8<-33468 716
          Coutm8<-5023
          Coutn8<-30354 183
          Couto8<-17348
          # tactique g
          qf38<-8 337972e-06
          # tactique h
          qh18<-1 761619e-06
          qh28<-1 362858e-06
          # tactique i

```

Annexe D

```

qi28<-1 489904e-06
qi48<-1 412698e-06
qi68<-2 245612e-06

# tactique j
qj78<-5 823041e-07

# tactique k
qk18<-0 0000080263
qk28<-1 671021e-06
qk48<-1 599104e-08
qk58<-3 676639e-08
qk68<-1 252026e-06
qk78<-5 081587e-10

# tactique l
ql58<-0

# tactique m
qm48<-3 549899e-07
qm58<-3 314264e-06
qm98<-9 373338e-07
qm108<-3 226637e-06
qm118<-3 468014e-06

# tactique n
qn58<-0

# tactique o
qo48<-3 897023e-06
qo58<-2 524643e-06
qo98<-1 033574e-06
qo108<-2 346701e-06
qo118<-3 684507e-06

# tactique p
qp68<-0
qp128<-7 587201e-06
qp138<-0

# tactique q
qq68<-7 781237e-06
qq138<-1 088008e-05

# tactique r
qr68<-0
qr128<-2 158653e-05
qr138<-0

# tactique s
qs68<-1 348569e-05
qs138<-5 128211e-06

# tactique t
#
# Les capturabilites des industriels envers les stocks sont
# exprimes comme une transformation logistique d'une
# combinaison lineaire de polynomes de degres 0 a 3
# Par exemple, la capturabihte des industriels envers le stock l au
# temps t vaut
# ie  $qtl(t) = q0l + (q1nfl - q0l) * (1/(1 + exp(al - alt/tstarl + bl * t^2 + cl * t^3)))$ 
#
qzero18<-1 230412e-05
qinf18<-1 393431e-05
tstar18<-1 231799e+02
a18<-6 879980e+02
b18<-10e-20
c18<-10e-20

qzero28<-2 861007e-05
qinf28<-1 554902e-05

tstar28<-10
a28<-10e-20
b28<-10e-20
c28<-10e-20

qzero38<-2 501575e-05
qinf38<-2 501573e-05
tstar38<-10
a38<-10e-20
b38<-10e-20
c38<-10e-20

qzero48<-2 730620e-05
qinf48<-3 596768e-05
tstar48<-200
a48<-10e-20
b48<-10e-20
c48<-10e-20

qzero58<-1 279487e-05
qinf58<-1 279494e-05
tstar58<-10
a58<-10e-20
b58<-10e-20
c58<-10e-20

qzero68<-1 831876e-06
qinf68<-1 147704e-05
tstar68<-1 622227e+02
a68<-1 008022e+01
b68<-10e-20
c68<-10e-20

qzero78<-1 009598e-05
qinf78<-1 009598e-05
tstar78<-10
a78<-10e-20
b78<-10e-20
c78<-10e-20

qzero88<-10e-20
qinf88<-10e-20
tstar88<-10
a88<-10e-20
b88<-10e-20
c88<-10e-20

qzero98<-3 069549e-08
qinf98<-3 069549e-08
tstar98<-10
a98<-0
b98<-0
c98<-0

qzero108<-1 201950e-05
qinf108<-1 201950e-05
tstar108<-10
a108<-10e-20
b108<-10e-20
c108<-10e-20

qzero118<-10e-20
qinf118<-10e-20
tstar118<-10e-20
a118<-10e-20
b118<-10e-20
c118<-10e-20

qzero128<-1 666868e-05
qinf128<-1 666868e-05
tstar128<-10
a128<-10e-20
b128<-10e-20
c128<-10e-20

qzero138<-6 272232e-05
qinf138<-6 272233e-05
tstar138<-10
a138<-10e-20
b138<-10e-20

```

Annexe D

```

c138<-10e-20
# -----Parametres relatifs aux changements-----
Qtassl818<-0 5
Qchininds838<-1 2
Dente838<-1 825499
Qtiofjl868<-1 145
Qpfdinds868<-1 414
Qtiofinds888<-1 7
Bvpoulpe898<-100000
Tiof898<-1 032908e+00
Daurades898<-1 034672e+00
RR908<-4 61
# -----Parametres relatifs aux profils-----
#
# version ou les profils sont dispatches par stock*tactique
#
# profilsq* est une matrice contenant pour la
# tactique q* les profils des stocks correspondants (cf contraintes)
#
# Rq_ On ne considere pas l'espece 3 (Dente profonds)
# pour laquelle on suppose une accessibilite constante ainsi que pour
# les
# tactiques industriels et lignes glacières
# Leurs parametres seront accolés lors de l'expression
# de la fonction cntere

# Definition des harmoniques
tt<-(1:24)
sin1<-sin((pi/12)*tt)
cos1<-cos((pi/12)*tt)
sin2<-sin((pi/6)*tt)
cos2<-cos((pi/6)*tt)
SinCos<-matrix(c(rep(1,24),cos1,cos2,sin1,sin2),ncol=5,byrow=F)

# Definition des profils
# Profils est obtenu en faisant "tourner" le fichier Pleurs S
# Attention, on doit avoir au préalable défini PacetactetPlacestock
#
# Profils est une liste sortie de Pleurs S dont la ieme composante
# contient les coefficients de l'ajustement des captures moyennes du
# tableau i
# (ex le tableau 1 sont les cm des lignes a St-Louis)
#
# La syntaxe est la suivante profa5c8 ou a est le nom de la tactique,
# 5 est le numero du stock
# c est relatif au coefficient considere
# (c pour la constante, et h pour les harmoniques)
#
# Profil tactique a
    profa5c8<-c(2 7884)
    profa5h8<-c(-0 426217, -1 05662, 6 56562, -2 16057)

# Profils tactique b
    profb1c8<-7 995694e-01
    profb1h8<-c(2 772017e-01, 3 800071e-01, 7 519435e-01, -6 357632e-02)
    profb2c8<-1 544390e+00
    profb2h8<-c(-7 941295e-01, 4 178626e-01, 4 263282e-02, -3 832077e-01)

# Profils tactique c
    profc1c8<-1 751445e+00
    profc1h8<-c(2 772017e-01, 3 800071e-01, 7 519435e-01, -6 357632e-02)

    profc2c8<-2 405375e-01
    profc2h8<-c(-8 381798e-01, 4 807672e-01, 4 379677e-02 -3 571297e-01)
    profc4c8<-6 721318e-01
    profc4h8<-c(1 168652e-01, 1 941042e-01, 5 475272e-01, -2 095808e-01)
    profc6c8<-1 013379e-02
    profc6h8<-c(1 208549e-01, -5 213582e-02, -6 241872e-02 ,5 438232e-03)

# Profil tactique d
    profd7c8<-2 132745e-01
    profd7h8<-c(9 508823e-02, -3 133463e-01, -3 106635e-01, -1 583672e-01)

# Profils tactique e
    profe5c8<-1 51747
    profe5h8<-c(-0 236369, -2 16631, 4 10379, -0 395932)

# Profil tactique f
    profff3c8<-log(9)
    profff3h8<-c(0,0,0,0)

# Profil tactique g
    profg8c8<-6 634446e+00
    profg8h8<-c(-5 417625e+00, -7 204585e-01,
-4 240084e+00, -1 848533e+00)

# Profils tactique h
    profh1c8<-1 675365e+00
    profh1h8<-c(2 068832e-01, 5 105954e-01, 6 812334e-01, 1 755640e-01)
    profh2c8<-1 254023e+00
    profh2h8<-c(-3 919446e-01, 5 804391e-01, -5 703475e-03, -4 370755e-01)

# Profils tactique i
    profi2c8<-1 781044e+00
    profi2h8<-c(3 864380e-01, 5 803603e-01, -5 702603e-03, -4 375383e-01)

    profi4c8<-1 095857e+00
    profi4h8<-c(-6 395566e-02, 7 345531e-02, 2 389873e-01, -6 975315e-03)
    profi6c8<-7 006224e-01
    profi6h8<-c(-3.784285e-01, 2 622314e-01, 1 788135e-01, -2 851255e-01)

# Profils tactique j
    profj7c8<-4 530615e-01
    profj7h8<-c(-4 804669e-01, -2 900270e-01, 6 583470e-01, -7 624915e-01)

# Profils tactique k
    profk1c8<-2 0165777799
    profk1h8<-c(0 0338916965,0 1107526160,-0 3417425438,-0 0071828417)
    profk2c8<-log(9)
    profk2h8<-c(0,0,0,0)
    profk4c8<-log(9)
    profk4h8<-c(0,0,0,0)
    profk5c8<-log(9)
    profk5h8<-c(0,0,0,0)
    profk6c8<-log(9)
    profk6h8<-c(0,0,0,0)
    profk7c8<-log(9)
    profk7h8<-c(0,0,0,0)

# Profil tactique l
    profl5c8<-Profils[[4]][1,Placetact$l]
    profl5h8<-Profils[[4]][2 5,Placetact$l]

# Profils tactique m
    profm4c8<-8 045884e-01
    profm4h8<-Profils[[4]][2 5,Placetact$m[1]]
    profm5c8<-c(rep(1,9),0 2 0 2 ,rep(1,13))
    profm9c8<-0 39670166
    profm9h8<-c(2 38197747, 0 08745736, 1 01326328, -0 49618995)
    profm10c8<- 1 801691e+00
    profm10h8<- Profils[[4]][2 5,Placetact$m[4]]
    profm11c8<-3 41391834

```

Annexe D

```

profm1h8<-c(-1 95820721, 0 02918581, -1 62114576, 0 6295895)

# Profil tactique n
profn5c8<-0
profn5h8<-c(0,0,0,0)

# Profils tactique o
profo4c8<-1 052507
profo4h8<-c(0 2102292, 0 1839396, 0 5075327, -0 1839422)
profo5c8<-c(rep(1,8),0 35,0 15,0 15,rep(1,13))
profo9c8<-1 555800e+00
profo9h8<-Profils[[5]][2 5,Placetacto[3]]
profo10c8,-1.847281e + 00
profo10h8,-Profils[[5]][2 5,Placetacto[4]]
profo11c8<-3 629663e+00
profo11h8<-c(-3 03327423, -0 01285588,-2 50212666, 0.13022460)

# Profils tactique p
profp12c8<-1 375229e-01
profp12h8<-c(-1 17616355, -0.07340197, 0.17203777, -0 77177022)
profp6c8<-0 841
profp6h8<-c(-0 07534, 0 1953, 0 1643, 0 03256)
profp13c8<-2 535+00
profp13h8<-c(-9 974834e-02, 4 029709e-01,-2 374458e-01, -5 382872e-02)

# Profils tactique q
profq6c8<-7 031601e-01
profq6h8<-c(-0.076325, 0 26868, 0 54878, 0 032648)
profq13c8<-2.585956e+00
profq13h8<-c(-9.974834e-02, 4 029709e-01,-2 374458e-01, -5 382872e-02)

# Profil tactique r
profr12c8<-3.945427e-01
profr12h8<-c(-0 97,-0 11,1 26,-0 31)
profr6c8<-0 25979663
profr6h8<-c(-0 072645969, 0 022922246, 0.278513798, -0 001860806)
profr13c8<-3 135282e+00
profr13h8<-c(5 230710e-01, 2 040172e-01, -1 002715e+00, -1 079536e-01)

# Profils tactique s
profs6c8<-4 513815e-02
profs6h8<-c(-0 072645969, 0 022922246, 0 278513798, -0 001860806)

profs13c8<-3.214757e+00
profs13h8<-c(5 230710e-01, 2 040172e-01, -1 002715e+00, -1 079536e-01)

# Profils tactique t
proft1c8<-log(9)
proft1h8<-c(0,0,0,0)
proft2c8<-log(9)
proft2h8<-c(0,0,0,0)
proft3c8<-log(9)
proft3h8<-c(0,0,0,0)
proft4c8<-log(9)
proft4h8<-c(0,0,0,0)
proft5c8<-log(9)
proft5h8<-c(0,0,0,0)
proft6c8<-log(9)
proft6h8<-c(0,0,0,0)
proft7c8<-log(9)
proft7h8<-c(0,0,0,0)
proft9c8<-log(9)
proft9h8<-c(0,0,0,0)
proft10c8<-log(9)
proft10h8<-c(0,0,0,0)
proft11c8<-log(9)
proft11h8<-c(0,0,0,0)
proft12c8<-log(9)
proft12h8<-c(0,0,0,0)
proft13c8<-log(9)
proft13h8<-c(0,0,0,0)

# Les autres tactiques etant des tactiques repos, elles ont des
# capturabilités nulles
# envers les stocks et donc pas de profils

# Definition de la liste PaJeuS1 des parametres qui sera ensuite
# completee (cf fonction SC)
PaJeuS1<-list(Lambda=numeric(0),rho=numeric(0),ncal=3,nstrat=6,
nstock=13,ntact=25,utemps=24,nan=22,M=M,
D=list(stock=numeric(0), prix=numeric(0), cout=numeric(0), se=se,
q=numeric(0),
alpha=numeric(0),effectifs=numeric(0),captind=numeric(0)),taux=0 8,
cgt=numeric(0))

#####
#
# 7 Ajustement ms, et valeurs de depart des parametres sur lesquels
# on ajuste
#
#####

# Parametre indiquant le nombre maximal d'iterations a consi-
# derer

control<-list(maxiter=12,tolerance=0 01,minscale=0 01,trace=T)

# Definition des parametres a ajuster et de leurs valeurs initiales

Coutm88<-1513 183

ajustement<-ms(SC(JeuS1.Pa=PaJeuS1,SinCos=SinCos,esp=esp,Pg=Pg,
Placetact=Placetact,Placestock=Placestock,Pondvar=Pondvar, as=1,
bs=0,
Coutm=Coutm8,
graphe=T,gradient=F,N=F,Log=T,tr=c("")),
data=JeuS1,
start=list(Coutm8=Coutm88),
control=control,
trace=T)

```


Annexe E

Article soumis à *Fisheries Research* le
28 novembre 1997

Model identification for flexible multifleet-multispecies fisheries

A simulation study.

F. Laloë¹, N. Pech¹, R. Sabatier² and A. Samba³

¹ ORSTOM HEA BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, (address to which proofs should be sent)

² Faculté de pharmacie, UMR CNRS 9921, av. C. Flahaut, Montpellier cedex 2

³ CRODT ISRA, BP 2241, Dakar, Sénégal

Abstract

In multifleet multispecies fisheries exploitation, fishing units of some fleets may choose between different fishing tactics targeting different species combinations. Such fishing units may be very important for different reasons, and must be accounted for in global frameworks. Such a framework was built in order to qualitatively represent the main features of the Senegalese artisanal fishery. Simulations may be carried out with output comparable to available data, so that the parameters of the model may be estimated using a least square criterium. One of the sources of uncertainty comes from a lack of knowledge on both the real dynamics of the fishing strategies and the dynamics of the harvested populations. We show, with a simple simulated fishery, that very different models may fit classical catch effort data, and that the assumptions made on the « biological » and on the « socio-economical » aspects of the fishery are very closely linked. We also show some of the consequences of the choice of a model in terms of prediction of results for economical and biological aspects.

Key words: multifleet-multispecies fisheries, population dynamics, fleet dynamics, adjustment, model identification

Introduction

The main objectives of fisheries management -or the evaluation of the results of management- are usually based on the abundance of harvested stocks. « Optimal » fishing effort and/or mortality, TACs (Total Available Catches) or ITQs (Individual Transferable Quotas) are mainly determined in this way (Stephenson and Lane 1995). These management objectives and tools may be more or less efficient, depending on the strategies of fishing units and the socio-economic context of the fisheries exploitation. When each fishing unit is specialized in harvesting a given component (or a given set of components) of the resource, it is quite « easy » to express its nominal effort in terms of fishing mortality. It is also the case when an ITQ or a TAC is given for each fishing unit, or set of fishing units. The problem is more difficult when fishing units change their target, due to the bio-socio-economical context. Such fishing units, as parts of integrated fisheries (Garrod 1973), may appear efficient, they may also be very important for economical and social reasons. Moreover, in some significant cases, their flexibility may be a condition for their viability. Hence, They must be taken into account in the global frameworks of fisheries exploitation.

Such frameworks were built in a lot of cases (Hilborn and Ledbetter 1979, Silvert and Dickie 1982, Allen and MacGlade 1986, Laurec *et al* 1991, Laloë and Samba 1991, Hilborn and Walters 1992...). A common approach is to consider that a fishing unit has a strategy, defined by a set of tactics (or « métiers ») and a decision rule for adopting one of the available tactics with a certain probability at a given step of time. A set of fishing units having the same strategy constitutes a fleet. Tactics are defined by their impact on the various components of

the resource (for example by catchability vectors if we represent the abundance of the various components of the resource with surplus production models). With such definitions, strategies refer to fishing units, and tactics refer to fishing actions or fishing trips.

A model

The framework we shall use here includes K Strategies, J tactics and I resource components. Each resource component i is modelled by a surplus production model :

$$(1) \quad \frac{dB_{it}}{dt} = r_i \times B_{it} \times \left(1 - \frac{B_{it}}{K_i}\right) - \sum_{j=1}^J q_{ij} \times f_{j,m} \times (B_{it} - \alpha_{ij,m} \times K_i)$$

where B_{it} is the biomass at time t of the i th component of the resource, r_i and K_i , are growth rates and carrying capacities, $f_{j,m}$ is the number of fishing trips with tactic j during the step of time m . Catchabilities q_{ij} depend on the resource component and the tactic. It is assumed that a proportion $\alpha_{ij,m}$ of the carrying capacity relative to the i th species remains inaccessible to the tactic j ; this proportion may be seasonal, in which case $\alpha_{ij,m} = \alpha_{ij,m+12l}$, $\forall l$ (for a monthly step of time).

The $f_{j,m}$ values are computed from the proportion of fishing units of the various strategies having chosen tactic j during the step m . Those proportions are functions of the previous choice and of revenues $R_{J(k),m}$ expected from previous results in terms of revenues obtained with the available tactics during the previous month and the same month of the previous year :

$$(2) \quad p_{kj,m+1} = f(p_{kj(k),m}, R_{J(k),m}, R_{J(k),m-1})$$

$p_{kj,m+1}$ is the proportion of fishing units of the k th strategy which adopt the j th tactic during step of time $m+1$, $J(k)$ is the set of tactics available to units of strategy k . f is a function which leads to an increase or decrease in p_{kj} if expected revenues with j are globally higher or lower than the revenues obtained with the other tactics in $J(k)$.

Revenues are obtained by :

$$(3) \quad R_{j,m} = \sum_{i=1}^I P_i \times q_{ij} \times (\bar{B}_{i,m} - \alpha_{ij,m} \times K_i) - C_j$$

where P_i is the price of the component i (per kg.), $\bar{B}_{i,m}$ is the mean biomass of component i during the step m and C_j is the cost of a fishing trip with tactic j . C_j may also represent the opposite of opportunity cost for tactics that consist of a non fishing strategy.

Such a model includes a great number of parameters. If there are K strategies, J tactics and I resource components, there are at least I growth rates, carrying capacities and, prices ; there are J costs, $J \times I$ catchabilities and $J \times I \times D$ unaccessibilities (D being the number of time steps in a year). There are also K number of fishing units . Eventually there are the parameters of the function f (equation 2 which could be different among the K strategies)..... These parameters may be not constant over time, and changes may be introduced in order to reflect changes in the environment of the fishermen and the fish. These changes may be very straightforward (a change in the prices of a resource component) or introduced to reflect a change in something

not explicitly stated in the model (for example, an arbitrarily high cost of fishing with a tactic that is undesirable for some reason, may be reduced to a « normal » value if this tactic becomes accepted). Using such a model, with initial values of the variates describing the system (initial biomass $B_{i,0}$ and initial proportions $p_{k,0}$), we may simulate a fishery, and obtain time series values of many variates (biomass, efforts, catches, revenues...).

This model has been used in order to represent the main features of the senegalese artisanal fishery (Laloë and Samba, 1991). In that case, the framework included $K=9$ strategies, $I=11$ resource components and $J=18$ tactics. Results were acceptable, with some plausible explanation of main changes observed in the fishery, which were difficult to reflect with models assuming that units of a fishing fleet always use the same tactic. But those results were obtained by tuning parameters, without using any quantitative fitting method.

However, it is important to use such quantitative methods in order to estimate the values of the parameters that lead to the minimization of some criterium reflecting the resemblance between observed (available) and fitted data. Those data are relative to both the fishing activity and the fishing results.

Parameter « estimation »

Parameter estimation is done for subset θ_1 of the whole set of parameters Θ , by searching for the values $\hat{\theta}_1$ that minimize a mean square criterium, as given for example in the equation (4), for given values of the other parameters ($\Theta = \{\theta_1, \theta_2\}$). This operation is carried out with a computer program written with the S-PLUS[®] statistical package.

$$(4) \quad \hat{\theta}_1 = \arg \min_{\theta_1} \left[\sum_{h,m=1}^{H,M} w_h \frac{(f_{hm} - \hat{f}_{hm})^2}{\sigma_{fh}^2} + \sum_{h,i,m=1}^{H,I,M} w_{hi} \frac{(c_{him} - \hat{c}_{him})^2}{\sigma_{chi}^2} \right]$$

where $f_{h,m}$ and \hat{f}_{hm} are observed and fitted number of trips during the step of time m with a given set h of one or several tactics, $c_{hi,m}$ and \hat{c}_{him} are the observed and fitted logarithms of catch per trip obtained with the set of tactics h on component i of the resource, σ_{fh}^2 and σ_{chi}^2 are the estimated variances of the f_h and c_{hi} series, w_h and w_{hi} are weights.

With some hypotheses, such as nil covariances between the f_{hm} and the logarithms of c_{him} , and normality of those variates, this fitting procedure leads to estimated values of the parameters that have good asymptotical statistical properties. As for most of the data set used in fisheries analysis, those hypotheses are probably not met and we shall not make any statistical test whose quality would be difficult to assess.

In equation (4), we consider sets of tactics (with subscript h) because available data do not generally correspond to individual tactics. For example we may, through a stratified sampling design, have data on the number of trips involving the use of handlines made from a port, but

we may know that at least two different tactics satisfy this criterium, because fishermen do not operate in the same manner if they target demersal or pelagic fish.

The number of tactics is not always known. This lack of knowledge is a source of uncertainty, the consequence of which may be important for a lot of reasons.

The first consequence is that the mean catch per trip, for a given component of the resource, is not necessarily a function of one catchability and one abundance, but may be a weighted mean of such functions, the weights depending on the decisions made by the fishermen. Thus, a variation in catch per trip may be the result of a variation in abundance or of changes in target species, or of both of them. The catchability vectors and their potential combinations define a set of potential mortality vectors, whose dimension and form depend on the existing and available catchability vectors.

The knowledge of this set may be important in terms of viability of the exploitation and in terms of predictability of the impact of changes in the environment for the fish and the fishermen, and which may or may not result from management decisions. Hence, analysis of data such as nominal effort and catch per trip time series, may be done according to questions on the existing strategies, the sets of available tactics, the catchabilities of those tactics etc... Thus these questions also deal with model identification (how many tactics are needed in the model in order to reflect the data in a convenient way). This question is similar to the question of model identification in ARMA modeling (Box and Jenkins, 1970) when assessing the degrees of autoregressive (AR) and moving average (MA) components of the model. Schnute (1985) also addressed this question using a general class of surplus production model including the most usual ones, as particular cases defined by constraints on the parameters.

However, with a given data set, at least two different models that give equivalent results can be obtained, thus the identification must be done with the help of experts

We shall try to illustrate these aspects (identification and estimation) and the related question on uncertainty with the help of a simple simulated fishery.

The simulation and the « available data »

We consider a fishery, with fishing units having a strategy ($K=1$) with two possible fishing tactics and a « no fishing » tactic ($J=3$). Two « species » are catchable ($I=2$). We give (Table 1) the values of the parameters of the two surplus production models, the price of species, the quantities of unaccessible biomass, the values of catchabilities. In this simulation, we consider only two unaccessibility parameters α_1 and α_2 only depending on the species i (ie unaccessibilities do not depend on the season nor on the tactic)).

Species (i)	Carrying Capacity (K_i , tons)	Growth rate (r_i)	Price (P_i)	Unaccessibility (α_i , K_i , tons)	$q(10^{-6})$ fishing tactic 1	$q(10^{-6})$ fishing tactic 2	non fishing tactic
1	10000	1.800	4	2000, ($\alpha_1=0.2$)	4	1	0
2	40000	0.600	2	40, ($\alpha_2=0.001$)	1	4	0

Table 1: Parameters used for the simulated fishery (model with two fishing tactics).

The cost per trip is equal to 50 for the two fishing tactics and the revenue of the non fishing tactic (opportunity cost) is equal to 10.

The function f is defined by the following equation:

$$(5) P_{kj,m+1} = P_{kj,m} + \lambda \left(Re_{j,m+1} - \overline{Re}_{J(k),m+1} \right) / \overline{Re}_{J(k),m+1}$$

where $\overline{Re}_{J(k),m+1}$ is the mean of the expected revenues $Re_{j,m+1}$ with available tactics in $J(k)$, $Re_{j,m+1} = (R_{j,m} + R_{j,m-1})/2$ (see equations (2) and (3)). $\lambda=30$, which corresponds to a very flexible fishing fleet. If needed, corrections can be made to ensure that the sum of $p_{kj,m}$ over j is equal to 1 and that each $p_{kj,m}$ belongs to the $[0,1]$ interval.

Catchabilities of the two fishing tactics for the two species are positive, the first tactic mainly targeting the first species, and the second tactic mainly targeting the second species. The unaccessible quantity of biomass of species 1 is one fifth of the virgin biomass which leads to an equilibrium relation similar to the relation of a Pella and Tomlinson model with the exponent parameter m lower than 1 (Laloë 1988). The unaccessible quantity of biomass for species 2 is quite negligible, which leads to an equilibrium relation similar to the relation of a Schaefer model ($m=2$). Species 1 is « under exploited » and species 2 is « over exploited ».

The simulation was carried out for a period of 20 years with a monthly step of time and with an increasing number of units from year 1 (500 units) to year 13 (900 units) followed by a decreasing phase (600 units for the last year). We assume that available data (Table 2, first three columns) consist of the total number of daily trips and the total catches for each species per year, which is a quite common situation. In Table 2 we also give (two last columns) the number of trips made with each of the two fishing tactics (with the values of the parameters and the number of units used for the simulation; the non fishing tactic was never used).

Year	Catches on species 1 (tons)	Catches on species 2 (tons)	Number of fishing trips (total, 10 ³)	Number of fishing trips (tactic 1, 10 ³)	Number of fishing trips (tactic 2, 10 ³)
1	2715.2	6558.6	182.5	81.23	101.27
2	2731.7	5955.6	182.5	85.643	96.857
3	2799.6	5510.7	182.5	91.328	91.172
4	2834.5	5277.0	182.5	94.628	87.872
5	3327.7	5896.1	219.0	116.48	102.52
6	3330.4	5305.8	219.0	122.72	96.283
7	3391.2	4890.5	219.0	129.95	89.048
8	3855.1	5246.6	255.5	156.7	98.8
9	3825.2	4717.0	255.5	164.22	91.276
10	3864.9	4358.4	255.5	172.46	83.036
11	4257.4	4643.7	292.0	201.47	90.532
12	4190.3	4213.9	292.0	209.27	82.728
13	4551.5	4254.2	328.5	246.19	82.31
14	4436.3	3855.8	328.5	255.7	72.801
15	4079.7	3360.2	292.0	232.66	59.344
16	4126.4	3612.5	292.0	226.24	65.756
17	3766.4	3407.1	255.5	193.22	62.277
18	3855.1	3710.0	255.5	187.78	67.72
19	3417.7	3531.3	219.0	154.81	64.186

Table 2: Available data on the simulated fishery (col 2-4) and number of trips with the two fishing tactics (col. 5,6)

Adjustment with one tactic

With such a data set, we may try to consider a model with one fishing tactic and a non fishing tactic giving results similar to the « available data ». This may be done by estimating some of the surplus production models parameters. These parameters are the two catchabilities, the two unaccessibilities α_i , the two growth rates r_i and the two initial biomasses. The cost per trip remains equal to 50 for the two fishing tactic and the revenue of the non fishing tactic (opportunity cost) remains equal to 10. The estimated values are obtained by minimizing the standardized squared difference in observed and fitted yearly logarithms of catch per trip (as only one fishing tactic is used, there is no difference between observed and fitted numbers of trips).

$$\hat{\theta}_1 = \arg \min_{\theta_1} \sum_{i,a=1,1}^{2,20} \frac{(c_{ia} - \hat{c}_{ia})^2}{\sigma_{c_i}^2}$$

The results (estimated values of the parameters) are given in Table 3

Species (i)	Carrying Capacity (K_i , tons)	Growth rate (r_i)	Price P_i	Unaccessibility ($\alpha_i K_i$, tons)	$q(10^{-6})$ fishing tactic	$q(10^{-6})$ non fishing tactic
1	10000	2.524	4	5, ($\alpha_1=0.0005$)	1.81	0
2	40000	0.650	2	3860, ($\alpha_2=0.0965$)	4.08	0

Table 3: Parameters of the model obtained from the fit of the general model assuming the existence of only one fishing tactic (estimated values in bold, the other parameters remaining unchanged from the simulation)

The « observed » (from the simulation) and fitted yearly catch per trip given by the two models are presented in Figure 1, which shows that these two models are equivalent in terms of « explanation » of the available catch data.

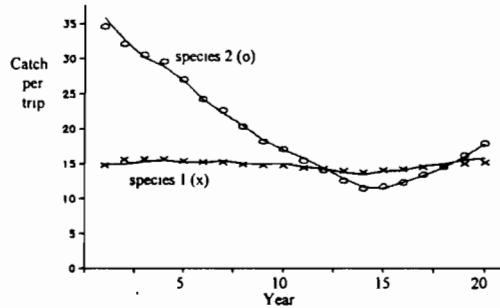


Figure 1: Catch per trip for the two species obtained with models assuming one (fitted values with symbols) or two (values from the simulation in continuous lines) fishing tactics.

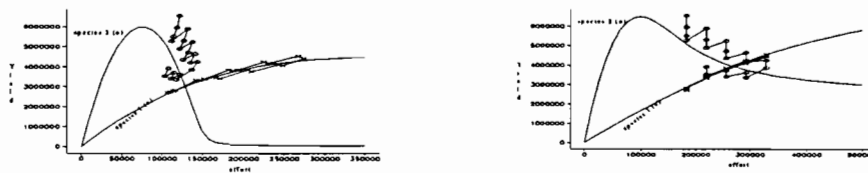


Figure 2: Catches and efforts values and equilibrium relationships assuming two (a) or one (b) fishing tactics.

Thus, we have two likely, but very different results. The population dynamics models obtained from the two models are given in figure 2a and 2b.

With the model for one fishing tactic, effective effort is given in number of trips. With the model for two fishing tactics, effective effort is a weighted mean of the number of trips with each tactic, the weight depending on the catchabilities. If we choose a trip with tactic 1 (respectively 2) as unit of effort on species 1 (respectively species 2) the effective efforts are $f_1+f_2/4$ for species 1 and $f_1/4+f_2$ for species 2, where f_1 and f_2 are the numbers of trips with tactic 1 and 2 (Table 2). When assuming the existence of only one tactic, the model fitted for species one is equivalent to a Schaefer model (α_1 is quite nil). We have a very different result with species 2, since α_2 equals 0.1 (see figure 2b). There is thus an inversion in the form of the surplus production models, when considering general models with one or two tactics. This result may be, at least partially explained. As a consequence of the decision rule of the fishermen (equation 5), for a given number of fishing units, the proportions of choice of each of the tactics result in equivalent revenues from each tactic. A new fishing unit will choose each of the available tactics with a proportion that maintains this result, and this proportion will be higher for tactics that lead to a lower change in revenues. Here, the dynamics of species 2 satisfies a Schaefer like model and is over exploited, which means that an increasing effort on species 2 will rapidly lead to a collapse of that species in terms of biomass and catches. For the first species, the existence of an important quantity of unaccessible biomass and higher growth rate lead to lower decreases in CPUE when the fishing effort increases. Hence the new fishing unit will have a higher probability to choose the tactic targeting species 1. This explains why the variation of effective effort is much lower for species 2 than for species 1 with coefficients of variation equal to 0.095 and 0.28, respectively. (see figure 2a and 2b). But those variations are identical (coefficient of variation equal to 0.19) if we assume the existence of only one fishing tactic, leading to an increase of the α value for species 2, and a decrease of the α value for species 1.

Given the fit obtained here with the information on yearly catch effort data, we cannot clearly choose between these two models. We need some further knowledge on the way the fishermen work or on the « true » population dynamics in order to be able to choose one model. In such a situation, if we consider, as is usually the case, a global framework where fishing units have only one available tactic, the first model will turn to be the best. This decision may also be preferred since this model is more parsimonious. But the choice of one model may have consequences on the way we may consider management. This can be illustrated here in terms of prediction of the impact of changes in the environment on the fishermen or the fish.

Comparison of the models

The two models, with one or two tactics, are equivalent in terms of catch for the effort time series used in the simulation. But we saw that they can be different, for example if we consider the equilibrium relationships of the surplus production models. They may also produce different results if they are used in a new context. We may for example consider the consequences of changes in the species prices for various numbers of fishing units.

We used each of the two models to simulate the long term results in terms of revenues of fisheries with 100, 300, 500 or 1000 fishing units with various prices of species 1 and 2. For this, we multiply the initial species prices (4 and 2) by λ_1 and λ_2 with λ_1 and λ_2 values varying from 0 to 2 in 0.1 steps. In figure 3 we give for each of the models, the results in terms of total revenues per year.

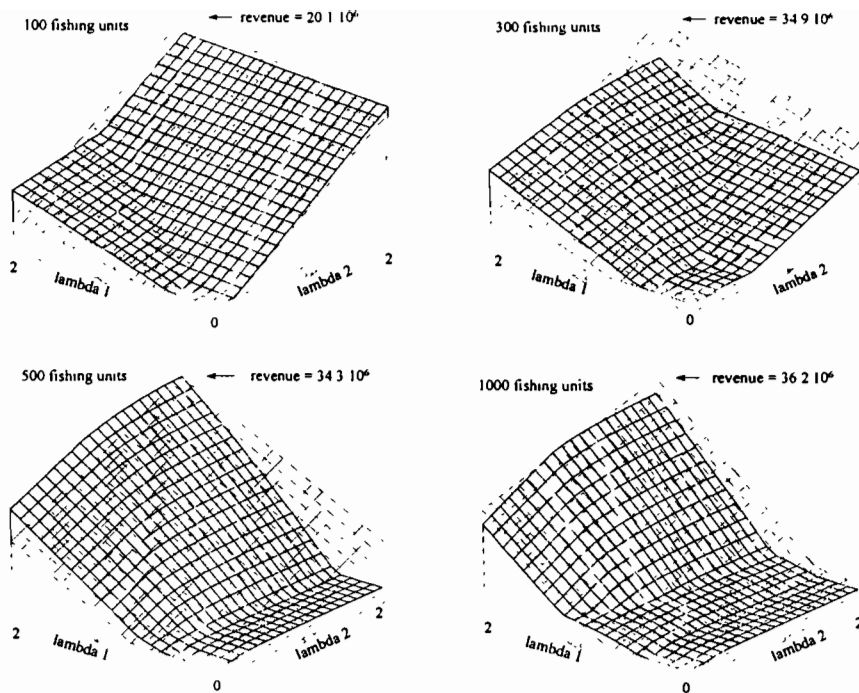


Figure 3: Equilibrium total year fishing revenues obtained with 100, 300, 500 and 1000 fishing units and various species prices with the models with one (grey grid) or two (black grid) fishing tactics. Prices of species 1 and 2 are multiplied by lambda 1 and lambda 2.

When $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$, the results from the two models are quite similar, which may be explained by the fact that the prices remain unchanged. There is no simple general description, with differences between the models that depend on the number of fishing units. If λ_1 is greater than λ_2 , the model with two fishing tactics usually gives higher results than the model with one fishing tactic, but we may observe that with 1000 units, if $\lambda_1=2$ and $\lambda_2=0$, this result is no more true, probably because of an excessive effort on species 1. If $\lambda_2=2$, the model with one tactic give higher results. This observation may be at least partially explained considering the very different dynamics models obtained in each case. Firstly the consequences of over exploitation are much more important for species 2 than for species 1 if there are two fishing tactics. Secondly, the estimated catchability coefficient is greater for species 2 than for species 1 in the model with one fishing tactic

In figures 4 we give the total numbers of fishing trips per year when there are 1000 fishing units.

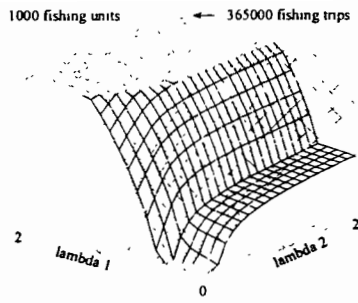


Figure 4: Equilibrium numbers of fishing trips per year for 1000 fishing units and various species prices with the models with one (grey grid) or two (black grid). fishing tactics. Prices of species 1 and two are multiplied by lambda 1 and lambda 2.

The number of trips is nil when $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$. It increases with increasing values of λ_1 and λ_2 . This is due to the presence of the non fishing tactic that gives a positive revenue (opportunity cost). When λ_1 and λ_2 are both equal to two, the non fishing tactic is never used. In intermediate situations the nominal effort is not systematically higher for a given model. When $\lambda_1 = 0$ and $\lambda_2 = 2$, the yearly number of trips is higher with the model with one tactic, which also comes from the difference between the fitted production models. With the model with two fishing tactics, it is useful to consider the impact of the fishermen decision on the distribution of nominal effort among the two fishing tactics. For this we show (figure 5) these proportions in equilibrium conditions when there are 100, 300, 500 or 1000 fishing units and, again, prices multiplied by λ_1 and λ_2 varying between 0 and 2

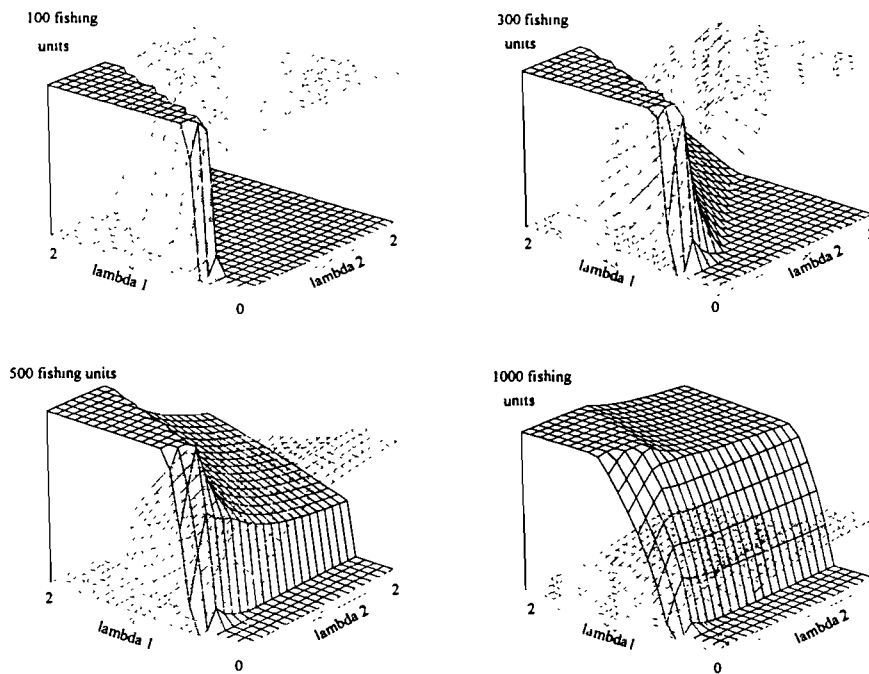


Figure 5: Proportion of choice of fishing tactic 1 (black grid) and fishing tactic 2 (grey grid) made by the fishermen, with 100, 300, 500 and 1000 fishing units and various species prices. Prices of species 1 and 2 are multiplied by λ_1 and λ_2 .

With 100 fishing units, none of the two species can be overexploited and all the fishermen generally adopt only one of the two fishing tactics. When the number of units increases, the area of (λ_1, λ_2) values for which the two tactics are used also increases, because if all the fishermen were choosing one given tactic, the impact on the targeted species would be sufficient to make the other species more attractive.

Conclusion

Considering the model that provides higher predictions as the better one would be a mistake. What is important here is the knowledge of the true model or at least the most robust one according the addressed questions.

The differences observed in the revenues, the nominal fishing efforts or in the overexploitation risks, in the « predictions » given by the two models are important from a management point of view. Hence, in the case presented here, usual catch-effort data are not sufficient in order to clearly identify the model. We need further information and knowledge on the biological component of the system, that cannot be provided only by fitting surplus production models. We also need further information and knowledge on the social and economical components of the system. But we have shown with the simulated example, that

assumptions made on one part of the system can have a very important impact on the perception of the other part of the system. Hence, we need monodisciplinary and multidisciplinary researches in order to progress in building useful fisheries exploitation frameworks. We must however acknowledge that we were surprised when comparing the two models. In our mind, the results given by the « true » model with two tactics were to be « better » than those of the model with only one tactic. This was not the case, and the two models give results that are not as different as we were expecting.

This « result » comes from the fact that each of the model is fitted with « real data » and with an explicit framework including both a model of fishing activity and a model of the resource... And the two solutions are coherent with the data. What is essential is to consider a model as a whole ; if we suppose that there is either one or two tactics, we must therefore consider the surplus production models obtained with the corresponding assumption. In our simulation, we observe that the data set is coherent with the conclusion that the first species is underexploited and that the second is overexploited. But this overexploitation appears to be quite viable because we do not observe a collapse in catches on that species. If we look at figure 2b and 2b, we observe this « viable overexploitation » with the two models, but with very different explanations. The model with two tactics shows that an increase in fishing mortality would lead to a collapse, and that any increase should be prohibited. But we also observe that the flexibility of the exploitation system induces a self-regulation. If there is only one tactic, such a self-regulation no longer exists but the corresponding surplus model indicates that an increase in mortality on species 2 will have no dramatic consequences

In conclusion, it would be a mistake to consider that the second species will collapse if the fishing mortality increases (which may be the truth) and, at the same time, to also consider that there is a single fishing tactic. In such a case, managers would be too precautionary. A symmetric error, supported by too optimistic managers would be to consider the second species is not endangered, together with the idea of a self-regulation ability of the fisheries.

References

Allen, P.M., and MacGlade, J.M., 1986. Dynamics of discovery and exploitation: the case of Scotian Shelf groundfish fishery. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 43: 1187-1200.

Box, G.E.P. and Jenkins, G.M., 1970. *Time series analysis, forecasting and control*. Holden Day, San Francisco, CA, 533 pp.

Garrod, D.J., 1973. Management of multispecies resource. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 30: 1977-1085.

Hilborn, R., and Ledbetter, M., 1979. Analysis of the British Columbia salmon purse seine fleet. *Dynamic of movement. Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 36: 384-391.

Hilborn, R. and Walters, C.J., 1992. *Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics, and Uncertainty*. Chapman and Hall, 570pp.

Laloë, F., 1988. Un modèle global avec quantité de biomasse inaccessible liée aux conditions environnementales. Application aux données de la pêche ivoiro ghanéenne de *Sardinella aurita*. *Aquat. Living Resour.* 1 : 289-298.

Laloë, F., and Samba, A., 1991. A simulation model of artisanal fisheries of Senegal. ICES Mar. Sci. Symp, 193 : 281-286.

Laurec, A., Biseau, A., and Charruau, A., 1991. Modelling technical interaction. ICES Mar. Sci. Symp, 193 : 225-234.

Pella, J.J., and Tomlinson, P.K., 1969. A generalized stock production model. Bull IATTC, 13: 419-496.

Schaefer, M.B., 1957. A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the Eastern Tropical Pacific Ocean. Bull IATTC, 2: 247-285.

Schnute, J., 1985. A general theory for analysis of catch and effort data. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 42: 414-429.

Silvert, W., and Dickie, L.M., 1982. Multispecies interactions between fish and fishermen. In Mercer (ed.) Multispecies approaches to fishing management advice. Can. Spec. Publ. Aquat. Sci., 59: 163-169.

Statistical Sciences, S-PLUS programmer's Manual, Version 3.2, Seattle: StatSci, a division of MathSoft, Inc., 1993.

Stephenson, R.L., and Lane, D.E., 1995. Fisheries Management Science a plea for conceptual change. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 52: 2051-2056.

Résumé de la Thèse: L'activité d'une pêcherie est déterminée par l'état de la ressource, mais aussi par d'autres conditions (sociales, économiques, ...) influant sur la nature de la pêche qui est menée. Notre travail consiste à proposer une approche statistique permettant de représenter conjointement les dynamiques de la ressource exploitée et de l'effort de pêche, et de l'appliquer à la pêche artisanale sénégalaise. Après avoir exposé dans un premier chapitre le système de collecte des données, et avoir effectué une revue des modèles usuels, nous proposons dans un second chapitre, une synthèse des données à l'aide de techniques d'ACPVI. Nous reprenons ensuite (chapitre 3) un modèle couplant ressource et exploitation qui caractérise la pêcherie à l'aide de trois composantes (unités de pêche, actions de pêche, ressource), chaque composante étant définie par une typologie. Nous abordons alors (chapitre 4) le problème de l'ajustement de ce modèle aux données collectées en décrivant les différents problèmes posés, et en proposant une procédure d'ajustement. Cette procédure est mise en œuvre dans un cinquième chapitre sur un jeu de données relatif à la pêche artisanale sénégalaise consistant en 7 séries chronologiques d'efforts de pêche et 36 séries de captures par espèce associées par quinzaine, de 1974 à 1992. Le sixième chapitre est consacré à l'évaluation pouvant être faite d'un tel modèle, avant de présenter (chapitre 7) quels apports peuvent être attendus de ce travail.

Title: Statistical approach of a fishery : the case of the Senegalese artisanal exploitation.

Abstract: The activity of a fishery is caused by the state of the resource but also by others conditions (social, economic, ...) which influence the nature of the fishing actions. Our aim is to propose a statistical approach which permits to represent jointly dynamic of the resource and of fishing effort, and to apply it to the artisanal senegalese fishery. We present in a first chapter the system of collect of data, and models usually used. We propose in a second chapter a synthesis of our data using PCAIV. Then in the third chapter, we consider a model which associates both resource and its exploitation, characterizing the fishery by the help of three components (fishing units, fishing actions and resource). Each of them being defined as a typology. Then, we consider (chapter 4) the problem of the fit of the model to collected data, describing the different difficulties which occur and proposing a fitting procedure. This procedure is carried out in a fifth chapter on a data set relative to the senegalese artisanal exploitation, consisting of 7 time series of fishing effort and 36 series of catch per unit of effort associated, by fortnight from 1974 to 1992. The sixth chapter is devoted to the evaluation which may be done of such a model. Then, we present in a seventh chapter, contributions which may be expected of this work.

Discipline: Biostatistique.

Mots-clés: Statistique, ACPVI, modèle, identification, identifiabilité, ajustement, exploitation halieutique, pêche artisanale, Sénégal.

Laboratoire: Laboratoire Halieutique et Ecosystèmes Aquatiques, Centre ORSTOM Montpellier, B.P. 5045, 34032 Montpellier cedex 1.