



THESE

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Ecole des Mines de Paris
Spécialité « **Géostatistique** »

présentée et soutenue publiquement

par

Eric De Oliveira

le 19 juin 2003

**Analyse de l'activité d'une pêcherie
à échelle spatio-temporelle fine :
des captures répétitives aux puissances de pêche locales**

Directeur de thèse : Nicolas Bez

Jury

MM. Francis	Laloë	Président
Guy	Duhamel	Rapporteur externe
Didier	Gascuel	Rapporteur externe
Nicolas	Bez	Examineur
Jean-Claude	Brêthes	Examineur
Paul	Marchal	Examineur

«Le besoin pressant d'un univers logique et cohérent est profondément ancré dans l'inconscient humain.
Mais l'univers réel est toujours à un pas au-delà de la logique. »

Franck Herbert

Remerciements

En grande partie, cette thèse doit son aboutissement au soutien de mon directeur, Nicolas Bez. Son encadrement scientifique, sa grande disponibilité et surtout ses conseils ont permis d'orienter ma réflexion et d'accomplir ma tâche. Tout simplement et avec sincérité, Merci Nicolas.

Mes remerciements iront aussi en grande partie à Guy Duhamel, sans qui rien n'aurait été possible. Votre implication dans cette thèse et surtout la mise à disposition des données de la pêcherie ont permis sa réalisation. J'ai particulièrement apprécié votre disponibilité et profiter de votre expérience de la pêcherie des îles Kerguelen. Vos conseils et vos suggestions m'ont guidé au long de ces 4 années. Je tiens aussi à exprimer mes remerciements aux contrôleurs de pêche sans qui cette thèse n'aurait pas eu lieu d'être. P Mes sincères remerciements iront à Didier Gascuel et Guy Duhamel qui ont accepté d'être rapporteurs de ce travail, ainsi qu'à Jean-Claude Brêthes et Paul Marchal pour leur participation en tant que membre du Jury et à Francis Laloë pour avoir présider ce jury. Un petit mot supplémentaire pour Didier qui en m'acceptant dans son DEA m'a permis de réaliser cette thèse et qui a toujours répondu présent quand j'avais un petit soucis. Je tiens à remercier François Gerlotto qui a activement participé au démarrage de la thèse, d'une part en nous mettant en contact avec IMARPE et d'autre part en me suggérant de m'intéresser au phénomène d'épuisement local. Merci à Mariano Gutierrez pour nous avoir fourni les données péruviennes.

Je tiens à souligner les excellentes conditions de travail que le Centre de Géostatistique m'a offertes pour mener à bien ma thèse. Je me dois de remercier aussi les personnes que j'ai pu solliciter pour leur aide ou leurs conseils, Christian Lantuéjoul, Christian Lajaunie, Chantal de Fouquet, Hans Wackernagel, Didier Renard, François Geoffroy et bien sur Jacques Rivoirard qui a tout particulièrement suivi mon travail. Merci à vous. De même un grand merci à Isabelle, Nathalie, Françoise et aux autres permanents du centre pour leur bonne humeur et l'aide apportée pendant ces quatre années. Une pensée pour Simon avec qui j'ai partagé le bureau et qui a su supporter mes humeurs, mes questions et parfois (voir souvent) mes cigarettes.

Voilà j'en ai presque terminé, mais au par avant je voudrais remercier ceux qui ont permis d'égayer le quotidien : Thomas (le seul et unique barbare de l'est qui m'a permis d'apprécier la culture germanique), Nicolas petit Jeannée (ma caille préférée), Laurent (le musicien de charme), Arnaud (toujours sur le coup), Juju (footballeur girondin dans l'âme), Etienne (le joueur invétéré), Sara (la discrète), Stéphane, Brigitte, Yannick ... et les petits nouveaux que je n'aurai pas eu le temps de bien connaître, Costin, Christophe, Caroline, Nicolas, Mireille ... il y en a bien entendu beaucoup d'autres et je les remercie aussi.

Pour terminer, j'aurai une pensée toute particulière pour Marta qui a partagé avec moi les moments difficiles comme les moments de joie et à ma famille qui a toujours cru que ce serait possible ...

Table des matières

I	Introduction	3
1	Rappels et Problématique	11
1.1	Estimations d'abondance à partir des PUE commerciales	11
1.1.1	Le système pêche	12
1.1.2	Concepts halieutiques et échelles spatio-temporelles correspondantes	12
1.2	Recouvrement spatio-temporel des données scientifiques et commerciales : Pêcherie péruvienne	16
1.3	Perturbations liées aux répétitions d'observations : Pêcherie des îles Kerguelen	24
1.4	Choix d'un chantier et d'un objectif d'étude	31
II	Présentation des données Kerguelen	33
2	Présentation de la pêcherie des îles Kerguelen	35
2.1	Historique des captures de légines sur le plateau de Kerguelen	37
2.2	Cycle biologique de la légine	38
2.3	Présentation des données et premières analyses	40
2.3.1	Présentation des données commerciales utilisées	40
2.3.2	Ségrégation spatiale et définition des zones d'études : pêcherie monospécifique par zone	43
2.3.3	Statistique des campagnes de pêche	49
2.4	Etude du support et de son effet sur les captures de légines	51
2.5	Conclusions	58
III	Etude de la variabilité locale intra-bateau	59
3	Les captures doublonnées : importance, intérêt et problèmes induits	61
3.1	Définition des individus statistiques : les marées	61
3.2	Importance du nombre de PUE doublonnées	63
3.3	Intérêt des PUE doublonnées	71
3.4	Retour sur la problématique et conclusions	76
4	Etude des distances inter-chalutage	79
4.1	Définition de tactiques de pêche à partir des <i>DIC</i>	79
4.2	Influence des tactiques de pêche sur les PUE	82

4.3	Conclusions	85
5	Epuisement local et efficacité locale de pêche	87
5.1	Mise en évidence d'un effet d'épuisement local	87
5.2	Règle de décision des pêcheurs ou épuisement local ?	92
5.3	Détermination de la loi de répartition de l'efficacité locale de pêche	94
5.3.1	Méthode et hypothèse	94
5.3.2	Résultats	99
5.3.3	Interprétations	103
5.3.4	Remarque sur la sensibilité du modèle	105
5.4	Traitement de la variabilité locale intra-bateau	107
5.5	Conclusions	109
IV	Etude de la variabilité locale inter-bateau	111
6	Analyse et estimation des puissances de pêche	113
6.1	Méthodes	113
6.1.1	Définition des couples de PUE de navires distincts	114
6.1.2	Estimation des $Log(\frac{p_i}{p_j})$ des couples de navire	116
6.1.3	Estimations des puissances de pêche par rapport à un ensemble de référence	117
6.2	Résultats	120
6.3	Estimation à l'aide d'une analyse de variances	125
6.4	Conclusions	130
7	Etude des PUE après traitement de la variabilité locale intra et inter bateaux	131
7.1	Répartition spatiale de la légine au sein de la zone du fer à cheval	131
7.2	Bilan du traitement de la variabilité locale	138
V	Retour sur analyse : Bilan méthodologique et interprétations halieutiques	139
8	Retour sur analyse : bilan méthodologique et interprétations halieutiques	141
8.1	Interprétations et incidences halieutiques	141
8.2	Bilan méthodologique : Outils géostatistiques et PUE commerciales	148
8.2.1	Référentiel spatial de la ressource	148
8.2.2	Intérêt des outils globaux	148
8.2.3	Importance de la taille du support	149
8.2.4	Variabilité locale et variogramme	150
8.3	Bilan et Perspectives	153
VI	Bibliographie	155
VII	Annexes	161

AVANT-PROPOS

“L’objectif des pêcheurs n’est pas de parvenir à une estimation d’abondance fiable, mais d’être aussi efficace que possible.” (Laurec, 1993)

La première partie de ce document consiste en une longue introduction qui vise à introduire à l’aide d’exemples l’objectif de cette thèse. L’objectif initial de la thèse est présenté en début de cette partie, ainsi qu’un rappel de différents concepts halieutiques. Puis à l’aide des deux exemples, issus de deux pêcheries distinctes, j’expliquerai en quoi j’ai dû modifier mon travail en le recentrant sur l’analyse spatiale fine des données commerciales. J’insisterai particulièrement sur les problèmes liés aux répétitions d’observations lors de l’utilisation d’un outil géostatistique tel que le variogramme. J’expliquerai également les raisons qui ont amené le choix d’une zone d’étude.

La seconde partie a pour but de décrire les principales caractéristiques de la pêcherie du plateau des îles Kerguelen. Un bref historique de la pêcherie ainsi que la biologie de la principale espèce ciblée sont présentés. Une analyse préliminaire des données à disposition terminera cette partie. La variabilité locale induite par les répétitions des opérations de pêche aux mêmes positions géographiques a été décomposée en deux composantes, une composante intra-bateau et une composante inter-bateau.

La troisième partie est consacrée à l’étude de la variabilité locale intra-bateau. A partir des opérations de pêche réalisées à une même position géographique par un même navire, un effet d’épuisement moyen de l’abondance locale est mis en évidence. Ces données co-localisées permettent d’estimer la loi de répartition de l’efficacité locale de pêche par navire à partir d’un modèle qui sera détaillé. La mise en évidence de l’épuisement local de la ressource permet de remplacer chaque série de PUE doublonnées réalisées par un même navire par une unique valeur. Cette transformation des données diminue la variabilité locale et donc les valeurs prises par les premiers pas du variogramme.

L’étude et le traitement de la variabilité locale inter-bateau est présenté au cours de la quatrième partie. La composante inter-bateau de la variabilité locale est étudiée et traitée à partir de l’estimation des puissances de pêche des différents navires. Ces estimations sont basées sur les comparaisons entre les PUE réalisées le même jour par des navires différents. Une comparaison entre la méthode proposée et une méthode basée sur les modèles linéaires généralisés est présentée. La standardisation des PUE commerciales par les puissances de pêche locales permet de déterminer la structure spatiale de la légine et de la cartographier par krigeage.

En cinquième partie, je discuterai les résultats et les conséquences aux niveaux halieutiques et méthodologiques.

Première partie

Introduction

Le secteur de la pêche a connu un essor considérable dans la seconde moitié du vingtième siècle, en particulier grâce à l'amélioration des techniques et à la modernisation des équipements. Actuellement, il doit souvent faire face à un déséquilibre entre les capacités de capture et le potentiel biologique des ressources halieutiques, qui entraîne une surexploitation de ces ressources et une modification des écosystèmes marins. Cependant la surpêche n'est pas un phénomène récent, puisque dès le XVI^e siècle, de signes de surexploitation sont observés dans les pêcheries littorales européennes. Pendant un grand nombre d'années, ce phénomène est resté cantonné aux zones côtières. Les possibilités de redéploiement vers les stocks hauturiers permettaient de résorber les surcapacités locales par le redéploiement des flotilles. A partir des années 50, le phénomène s'est graduellement étendu à l'ensemble de l'océan mondial. La notion d'exploitation durable des ressources halieutiques s'est imposée au cours des années 60, et nécessitait une gestion efficace pour assurer la durabilité des activités de pêche (Troadec, 2001). Ainsi des structures institutionnelles ont été mises en place et chargées de la gestion des stocks. Actuellement, en Europe, cette surexploitation est telle que les instances scientifiques ont recommandé des réductions rapides des taux d'exploitation pouvant aller jusqu'à 40%. C'est notamment le cas pour un ensemble d'espèces essentielles à la survie des pêcheries européennes comme la morue, l'aiglefin, la plie ou le hareng, pour lequel il a fallu prendre des mesures d'urgence très restrictives afin d'éviter une situation comparable à celle qui avait nécessité, à la fin des années 70, la fermeture de toute pêche pendant quatre ans (Anonyme, 1999). Outre la fermeture complète de la pêche, il existe un grand nombre de systèmes de gestion basés, soit sur les totaux autorisés de captures (les TAC), soit sur la réglementation des caractéristiques des engins de pêche (comme par exemple, le maillage des filets, la taille des filets ...), soit sur la taille minimale de capture des poissons, soit sur le nombre de licences de pêche accordées... Pour être opérationnels, ces systèmes de gestion nécessitent des éléments quantitatifs de description du système poissons-pêcheurs, afin de gérer son évolution dans le temps. Or, en halieutique, le dénombrement direct des poissons est impossible. On utilise donc des données indirectes comme les captures de pêche issues des campagnes commerciales ou bien les captures réalisées au cours de campagnes scientifiques pour fournir des indices d'abondance. Cependant, seules, ces informations ne sont pas suffisantes, il est nécessaire de modéliser le système pêche à l'aide d'outils mathématiques, afin de valoriser l'information collectée, dans un processus d'estimation. Actuellement, les indices d'abondances issues des campagnes scientifiques servent essentiellement de données de calage aux estimations de stocks de poissons issus de l'analyse des cohortes ou Virtual Population Analysis (V.P.A.) (Gulland, 1965). Cette technique d'analyse des cohortes permet d'estimer le coefficient de mortalité par pêche (il s'agit d'une des notions clefs du système pêche sur laquelle nous reviendrons dans la section 1.1.2) qui permet ensuite de relier l'abondance d'un stock aux captures moyennes réalisées pendant une période de temps, encore appelées Prises par Unité d'Effort (PUE) :

$$\text{Abondance} = \frac{\text{PUE}}{\text{Capturabilité}}$$

Les estimations de stock sont donc le plus souvent basées sur la relation linéaire qui relie les PUE à l'abondance. Cependant un grand nombre de travaux ont montré que les PUE et l'abondance n'évoluent pas nécessairement de façon linéaire (Hillborn et Walters, 1987 ; Gauthiez, 1997 ; Rahikainen et Kuikka, 2002). Cette non linéarité est généralement attribuée à l'hétérogénéité spatiale de la ressource ainsi qu'aux stratégies de pêche qui ont un impact sur la capturabilité (Gillis, Peterman, et Tyler, 1993). Les relations de proportionnalité utilisées couramment dans les estimations de stocks impliquent que la capturabilité soit globalement constante et que la répartition des pêcheurs soit homogène sur la zone et la durée de l'étude. Or,

lors des estimations de stock, la dimension spatiale est généralement ignorée puisque les données d'effort et de captures sont agrégées pour une période et une zone géographique données. Il est donc implicitement fait l'hypothèse que les répartitions spatiales de la ressource et des pêcheurs sont homogènes. Leurs réelles hétérogénéités sont difficilement appréhendables.

La capturabilité est susceptible d'être modifiée par un grand nombre de facteurs comme la vulnérabilité de la ressource vis à vis de l'engin de pêche, la disponibilité de la ressource, les stratégies de pêche... Ces relations entre la capturabilité et les distributions spatiales des deux acteurs peuvent être qualifiées de relations de densité-dépendance. Ces relations sont rarement prises en compte, or de plus en plus de travaux suggèrent que ces phénomènes de densité-dépendance ont un impact important et qu'ils font partie intégrante des relations pêcheur-ressource (MacCall, 1976 ; Fréon et Misund, 1999). Mackinson et al. (1997) citent un nombre important de travaux mettant en évidence la relation de densité-dépendance reliant la capturabilité et l'abondance du stock chez les populations de petits pélagiques. Ils montrent par exemple que la capturabilité est inversement proportionnelle à l'abondance du stock. La densité de la ressource ou celle des pêcheurs ont donc un impact sur la capturabilité, de même que la densité de poissons a un impact sur la mortalité naturelle de la ressource.

La distribution hétérogène des pêcheurs peut être en partie due aux stratégies de pêche. Il existe en effet des phénomènes de compétition ou de coopération entre les pêcheurs qui contribuent à la répartition spatiale des pêcheurs. Au niveau local, plusieurs travaux ont montré que la prise en compte des stratégies de pêche peut expliquer la non linéarité entre les PUE et l'abondance (Sampson, 1991 ; Vignaux, 1996 ; Gaertner, Pagavino, et Marcano, 1999). Gillis et Peterman (1998) ont montré que de faibles interactions entre les bateaux peuvent entraîner la décomposition de la corrélation entre PUE et abondance. Associé à des phénomènes de coopération des flotilles de pêche, le phénomène de surexploitation locale est susceptible d'entraîner l'existence d'une relation non linéaire entre les PUE et l'effort de pêche calculé localement (Maury, Gascuel, Marsac, Fonteneau, et Rosa, 2001 ; Maury et Gascuel, 2002). C'est le cas par exemple lors de répétitions d'opérations de pêche au sein de zones réduites. Ce type de stratégie est probablement fréquent dans les pêcheries démersales ou d'espèces profondes.

Petitgas et al. (1999) ont montré récemment que les informations fournies par les campagnes scientifiques et les captures commerciales sont complémentaires et améliorent l'estimation d'un stock donné. La variance des PUE commerciales peut apporter une aide non négligeable lors de l'estimation de l'abondance à partir de données scientifiques. Les campagnes scientifiques proposent une information complète sur l'état du stock (abondance, pyramide des âges, sex-ratio) à un instant donné alors que les captures commerciales sont disponibles tout au long de l'année mais ne fournissent pas d'information sur l'état du stock des juvéniles. Verdoit et Pelletier (2000) ont utilisé conjointement ces deux types d'information afin de suivre les déplacements d'un stock en mer du nord tout au long de l'année. Ces différents travaux ont montré que campagnes scientifiques et captures commerciales peuvent être complémentaires et donc permettre d'améliorer les estimations de stock (Fox et Starr, 1996).

L'objectif premier de cette thèse était d'utiliser les campagnes scientifiques comme une référence permettant de déterminer la structure spatiale et l'abondance de la ressource, et d'étudier différents phénomènes de densité-dépendance à partir de cette référence, comme :

- la répartition spatiale des pêcheurs par rapport à l'abondance ;
- les modifications de capturabilité en fonction de l'abondance de la ressource ;
- l'hétérogénéité locale de la ressource à partie des PUE commerciales.

Pour utiliser conjointement campagnes scientifiques et captures commerciales, il est nécessaire que les deux sources d'information soient disponibles au cours de la même période et au sein de la même zone géographique. A supposer que ce soit le cas, il conviendrait, pour étudier les liens entre abondance et capture de :

- déterminer la structure spatiale de la ressource fournie par les campagnes scientifiques (cartographie des PUE scientifiques) ;
- déterminer la structure spatiale de la ressource fournie par les PUE commerciales (cartographie des PUE commerciales) ;
- déterminer la structure spatiale de l'effort de pêche (cartographie de l'effort de pêche) ;
- comparer les distributions spatiales de la ressource et de l'effort de pêche.

Si l'information issue des données commerciales est connue par opération de pêche, alors il est possible de discuter des modifications de capturabilité pour chaque opération en fonction de l'abondance de la ressource.

La première zone retenue pour cette étude et répondant en partie aux différentes contraintes citées précédemment concerne la pêcherie péruvienne d'anchois. Cette espèce est la clef de voute du système pêche péruvien. Elle représente un potentiel de capture pouvant atteindre près de 12 millions de tonnes et les revenus qu'elle génère représentent 11% des exportations du pays. Un suivi scientifique à l'aide de campagnes acoustiques est effectué tous les ans et les pêcheurs sont tenus de déclarer l'ensemble des secteurs dans lesquels ils ont pêché ainsi que les captures réalisées. De plus, cette zone est sous l'influence directe du phénomène climatique El Niño, ce qui implique des années à très forte abondance et des années à faible abondance. Ces différents niveaux d'abondance pourraient permettre de comparer les changements, s'ils existent, de distribution spatiale de la ressource et d'observer l'impact sur la répartition spatiale des pêcheurs, ainsi que d'étudier les modifications de capturabilité en fonction de l'abondance. La fréquence des campagnes scientifiques offre la possibilité d'étudier :

- les modifications de répartition spatiale de la ressource et des pêcheurs en fonction du niveau d'abondance de la ressource ;
- les conséquences sur les niveaux de captures des pêcheurs ;
- les modifications de stratégie de pêche des pêcheurs.

Les données en notre possession concernent plusieurs campagnes scientifiques acoustiques, les captures commerciales d'anchois, mais nous n'avons jamais été en possession des efforts de pêche associés aux captures commerciales (c'est à dire des PUE). Nous verrons par la suite que la non connaissance de l'effort de pêche développé par les navires commerciaux, a considérablement limité le potentiel de ce cas d'étude.

En conséquence, une seconde zone d'étude a été recherchée. Notre choix s'est portée sur la pêcherie des îles Kerguelen (Terres Australes et Antarctiques Française). Malgré la distance et les conditions d'exploitation, cette pêcherie est en pleine croissance. La légine, espèce cible de cette pêcherie, est un poisson à très forte valeur marchande, de l'ordre de 50 à 60 F/kg au débarquement et le tonnage annuel produit est de l'ordre de 5000 tonnes par an actuellement (Com. pers. Duhamel). Sur cette zone, l'activité de pêche est strictement contrôlée puisqu'un observateur se trouve à bord de chaque navire. Les déclarations de captures sont donc fiables (positions et tonnage des captures). Par ailleurs deux campagnes scientifiques ont été réalisées en 1987 et 1988.

Les deux exemples présentés dans cette introduction ont pour but d'introduire les problèmes auxquels j'ai été confronté lors des analyses statistiques et permettent d'expliquer le recentrage de mon travail vers une question incluse dans la thématique globale énoncées précédemment. Les premier exemple, après avoir résumé l'information présente dans les séries de campagnes scientifiques, souligne le peu de comparaisons pertinentes entre campagnes scientifiques et campagnes commerciales qu'il était possible de faire avec le matériel disponible. Le second exemple illustre les perturbations induites par les répétitions de mesure et introduit la problématique de travail retenue.

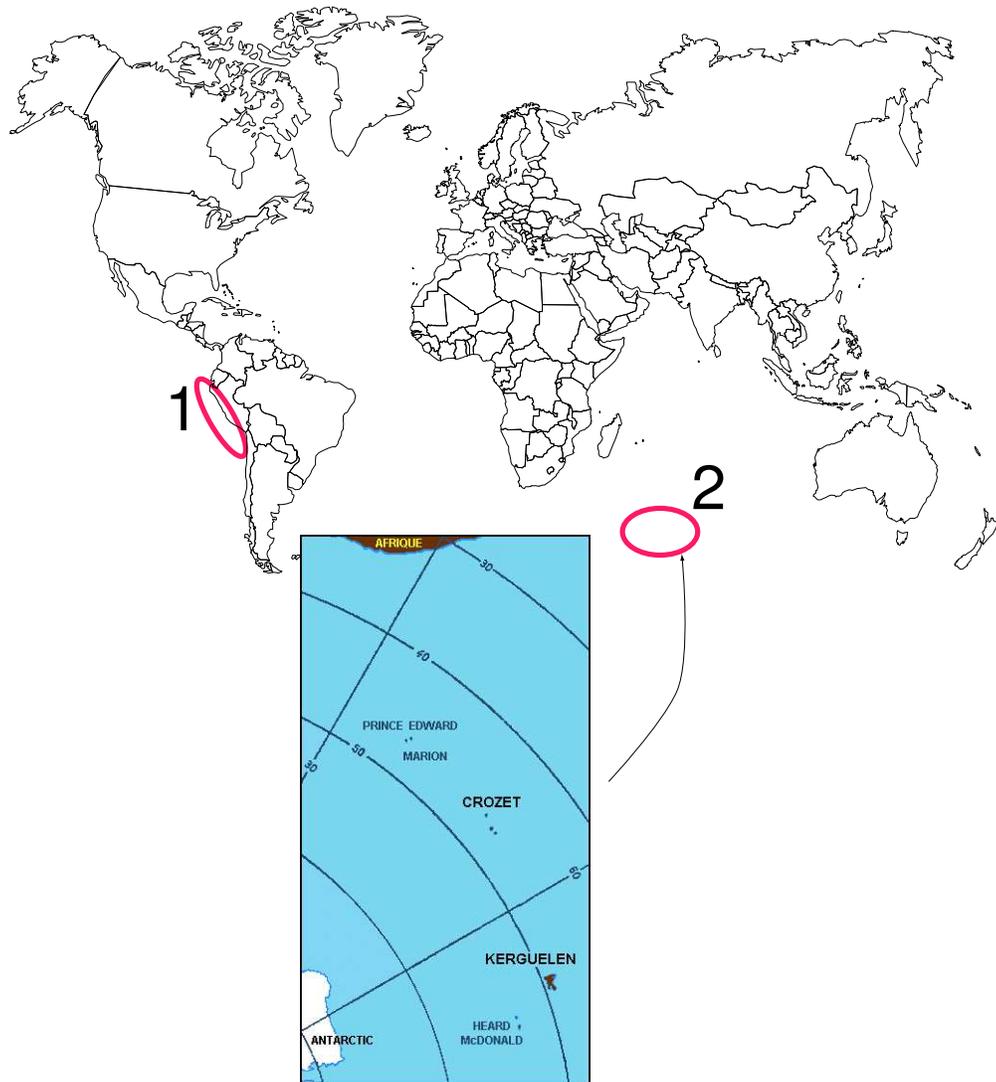


FIG. 1 – Positions géographiques des deux zones d'étude.

Chapitre 1

Rappels et Problématique

Sommaire

Au cours de ce chapitre sont présentés différents concepts halieutiques intervenant lors des estimations de stock, ainsi qu'un résumé de l'analyse des cohortes. Deux exemples issus des deux zones d'étude illustrent la redéfinition de l'objectif de cette thèse.

1.1 Estimations d'abondance à partir des PUE commerciales

Les modèles de dynamique des populations permettent une modélisation du système pêche au cours du temps. Ces modèles peuvent se diviser en deux catégories. La première classe est constituée des modèles dits globaux. Ils décrivent la dynamique d'une population par un modèle de croissance logistique à laquelle est soustrait une mortalité correspondant au prélèvement par la pêche (Graham, 1935 ; Schaefer, 1954). Ce type de modèles est basé sur l'hypothèse qu'un stock naturel tend vers une situation d'équilibre stable avec son milieu. Un grand nombre de variantes a été proposé au modèle de Graham-Schaffer. La seconde classe de modèle correspond aux modèles analytiques (Baranov, 1918 ; Beverton et Holt, 1957 ; Ricker, 1945). Ils conduisent à identifier les échanges affectant le stock, comme le recrutement, la croissance des individus, la mortalité naturelle et la mortalité par pêche et réalisent donc une description plus fine de la dynamique et des principaux mécanismes de régulation. En d'autres termes, ils représentent la structure démographique de la population. Les modèles analytiques nécessitent un plus grand nombre de connaissances et donc de données, pas toujours accessibles. Il faut être en mesure de pouvoir déterminer l'âge des animaux pour préciser leur croissance, estimer les coefficients de mortalité. Les modèles structurés en âge offrent une représentation plus fidèle de la dynamique du stock, de ce fait l'utilisation de ce type de modèle s'est généralisé en évaluation de stock. Pour ces deux types de modèles, l'effet de la pêche est représenté par

une mortalité additionnelle infligée au stock et ces deux approches sont basées sur l'hypothèse du lien entre observations et abondance du stock.

1.1.1 Le système pêche

Le système pêche peut être assimilé à un système proie - prédateur comprenant deux compartiments, les poissons ou la ressource et les pêcheurs. Le premier compartiment correspond aux proies, les poissons. L'ensemble des poissons n'étant pas accessible, on définit une unité de gestion appelée le stock, qui représente l'ensemble des animaux exploitables. Cet ensemble exclut les jeunes ainsi que les individus au-delà d'un certain âge dit âge de réforme. Le second compartiment correspond à l'ensemble des navires de pêche participant à l'exploitation du stock. Pour quantifier la pression exercée par la flottille de pêche sur le stock, on fait appel au concept d'effort de pêche qui correspond à la quantification de l'importance de l'exploitation pour un stock donné, dans un laps de temps donné. On définit une unité d'effort qui permet de calculer des prises ou captures par unité d'effort, notées PUE.

1.1.2 Concepts halieutiques et échelles spatio-temporelles correspondantes

Beverton et Holt (1957) ont introduit et défini différents paramètres et concepts décrivant le système pêche. Un grand nombre d'auteurs et d'ouvrages ont repris ces concepts. Cette section est fortement inspirée de l'ouvrage de Laurec et Le Guen, "Dynamique des populations marines exploitées (1981)", et de l'article de D. Gascuel (1993).

La capturabilité (q) est une notion clef qui relie l'effort de pêche à la mortalité par pêche. Pour un stock donné, ce paramètre se définit comme la probabilité pour un poisson pris au hasard dans le stock d'être capturé pendant une unité de temps et par unité d'effort de pêche. Deux ensembles de facteurs sont susceptibles de modifier la capturabilité :

- les facteurs d'ordre biologique correspondant à la notion de *disponibilité* de la ressource ;
- les facteurs d'ordre humain désignés sous l'appellation de *puissance globale de pêche* (Pg).

La *disponibilité* quantifie l'ensemble des facteurs liés à la biologie et l'écologie du stock susceptibles de modifier la probabilité qu'un poisson d'être capturé. Cette notion se divise en deux aspects, l'*accessibilité* et la *vulnérabilité*. L'*accessibilité* correspond aux taux de présence sur les lieux de pêche. Les variations d'*accessibilité* se traduisent par des différences dans la répartition spatiale de la ressource d'une saison à l'autre, et d'une année sur l'autre avec les anomalies majeures de l'environnement, comme par exemple le phénomène El Niño le long des côtes du Pérou. La *vulnérabilité* varie quant à elle à des échelles de temps plus fines, comme les variations inter ou intra-journalières de paramètres physiques tels que la température, la teneur en oxygène, la luminosité, etc..., qui se traduisent par des changements de comportement des poissons qui influent sur la vulnérabilité du stock. Il s'agit par exemple des migrations nyctémérales. Ces deux aspects sont dans la pratique difficiles à distinguer bien qu'ils interviennent à des échelles spatio-temporelles différentes. Le second ensemble de facteurs correspond aux facteurs d'ordre humain et peut

être désigné sous l'appellation de puissance de pêche globale. Elle quantifie l'ensemble des facteurs liés au pêcheur qui contribuent à modifier le rendement d'une unité d'effort de pêche. En effet, deux bateaux développant le même effort de pêche ne vont pas nécessairement réaliser les mêmes captures quand bien même ils exploiteraient la même distribution de poissons. Le rapport entre les puissances de pêche globale de deux navires est donc égal au rapport des PUE réalisées par ces navires, à condition qu'ils aient exploité la même distribution locale de poissons. Ainsi la puissance de pêche d'un navire peut être définie par le rapport des PUE de ce navire à celle d'un navire standard. Nous reviendrons par la suite sur la notion de puissance de pêche.

La notion d'effort de pêche a toujours eu une grande importance en halieutique, car l'effort de pêche intervient d'une part lors des diagnostics concernant l'état des stocks exploités et d'autre part sa gestion permet la régulation de l'activité de pêche. Il est nécessaire de distinguer deux notions d'effort se rapportant à deux objectifs distincts. Soit on cherche à quantifier l'activité humaine, on parlera alors de d'effort de pêche nominal (F_n). Soit on cherche à évaluer l'impact de la pêche sur le stock (abondance, structure démographique), on parlera alors d'effort effectif (F_e). L'effort de pêche nominal est un paramètre de gestion qui mesure l'accumulation de l'ensemble des moyens mis en œuvre par les pêcheurs, pour exploiter un stock donné pendant une unité de temps. L'effort de pêche nominal est donc mesurable à l'aide des statistiques de pêche et permet de calculer des PUE nominales. Cet effort peut être exprimé par exemple en heure de chalutage. L'effort effectif (F_e) est un paramètre d'évaluation qui mesure la pression réelle exercée par les pêcheurs sur un stock, pendant une unité de temps. Pour un intervalle de temps donné, caractérisé par la même disponibilité de la ressource, deux efforts effectifs identiques conduisent à la même mortalité par pêche. L'effort effectif est donc égal au coefficient de mortalité par pêche (noté F) à un facteur de disponibilité près.

$$F_e = \frac{F}{d}$$

L'effort effectif prend en compte la puissance de pêche globale (P_g) :

$$F_e = P_g.F_n$$

La *puissance de pêche globale* recouvre deux aspects différents. Le premier correspond à la capacité du pêcheur à exploiter les périodes et les zones les plus favorables. Cet aspect appelé *efficacité de pêche globale* (notée φ_g), peut être assimilé à une capacité stratégique du pêcheur. L'efficacité de pêche globale quantifie donc la capacité d'un navire à tenir compte des modifications d'accessibilité du stock. Le second aspect correspond à la capacité du navire à capturer le poisson dans une zone donnée et à un moment donné. Cette capacité est qualifiée de *puissance de pêche locale* (P_l) et intègre deux notions différentes. L'*efficacité de pêche locale* (φ_l) qui quantifie la capacité à repérer les zones de fortes abondances au sein d'une zone donnée et l'*efficacité de pêche locale* (e_l) se définissant comme la capacité à capturer le poisson vulnérable. L'*efficacité de pêche locale* mesure donc la capacité d'un navire à trouver le poisson vulnérable en rapport avec le métier ou la technique de pêche utilisé. Tous ces concepts sont résumés à l'aide de la figure 1.1.

Dans la pratique, distinguer et quantifier ces différents termes est rarement possible. Le plus souvent, les variations de vulnérabilité sont négligées, et l'efficacité locale de pêche est considérée comme constante. Une cohorte correspond à l'ensemble des individus ayant vécu un même évènement au cours d'une même période (comme par exemple, la cohorte des anchois nés en 1989). L'analyse des cohortes repose sur l'uti-

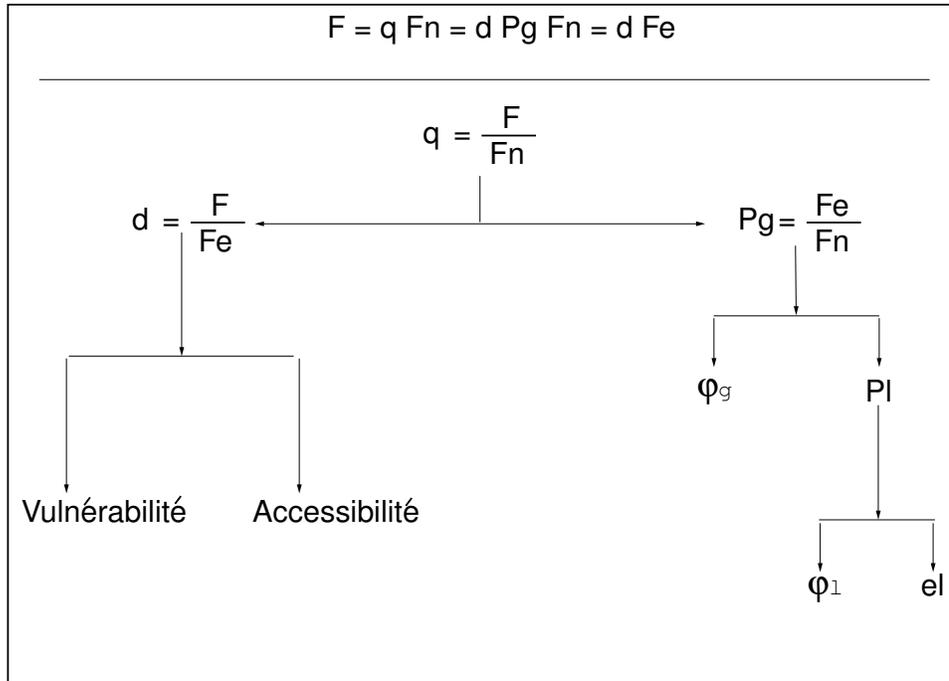


FIG. 1.1 – Composantes de la capturabilité (Gascuel, 1993).

lisation de l'ensemble des captures qu'a permis une cohorte au long de son exploitation, pour remonter à son abondance initiale (le recrutement). L'analyse des cohortes revient donc à calculer le nombre de poissons vivant chaque année. Avec un pas de temps annuel, cette technique conduit à estimer pour chaque âge et chaque année un coefficient instantané de mortalité par pêche, à condition de supposer que la mortalité naturelle n'est pas affectée par la densité de la population. Ces coefficients se regroupent en un vecteur de mortalité par pêche, noté F , qui caractérise et quantifie la pression de pêche exercée sur les classes d'âge d'un stock donné et dans des conditions de disponibilité données. A condition de supposer que l'effort de pêche nominal et la mortalité par pêche sont proportionnels, la mortalité par pêche s'exprime de la façon suivante :

$$F = q \cdot Fn$$

avec Fn l'effort de pêche nominal et q la capturabilité. A partir des résultats de l'analyse des cohortes (F) et de la connaissance de l'effort de pêche nominal déployé (Fn), on en déduit la capturabilité (schéma 1.2). La capturabilité permet également de relier l'indice d'abondance que fournissent les prises par unité d'effort (PUE) à l'abondance réelle d'un stock.

$$PUE = q \cdot A$$

où A représente l'abondance du stock. Ces deux relations supposent que la capturabilité et la mortalité naturelle sont globalement constantes sur la zone et pendant la durée de l'étude et que la répartition spatiale des pêcheurs soit uniforme sur la zone. A ces conditions, on peut utiliser les PUE comme un indice de l'abondance du stock.

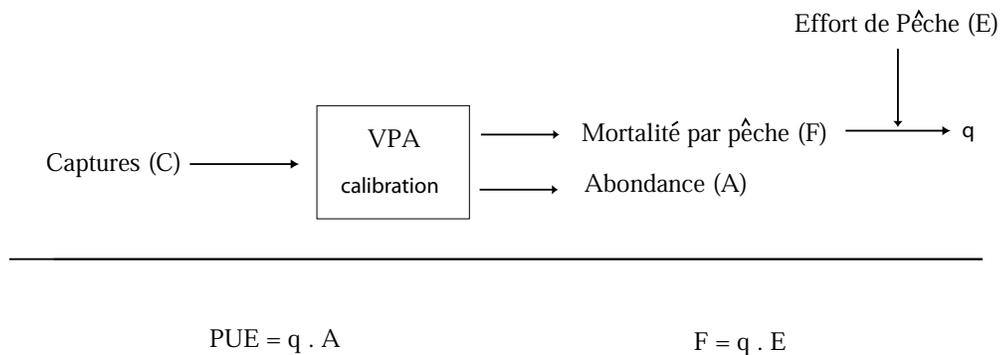


FIG. 1.2 – Schéma de l'estimation des stocks à partir des résultats de VPA.

1.2 Recouvrement spatio-temporel des données scientifiques et commerciales : Pêche péruvienne

L'IMARPE (Institut Océanographique Péruvien) réalise chaque année une ou plusieurs campagnes acoustiques ciblant entre autres l'anchois. De 1983 à 2000, 25 campagnes ont été réalisées le long des côtes du Pérou (Pacifique est). Un exemple d'une de ces campagnes est présenté à la figure 1.4. De plus, nous avons eu à notre disposition les captures d'anchois réalisées par les flottes commerciales au cours de cette même période, par carrés statistiques de 10 miles nautiques sur 30 miles nautiques (fig. 1.3). Il est nécessaire de préciser qu'il s'agit des captures et non des PUE, ce qui limite considérablement le potentiel de ce cas d'étude dans le cadre de cette thèse. En effet, les PUE sont nécessaires à la détermination de la répartition spatiale de la ressource à partir de l'information fournie par les données commerciales. L'effort de pêche doit être connu afin de pouvoir étudier sa répartition spatiale. A l'aide des données disponibles, il nous est possible de déterminer la répartition spatiale de la ressource à partir des campagnes scientifiques et de localiser les zones permettant les plus fortes captures. Mais il nous est impossible de savoir si les forts niveaux de captures sont dus à une forte abondance de la ressource ou à un effort de pêche élevé.

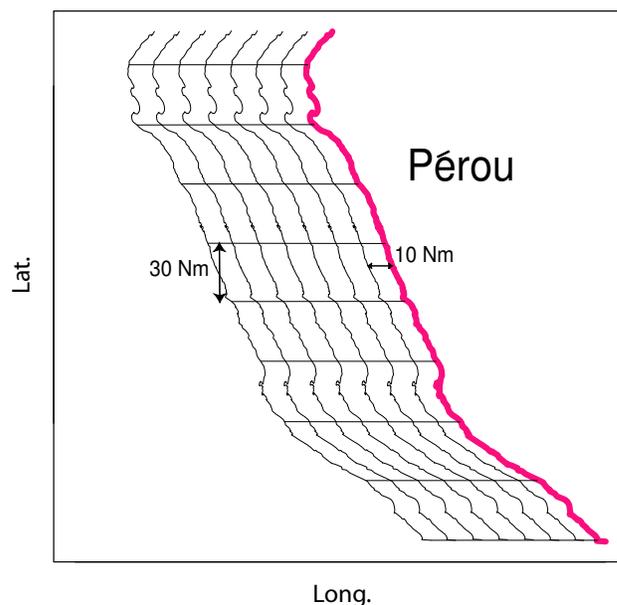


FIG. 1.3 – Représentation schématique des carrés statistiques le long de la côte du Pérou utilisés lors de la déclaration des captures commerciales.

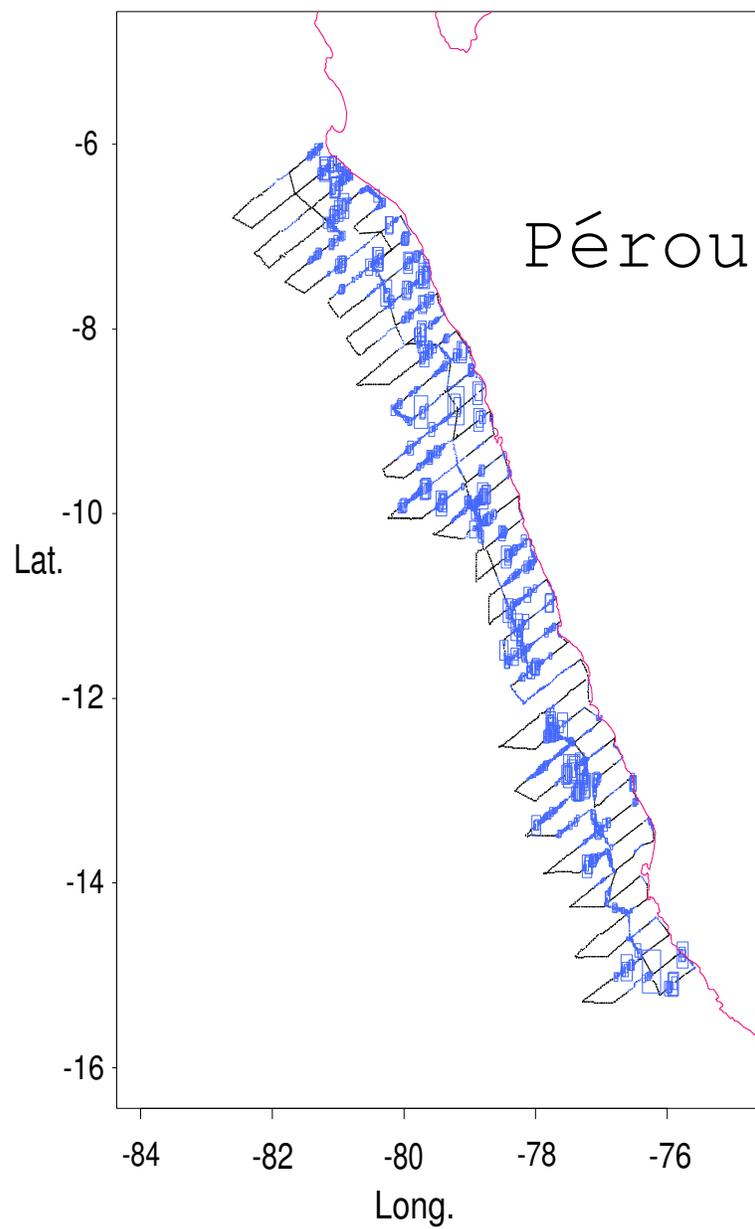


FIG. 1.4 – Campagne acoustique réalisée au Pérou au cours du mois de novembre 1999. Représentation de l'indice d'abondance de l'anchois. La surface des carrés est proportionnelle à l'abondance de la ressource et les points noirs figurent les données nulles.

Afin de synthétiser l'information disponible et de comparer les données issues de deux sources d'information, nous avons utilisé les centres de gravité (Bez, 1997). Cet outil permet de localiser la position moyenne d'une population pour une zone géographique donnée. On note z_i l'indice d'abondance des anchois à la position x_i de l'espace. La position moyenne de l'espèce est donc donnée par son centre de gravité :

$$\bar{x}_i^* = \frac{\sum_i x_i z_i}{\sum_i z_i}$$

La distance à la côte des centres de gravité de la population d'anchois et des captures d'anchois des pêcheurs est présentée à la figure 1.5. Les deux courbes noires représentent l'évolution du centre de gravité de l'échantillonnage avec le temps. Ces deux courbes permettent d'évaluer visuellement dans quelle mesure les déplacements observés au niveau de centres de gravité de la population sont dus à un déplacement de l'échantillonnage. On observe que les centres de gravité annuels des captures commerciales se retrouvent plus à la côte que ceux issus des campagnes scientifiques. Cependant les localisations des captures commerciales suivent les déplacements du stock pour les grandes tendances. En d'autres termes, les pêcheurs suivent le stock tout en exploitant la limite ouest du stock, c'est à dire les individus les plus proches de la côte. Il se confirme que la répartition spatiale des pêcheurs ne dépend pas exclusivement de la répartition spatiale de la ressource mais de plusieurs facteurs. Premièrement, l'objectif des campagnes scientifiques est de couvrir l'aire de répartition de l'espèce ciblée afin d'obtenir une bonne estimation de l'abondance, alors que les pêcheurs cherchent à capturer le plus de poisson possible dans un minimum de temps. Deuxièmement, une explication possible de cette situation est de nature économique puisque tant par la nature des bateaux qu'un souci de rentabilité, il est à penser que les pêcheurs limitent au maximum les trajets entre leur port et les lieux de pêche tant que ces dernières permettent des niveaux de captures suffisants. C'est une combinaison d'un grand nombre de phénomènes, comme la répartition et la disponibilité de la ressource, le temps passé en mer, la distance à la côte, etc..., qui définit la distribution de l'effort de pêche. Babcock and Pikitch (2000) ont montré à l'aide d'un modèle dynamique que les changements des coûts d'exploitation modifient les prises de décision des pêcheurs. Il se confirme si besoin était, que les pêcheurs n'échantillonnent pas nécessairement les zones les plus riches.

Afin de proposer une illustration, à une échelle spatio-temporelle plus fine, du constat concernant les positions des navires de pêche et les localisations des zones riches en poissons, l'IMARPE nous a fourni les positions journalières des opérations de pêche (données Vessel Monitoring System ou suivi satellite des localisations des opérations de pêche pour chaque navire) au cours de l'année 1999. Le but est d'utiliser des données scientifiques afin de déterminer la structure spatiale de la ressource (pour cartographier la ressource) et de comparer les localisations des opérations de pêche. Pour cela, il est nécessaire que la campagne scientifique et les opérations de pêche des pêcheurs aient eu lieu en même temps. Au cours de l'année 1999, deux campagnes scientifiques ont eu lieu, une en juin et une en novembre. Nous nous sommes focalisés sur la campagne ayant eu lieu en novembre 1999. Premièrement, il a été nécessaire de déterminer la répartition spatiale de la ressource à partir de la campagne acoustique. Le variogramme expérimental a été calculé pour un pas de 1 mile nautique, puis a été modélisé à l'aide d'une combinaison de deux modèles comprenant un modèle pépitique et un modèle sphérique (fig. 1.6).

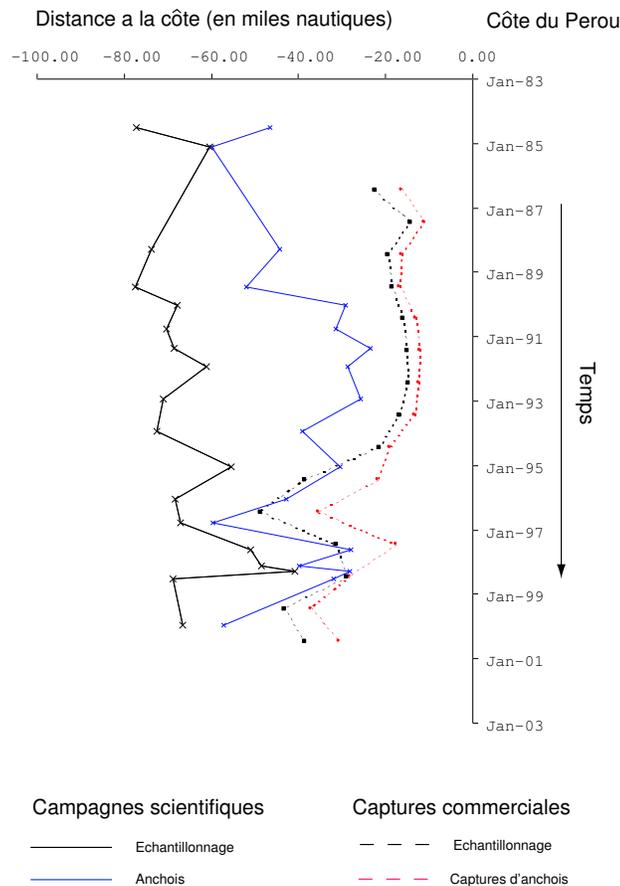


FIG. 1.5 – Evolution longitudinale (distance à la côte) des centres de gravités au cours du temps.

A partir de ce modèle de variogramme, une cartographie par krigeage ordinaire a été réalisée. Un voisinage glissant de 60 sur 60 miles nautiques a été choisi pour l'estimation de l'indice d'abondance de l'anchois. Suite à une communication personnelle de Mr. Gutierrez, nous savons que les pêcheurs travaillent en groupe ou en cluster. De ce fait, nous avons cherché à identifier des concentrations d'opérations de pêche par jour à l'aide d'une procédure automatique de recherche de cluster. Des clusters ont donc été identifiés jour par jour. La méthode est présentée en annexe (VII). Toutes les opérations de pêche appartenant au même cluster sont distantes de moins de 2 miles nautiques. Les positions des clusters identifiés au cours du mois de novembre 1999 ont été reportées sur la cartographie de l'indice d'abondance de l'anchois issue de la campagne scientifique de ce même mois (fig. 1.7). Ainsi, il est possible de comparer visuellement la position des pêcheurs par rapport à la répartition spatiale de la ressource déduite de la campagne scientifique.

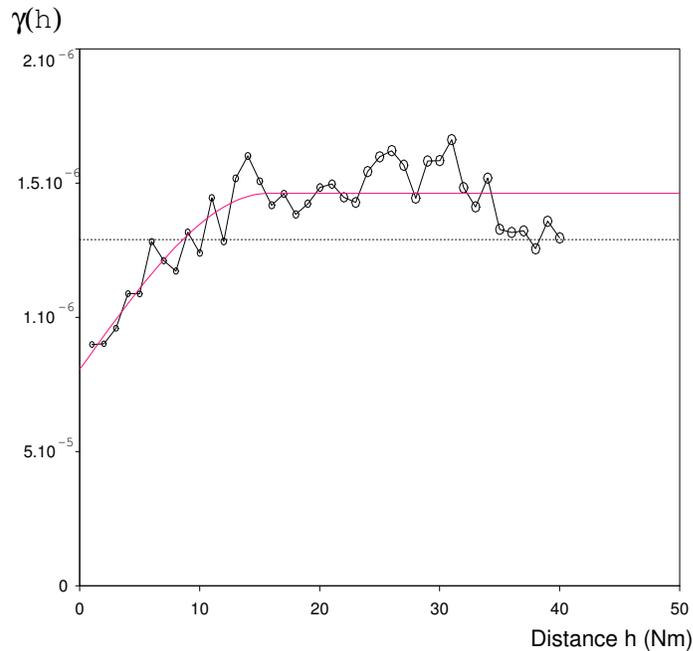


FIG. 1.6 – Variogramme expérimental et modèle de variogramme de l'anchois. Campagne scientifique acoustique de novembre 1999.

De plus, pour chaque cluster, sont connus :

- la position géographique ;
- le nombre de navires différents ;
- la surface échantillonnée ;
- la densité moyenne de la ressource krigée. Il s'agit de la moyenne des densités de la ressource comprises dans un rayon de 2,5 mile nautique autour du centre de gravité du cluster.

Aux figures 1.8 sont présentés trois exemples, concernant les surfaces des clusters, le nombre d'opérations de pêche par cluster, et les moyennes de l'indice d'abondance krigé. Ces différentes statistiques n'ont pas permis de mettre de évidence de relation entre les caractéristiques d'un cluster et l'abondance de la ressource correspondante. Cependant, il est à noter que les clusters les plus importants, en d'autres termes les clusters recouvrant de grandes surfaces ou comprenant un nombre d'opérations de pêche important, sont localisés au sein de zones de faibles densités de poisson. Les surfaces des clusters sont positivement corrélées avec le nombre d'opérations de pêche.

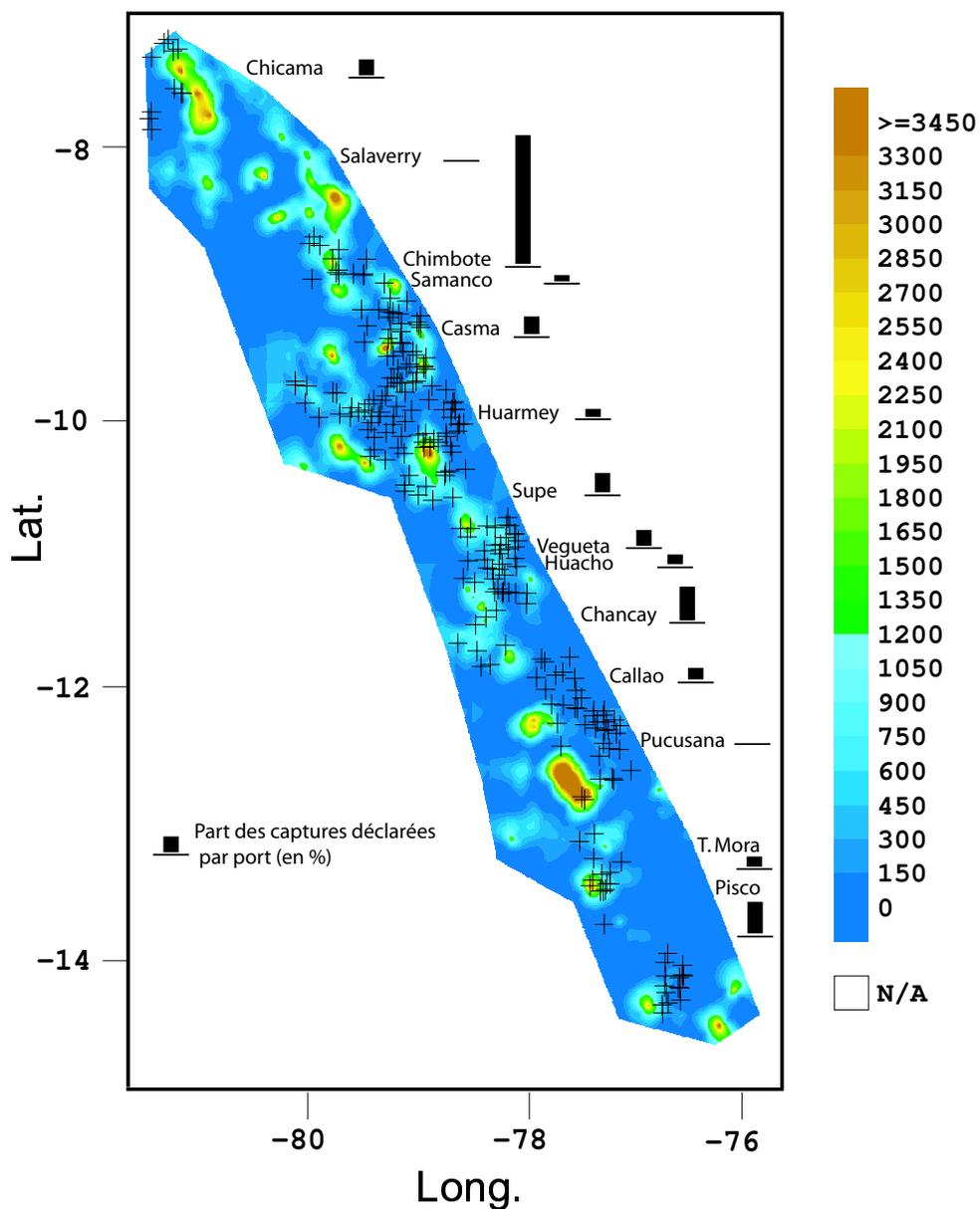
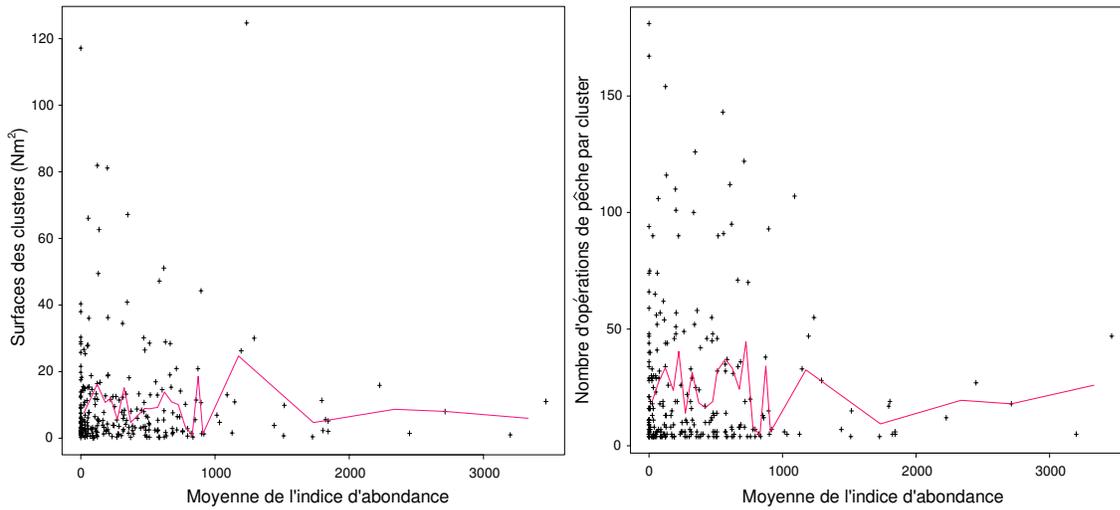
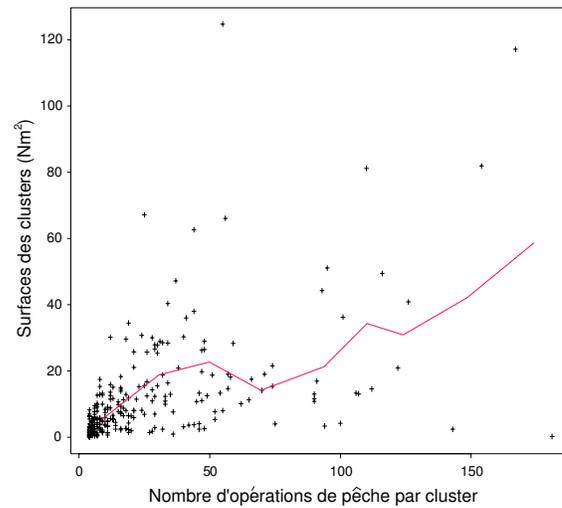


FIG. 1.7 – Cartographie de l'indice d'abondance de l'anchois en novembre 1999 obtenue par krigeage (en $m^2 \cdot nm^{-2}$). Les clusters des opérations de pêche commerciales sont symbolisés par des croix et les noms des ports sont reportés sur la carte.



(a) Surface des clusters en fonction de la moyenne de l'indice d'abondance krigé

(b) Nombre de navires par cluster en fonction de la moyenne de l'indice d'abondance krigé



(c) Surface des clusters en fonction du nombre d'opération de pêche par cluster

FIG. 1.8 – Moyenne de l'indice d'abondance krigée, surface des clusters et nombre de navires par clusters. Mois de novembre 1999. Un profil moyen est représenté pour chaque nuage de corrélation.

Le premier constat issu de cette comparaison graphique est la non-uniformité de la répartition des pêcheurs sur la zone. Le second constat concerne les positions des clusters, qui ne coïncident pas avec les zones les plus riches en anchois mais se trouvent le plus souvent à l'est de ces zones, c'est à dire plus proche de la côte. Ce résultat confirme le résultat déduit de l'analyse plus globale des centres de gravité. Premièrement, pour cette pêcherie, la présence de concentration de pêcheurs ne semble pas être un bon indicateur d'une forte densité d'anchois. Deuxièmement, l'hypothèse émise concernant la présence de concentration de pêcheurs au large des ports n'est pas évidente. L'exemple proposé à partir de la pêcherie d'anchois du Pérou met en évidence les différents problèmes soulevés précédemment, comme la distribution hétérogène des pêcheurs et de la ressource dans l'espace et le temps. Cependant, à aucun moment nous n'avons été en possession des PUE de cette pêcherie, ce qui ne nous a pas permis de poursuivre plus en avant notre étude et en particulier les modifications de capturabilité.

A partir du moment où l'on travaille avec des données commerciales, il est indispensable de discuter de la confiance à accorder aux déclarations des pêcheurs. En effet pour la plupart des pêcheries, ces déclarations sont erronées. Or, il est nécessaire de travailler à partir de données fiables si l'on veut étudier les modifications de capturabilité. C'est en grande partie pour cette raison que nous nous sommes tournés vers une autre pêcherie nous permettant de répondre à cette contrainte. La zone retenue est la pêcherie des îles Kerguelen. La présentation plus détaillée de cette zone d'étude est reportée au début de la seconde partie de ce document. Toutefois, la suite de cette introduction repose sur cette zone d'étude afin d'illustrer quelques uns des problèmes récurrents de l'analyse des données de pêche.

1.3 Perturbations liées aux répétitions d'observations : Pêcherie des îles Kerguelen

Comme le note Laloë et al. (2002) , les pêcheurs vus comme des échantillonneurs offrent des plans d'expériences non seulement très déséquilibrés, mais surtout allant à l'encontre des analyses de variabilité spatio-temporelle des densités. Dans cette section, je m'attache à illustrer les perturbations générées par les répétitions d'observations. Ces répétitions sont très fréquentes dans les données commerciales et sont également présentes pour un certain nombre de campagnes scientifiques.

Les campagnes scientifiques réalisées autour des îles Kerguelen sont des campagnes exploratoires (Scouting Research) ayant pour but de définir l'abondance dans les zones reconnues a priori comme riches. Les conditions de réalisation de ces campagnes autorisent que si un trait de chalut présente une forte abondance, un second trait est réalisé à la même position géographique, appelé aussi doublon, pour rentabiliser la campagne en capturant un plus grand nombre de poissons et en les vendant ensuite. Nous n'avons pas tenu compte de ces traits de chaluts consécutifs (réalisés à la même date) et les avons éliminés de l'étude (seul le premier trait étant conservé), afin de ne pas surestimer les zones riches. Un second type de doublons dû au fait que le bateau a échantillonné deux fois la même station à plus d'un jour d'écart est resté inexplicé. Ces données ont été conservées pour l'étude. L'échantillonnage est constitué de chalutages de fond entre les isobathes 100 et 500 mètres en moyenne. L'engin de pêche utilisé par le bateau scientifique est identique à ceux utilisés par les navires commerciaux. Les captures ont été normalisées à une heure de pêche et exprimées en quintaux de poisson par heure de chalutage.

Deux chalutiers de code bateau 32 et 49 ont réalisé 4 campagnes scientifiques. Ces deux bateaux n'ont pas pêché à la même période. Le bateau 32 a réalisé 3 campagnes, une de février à avril 1987, une d'août à novembre 1987 et une de février à mars 1988. Ce navire a donc réalisé une unique campagne en hiver et deux en été. Le bateau 49 a quant à lui réalisé une unique campagne au cours de l'été 1988, en avril. A cette époque, 2 espèces étaient ciblées par les navires commerciaux, le poisson des glaces et la légine. C'est à cette dernière (la légine) que nous nous intéresserons en priorité. Le tableau 1.3 résume par les moyennes des PUE, chacune des campagnes scientifiques.

Code Bateau	campa.	PUE Toutes espèces	PUE légine	PUE poissons des glaces	PUE colin	Pourcentages de PUE doublonnées	saison
32	1	3.84	1.21	1.60	1.03	2	été
32	2	5.21	2.63	2.08	0.50	58	hiver
32	3	16.38	0.13	15.79	0.46	0	été
49	1	4.33	0.45	3.71	0.17	0	été (fin)

TAB. 1.1 – PUE des campagnes scientifiques.

On note que la campagne du navire 49 et la troisième campagne du navire 32 ont uniquement ciblé le poisson des glaces. Les deux premières campagnes du navire 32 ne semblent pas avoir ciblées une espèce en particulier, et c'est au cours de la troisième campagne réalisée par le navire 32, que la PUE moyenne

toutes espèces confondues a été la plus forte. Les zones géographiques explorées ne sont pas les mêmes pour chacune des campagnes (fig. 1.10). Les deux premières campagnes du navire 32 ont échantillonné la quasi totalité de la zone, la troisième campagne n'a prospecté que le nord-est de la zone.

La seconde campagne du navire 32 se distingue des trois autres par un pourcentage de captures doublonnées très élevé, plus de 50%. Au cours de cette introduction, nous nous focaliserons uniquement sur cette campagne, la seule ayant eu lieu pendant la saison estivale. Cette campagne couvre toute la zone et présente une PUE moyenne de légines plus forte que les trois autres. Seule la zone délimitée en rouge (fig.1.9) sera étudiée, car il s'agit de la principale zone de pêche de légines au cours de cette période. Cette zone est communément appelée zone du fer à cheval.

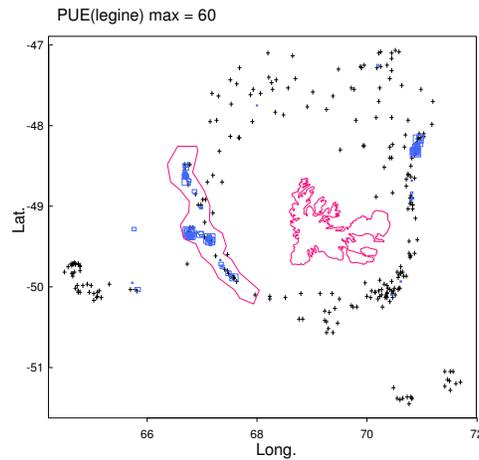


FIG. 1.9 – Délimitation de la zone du fer à cheval. Les surfaces des carrés sont proportionnelles aux PUE. Les croix représentent les PUE nulles. La zone délimitée représente la zone du fer à cheval.

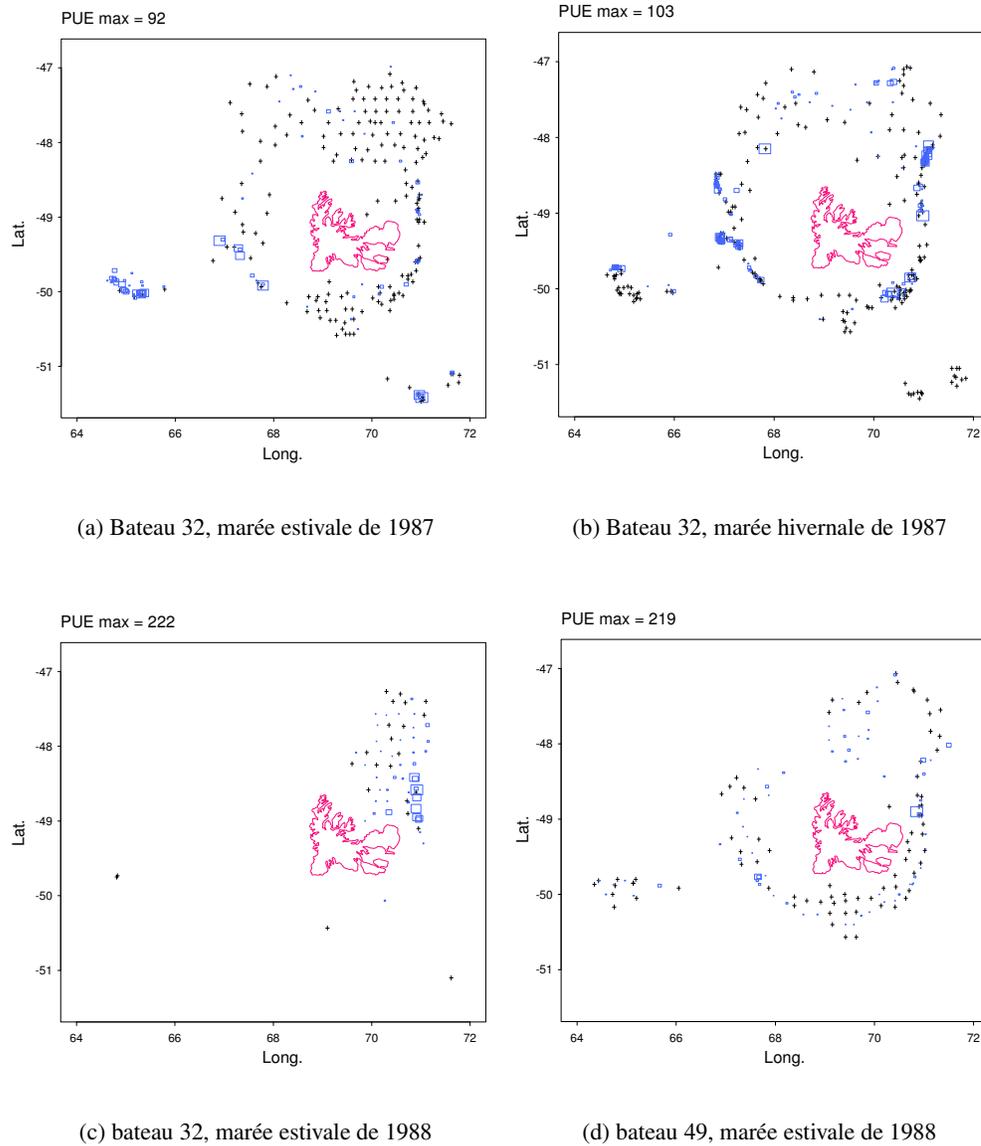


FIG. 1.10 – Localisation des PUE de légines des campagnes scientifiques. Les surfaces des carrés sont proportionnelles aux PUE. Les croix représentent les PUE nulles.

Les légines adultes, donc le stock exploitable, ne remontent que très rarement sur le plateau continental, et restent le long du talus continental (ce point sera développé plus largement ultérieurement lors de la description du cycle de vie de la légine). Dans cette zone, les accores du plateau sont sinueux, les données ont donc été projetées perpendiculairement sur l'axe des accores du plateau continental (fig. 1.11), préalablement à toute analyse spatiale. Suite à cette projection, des distorsions sont inévitables, amenant deux points proches à être très éloignés après projection, mais l'axe principal du système étudié est respecté.

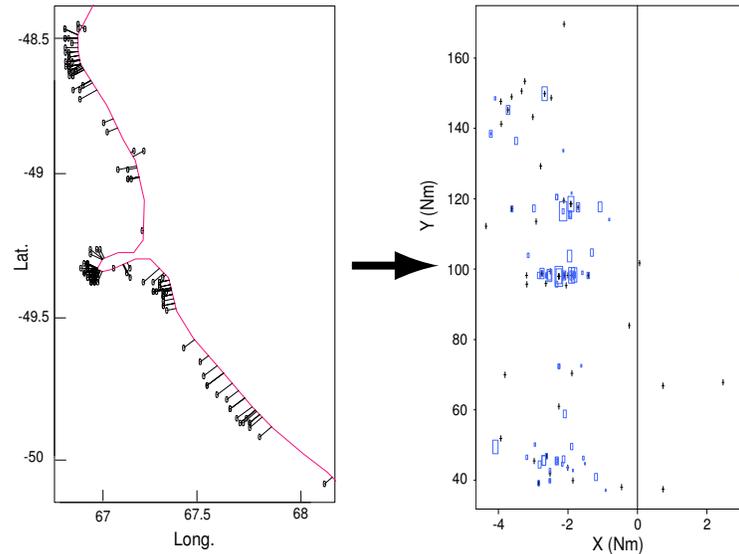


FIG. 1.11 – Projection des PUE de légines de la seconde campagne scientifique du navire 32 le long des accores du plateau continental.

Un variogramme expérimental a été calculé à partir des données projetées, dans deux directions, une perpendiculaire et une parallèle aux accores (fig. 1.12) :

- direction perpendiculaire aux accores : pas de 0.5 mile nautique ;
- direction parallèle aux accores : pas de 1 mile nautique.

On observe un variogramme décroissant, ce qui n'est théoriquement pas modélisable mis à part situation exceptionnelle (Matheron, 1982). Cette décroissance met en évidence un fort niveau de variabilité locale. En effet la part importante de PUE doublonnées perturbe le premier pas de calcul du variogramme. Il apparaît que la variance des PUE doublonnées est 1,5 fois plus forte que la variance de l'ensemble des PUE, et 5,5 fois plus forte que la variance des PUE non doublonnées (tab. 1.2). La variabilité des PUE à petites distances est supérieure à celle observée à grande distance.

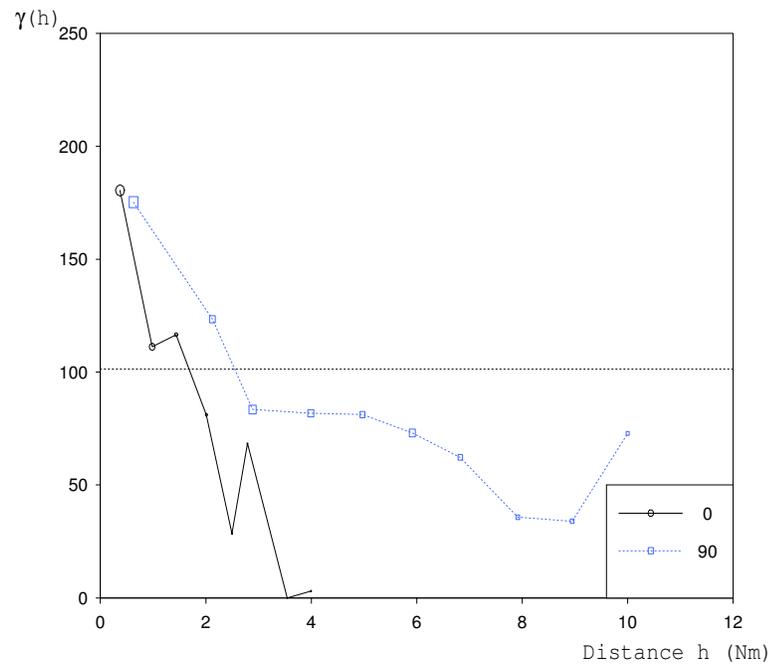


FIG. 1.12 – Variogramme des PUE de légines de la seconde campagne scientifique du navire 32. “90”, la direction parallèle aux accores, et “0” la direction perpendiculaire.

PUE de légines	PUE totales	PUE doublonnées	PUE sans les doublons
Variance	102	156	27

TAB. 1.2 – Variance des PUE de légines réalisées au sein de la zone du fer à cheval au cours de la seconde campagne du bateau 32.

La légine est une espèce profonde peu mobile, et ce manque de mobilité expliquerait les répétitions observées des coups de pêche une fois une zone riche découverte. Le fait de répéter localement des opérations de pêche pendant un court laps de temps risque, cependant d'entraîner une diminution de l'abondance locale à condition qu'il n'y ait pas d'apport d'individus extérieurs. Deux PUE doublonnées ne seraient donc pas représentatives de la même abondance locale. Il semble donc nécessaire d'exclure les paires de PUE ayant été réalisées le même jour. Afin d'éviter de comparer des PUE trop éloignées dans le temps, situation pour laquelle l'hypothèse d'absence d'apport d'individus entre coups de pêche devient irréaliste, une sélection temporelle a été imposée lors de la sélection des paires de points participant au calcul du variogramme. Seules les PUE séparées par moins de t jours et n'ayant pas été réalisées le même jour sont prises en compte. Différents intervalles de temps ont été testés de 1 à 5 jours, de 1 à 10 jours (fig. 1.1.13(a)) mais aucun n'a permis une amélioration du variogramme. De même le passage au $\log(PUE + 1)$ n'a pas permis d'améliorer le variogramme expérimental (fig. 1.1.13(b) et 1.1.13(c)).

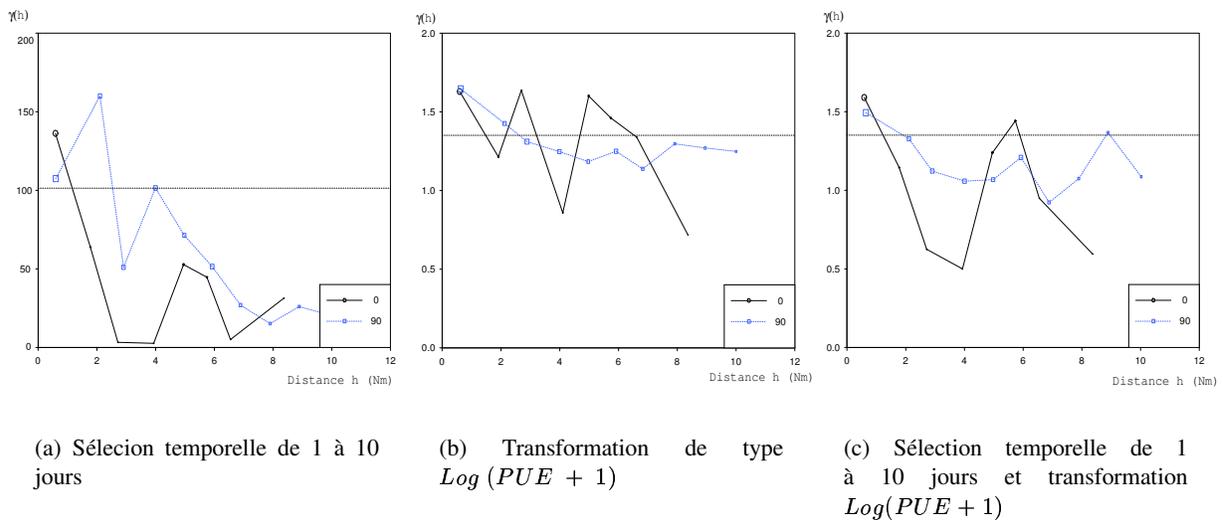


FIG. 1.13 – Variogrammes des PUE de légine réalisées par le navire 32 au cours de la seconde campagne, au sein de la zone du fer à cheval. “90” la direction parallèle aux accores, “0” la direction perpendiculaire.

La présence de données très contrastées et proches spatialement perturbe fortement le ou les premiers pas de calcul du variogramme. On a pu voir que pour cette campagne scientifique la variabilité locale est plus forte que la variabilité de l'ensemble des PUE. Ce type de problème semble inévitable à partir du moment où l'on travaille avec des données doublonnées. Une méthode pour contourner ce problème est de calculer des moyennes de PUE par bloc. Cependant cette solution entraîne la perte de la finesse de l'information disponible. Cette mise en bloc a été réalisée pour des blocs dont les dimensions étaient de 0.5 Nm (est-ouest) sur 1 Nm (nord-sud) (fig. 1.14). Le variogramme obtenu à partir des moyennes des PUE par bloc (fig. 1.14(b)) n'est plus décroissant, excepté pour les deux premiers pas de calcul dans la direction perpendiculaire aux accores. La variance a fortement diminué, passant de 105 à 33.

Les sélections temporelles des PUE participant au calcul du variogramme ou les transformation $\log(PUE + 1)$ n'ont pas permis d'identifier la structure spatiale de la ressource. La forte variabilité locale des PUE, due en grande partie à l'important pourcentage de PUE doublonnées, perturbe les premiers pas de calcul du variogramme. Pour de petites distances, la valeur du variogramme est donc surestimée. Ce constat est vérifié par le fait que le variogramme calculé à partir des PUE moyennes par bloc n'est pas décroissant. Les moyennes de PUE par bloc permet d'éliminer les problèmes liés à la forte variabilité locale. En théorie, être en possession de répliquats permet d'améliorer la précision statistique des différentes analyses, en estimant la précision et la qualité de la mesure. Le haut niveau de variabilité des PUE doublonnées observé peut trouver une explication dans le fait que la légine est une espèce peu mobile à l'échelle du mois. Nous reviendrons sur ce point au cours de la description de la biologie de la légine. Les répétitions des opérations de pêche aux mêmes positions géographiques peuvent entraîner une diminution de l'abondance locale. L'importante présence de PUE doublonnées n'est pas spécifique à cette campagne scientifique. En effet, nous verrons par la suite que certains navires commerciaux réalisent un très grand nombre de PUE doublonnées, avec des pourcentages de PUE doublonnées supérieurs à 80%.

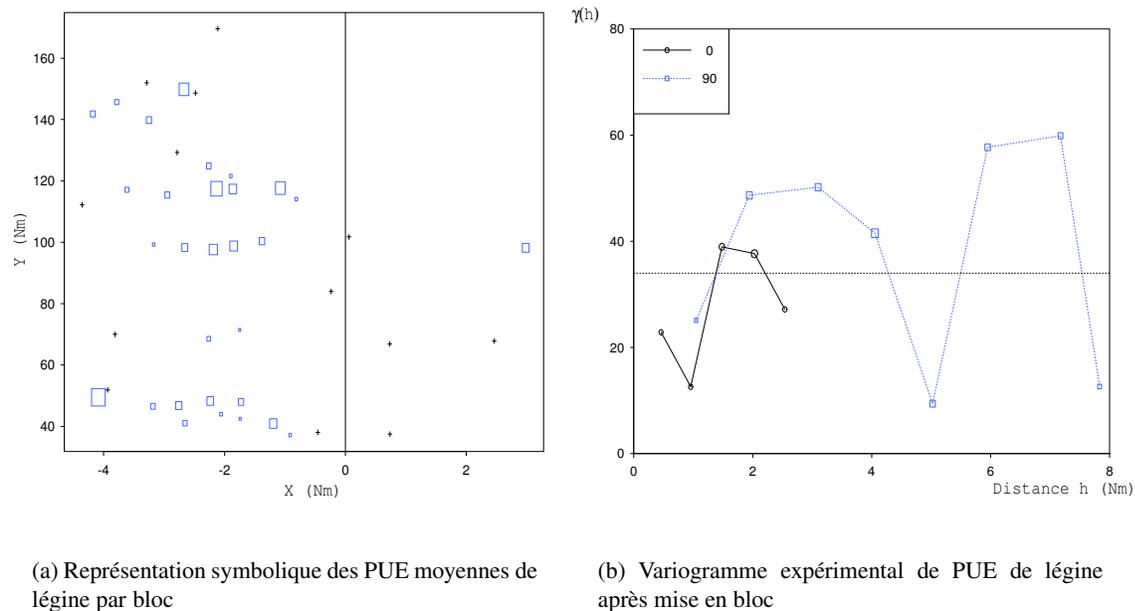


FIG. 1.14 – PUE moyenne de légine par bloc. La ligne verticale symbolise les accores du plateau. '90", la direction parallèle aux accores, et "0" la direction perpendiculaire.

1.4 Choix d'un chantier et d'un objectif d'étude

Les deux pêcheries sélectionnées s'opposent tant par l'espèce ciblée que par le métier utilisé. L'exemple de la pêcherie péruvienne a mis en évidence l'hétérogénéité des distributions spatiales de la ressource et des pêcheurs. Cependant, le fait de ne pas avoir eu accès aux PUE mais uniquement aux captures ne nous permettait pas de poursuivre plus avant l'étude de la densité-dépendance des localisations des pêcheurs et de la capturabilité. La pêcherie des îles Kerguelen offre quant à elle une information détaillée pour chaque opération de pêche et la présence de contrôleurs de pêche à bord de chaque navire commercial assure la fiabilité des données. La forte co-localisation des PUE de la pêcherie des Kerguelen révèle un phénomène plus important que le simple exemple puisque la présence d'opérations de pêche doublonnées et les problèmes induits semblent inévitables lors de l'étude des PUE d'une pêcherie commerciale. L'objectif de cette thèse a été redéfini suite à ces différents résultats et contraintes posées par les données. Nous nous sommes attachés à identifier un modèle explicatif des PUE doublonnées, et à déterminer des indices et des outils permettant d'identifier et d'intégrer ce phénomène lors des estimations de stock. La seconde partie de cette thèse correspond à la présentation de la pêcherie des îles Kerguelen, à la biologie de la légine et à une première analyse des données à notre disposition qui soulignera plus particulièrement le rôle important joué par les répartitions spatio-temporelle des PUE de chaque navire commerciaux, et donc les PUE doublonnées. Plus encore que la campagne scientifique traitée précédemment, les PUE commerciales réalisées au sein de la zone de Kerguelen présentent en effet de forts pourcentages de captures doublonnées. A partir des répartitions spatio-temporelles des PUE, deux tactiques de pêche seront définies au cours de la troisième partie. Ces tactiques permettront de différencier les différents navires opérant sur la zone de pêche et d'étudier l'impact des différentes tactiques sur les PUE moyennes réalisées. Les répétitions des opérations de pêche aux mêmes positions géographiques ont pour conséquence une forte variabilité locale des PUE qui perturbe les premiers pas de calcul du variogramme. Une position géographique peut être exploitée à plusieurs reprises par un même navire et/ou par différents navires. La variabilité locale a donc été décomposée en deux composantes : une composante intra-bateau et une composante inter-bateau.

La variabilité locale intra-bateau correspond à la variabilité des PUE doublonnées réalisées par un navire (chapitres 3 et 4). Pour chaque navire, des séries de captures doublonnées seront identifiées et permettront de mettre en évidence une diminution moyenne progressive des PUE au cours des répétitions, suggérant une diminution de l'abondance locale de la ressource (chapitre 5). Pour chaque position doublonnée et pour chaque navire, une unique PUE résultante sera conservée. Le cheminement de pensée de l'analyse de la variabilité locale intra-bateau consistera donc à appliquer des sélections de plus en plus strictes sur les données. En premier lieu les PUE doublonnées par navire seront sélectionnées sans aucune contrainte de temps. Puis, la dimension temporelle sera introduite lors de l'étude des distribution spatio-temporelle des campagnes de pêche de chaque navire, à l'aide des distances inter-chalutage (distances qui séparent deux opérations de pêche successives). Les séries de PUE doublonnées intégreront d'une part une contrainte spatiale forte et d'autre part une contrainte temporelle imposant que deux PUE doublonnées de rangs successifs (au sein de la série) ne soient pas espacées de plus de 4 jours.

La composante inter-bateau de la variabilité locale sera étudiée et traitée à partir de l'estimation des puissances de pêche des différents navires (chapitre 6). Différents travaux (Robson, 1966 ; Laurec, 1977 ; Salthaug et Godø, 2001) ont montré à l'aide d'une méthode basée sur les comparaisons des PUE réalisées

par des navires différents qu'il est possible d'estimer les puissances de pêche locales des différents navires à un navire référence. La connaissance des localisations géographiques de chaque PUE nous a permis d'utiliser les comparaisons des PUE de navires différents en fonction de la distance qui les sépare. Nous avons eu recours à une méthode développée par Laurec (1977), basée sur les rapports des PUE réalisées par des navires différents le même jour et exploitant le même stock local. Les puissances de pêche de chaque navire permettront de standardiser chacune des PUE. A partir des PUE obtenues après le traitement de la variabilité locale intra et inter-bateau, la répartition spatiale de la ressource sera étudiée puis modélisée à l'aide du variogramme. Une cartographie de la ressource sera obtenue par krigeage, permettant de comparer visuellement les distributions spatiales relatives de la ressource et des pêcheurs (chapitre 7).

Dans une cinquième partie, un retour sur analyse et une discussion concernant les principales interprétations halieutiques seront proposés. Ce retour consistera à reprendre et à discuter les différents problèmes posés par les PUE doublonnées lors de l'utilisation d'outils structuraux tel que le variogramme. Les incidences halieutiques des différents résultats seront reprises et discutées. L'accent sera particulièrement mis sur l'importance du rôle joué par les répartitions spatiales et spatio-temporelles de l'effort de pêche. L'apparition ces dernières années de systèmes permettant le suivi des localisations des opérations de pêche par satellite (données Vessel Monitoring System) permet de connaître de façon précise les positions géographiques de chaque opération de pêche. L'utilisation de ce type d'information nécessitera l'élaboration d'outils et d'indices permettant de prendre en compte l'information spatiale. Ce sera le cas, par exemple des captures doublonnées, si elles sont présentes.

Deuxième partie

Présentation des données Kerguelen

Chapitre 2

Présentation de la pêche des îles Kerguelen

Sommaire

Ce chapitre a pour but de présenter les données à disposition. Un bref historique de la pêche des Kerguelen ainsi que le cycle biologique de la légine seront présentés. Ils permettront d'énoncer les spécificités de la pêche ainsi que de la principale espèce ciblée actuellement au sein de la ZEE des îles Kerguelen. Suite aux résultats, une brève analyse concernant l'effet de support sera abordée.

Malgré l'isolement et de difficiles conditions d'exploitation, la pêche des îles Kerguelen était en pleine expansion jusqu'à la fin des années 1990. Cette croissance était en grande partie due à l'engouement des japonais pour la légine (*Dissostichus eleginoides*) et à la forte valeur marchande de cette dernière (de l'ordre de 50 à 60 F/Kg au débarquement). L'intérêt porté par les japonais pour la légine s'explique par une suite d'événements qui ont débuté dans les années 1980. Ainsi, la rupture des contrats accordés par les USA pour la pêche de morue noire ou black cod (*Anoplopoma fimbria*) au large de l'Alaska a contraint les japonais à prospecter de nouvelles zones pour découvrir un produit de substitution. A ce même moment, le marché japonais découvre au large du Chili une espèce très proche de la morue noire, la légine. Très rapidement les prix au débarquement augmentent ce qui pousse les pêcheurs Chiliens à surexploiter leur propre stock. D'autres zones susceptibles de rencontrer cette ressource ont donc été recherchées. C'est ainsi que l'intérêt s'est porté sur l'océan austral et en particulier sur les secteurs les plus productifs : la Georgie du sud et le plateau de Kerguelen. L'attrait commercial de cette pêche a induit l'apparition du braconnage à grande échelle, ce dernier dépasse fréquemment la capture légale et risque de conduire à la disparition de cette espèce sur cette zone.

La pêche de légine au sein de la zone de Kerguelen a débuté en 1984 et résulte d'une diminution régulière de l'abondance des poissons des glaces (*Champscephalus gunnari*) qui avait contraint les chalutiers soviétiques (les seuls présents sur la zone) à trouver d'autres ressources. Depuis la création de la zone en 1978, les captures annuelles étaient de l'ordre de quelques dizaines de tonnes pour augmenter brutalement à plus de 6600 tonnes de légines en 1984-85. Le premier chalutier français sur zone est arrivé en 1986. De 1978 à 1990, l'engin de pêche utilisé était uniquement le chalut de fond. A l'heure actuelle, ce sont des palangriers sous pavillon français qui exploitent seuls ce stock.

Pour cette étude, les données disponibles correspondent aux captures par chalutage. Sur cette zone, l'activité de pêche est strictement contrôlée puisqu'un observateur se trouve à bord de chaque navire. De ce fait, la position (connue au mile nautique près), la durée des coups de chalut ainsi que les captures sont fiables et connues de façon précise. Ainsi les PUE de légines ont pu être suivies au cours de deux périodes espacées d'une dizaine d'années. Au cours de la première période, 12 chalutiers commerciaux (11 soviétiques et 1 français) ont exercé une activité entre 1985 et 1987. La seconde période quant à elle a vu 2 chalutiers français en activité de 1995 à 1997. Par ailleurs quatre campagnes scientifiques ont été réalisées au chalut en 1987 et 1988 soit très peu de temps après les premiers prélèvements importants de légines. Ces deux périodes ont été retenues afin de comparer l'évolution des comportements des pêcheurs, des PUE réalisées pour une pêcherie en début d'exploitation et pour une pêcherie en pleine exploitation. Après 1999, la technique de pêche à la palangre a été rendue obligatoire par les autorités.

2.1 Historique des captures de légines sur le plateau de Kerguelen

A l'ouverture de la pêcherie en 1978, les trois espèces ciblées par les pêcheurs sont le poisson des glaces, le colin de Kerguelen et le colin austral. Au début des années 90, l'abondance du poisson des glaces a diminué de façon très importante, son exploitation est donc devenue peu rentable. Les deux espèces de colin ont été interdites à la pêche à la même période, leur abondance étant très faible. Ces trois espèces ont été délaissées au profit de la légine. Avant 1984-85, les captures de légines peuvent être qualifiées d'accessoires puis deviennent régulières. Le volume de capture légal est bien connu du fait de la présence des contrôleurs de pêche (Duhamel et Agnew, 1990 ; Duhamel, 1993 ; Duhamel, 1990). La légine a été choisie comme espèce cible au cours de cette thèse du fait du développement de son exploitation. Depuis l'été 1996/97, il existe une grande incertitude concernant les prélèvements réels en raison de l'absence de déclaration des débarquements illégaux. Pour la période s'étendant de 1996 à nos jours, le niveau de capture est basé sur des estimations minimales des captures réalisées par les navires illégaux (fig. 2.1).

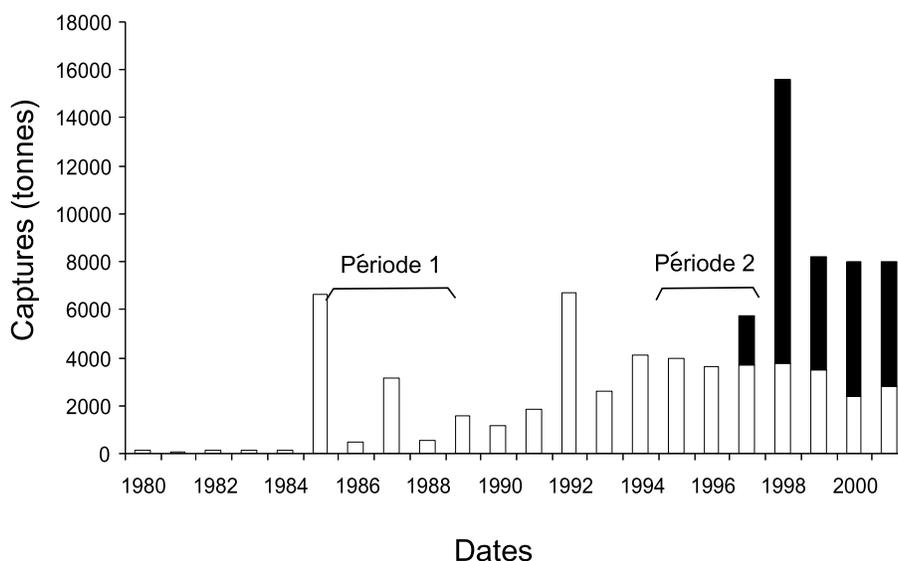


FIG. 2.1 – Captures de légines dans la ZEE de Kerguelen exprimées en tonnes (chalutiers et palangriers). En blanc, les captures commerciales légales et en noir les captures illégales. Matérialisation des deux périodes d'étude abordées dans la thèse.

Nous n'avons pas eu accès à l'effort de pêche pour toute la période d'exploitation de la zone, cependant il semble évident que la brusque augmentation des captures observée à partir de 1997 est due à la présence des navires illégaux, et donc à une très forte et subite augmentation de l'effort de pêche.

2.2 Cycle biologique de la légine

La légine fait partie de la famille des *Nototheniidae* dont les espèces sont uniquement rencontrées dans l'hémisphère sud et plus particulièrement dans l'océan austral. La légine australe possède une distribution subantarctique et peut remonter seulement vers le nord en longeant les côtes de l'Amérique du Sud en profitant des courants froids. De récentes expériences de marquage réalisées à l'île d' Heard (située à 300 miles nautiques au sud-est des îles Kerguelen) ont montré que les légines peuvent parcourir des distances considérables (plus de 1000 miles nautiques). Au vue de cette distance, il est très probable qu'il y ait un mélange important entre les populations, il est donc difficile de définir des stocks. La légine est une espèce dite profonde, les adultes sont rencontrés à des profondeurs comprises entre 90-100 mètres et jusqu'à plus de 2500 mètres. Cependant un gradient de distribution bathymétrique est observé au cours du développement de la légine (Duhamel, 1981 ; Duhamel, 2000).



FIG. 2.2 – Lègine (*Dissostichus eleginoides*).

La ponte a lieu le long du talus continental en profondeur (dépassant 500 mètres) à la fin de l'automne austral (fin juin, fig. 2.3). La zone nord du plateau de Kerguelen semble plus favorable pour la fraie. L'éclosion a lieu en septembre. Les individus les plus jeunes sont retrouvés en fin d'été austral sur le plateau continental (90-100 mètres de profondeurs). Les juvéniles semi-pélagiques demeurent au sein de ces zones dites nurseries plusieurs années avant de rejoindre le stock adulte en profondeur. Les adultes se situent le long du talus continental à des profondeurs importantes. Ce poisson peut atteindre 215 cm et peser plus de 80 Kg. Les légines ont une espérance de vie très longue, certains individus atteignent 40 ans. Il n'y a pas de migration particulièrement prouvée même si des déplacements de groupes sont régulièrement observés, probablement en fonction des ressources alimentaires disponibles. Il est donc possible d'avancer que cette espèce démersale de profondeur est peu mobile pour des échelles de temps de l'ordre du mois. Ce constat nous intéressera tout particulièrement pour la suite de cette étude. En effet, cette faible mobilité de la légine est favorable à un épuisement local de la ressource lors de la répétition d'opérations de pêche co-localisées.

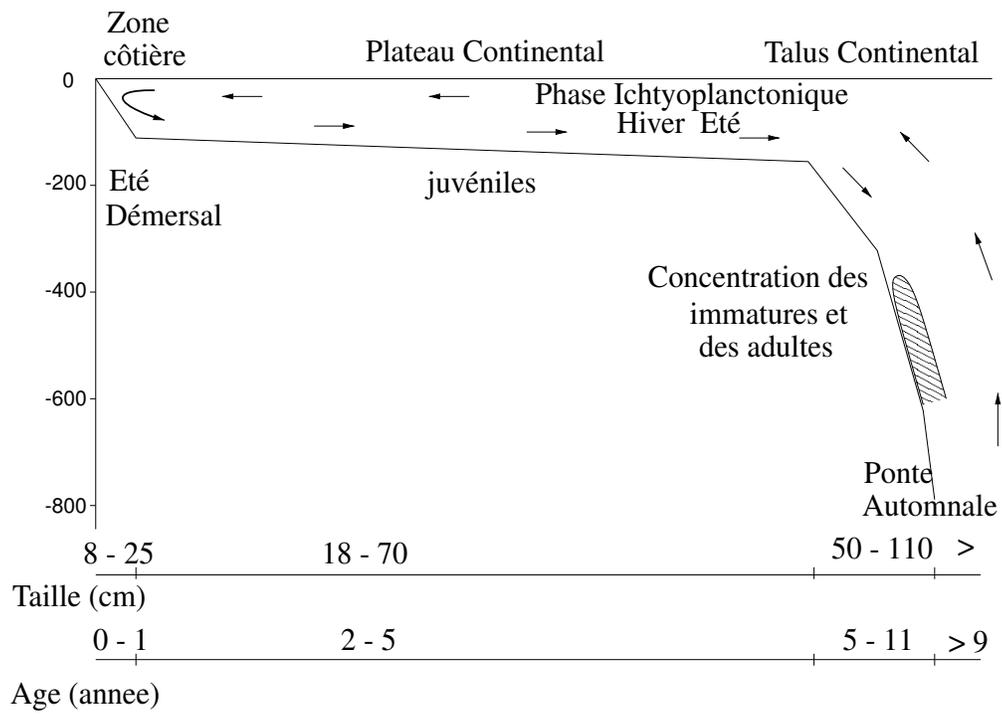


FIG. 2.3 – Cycle biologique de la légine.

2.3 Présentation des données et premières analyses

2.3.1 Présentation des données commerciales utilisées

J'ai disposé des opérations de pêche officielles effectuées au cours de deux périodes distantes d'une dizaine d'années. Un observateur scientifique se trouve à bord de chaque navire commercial. Il est donc possible de suivre les marées de chaque bateau et d'avoir confiance en chacune des données. Pour chaque opération de pêche, nous connaissons sa position au mile près, le temps de chalutage, la profondeur de chalutage, le cap ainsi que les captures par espèce exprimées en quintaux. L'unité d'effort de pêche choisie est le temps de chalutage. Les PUE nominales seront donc exprimées en quintaux de poissons capturés par heure de chalutage. Par la suite, sous le terme de PUE seront désignées les PUE nominales. Dans un premier temps, des PUE mensuelles ont été calculées (somme des captures mensuelles divisée par la somme mensuelle des temps de pêche). L'échelle de temps mensuelle a été retenue car elle permettait de calculer des moyennes à partir d'effectifs importants pour chaque mois. Les mois ayant un très faible nombre de captures ne sont pas pris en compte. Dans cette région, seules deux saisons sont généralement distinguées, une saison estivale d'octobre à mars et une saison hivernale d'avril à septembre.

Au cours de la première période d'étude, allant de 1986 à 1988, 12 chalutiers (11 soviétiques et 1 français) ont pêché. La légine n'était pas encore l'espèce ciblée par les pêcheurs. Trois autres espèces étaient recherchées : le poisson des glaces, le colin de Kerguelen et le colin austral. Pour cette analyse, les deux espèces de colin n'ont pas été distinguées. La seconde période a vu quant à elle, deux chalutiers français opérer au sein de la zone de Kerguelen. Cette période concerne les années allant de 1995 à 1997, années où la légine était l'espèce ciblée par les pêcheurs, le poisson des glaces ayant quasiment disparu et les colins étant interdits à la pêche.

Parallèlement à la disparition du poisson des glaces et du colin (fig. 2.2.5(b) et 2.2.5(c)), les PUE mensuelles de légines des années 90 sont en moyenne deux fois plus fortes que celles des années 80. Les PUE mensuelles de la seconde période confirme le fait que les PUE estivales sont en moyenne plus fortes que les hivernales (fig. 2.2.5(a)). L'évolution dans le temps de l'effort de pêche semble saisonnier (fig. 2.2.5(d)). Au cours de l'été 1986-87, les efforts de pêche mensuels sont les plus importants et c'est à cette même période que le nombre de navires exploitant la zone est le plus grand. Suite à cette période, l'effort de pêche a diminué de façon importante, de plus de 90 000 minutes à des temps oscillant autour de 20 000 minutes par mois. L'effort de pêche réalisé au cours des années 90 est du même ordre de grandeur que celui des mois d'hiver de la première période.

L'évolution des PUE mensuelles de légines en fonction de l'effort de pêche représentée à la figure 2.4 est utilisée ici en tant que survol de l'historique de la pêcherie. Sur l'ensemble des deux périodes, il n'apparaît pas de relation entre les PUE de légines et l'effort de pêche déployé. Les données à disposition n'offrent pas le recul nécessaire pour conclure quant à une éventuelle situation de sur-exploitation ou de sous-exploitation de la légine (modèle global, Schaeffer 1954). Cependant Dagorn (1990) a montré, sur la période 1984-90, que la pêcherie de légine était en situation de sous-exploitation.

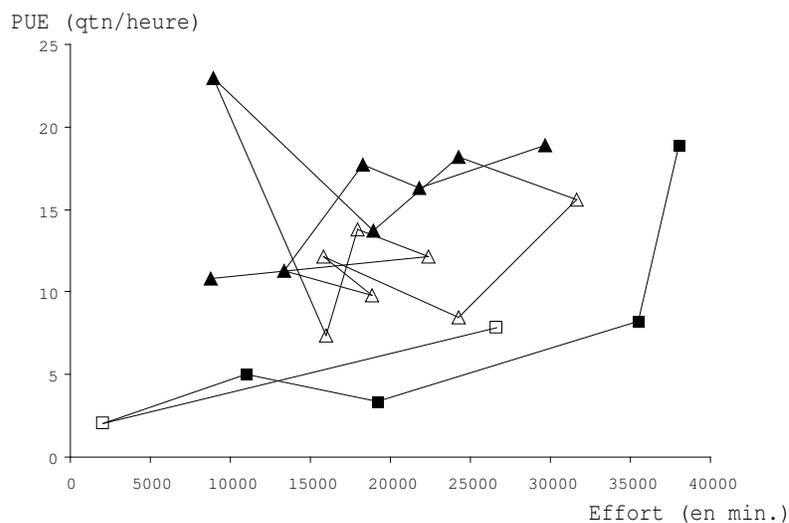
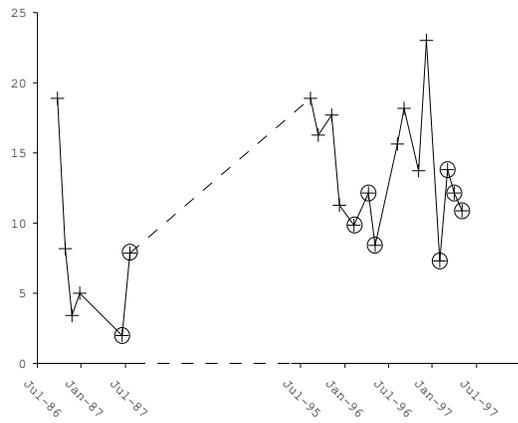
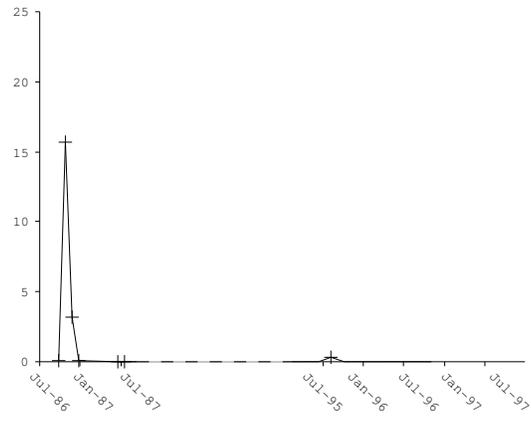


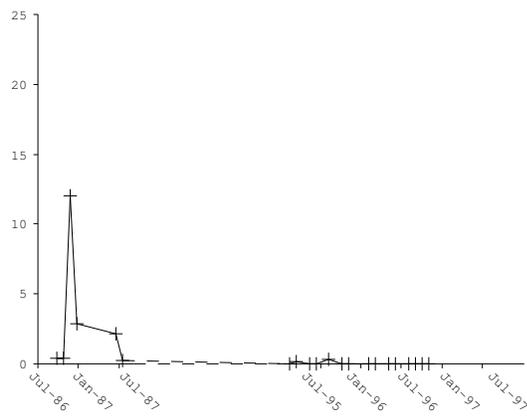
FIG. 2.4 – PUE mensuelles de légines en fonction de l'effort de pêche mensuel (en minutes de chalutage). Les carrés correspondent aux mois des années 80 et les triangles aux mois des années 90. En noir, les mois estivaux et en blanc, les mois hivernaux.



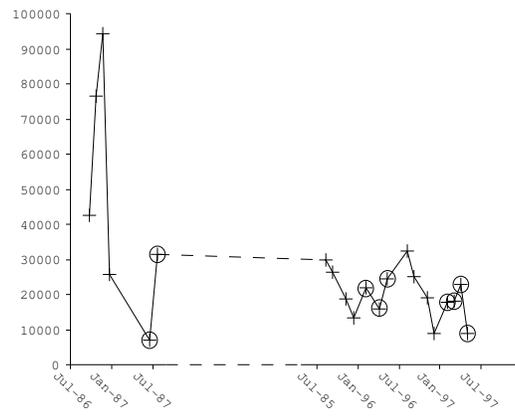
(a) PUE mensuelles de légine (quintaux de légines par heure de chalutage)



(b) PUE mensuelles de poisson des glaces (quintaux de poissons des glaces par heure de chalutage)



(c) PUE mensuelles de colin (quintaux de colins par heure de chalutage)



(d) Sommes mensuelles des temps de pêche en minutes

FIG. 2.5 – PUE et effort de pêche mensuels. Les lignes pointillées symbolisent le changement d'échelle dans le temps. Les croix cerclées correspondent aux mois hivernaux.

2.3.2 Ségrégation spatiale et définition des zones d'études : pêcherie monospécifique par zone

Les captures de légines sont exclusives de toutes autres captures de colin ou de poisson des glaces (fig. 2.6) et réciproquement.

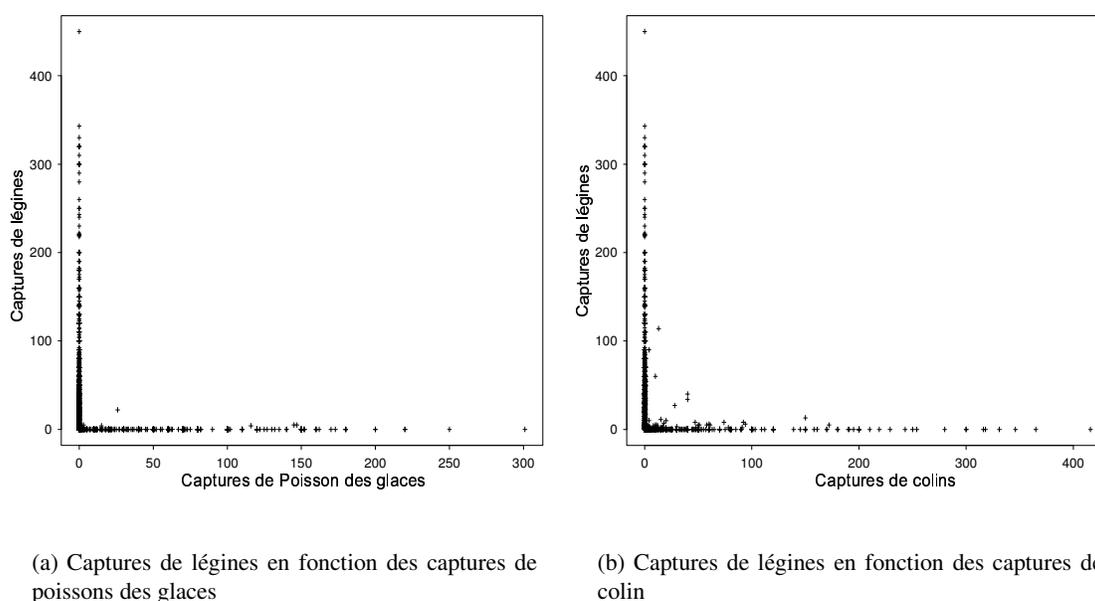


FIG. 2.6 – Corrélation entre les captures de légines, de poissons des glaces et de colin.

Les distributions spatiales de chacune des espèces sur la zone de Kerguelen sont très distinctes dans l'espace, de sorte que chaque espèce est pêchée au sein d'une zone bien définie spatialement, et sans recouvrement dans l'espace avec la zone d'une autre espèce. La monospécificité des coups de chalut recouvre une ségrégation spatiale très profonde des zones de présence. Cette particularité est aisément vérifiable lorsque l'on observe la distribution des captures (fig. 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11). La répartition dans l'espace de chacune des espèces s'est donc imposée comme une post-stratification nécessaire à l'étude des captures. Au total 5 zones ont été définies à l'aide des localisations des captures de chacune des espèces (tab. 2.1). Les PUE réalisées en dehors de ces 5 zones ont été localisées dans une zone de code 6.

Les zones prospectées ont évolué avec le temps. Le banc Skiff (zone 5) a été totalement délaissé dans les années 90, alors que deux nouvelles zones à légines ont été exploitées, les zones nord (zone 2) et nord-est (zone 3). La zone du fer à cheval (zone 1) a été beaucoup plus exploitée pendant la première période. Les deux autres zones à légines ne sont prospectées que pendant la seconde période. Cette évolution dans l'exploitation des zones à légines est due aux caractéristiques topographiques de la zone du fer à cheval. Cette zone est dangereuse pour les engins de pêche et occasionne des casses ou des pertes de matériel de pêche

(Duhamel, com. pers.). Les pêcheurs ont donc cherché à exploiter de nouvelles zones. Ce changement de zones d'exploitation de la légine a une incidence importante sur la distribution spatiale de l'effort de pêche et est révélateur d'un changement de comportement des pêcheurs vis à vis de la ressource. Ce point sera largement développé plus loin.

Code zone	1	2	3	4	5	6
espèce ciblée	légine	légine	légine	colin	p. glaces	aucune
nom local	Fer à cheval	zone nord	zone est	zone sud	Banc Skiff	

TAB. 2.1 – Définition des différentes zones de pêche.

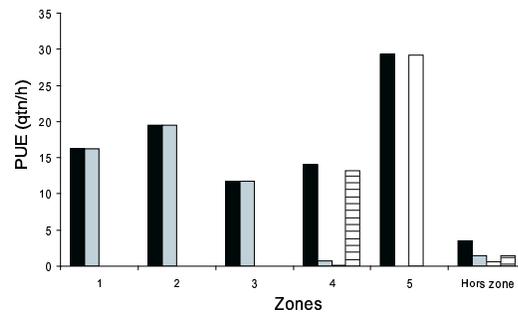


FIG. 2.7 – PUE moyennes par zone et par espèce. En noir, la PUE moyenne toutes espèces confondues ; en gris les légines ; en blanc le poisson des glaces ; traits horizontaux le colin.

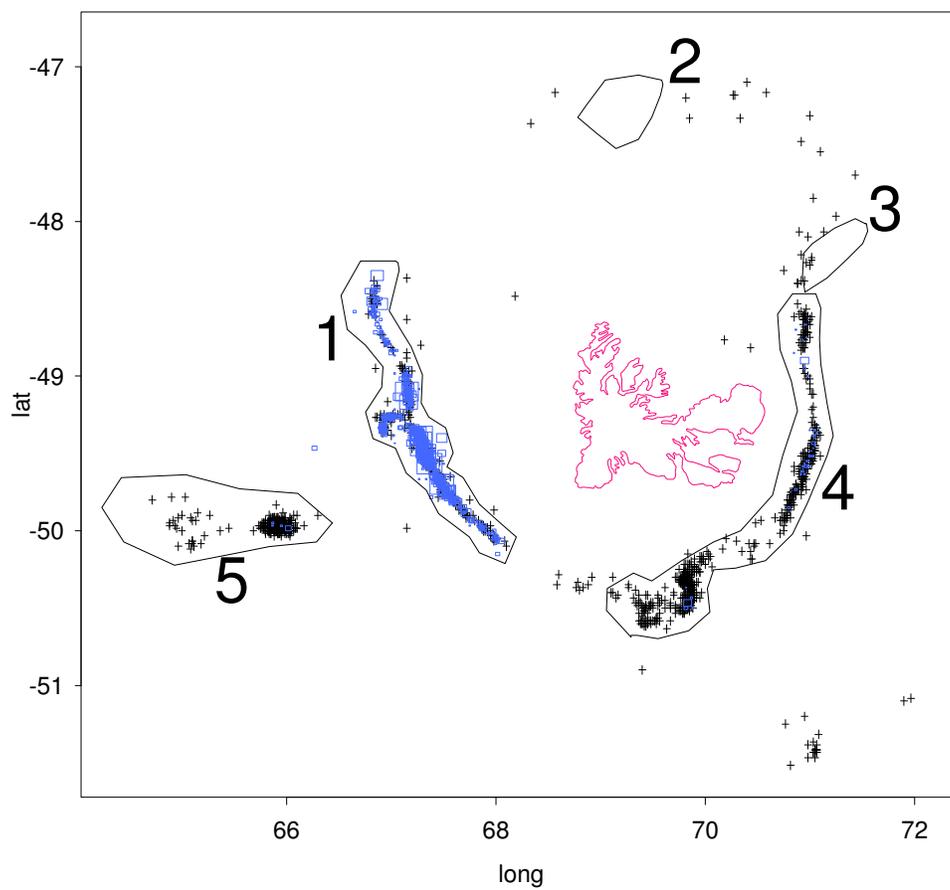


FIG. 2.8 – PUE de légine au cours des années 1986-87. La surface des carrés est proportionnelle aux PUE et les croix représentent les PUE nulles. Les chiffres correspondent aux numéros des zones.

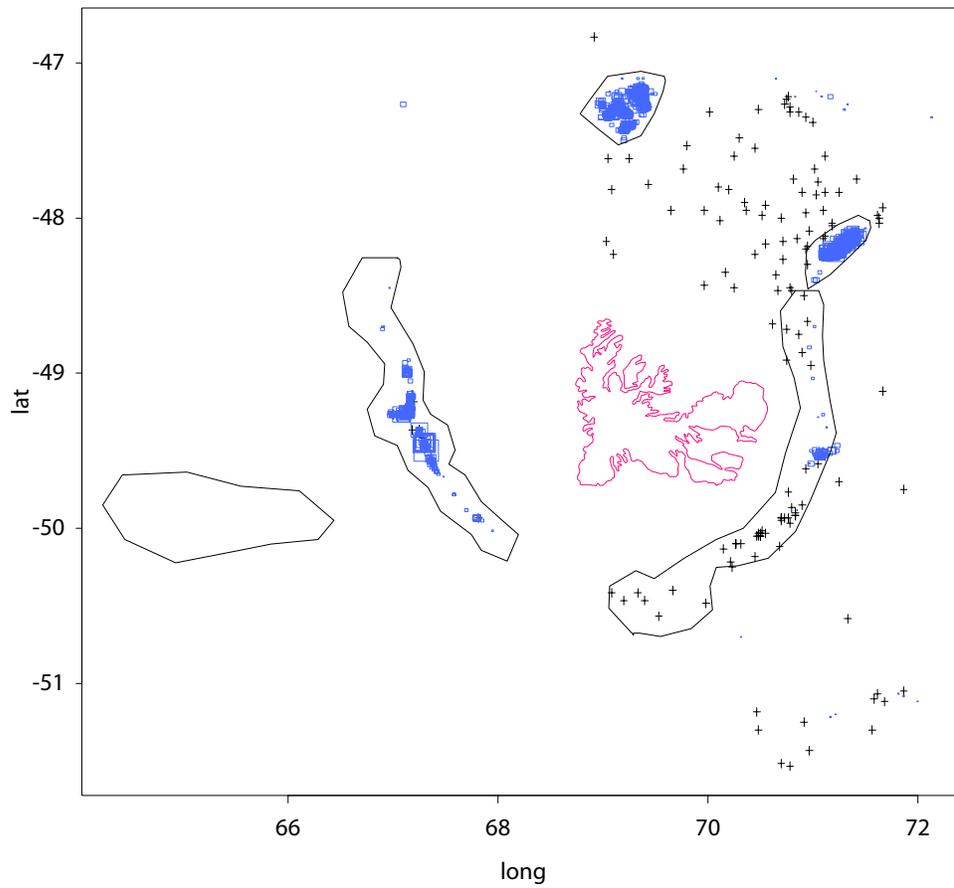


FIG. 2.9 – PUE de légine au cours des années 1995-97. La surface des carrés est proportionnelle aux PUE et les croix représentent les PUE nulles.

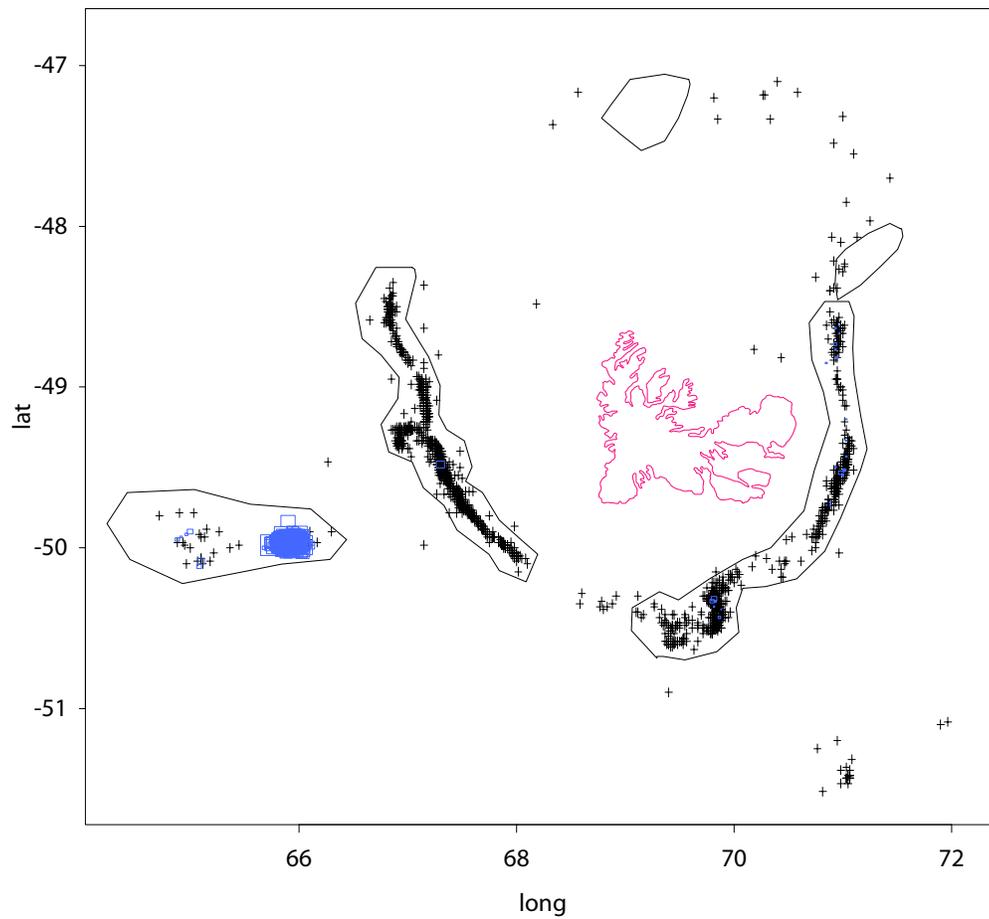


FIG. 2.10 – PUE de poissons des glaces au cours des années 1986-87. La surface des carrés est proportionnelle aux PUE et les croix représentent les PUE nulles.

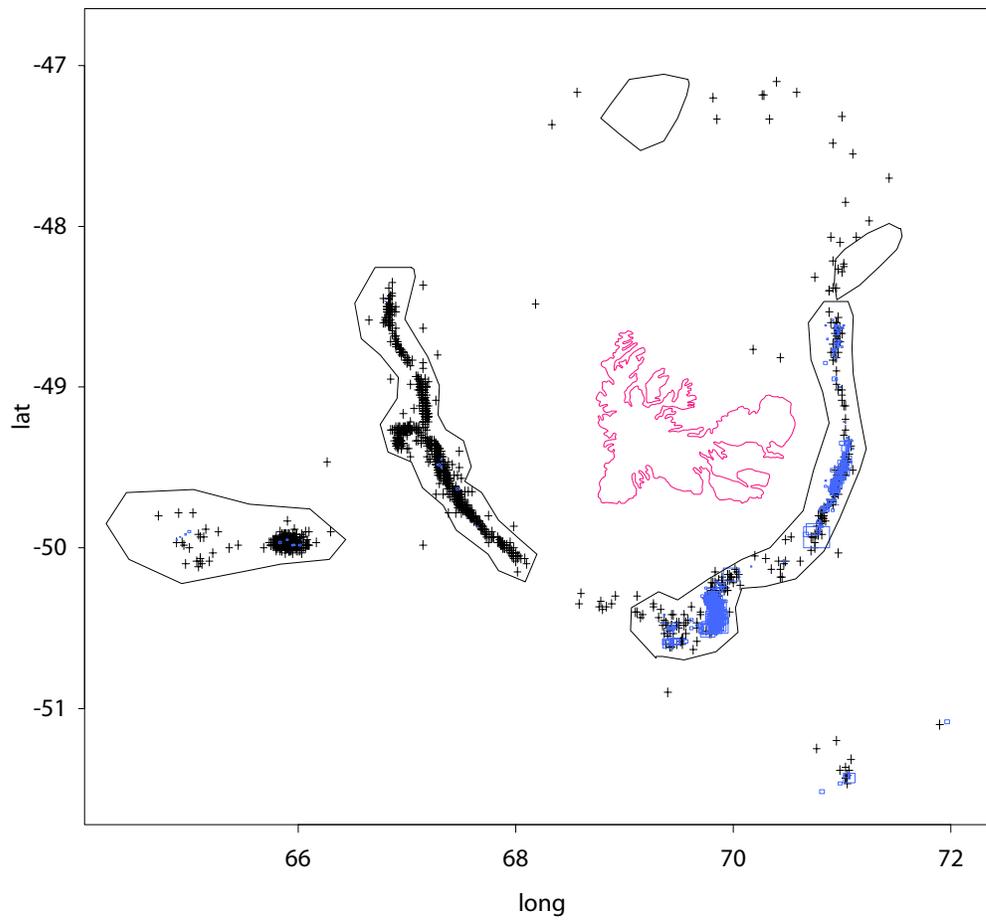


FIG. 2.11 – PUE de colins au cours des années 1986-87. La surface des carrés est proportionnelle aux PUE et les croix représentent les PUE nulles.

2.3.3 Statistique des campagnes de pêche

L'isolement des îles Kerguelen oblige les navires à réaliser de longues périodes de pêche. Des campagnes de pêche ont été identifiées pour chaque navire. Toutes les PUE successives d'une même campagne sont espacées par moins de 10 jours. Cette contrainte assure que le navire est resté sur la zone de pêche. Les tableaux 2.2 et 2.3 résument chacune des campagnes de pêche des navires. Au cours de la période 1986-1987, les différents chalutiers n'ont réalisé qu'une unique campagne de pêche, contrairement à la seconde période d'étude. Nous retiendrons de l'ensemble de ces statistiques quelques traits marquants. Au cours de la première période, les pourcentages de PUE nulles sont dans l'ensemble élevés. Particulièrement pour le bateau 22, qui a réalisé 67% de PUE nulles et une des plus faibles PUE moyennes. Inversement, le navire 45 a réalisé la PUE moyenne la plus forte et possède le plus faible pourcentage de captures nulles. Au cours de la seconde période, seule la légine a été ciblée, et seules les zones 1, 2 et 3 ont été prospectées. Les pourcentages de PUE nulles sont très faibles, mais les PUE moyennes ne sont pas pour autant plus fortes qu'en première période (tab. 2.3). Un chalutier a pêché pendant les deux périodes d'étude, il s'agit du navire de code 19, pour la première période (1986-87), et 192, pour la seconde période (1995-97). Deux codes lui ont été assignés afin de différencier plus facilement les deux périodes de pêche.

Code bateau	Année	Mois	Temps en jours de mer	Nombre d'opérations de pêche	PUE moyenne par espèce			Pourcentage de PUE nulles
					légine	P. glaces	Colin	
Saison estivale								
19	1986	10-11	30	214	26,9	23,9	0	46
38	1986	10-11-12	88	377	30,7	32	35,9	23
43	1986	10-11-12	85	354	21,2	35,4	13,8	27
44	1986	10-11	42	116	17,5	12,2	5,6	57
45	1986	10-11-12	78	310	19	47,9	25,2	9
47	1986	11-12	34	124	0	28,4	15,7	32
48	1986	11-12	30	140	15,3	3,5	14,1	44
41	1986-87	10 à 1	85	398	11,9	37,6	17,2	22
46	1986-87	10 à 1	97	422	17,9	35,8	22,1	22
Saison hivernale								
16	1987	8-9	30	90	8,2	NA	0,3	31
22	1987	7-8-9	57	213	6,8	0	1,4	67
29	1987	7-8-9	35	129	11,1	NA	NA	14

TAB. 2.2 – Résultats des campagnes de la première période de pêche, de 1986 à 1987.

Code bateau	Camp.	Année	Mois	Temps en jours de mer	Nombre d'opérations de pêche	PUE moyenne Légines	Pourcentage de PUE nulles
Saison estivale							
54	1	1995	8-9-10	46	156	19,5	0
54	2	1995-96	11-12-1	48	195	15,7	1
54	4	1996	9-10	45	167	13,9	0
54	5	1996-97	11-12-1	52	207	17,5	3
192	1	1995	9-10	44	153	18,3	3
192	3	1996	9-10	36	170	24,1	5
Saison hivernale							
54	3	1996	3-4	30	98	12,2	1
54	6	1997	3-4	46	169	11,5	1
192	2	1996	5-6	46	208	10	1
192	4	1997	4-5-6	45	244	13,4	2

TAB. 2.3 – Résultats des campagnes de la seconde période de pêche, de 1995 à 1997.

2.4 Etude du support et de son effet sur les captures de légines

En géostatistique, une variable régionalisée est définie comme la moyenne d'un phénomène mesuré sur un certain volume ou une certaine surface, plutôt que comme la valeur en un point. Pour le cas présent, la surface sur laquelle la PUE est mesurée, encore appelée support, correspond à la surface chalutée. Les données à ma disposition ne mentionnaient pas les surfaces chalutées, mais les temps de chalutage. Si l'on considère que tous les navires chalutent à la même vitesse et qu'ils utilisent le même chalut (ce qui est le cas), le temps de chalutage permet de connaître la surface chalutée à une constante près. Cette section concerne uniquement les actions de pêche ciblant la légine.

L'histogramme des PUE commerciales de légine (fig. 2.12) est très disymétrique et présente un grand nombre de PUE nulles. Plus précisément la part des PUE nulles de légines est beaucoup plus importante au cours de la première période qu'au cours de la seconde.

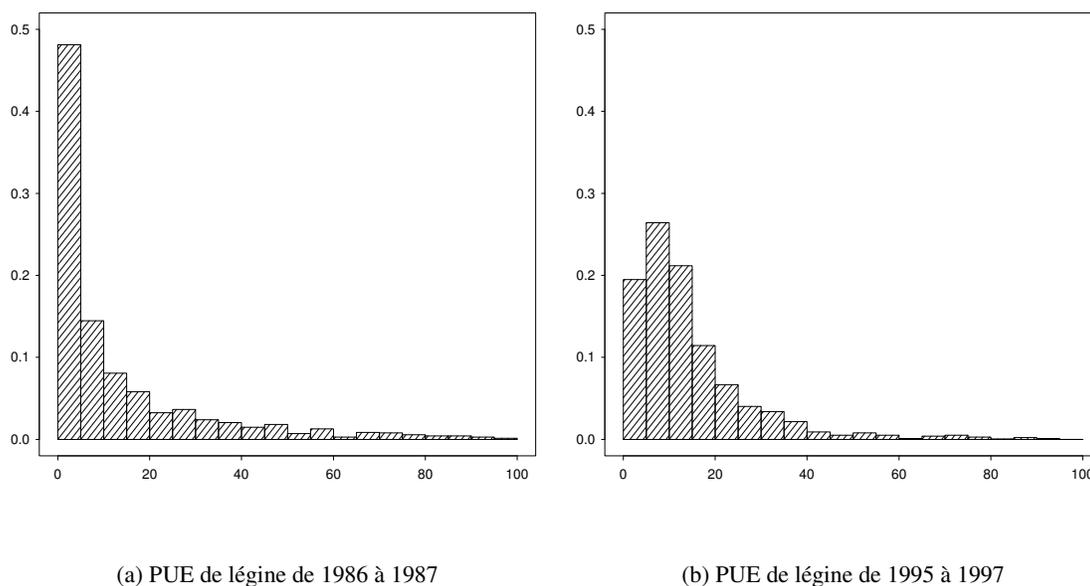


FIG. 2.12 – Histogrammes des PUE de légines (en fréquences) au cours des deux périodes, exprimées en quintaux de légines par heure.

On observe que les PUE les plus importantes correspondent à des temps de chalutage faibles, moins de 100 minutes pour les deux périodes de pêche (fig. 2.14). L'étude des temps de chalutage permet de mettre en évidence une tendance à l'augmentation du temps de chalutage entre les deux périodes (fig. 2.13). Le temps de pêche moyen est de l'ordre d'une centaine de minutes pour la première période et de 170 minutes pour la seconde. Si la taille du support augmente, on obtient une nouvelle variable régionalisée qui est liée à la précédente mais qui possède des caractéristiques statistiques différentes. L'augmentation du support tend

à diminuer la variance de la variable, mais aussi à normaliser la distribution de cette variable. C'est bien le phénomène que l'on observe pour les PUE de légines. Les temps de pêche de la seconde période sont sensiblement plus longs et la distribution des PUE de légine est moins disymétrique. Cependant, pour cette pêcherie, l'effet de support n'est probablement pas seul responsable de cette modification. Nous verrons par la suite que les tactiques de pêche ont évolué, ainsi que l'équipement embarqué par les différents navires, et que ces évolutions induisent des changements similaires à l'augmentation du support. Il est à noter qu'il existe aussi un effet zone, puisque les zones 2 et 3 ont uniquement été exploitées au cours de la seconde période au détriment de la zone 1.

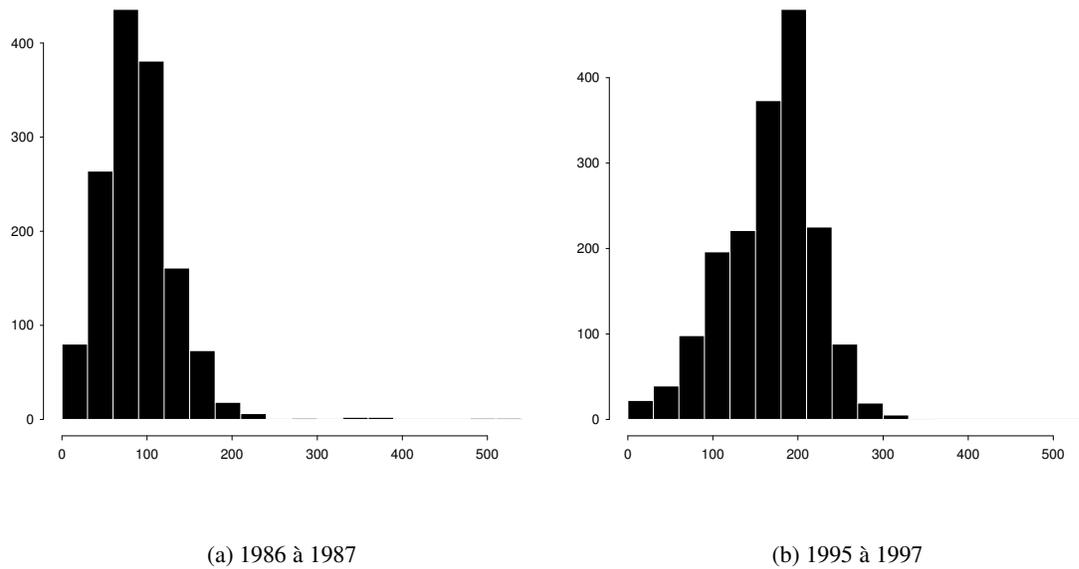
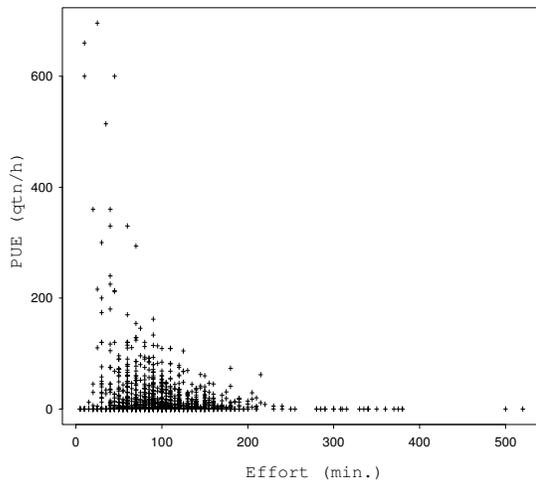
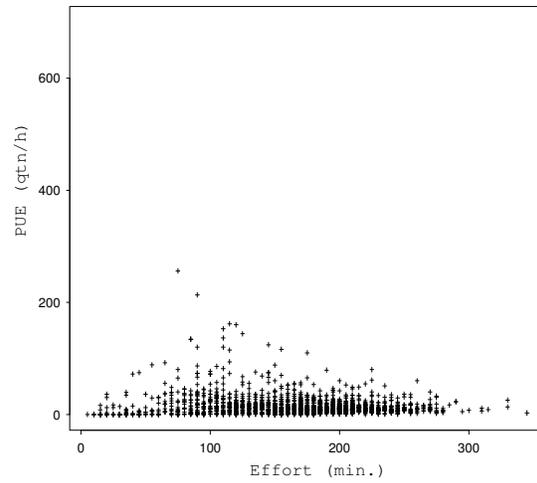


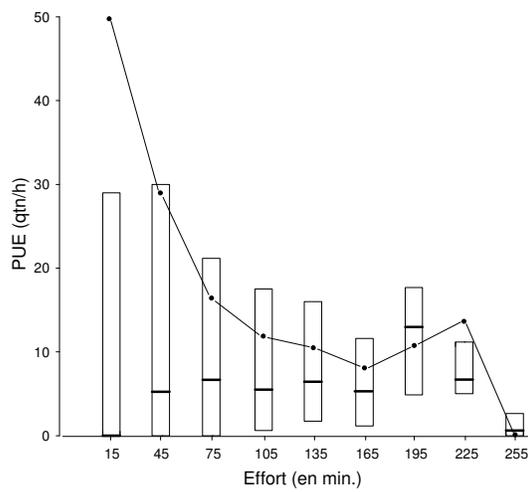
FIG. 2.13 – Histogrammes des temps de pêche des actions ciblant la légine.



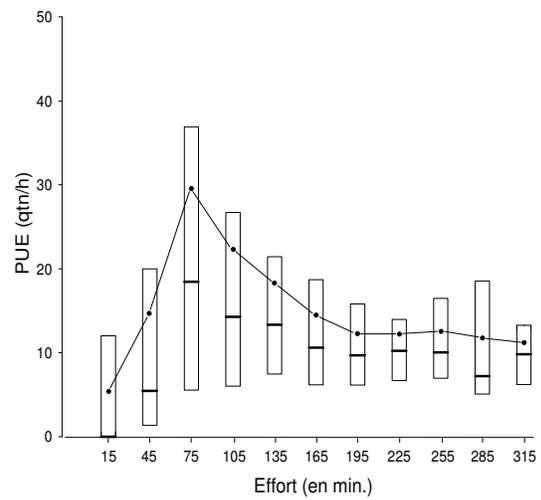
(a) de 1986 à 1987



(b) de 1995 à 1997



(c) de 1986 à 1987



(d) de 1995 à 1997

FIG. 2.14 – PUE de légines en quintaux par heure en fonction des temps de chalutage en minute.

La figure 2.15 représente les histogrammes des PUE de légines de la seconde période avec une sélection sur les temps de pêche. La figure 2.2.15(a) représente les PUE dont les temps de pêche sont inférieurs à 85 minutes et la figure 2.2.15(b), les PUE dont les temps de pêche sont supérieurs à 240 minutes. L'histogramme des PUE obtenues à partir des temps de chalutage court est très disymétrique. Les écart-types et les maxima sont très différents (tab. 2.4). La variance des PUE pour des temps de pêche inférieurs à 85 minutes est supérieure à la variance des PUE pour des temps de pêche supérieurs à 240 minutes. L'augmentation du support permet donc de diminuer la part des faibles PUE et de normaliser la distribution des PUE. L'effet de support est surtout mis en évidence pour les valeurs extrêmes des distributions des PUE de légines.

sélection	Temps de pêche	
	inférieurs à 85 min.	supérieurs à 240 min.
Nombre d'échantillons	113	113
Moyennes	18,4	12,4
Ecart-types	30,1	9
Maxima	256	60

TAB. 2.4 – Moyennes, écart-types et maxima des PUE de légines en fonction du temps de pêche.

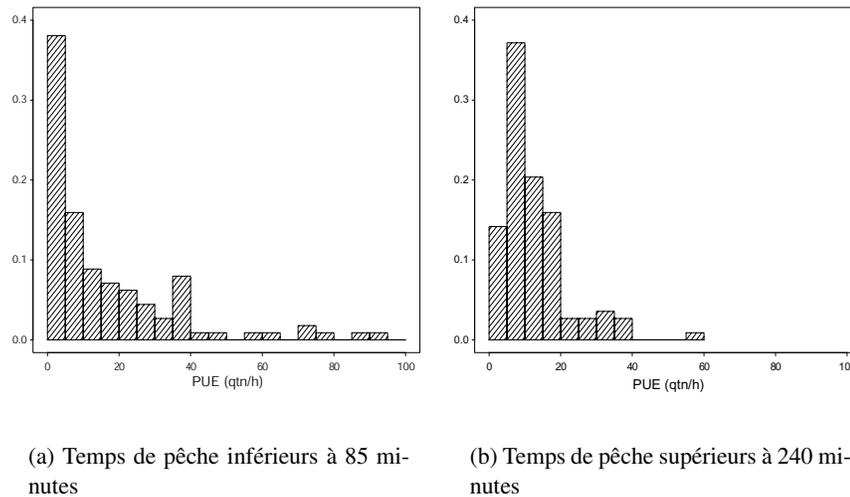
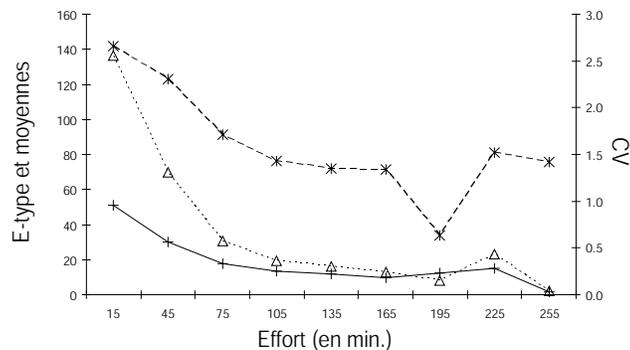
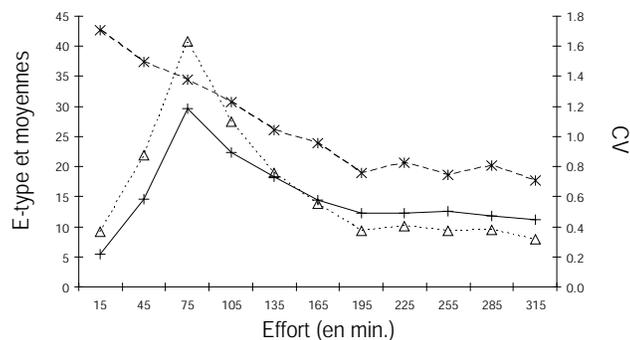


FIG. 2.15 – Histogrammes des PUE de légines (en fréquences) réalisées au cours des années 1995-97, avec une sélection sur le support.

Les figures 2.16 représentent l'évolution de la moyenne, de l'écart-type et du coefficient de variation de PUE en fonction du support. Il apparaît pour les deux périodes, que la moyenne n'est pas constante au cours de l'évolution du support. De plus, l'écart-type des PUE en fonction du support présente une évolution comparable à l'évolution de la moyenne. Ecart-type et moyenne ne sont pas indépendants. Afin de corriger les variations systématiques de la moyenne, nous nous sommes intéressés à l'évolution du coefficient de variation, noté CV , en fonction de la taille du support. Il apparaît pour les deux périodes d'étude que le coefficient de variation diminue avec la taille du support.



(a) de 1986 à 1987



(b) de 1995 à 1997

FIG. 2.16 – Effet du support sur les statistiques des PUE. En trait plein et croix la moyenne des PUE ; en pointillés et triangles l'écart-type des PUE et en tirets et étoiles le coefficient de variation.

L'idée est ici de comparer les résultats obtenus avec quelques situations de références pour lesquelles des résultats théoriques sont connus afin d'apprécier, en première approximation, l'importance des structures spatiales. Dans le cas d'un modèle pépitique, c'est à dire sans structure spatiale, le CV décroît théoriquement de manière hyperbolique en $\frac{1}{\sqrt{V}}$, avec V représentant la taille du support. Dans le cas d'un modèle stationnaire, le CV décroît moins vite que le CV d'une situation sans structure (modèle pépitique) jusqu'à une certaine distance, désignée sous le terme de portée intégrale. Au delà de cette distance, la décroissance va de nouveau être de type hyperbolique. En d'autres termes, la rupture de la décroissance hyperbolique correspond à la portée intégrale de la structure (fig. 2.17). La portée intégrale représente l'élément de référence vis à vis duquel il y a un sens à dire que le champ d'étude est grand par rapport à la structure spatiale de la variable étudiée (Matheron, 1976). La portée d'une structure spatiale est donc inférieure à la portée intégrale.

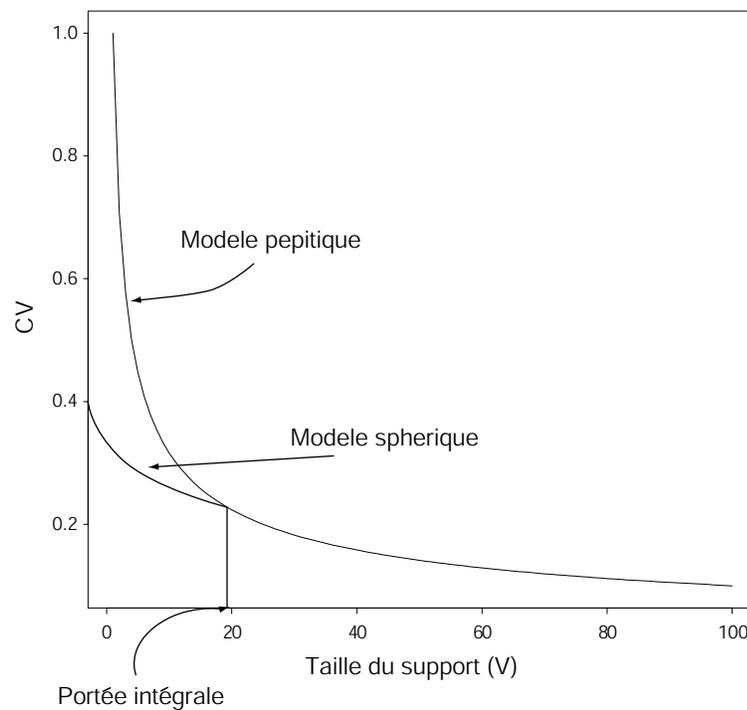
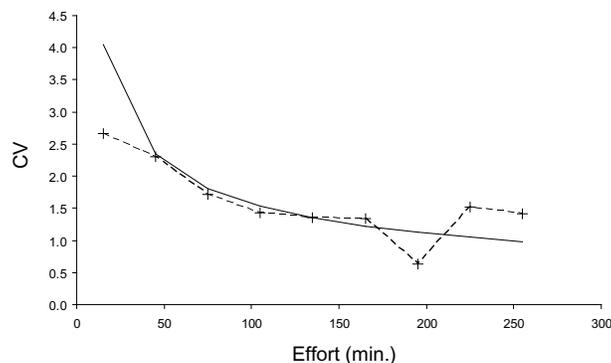
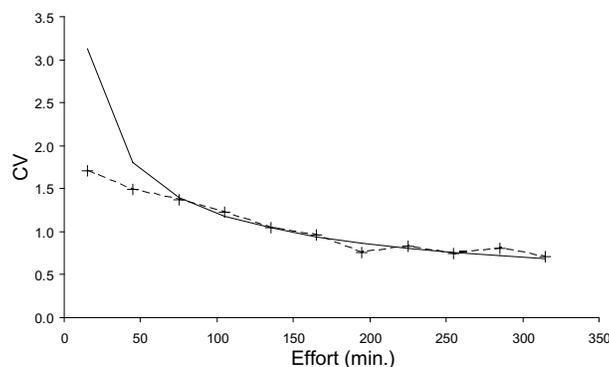


FIG. 2.17 – Influence du support sur le coefficient de variation pour deux modèles de variogrammes.

Les figures 2.18 représentent l'évolution du coefficient de variation en fonction de la taille du support (le temps de chalutage), pour chacune des deux périodes. Les coefficients de variation expérimentaux sont comparés aux CV théoriques d'une situation sans structure spatiale (modèle pépitique). Il apparaît que pour les deux périodes, le CV expérimental retrouve une décroissance hyperbolique autour d'une centaine de minutes. Si l'on admet que tous les navires commerciaux chalutent à la même vitesse (3 noeuds), alors la portée intégrale correspond à une distance de l'ordre de 3 miles nautiques. Graphiquement il est difficile de déterminer précisément le début de la décroissance hyperbolique. Cependant, ce résultat indique que si il existe une structure spatiale pour la légine alors celle-ci est de portée faible.



(a) de 1986 à 1987



(b) de 1995 à 1997

FIG. 2.18 – Coefficient de variation en fonction de la taille du support. En trait plein, le CV pour une situation sans structure et en trait pointillé et croix, le CV expérimental.

2.5 Conclusions

Cette étude préliminaire des données a permis d'énoncer les principales caractéristiques de cette pêche, et principalement la très forte ségrégation spatiale entre les différentes espèces. Cette ségrégation délimite une ou plusieurs zones, sans recouvrement spatial, pour chacune des espèces. De ce fait chaque coup de chalut est monospécifique. Il existe une opposition entre les navires de la période 1986-87 et ceux de la période 1995-97 sur plusieurs plans. Premièrement, ils n'exploitent pas les mêmes zones et ne ciblent donc pas les mêmes espèces. Par exemple, la zone du fer à cheval est largement exploitée au cours de la première période et délaissée au profit des zones 2 et 3 au cours de la seconde période. Deuxièmement, les campagnes de pêche des navires de la seconde période comportent très peu de captures nulles contrairement aux navires de la première période. L'augmentation du support, en d'autres termes du temps de chalutage, explique en partie la diminution des pourcentages de PUE nulles observés en seconde période, mais d'autres phénomènes tels que ceux que nous allons voir par la suite (changement de tactique de pêche) sont aussi susceptibles d'expliquer ces changements. De plus cette analyse permet d'intuiter la structure spatiale de la légine.

Troisième partie

Etude de la variabilité locale intra-bateau

Chapitre 3

Les captures doublonnées : importance, intérêt et problèmes induits

Sommaire

Ce chapitre a pour but d'identifier les captures doublonnées par navire et de mettre en évidence les relations qui les relient aux PUE moyennes. Des individus statistiques, appelés marées seront définis. Ils permettront de calculer des moyennes de PUE et des pourcentages de doublons par bateau et par zone. Les pourcentages de doublons suggèrent différents comportements de pêche qui semblent être intrinsèques à chaque navire.

3.1 Définition des individus statistiques : les marées

L'étude de la campagne scientifique présentée en introduction a mis en évidence les perturbations induites par les opérations de pêche réalisées à la même position géographique, c'est à dire doublonnées. Les forts pourcentages de PUE doublonnées et leurs fortes variabilités perturbent les premiers pas de calcul du variogramme. Un grand nombre d'opérations de pêche doublonnées sont réalisées par les navires commerciaux. Pour l'un d'entre eux le pourcentage de PUE doublonnées est de 87%, en d'autres termes 9 PUE sur 10 sont des PUE doublonnées. De plus une ségrégation spatiale forte existe entre les différentes espèces qui a permis de délimiter différentes zones de pêche spécifiques d'une espèce. Afin d'étudier l'importance et l'impact des PUE doublonnées, des marées ont été définies pour chaque navire et pour chaque zone compte tenu de la forte ségrégation spatiale qui existe entre les espèces. Une marée comporte les opérations de pêche espacées au plus de 5 jours réalisées par un navire, au sein d'une zone de pêche. Ces contraintes permettent d'homogénéiser les PUE et donc d'améliorer la signification des différentes statistiques calculées pour chacune des marées. La figure 3.1 illustre la définition de marée et représente l'évolution de l'exploitation des

différentes zones de pêche au cours de la campagne du navire 38. Certaines marées n'ont pas été retenues car elles comprenaient trop peu de données : seules les marée-zones dont les navires sont restés plus de deux jours au sein d'une zone ont été retenues.

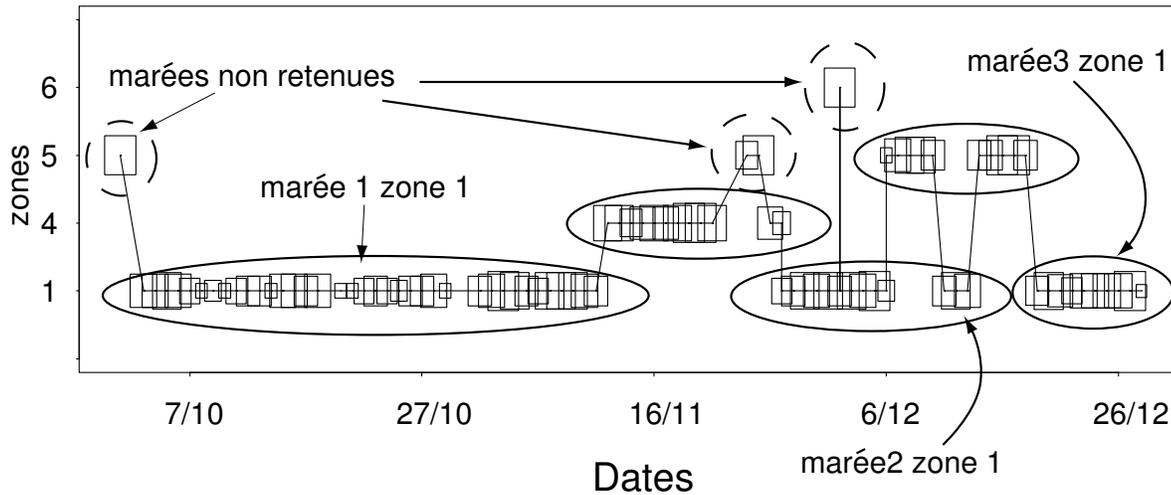


FIG. 3.1 – Définition des marées pour le navire 38. En ordonnée, les numéros des zones exploitées. La surface des rectangles est proportionnelle au nombre d'opérations de pêche.

3.2 Importance du nombre de PUE doublonnées

Les tableaux suivants résument les marées de chaque navire pour les différentes zones d'exploitation. Les marées estivales et hivernales ont été différenciées. Les trois premiers tableaux concernent les zones à légines, qui sont au nombre de trois. La zone 1, appelée zone du fer à cheval, a été largement exploitée au cours de la première période de pêche, de 1986 à 1987. Il apparaît que les navires 16, 22, 38, 41, 44, 45, 46 réalisent plusieurs marées au sein de cette zone. Le navire 38 a obtenu les plus fortes PUE moyennes de légines avec des pourcentages de captures doublonnées compris entre 49% et 59%. Inversement, la seconde marée du navire 44 présente la plus faible PUE moyenne des navires pêchant l'été avec un pourcentage de PUE doublonnées faible, 25%. Pour les bateaux effectuant plusieurs marées, les pourcentages de PUE doublonnées sont comparables pour toutes les marées d'un même navire. Le bateau 46 a effectué quatre marées, et toutes présentent un pourcentage de PUE doublonnées fort exceptée la troisième marée qui est aussi la plus courte. Chaque navire semble utiliser une tactique de pêche basée soit sur la répétition des opérations de pêche soit sur un parcours plus exploratoire comme le navire 22. Ce navire a réalisé les PUE moyennes les plus faibles et présente les pourcentages de captures doublonnées les plus faibles.

Les zones 2 et 3 ont été découvertes après la zone 1, par le navire 192, ce qui explique le fait que ces deux zones n'ont pas été exploitées au cours de la première période de pêche. Pour toutes les marées, les pourcentages de captures nulles sont très faibles, contrairement aux marées de la première période. La majorité des marées présente un pourcentage de PUE doublonnées fort. Seules les courtes marées présentent des pourcentages de doublons faibles. C'est le cas de la dixième marée du navire 54 qui présente un pourcentage de captures doublonnées nul et une PUE moyenne très faible. Les PUE moyennes des marées de la zone 3 sont dans l'ensemble plus fortes que celles de la zone 2. La moyenne des PUE de légine réalisées au sein de la zone 3 est de 23 quintaux par heure de chalutage et de 12 quintaux par heure de chalutage pour la zone 2.

Les deux derniers tableaux concernent la zone à colin (zone 4) (tab. 3.4) et la zone à poisson des glaces (zone 5) (tab. 3.5). Les zones 4 et 5 ont uniquement été exploitées au cours des années 1986-87. Au sein de la zone 4, 13 marées ont été identifiées dont 3 hivernales, qui présentent des PUE moyennes très faibles et des pourcentages de PUE nulles supérieures à 70%. Au sein de la zone à poisson des glaces, les courtes marées présentent systématiquement des pourcentages de PUE doublonnées faibles. Les navires 41 et 46 sont les deux seuls à avoir réalisé deux marées en été, une marée longue avec un pourcentage de PUE doublonnées élevé et une marée courte avec un pourcentage de PUE doublonnées très faible. Les PUE moyennes réalisées au sein de cette zone sont les plus élevées de toutes les marées. Pour cette zone, seul le navire 44 réalise peu de captures doublonnées. Les neuf marées définies au sein du banc Skiff (zone 5) ont uniquement eu lieu l'été.

Code bateau	Marée	Nombre de jours de marée	Nombre d'opérations de pêche	PUE moyennes légine	Pourcentage de PUE de légines nulles	Pourcentage de PUE doublonnées
Marées estivales de la période 1986-87						
19	1	23	171	27	45	68
38	1	40	143	33,5	25	59
38	2	17	63	27,7	22	49
38	3	10	61	29,1	25	57
41	1	11	50	12,8	32	46
41	2	4	18	13,2	22	56
43	1	39	139	21,4	44	40
44	1	19	45	21,2	38	36
44	2	8	16	9,3	69	25
45	1	34	116	19,7	7	58
45	2	6	27	17,5	15	33
46	1	28	102	25,8	44	70
46	2	6	32	18,6	44	72
46	3	4	20	17,2	0	20
46	4	27	100	10,2	14	79
Marées hivernales de la période 1986-87						
16	1	23	72	7,9	18	37
16	2	4	12	10	33	33
22	1	5	13	4,9	85	0
22	2	25	66	7,8	30	9
22	3	4	8	2	63	0
29	1	30	128	11,1	14	70
Marées de la périodes 1995-97						
54	1	13	32	9,7	6	81
192	1	15	74	32,3	12	61
192	2	3	17	12,8	0	24
192	3	18	88	12,1	2	73

TAB. 3.1 – Résumé des marées réalisées au sein de la zone 1.

Code bateau	Marée	Nombre de jours de marée	Nombre d'opérations de pêche	PUE moyennes légine	Pourcentage de PUE de légines nulles	Pourcentage de PUE doublonnées
Marées estivales de la période 1995-97						
54	3	50	156	13,4	1	84
54	5	33	68	13,1	0	87
54	6	14	19	5,8	0	42
54	7	4	9	6,5	11	22
54	8	4	9	6,4	11	33
54	9	6	19	14,2	0	32
192	2	20	91	15	4	63
192	3	4	13	24,6	0	54
192	6	6	22	11,8	0	45
Marées hivernales de la période 1995-97						
54	1	25	79	16,7	0	86
54	2	9	30	16,9	0	50
54	4	21	92	12,7	1	76
54	10	23	80	8,4	0	69
54	11	12	53	10,1	2	72
192	1	6	16	7,1	0	63
192	4	47	204	10,1	1	84
192	5	4	11	15,4	0	18
192	7	6	23	9,2	0	17
192	8	10	52	11,3	0	65

TAB. 3.2 – Résumé des marées réalisées au sein de la zone 2.

Code bateau	Marée	Nombre de jours de marée	Nombre d'opérations de pêche	PUE moyennes légine	Pourcentage de PUE de légines nulles	Pourcentage de PUE doublonnées
Marées estivales de la périodes 1995-97						
54	1	7	11	31,3	0	45
54	2	11	36	24,1	0	72
54	3	26	39	24,6	0	64
54	4	38	98	14,1	0	87
54	5	6	7	11,8	0	29
54	6	33	97	23,2	2	83
192	1	11	33	30,7	0	67
192	2	12	57	21,1	4	63
Marées hivernales de la périodes 1995-97						
54	7	8	9	3,8	11	0
54	8	6	22	30	0	64
192	3	10	42	14,1	7	67
192	4	6	22	26,8	0	74

TAB. 3.3 – Résumé des marées réalisées au sein de la zone 3.

Code bateau	Marée	Nombre de jours de marée	Nombre d'opérations de pêche	PUE moyennes colin	Pourcentage de PUE de colin nulles	Pourcentage de PUE doublonnées
Marées estivales de la périodes 1986-77						
38	1	13	48	29,7	15	73
41	1	38	195	18,9	16	47
41	2	5	26	5,7	50	8
43	1	21	96	14,5	17	50
44	1	3	8	13,5	75	0
45	1	16	59	26	14	59
46	1	16	58	26,1	7	67
46	2	4	22	3	45	18
47	1	20	69	15,9	26	23
48	1	31	116	14,1	41	31
Marées hivernales de la périodes 1986-77						
22	1	3	11	3,1	82	0
22	2	21	40	0	100	0
22	3	10	34	2,6	74	18

TAB. 3.4 – Résumé des marées réalisées au sein de la zone 4.

Code bateau	Marée	Nombre de jours de marée	Nombre d'opérations de pêche	PUE moyennes P. des glaces	Pourcentage de PUE de P. glaces nulles	Pourcentage de PUE doublonnées
19	1	3	24	24,7	8	25
38	1	16	54	32	17	69
41	1	25	98	37,6	17	72
43	1	25	106	36,4	11	79
44	1	5	19	15,5	47	11
45	1	24	100	50,6	10	65
46	1	9	40	32,8	5	67
46	2	5	26	40,4	0	73
47	1	13	48	29	31	54

TAB. 3.5 – Résumé des marées réalisées au sein de la zone 5. Toutes les marées ont eu lieu l'été.

Il semble exister une certaine homogénéité du pourcentage de doublons par marée pour chaque navire. En effet, les cas du bateau 22, dont toutes les marées présentent des pourcentages de PUE doublonnées faibles et du navire 38, dont toutes les marées présentent de doublons élevés illustrent cette homogénéité (tab. 3.1). Les figures 3.2 et 3.3 symbolisent respectivement les pourcentages de doublons par marée au cours de la période 1986-87 et les pourcentages de doublons par marée-campagnes de la période 1995-97. Ces figures ont pour but d'observer graphiquement les pourcentages de PUE doublonnées par marée réalisée par chaque navire. Il apparaît que pour les navires 19, 45 et 46, les courtes marées présentent systématiquement des pourcentages de PUE doublonnées faibles. Ce constat est d'autant plus évident pour les marées de la seconde période (fig. 3.3). Pour les navires de la seconde période (fig. 3.3), chaque campagne a été représentée séparément pour une meilleure lisibilité du graphique. Ces courtes marées semblent n'être que des passages transitoires entre deux périodes de pêche ou des périodes de prospection. Les navires prospectent les zones afin d'identifier un secteur riche qu'il va ensuite exploiter à plusieurs reprises. Ce comportement pourrait expliquer les courtes marées et les forts pourcentages de doublons.

Afin de confirmer, le constat issu de l'observation des différents tableaux précédents, une analyse de variance à un facteur (ANOVA), (Saporta, 1990) a été réalisée. Les résultats de l'analyse sont présentés au tableau 3.6. Le but de cette analyse est de tester si il existe des différences significatives entre les pourcentages de doublons par marée réalisés par les différents navires. En d'autres termes, il s'agit de confirmer ou non si pour chaque marée, un navire pratique une pêche basée sur les doublons ou non, quelque soit l'espèce ciblée. Seuls les navires ayant réalisés au moins deux marées ont été retenus. Les navires 29, 47 et 48 ont donc été écartés.

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen
expliquée (variance inter-classe)	15970	6	2662
résiduelle (variance intra-classe)	9256	28	331
Totale	25226	34	

TAB. 3.6 – Analyse de variance des pourcentages de doublons par marée réalisée de 1986 à 1987.

La valeur du facteur F est de 8,04. Elle est donc supérieure au seuil de 1% d'une variable $F(6, 28)$ qui est de 3,53. On peut considérer que les différences entre les pourcentages de doublons par marée sont donc significatives entre les navires. Ces résultats suggèrent que les stratégies de pêche employées sont intrinsèques à chaque navire et ne dépendent pas des zones ou des espèces ciblées.

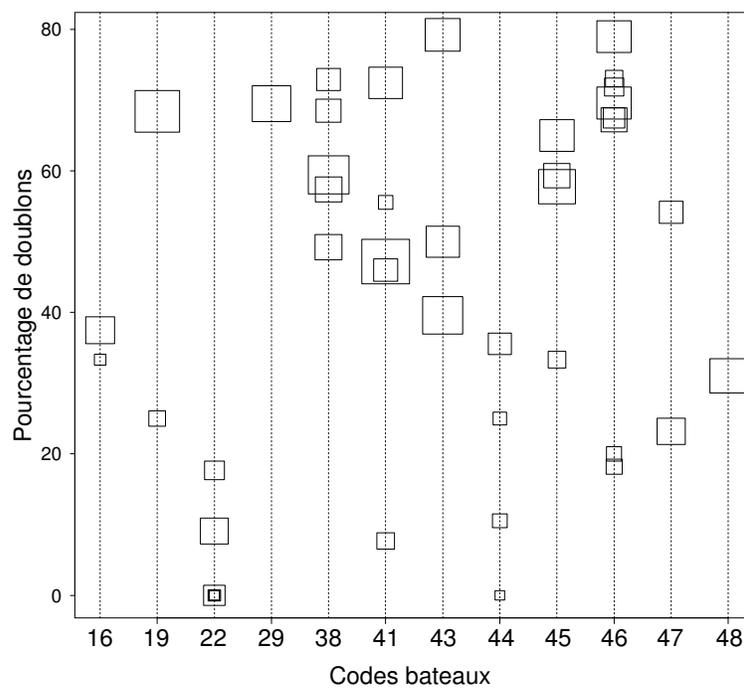


FIG. 3.2 – *Pourcentage de doublons par marée pour les navires ayant pêché au cours de la période 1986-87. La surface des carrés est proportionnelle au nombre d'opérations de pêche par marée-zone.*

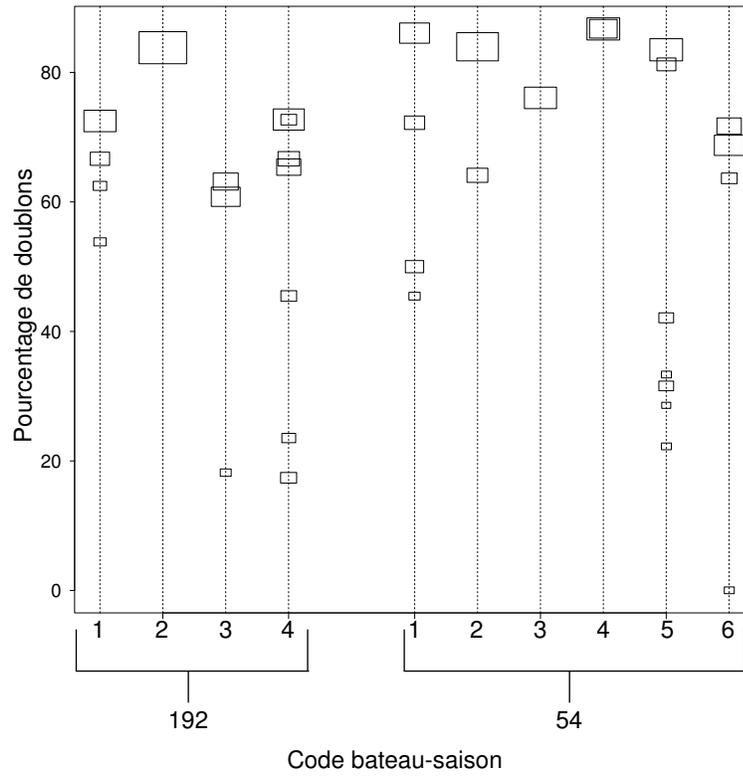


FIG. 3.3 – Pourcentage de doublons par marée pour les navires ayant pêché au cours de la période 1995-97. La surface des carrés est proportionnelle au nombre d'opérations de pêche par marée.

3.3 Intérêt des PUE doublonnées

L'homogénéité des pourcentages de PUE doublonnées par marée pour chaque navire et les différences entre ces mêmes pourcentages entre les différents navires semblent indiquer que tous les navires n'adoptent pas le même comportement vis à vis de la ressource. En d'autres termes, les navires ne pratiquent pas la même tactique de pêche. Chaque navire semble utiliser une tactique de pêche basée soit sur la répétition des opérations de pêche soit sur un parcours plus exploratoire comme le navire 22.

Les figures 3.4 et 3.5 représentent respectivement les PUE moyennes en fonction du pourcentage de PUE doublonnées pour chaque marée de chaque navire au sein de la zone 1, de la zone 2 et de la zone 3. Chaque droite de régression est issue d'une régression linéaire pondérée par le nombre d'opérations de pêche par marée. Au vue des différences entre les PUE moyennes mensuelles, entre les deux périodes d'étude et entre les deux saisons, une régression a été calculée par période et par saison.

Au sein de la zone 1 et pour chacune des deux périodes, il n'apparaît pas de corrélation nette entre les pourcentages de PUE doublonnées et les PUE moyenne de légine. Au cours de la saison hivernale, la régression présente une très faible pente de 0,07 avec un R^2 de 0,9. Au cours de la période estivale, la corrélation est nulle entre les deux variables. Cependant, si la régression n'est plus pondérée par le nombre d'opérations de pêche, une pente de 0,1 apparaît avec un R^2 très faible, de 0,07. Au cours de la seconde période de pêche, seules quatre marées ont été identifiées au sein de la zone 1, deux en hiver et une en été. Aucune tendance n'est donc observable.

Pour la zone 2, il a été possible de calculer une régression linéaire pour chaque saison, ce qui n'a pas été possible pour la zone 3 (tab. 3.7). Seules 4 marées hivernales ont été retenues, dont une présentant un pourcentage de doublons nul et les trois autres présentant des pourcentages de doublons comparables de l'ordre de 68%. Une corrélation ne peut donc être mise en évidence à partir de ce type de configuration des données. Au sein de la zone 2, les corrélations présentent des pentes très faibles voir nulles. Aucune tendance n'a donc pu être mise en évidence pour la zone 2. Pour la zone 3, on observe une corrélation négative entre les pourcentages de doublons et les PUE moyennes, avec une pente de 0,18. Contrairement aux zones 1 et 2 qui présentent de faibles tendances mais toujours vers une corrélation positive entre PUE doublonnées et PUE moyennes, les marées estivales de la zone 3 présentent une corrélation négative avec un R^2 faible, de 0,5.

Zones	2		3
Saison	Eté	Hiver	Eté
Pentes	0,05	0	-0,18

TAB. 3.7 – Pentes des régression linéaire des PUE moyennes en fonction des pourcentages de PUE doublonnées pour les zones 2 et 3.

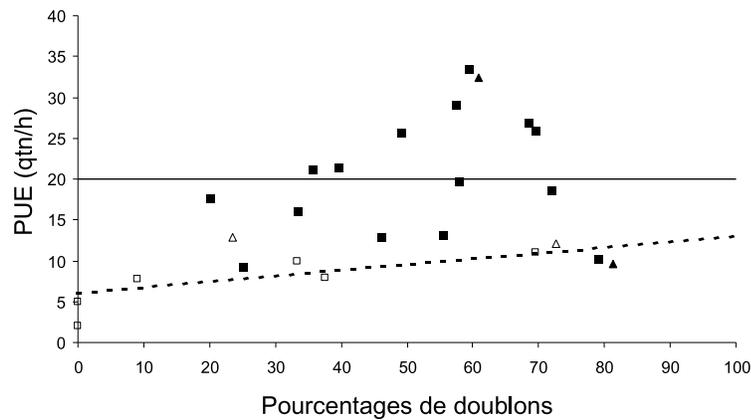
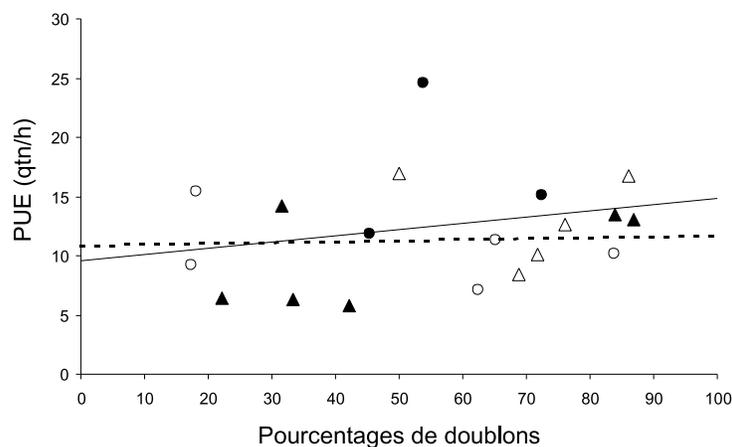
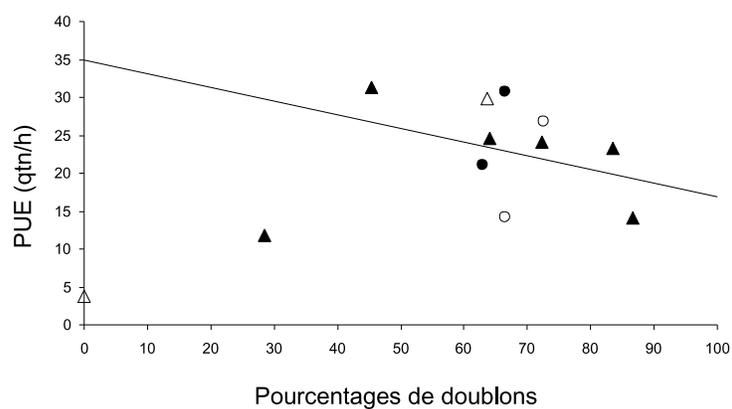


FIG. 3.4 – PUE moyennes de légines en fonction du pourcentage de captures doublonnées pour chaque marée réalisée au sein de la zone 1. Les carrés correspondent aux marées de la première période et les triangles aux marées de la seconde période. Les marées estivales sont symbolisées en noire et les hivernales en blanc. Régression linéaire pondérée par le nombre d'opérations de pêche réalisées pendant chaque marée, en trait plein pour les marées estivales de la première période et en pointillé pour les marées hivernales de la première période.



(a) zone 2



(b) zone 3

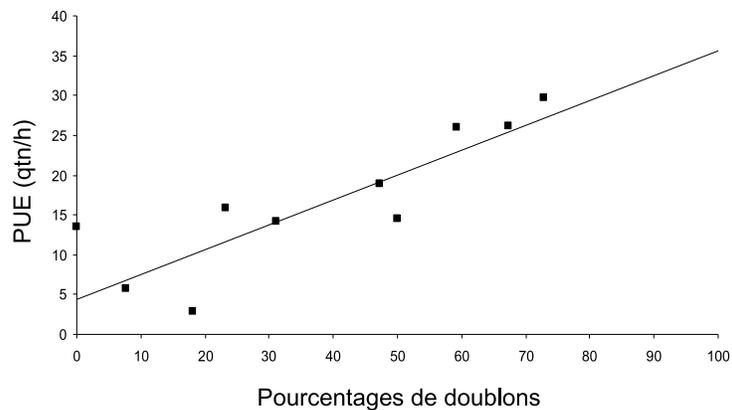
FIG. 3.5 – PUE moyennes de légines en fonction du pourcentage de captures doublonnées pour chaque marée réalisée au sein des zones 2 et 3. Les triangles correspondent aux marées du navire 54 et les cercles aux marées du navire 192. Les marées estivales sont symbolisées en noire et les hivernales en blanc. Régression linéaire pondérée par le nombre d'opérations de pêche réalisées pendant chaque marée, en trait plein pour les marées estivales et en pointillés pour les marées hivernales.

Pour les zones à colin et la zone à poisson des glaces, les figures 3.6 mettent en évidence la forte corrélation positive qui existe entre les PUE moyennes et les pourcentages de PUE doublonnées. Tout comme pour les zones à légines, la régression linéaire est réalisée à partir des données pondérées par le nombre d'opérations de pêche. Au vue du faible nombre de marées hivernales, les régressions linéaires ont uniquement été calculées pour les marées estivales. Les coefficients R^2 des deux corrélations sont élevés, 0,9 pour la zone 4 et 0,7 pour la zone 5, et confirment la forte corrélation entre PUE doublonnées et PUE moyennes (tab. 3.8).

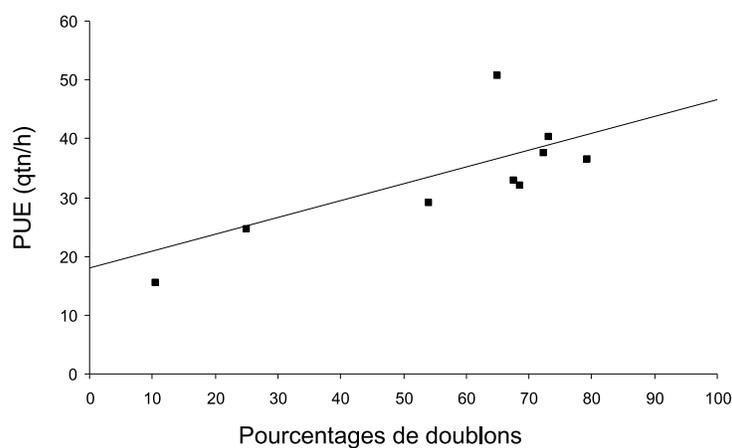
Zones	4	5
Pentes	0,3	0,3
R^2	0,7	0,9

TAB. 3.8 – Pentes et coefficients R^2 des régressions linéaires des PUE moyennes en fonction des pourcentages de PUE doublonnées pour les zones 4 et 5.

Par extrapolation, les pourcentages de captures doublonnées permettraient d'estimer la PUE moyenne. Ce résultat me semble important, car la connaissance des positions spatiales des pêcheurs informe sur le niveau de captures réalisées et permet d'appréhender la structure spatiale de l'espèce ciblée. En effet, suivant le type de répartition dans l'espace des opérations de pêche, il est possible d'en déduire à posteriori les PUE moyennes réalisées par un navire. Cette forte corrélation indique que le colin ou le poisson des glaces sont des espèces plus grégaires que la légine, pour laquelle cette corrélation n'a pu être mise en évidence. Ce constat suggère que les espèces grégaires sont plus sensibles à une tactique de pêche basée sur les répétitions spatiales des captures. Les pentes des régression permettraient donc de comparer le degré de grégarité de chaque espèce.



(a) zone 4



(b) zone 5

FIG. 3.6 – PUE moyennes de colin (a) et de poisson des glaces (b) en fonction du pourcentage de captures doublonnées pour chaque marée réalisée au sein des zones 4 et 5. Seules les marées estivales sont représentées. Régression linéaire pondérée par le nombre d'opérations de pêche réalisées pendant chaque marée.

3.4 Retour sur la problématique et conclusions

Cette analyse des marées commerciales met en évidence le rôle important joué par les stratégies spatiales employées par les pêcheurs. Pour le poisson des glaces et le colin, plus le pourcentage de PUE doublonnées est grand et plus la PUE moyenne est forte. On ne retrouve pas cette forte corrélation pour les zones à légines, quelque soit la période. Cette différence rend compte des différences de grégarité entre la légine, le poisson des glaces et le colin.

Il semble se dégager deux stratégies ou tactiques de pêche, une basée sur la répétition des opérations de pêche (type, navire 38) et une exploratoire (type, navire 22). De plus une tactique de pêche semble être intrinsèque à un navire et ne pas dépendre de la zone ou de l'espèce ciblée. Le navire 46 représente une situation intermédiaire entre ces deux types de tactique. Il réalise quelques courtes marées lui permettant de prospecter une zone, et lorsqu'une position est considérée comme riche, alors elle est exploitée à plusieurs reprises, d'où la présence de longues marées avec de forts pourcentages de doublons. Le chapitre (chapitre 4) démontre qu'une étude spatio-temporelle de l'effort de pêche permet d'établir une classification des navires.

La répétition des opérations de pêche en un même point et avec un laps temps court risque d'entraîner un effet d'épuisement local. Dans ce cas, deux PUE doublonnées ne sont pas représentatives de la même abondance locale. Cet effet, s'il est important (ce qui dépend de la biologie des espèces ciblées) et fréquent (ce qui dépend des tactiques de pêche) est une des causes de non linéarité entre PUE moyennes et abondance. L'effet d'épuisement sera étudié au cours du chapitre 5.

Nous avons mis en évidence, au cours de l'introduction, les problèmes rencontrés lors de l'analyse spatiale d'une campagne scientifique ayant doublonné des actions de pêche. Pour les navires commerciaux, les pourcentages de doublons sont plus élevés que pour la campagne scientifique étudiée. Le problème posé par la forte variabilité locale due aux PUE doublonnées est donc d'autant plus important. La figure 3.7 représente le variogramme des PUE réalisées par le navire 38 au sein de la zone 1 et pendant la première marée-zone. Tout comme pour la campagne scientifique, le variogramme est décroissant dans les deux directions. Ce comportement décroissant du variogramme se retrouve pour tous les navires quelque soit la zone exploitée.

Au cours de la période 1986-87, la zone 1 est exploitée par plusieurs navires au même moment. Nous verrons par la suite que certaines positions géographiques sont exploitées par des différents navires le même jour. En d'autres termes, une position géographique peut donc être exploitée à plusieurs reprises par le même navire *et/ou* par différents navires. La variabilité locale observée au sein des doublons peut donc être décomposée en une composante intra-bateau et une composante inter-bateau. La composante intra-bateau correspond aux doublons réalisés par un même navire et la variabilité locale inter-bateaux correspond aux doublons de navires différents (chapitre 6).

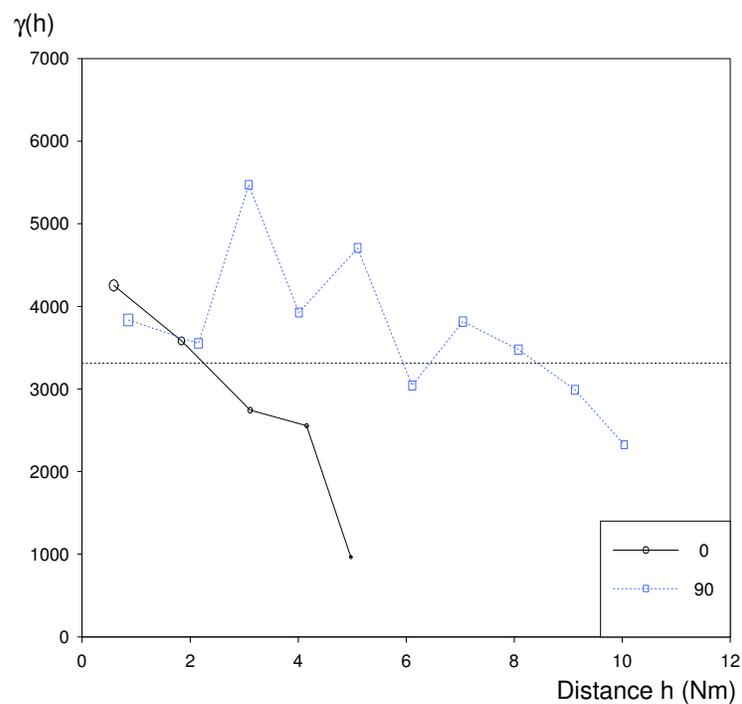


FIG. 3.7 – Variogramme des PUE de légines du navire 38 en zone 1 pendant la première marée. La direction 0 est perpendiculaire aux accores du plateau et la direction 90 est parallèle aux accores.

Chapitre 4

Etude des distances inter-chalutage

Sommaire

*Au cours de ce chapitre, je m'intéresse à la distribution spatio-temporelle de l'effort de pêche de chaque navire, afin de déterminer et de définir une classification (ou typologie) des différents comportements des pêcheurs. Pour cela, je m'appuie sur l'étude des distances inter-chalutage (notées *DIC*), à savoir la distance qui sépare deux coups de chalut successifs réalisés par un même navire. Un critère de classification basé sur les *DIC* sera identifié, permettant de distinguer différentes tactiques de pêche.*

4.1 Définition de tactiques de pêche à partir des *DIC*

La distance inter-chalutage (*DIC*) est la distance qui sépare deux coups de chalut successifs réalisés par un même navire. Les *DIC* fournissent une information sur les déplacements des navires de pêche au cours d'une campagne de pêche et recouvrent donc une dimension spatio-temporelle. Ce paramètre est donc plus contraignant que les doublons spatiaux, et prend en compte la dimension temporelle puisqu'il s'agit de la distance entre deux coups de chalut successifs.

Les *DIC* de chaque marée ont été utilisées pour cette étude. La figure 4.1 représente les histogrammes cummulés des $\text{Log}(DIC + 1)$ de chaque bateau. Les deux périodes de pêche ont été étudiées indépendamment l'une de l'autre dans un premier temps. Au cours de la première période de pêche (fig. 4.4.1(a)), le

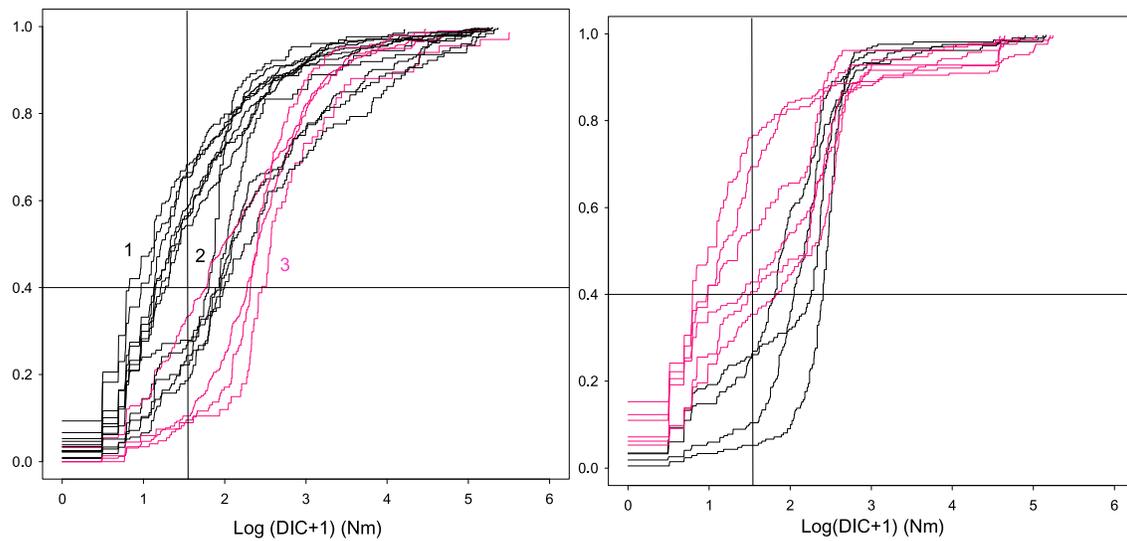
quantile 40% des *DIC*, noté $dic_{40\%}$, permet de distinguer trois groupes de bateaux. Le premier groupe est constitué de navires commerciaux ayant effectué des *DIC* faibles. La $dic_{40\%}$ de chacun de ces bateaux est inférieure à 4 miles nautiques. Le groupe intermédiaire est constitué des autres chalutiers et de la seconde campagne scientifique du navire 32. Pour ce groupe, la $dic_{40\%}$ est comprise entre 4 et 7 miles nautiques. Le troisième groupe comprend uniquement les campagnes scientifiques, exceptée la seconde campagne du navire 32. Pour ce groupe, la $dic_{40\%}$ est supérieure à 7 miles nautiques.

Au cours de la seconde période de pêche (fig. 4.4.1(b)), seuls deux navires étaient présents et 10 campagnes ont été définies. Les distances correspondant aux quantiles 40% de chacune des marées du navire 54 sont systématiquement inférieures à celle des marées du navire 192. Ce qui revient à dire que le navire 54 réalise un pourcentage plus important de petites *DIC* que le navire 192. Seule la sixième campagne du navire 54 présente une $dic_{40\%}$ supérieure à 4 miles nautiques.

L'étude des *DIC* permet donc ici de distinguer les différents bateaux à l'aide d'un critère spatio-temporel très simple. Trois tactiques de pêche ont été définies :

- Tactique 1 : Cette tactique sera qualifiée de répétitive, ou obstinée ; $dic_{40\%} \leq 4$;
- Tactique 2 : Cette tactique sera qualifiée d'exploratoire ; $4 < dic_{40\%} \leq 7$.
- Tactique 3 : Cette tactique sera qualifiée de tactique scientifique ; $dic_{40\%} > 7$.

Il est intéressant de noter que les distances inter-chalutage, *DIC*, permettent de définir un indice directement opérationnel pour tous types de pêche, à condition de connaître les positions de chaque opération de pêche. L'information fournie par les suivis satellitaires des campagnes de pêche (données VMS) est directement exploitable à l'aide des *DIC*.



(a) Navires ayant pêché au cours de la première période. En rouge sont représentés les scientifiques. Les 3 groupes sont indiqués.

(b) Navires ayant pêché au cours de la seconde période. En rouge sont représentés les campagnes de pêche du bateau 54

FIG. 4.1 – Histogramme cumulé des $\log(\text{DIC} + 1)$ pour chaque bateau de la première période et chaque campagne de la seconde période

4.2 Influence des tactiques de pêche sur les PUE

A chaque PUE est associée la distance inter-chalutage consécutive, c'est à dire la distance parcourue "après coup" de pêche. Les figures 4.2 représentent les nuages de corrélation entre les PUE et les DIC pour chacune des deux tactiques de pêche identifiées. Pour les deux tactiques de pêche, les PUE les plus fortes sont suivies par de faibles déplacements. Par contre pour de faibles PUE, la distribution des DIC associées est très étalée. Cependant ce constat est moins nette pour les navires pratiquant une tactique de pêche plus exploratoire (tactique 2). Ce résultat semble donc confirmer le fait que la tactique 2 est d'une part plus exploratoire et d'autre part que les déplacements des navires pratiquant cette tactique sont moins dépendants des niveaux de capture.

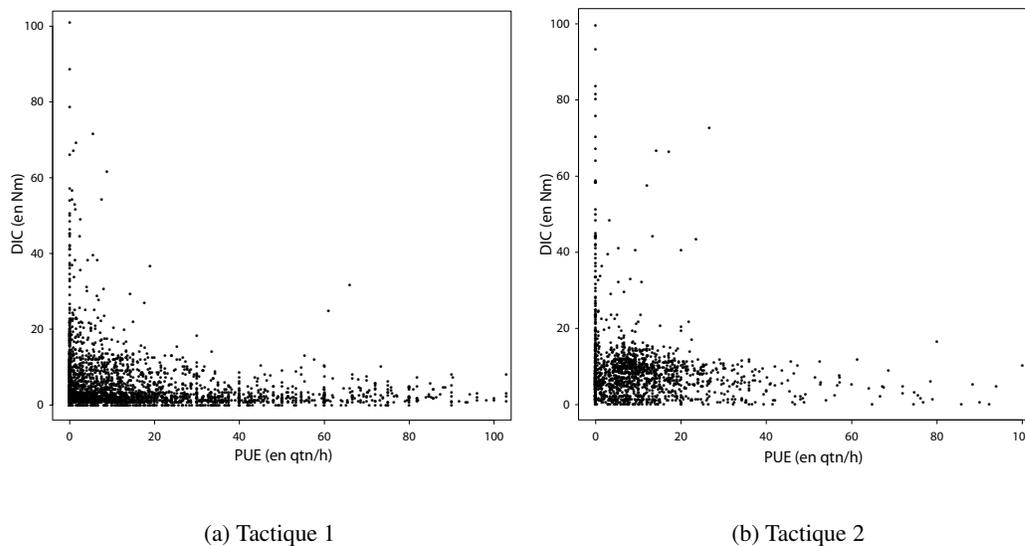


FIG. 4.2 – Nuages de corrélation entre les PUE et les DIC après coup

Premièrement sont représentés les profils des moyens des DIC par classe de PUE (fig. 4.3). Les profils moyens confirment les observations issues des nuages de corrélations précédants. Pour les deux tactiques, le profil moyen des DIC diminue quand les PUE augmentent. Cette diminution est moins chaotique pour la tactique 1 et les distances inter-chalutage moyennes sont dans l'ensemble plus faibles. Cependant, on n'observe pas de rupture de pente sur les profils moyens qui suggèrerait l'existence d'un seuil de PUE pour lequel l'ensemble des navires réexploitent une zone identifiée.

Deuxièmement, La corrélation inverse, PUE en fonction des DIC après coup est illustré à la figure 4.4. Cette représentation permet de connaître de quel niveau moyen de captures sont précédés des déplacements de h miles nautiques (fig. 4.4). Il s'agit des espérances conditionnelles des PUE par classe de DIC après coup. Pour chaque tactique, un profil de PUE moyennes est calculé. Les profils des premiers et troisièmes

quantiles des PUE de tactique 1 encadrent le profil moyen des PUE de tactique 2 (fig. 4.5). Il n'est donc possible de ne mettre en évidence que des tendances moyennes vis à vis des relations PUE et *DIC*. Si le déplacement d'un navire ne dépend pas de la PUE précédente alors, les profils de la figure 4.4 ne devraient pas présenter de tendance, c'est à dire fluctuer autour d'une valeur moyenne de PUE. En théorie, il devrait donc apparaître des PUE moyennes comparables quelque soit les *DIC* après coup.

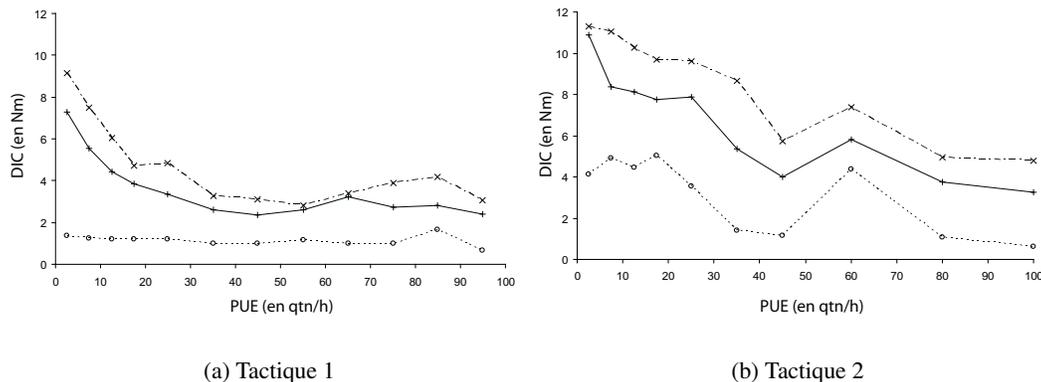


FIG. 4.3 – Moyennes, premier et troisième quartiles des *DIC* après coup par classe de PUE et par tactique. En noir et croix verticales, le profil moyen ; en pontillés larges et croix, le troisième quartile ; en pointillés larges et ronds, le premier quartile.

Les profils des PUE après coup présentent une tendance à la baisse des PUE moyenne par classe de *DIC* après coup. Cette tendance confirme donc qu'il existe une relation entre une PUE et le déplacement qui la suit. Pour des *DIC* nulles, c'est à dire pour des PUE doublonnées, les PUE moyennes des tactiques 1 et 2 sont très proches. Par contre pour des *DIC* après coups faibles, de 1 à 10 miles nautiques, les PUE moyennes des bateaux de tactique 1 sont supérieures aux PUE moyennes de tactique 2. Puis au-delà de 10 miles nautiques, les PUE moyennes des deux tactiques sont proches. Entre 0 et 3 miles nautiques, la PUE moyenne des navires de tactique 2 décroît fortement pour atteindre un niveau moyen qui correspond à la PUE moyenne des toutes les PUE réalisées par les navires de tactique 2, qui est égale à 12 quintaux par heure de chalutage. Ces résultats semblent indiquer que les *DIC* des navires de tactiques 2 sont moins influencées par le niveau de PUE que les déplacements des navires de tactique 1. Ce résultat explique en quoi la tactique 2 peut être qualifiée de tactique exploratoire.

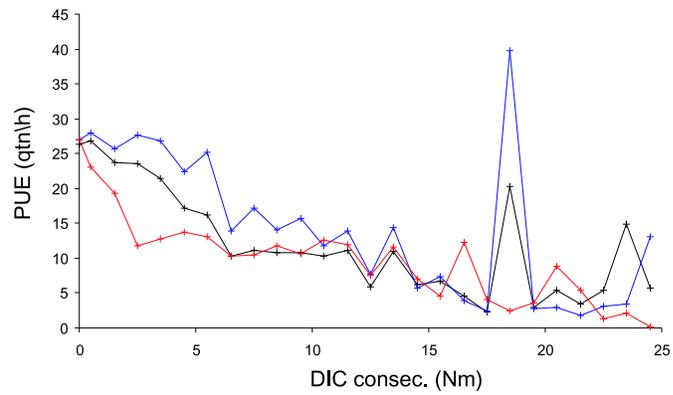


FIG. 4.4 – Moyennes des PUE toutes espèces confondues par gamme de DIC consécutives et par tactique. En noir, toutes tactiques confondues ; en bleu, la tactique 1 ; en rouge la tactique 2.

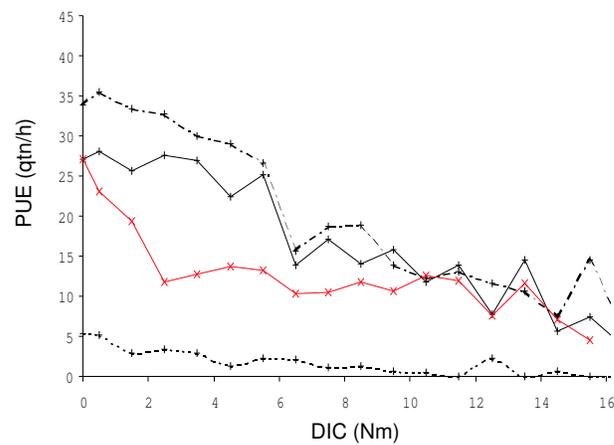


FIG. 4.5 – Moyennes des PUE toutes espèces confondues par gamme de DIC consécutives et par tactique. En noir, profil moyen des PUE de tactique 1 ; en noir pointillé, le profil du premier quantile des PUE de tactique 1 ; en noir pointillé large, le profil du premier quantile des PUE de tactique 1 ; en noir pointillés serrés, le profil du troisième quantile des PUE de tactique 1 ; en rouge, le profil moyen des PUE de tactique 2.

4.3 Conclusions

L'étude des distances inter-chalutage a permis de mettre en évidence le rôle important joué par la répartition spatio-temporelle des opérations de pêche sur les niveaux moyens des PUE. Premièrement, une classification des différents navires en fonction de leur comportement ou tactique de pêche a été réalisée. Deux tactiques de pêche ont été clairement définies pour les navires commerciaux. La tactique qualifiée de répétitive est plus efficace en moyenne que la tactique exploratoire. Ce résultat confirme le fait que plus le pourcentage de PUE doublonnées est grand et plus la PUE moyenne est forte.

Les tactiques de pêche sont intrinsèques à chaque navire et ne dépendent pas de la zone ou de l'espèce exploitées. Pour des *DIC* nulles les moyennes des PUE des tactiques 1 et 2 sont très proches. Pour des *DIC* comprises entre 0 et 10 miles nautiques, les PUE moyennes des navires de tactique 1 sont supérieures aux PUE des navires de tactique 2. Ce résultat suggère que les déplacements des navires de tactique 1 sont plus influencés par les niveaux de captures précédant le déplacement que les navires de tactique 2. Ce constat est confirmé par les nuages de corrélation entre PUE ET *DIC* après coup.

Les *DIC* peuvent être considérées comme un indice permettant de classer les navires. Cet outil est directement opérationnel et semble très précieux lors d'une analyse exploratoire. Il revêt un caractère plus généraliste que les doublons, qui sont exceptionnellement nombreux dans cette pêcherie.

Chapitre 5

Epuisement local et efficacité locale de pêche

Sommaire

La plupart des navires opérant sur la ZEE (Zone d'Exclusivité Economique) de Kerguelen ont réalisé un nombre important de PUE doublonnées, et ce quelque soit l'espèce ciblée. La part des doublons a augmenté avec le temps, pour atteindre dans les années 1990, plus de 80% pour certains navires. Nous avons pu constater l'importance des différentes tactiques de pêche vis à vis de la PUE moyenne résultante. Au cours de ce chapitre, nous tenterons d'étudier l'impact occasionné par la répétition des opérations de pêche sur les PUE moyennes. Pour cela, des séries de PUE doublonnées seront identifiées pour chaque marée. Un effet d'épuisement local sera mis en évidence à partir des PUE doublonnées commerciales indiquant que les PUE réalisées à une même position géographique ne sont pas représentatives de la même abondance locale. Chacune des séries de doublons sera ensuite remplacée par une unique valeur de PUE correspondant à la moyenne des 3 premières PUE de la série. Un modèle basé sur l'épuisement local sera proposé, permettant de déterminer la loi de répartition de l'efficacité locale de pêche à partir des PUE doublonnées.

5.1 Mise en évidence d'un effet d'épuisement local

Le fait de répéter des opérations de captures à la même position géographique risque d'entraîner un appauvrissement local de la ressource qui peut se traduire à l'extrême par un épuisement local. Afin de mettre en évidence cet effet d'épuisement, des séries de doublons ont été identifiées pour chaque bateau pour la période 1986-87 et pour chacune des campagnes des bateaux de la période 1995-97. Chacune de ces séries permet de suivre l'évolution des PUE au cours de la répétition des captures. Chacune des séries a été construite à l'aide des contraintes suivantes :

- chacune des séries comporte uniquement des PUE réalisées par le même navire ;

- toutes les PUE d'une même série sont distantes de moins d'un mile nautique (précision de l'échantillonnage) ;
- deux PUE de rangs successifs au sein d'une même série sont séparées au plus de deux jours ;
- chaque série comporte au moins 3 PUE non nulles.

*****Nous

avons supposé qu'un maximum de 2 jours entre deux PUE successives colocalisées ne permettait pas à l'abondance locale de se reconstituer par l'apport d'individus extérieurs et qu'il n'y avait pas de fuite des individus entre deux opérations de pêche. Seules les séries comportant au moins 3 PUE non nulles ont été conservées afin de s'assurer que la répétition des opérations était due à la volonté du pêcheur et non à des incidents de pêche (comme par exemple des avaries). Un grand nombre de positions géographiques ont été échantillonnées à deux ou trois reprises avec pour certaines un temps de pêche très court, suggérant des problèmes techniques lors de la capture. Les PUE correspondant à des temps de chalutage inférieurs ou égaux à 15 minutes n'ont pas été retenues. 179 séries ont été identifiées pour l'ensemble des navires commerciaux ayant opéré au cours des deux périodes. La plus longue série comporte 13 opérations de pêches successives. Ces séries peuvent être représentées à l'aide du tableau suivant (fig. 5.1). Ce type de représentation nous permettra par la suite de réaliser des moyennes de PUE par rang de répétition.

Code Bateau	Long	Lat	Rang 1	Rang 2	Rang 3

FIG. 5.1 – Tableau des séries de doublons.

Dans un premier temps, les séries ont été observées une à une. Les 179 séries offrent une grande diversité de profil. Trois exemples de profils sont proposés à la figure 5.2. Le profil de la série 1 (fig. 5.5.2(a)) met en évidence un effet d'épuisement local, contrairement aux deux autres séries (fig. 5.5.2(b), 5.5.2(c)). Il est donc impossible de conclure quant à un systématique effet d'épuisement local de la ressource.

Dans un second temps, afin de rendre comparable toutes les séries entre elles, chacune des PUE d'une série a été divisée par la moyenne des PUE de la série correspondante. Puis un profil moyen (fig. 5.3) a été calculé, en moyennant toutes les séries. Ce dernier met en évidence une diminution moyenne et progressive des PUE doublonnées. Il y a donc en moyenne un effet d'épuisement local. Au-delà du sixième rang, les effectifs deviennent très faibles (i.e. moins de 14 points). Il est donc difficile d'interpréter la fin du profil. L'épuisement observable sur les premiers rangs est modélisé par une régression linéaire de pente -0,06 et de coefficient de régression R^2 0,8. En d'autres termes, il apparaît en moyenne une perte autour de 6% à chaque opération de pêche en moyenne. Un résultat du même ordre de grandeur a été mis en évidence par Rijnsdorp et al. en 2000. Il existe donc une dérive temporelle locale qui si elle n'est pas prise en compte, induit une augmentation de la variabilité spatiale à échelle fine.

Les figures 5.4 représentent les profils moyens des PUE doublonnées pour chacune des deux périodes. L'effet d'épuisement est beaucoup plus évident au cours de la seconde période (fig. 5.5.4(b)). La pente de la droite de régression est de -0,07 pour les années 1995-97 et de -0,04 pour les années 1986-87. Les figures 5.5

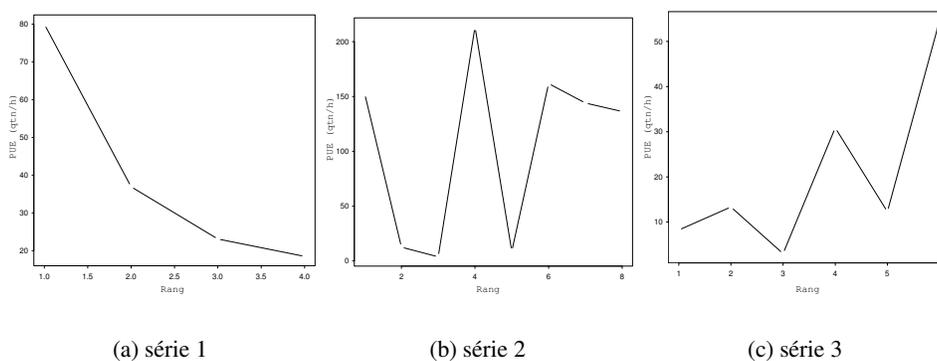


FIG. 5.2 – Exemples de trois séries de PUE doublonnées. Les PUE sont exprimées en quintaux par heure de chalutage.

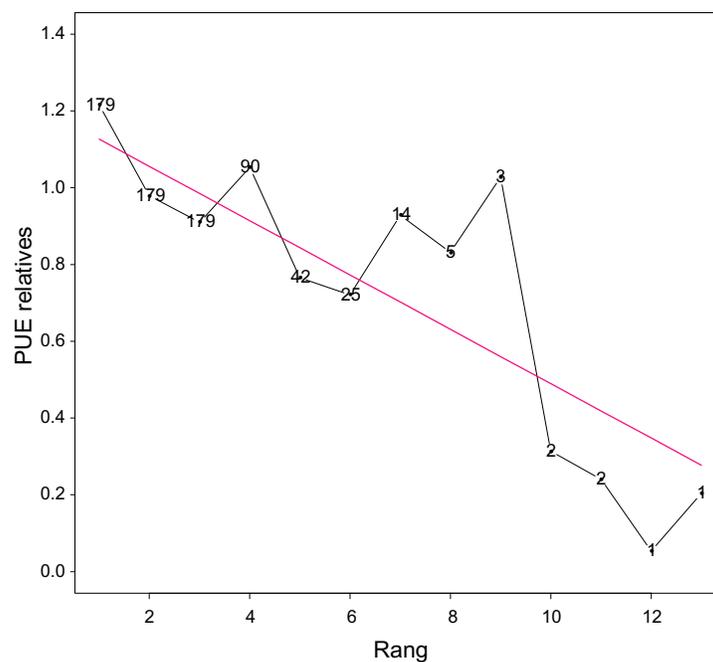


FIG. 5.3 – Profil moyen des PUE doublonnées. La droite représente la droite de régression linéaire pondérée par le nombre de données.

représentent les profils moyens des PUE doublonnées de la première période pour la légine (fig. 5.5.5(a)) et pour le poisson des glaces et le colin (fig. 5.5.5(b)). Le colin et le poisson des glaces ont été associés pour des

problèmes d'effectifs. Pour la légine, la régression présente une pente de $-0,04$ et pour l'ensemble poisson des glaces et colin de $-0,17$.

Il apparaît une diminution moyenne au cours des répétitions pour toutes les espèces et pour les deux périodes, qui est la conséquence d'effet d'épuisement local moyen. Pour la légine, c'est au cours de la seconde période que les pourcentages de captures doublonnées sont les plus élevés. Précédemment, nous n'avons pu mettre en évidence de relations nettes entre les pourcentages de PUE doublonnées et les PUE moyennes de légine. Cependant, la légine est sensible au phénomène d'épuisement local. Pour le poisson des glaces et le colin, plus le pourcentage de PUE doublonnées est grand et plus la PUE moyenne est forte. La plus forte diminution des PUE doublonnées au cours des répétitions est observée pour les deux espèces citées dernièrement. Ces deux espèces sont donc plus sensibles que la légine à l'épuisement local, ce qui semble pouvoir s'expliquer par le comportement des espèces. Par exemple, le poisson des glaces et la légine s'opposent à plusieurs niveaux. Le poisson des glaces revêt un caractère grégaire et se rencontre principalement en bancs très denses. Le poisson des glaces est une espèce phytophage se nourrissant sur le fond. Le jour, des bancs très denses sont rencontrés près du fond ((Dagorn, 1990), (Duhamel et Agnew, 1990)). La légine est un prédateur dont le comportement est beaucoup moins grégaire. La légine se situe à un plus haut rang évolutif que le poisson des glaces et son statut de prédateur lui confère un comportement plus craintif vis à vis des perturbations extérieures. Ces différences comportementales influent sur la sensibilité des espèces vis à vis des tactiques de pêche. Ainsi le poisson des glaces serait plus sensible que la légine à une tactique de pêche basée sur la répétition des coups de chalut. Il semble donc que la diminution des PUE doublonnées au cours des répétitions permettent d'appréhender de façon très indirecte des niveaux de grégarité en accord avec les connaissances biologiques. Le lien entre tactiques et PUE dépend étroitement du comportement des espèces ciblées.

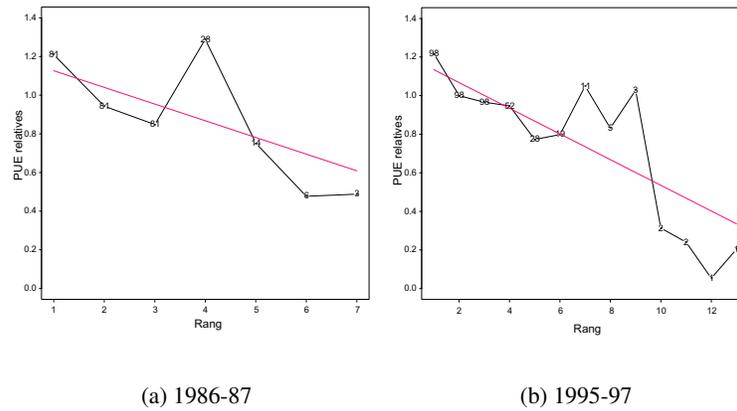


FIG. 5.4 – Profils moyens des séries de PUE doublonnées, par période. Les droites de régression pondérées par les effectifs sont représentées.

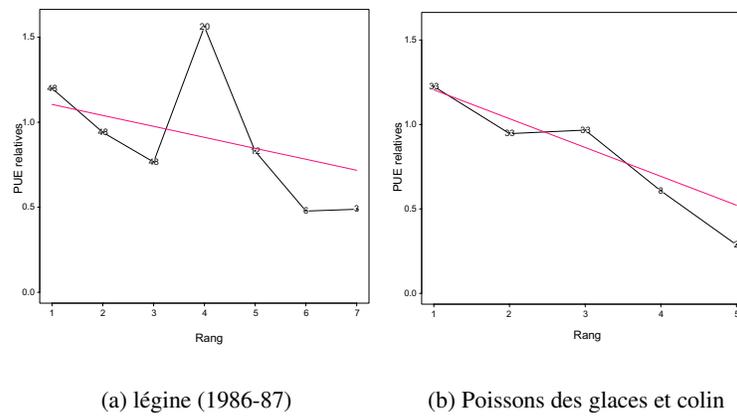


FIG. 5.5 – Profils moyens des séries de PUE doublonnées de la période 1986-87. Les droites de régression pondérées par les effectifs sont représentées.

5.2 Règle de décision des pêcheurs ou épuisement local ?

Au delà du troisième rang, le nombre de séries diminue à peu près de moitié à chaque rang. Cette constatation nous a amené à poser une hypothèse concernant une règle de décision possible des pêcheurs vis à vis de la poursuite ou non de l'exploitation (intensive) d'une zone.

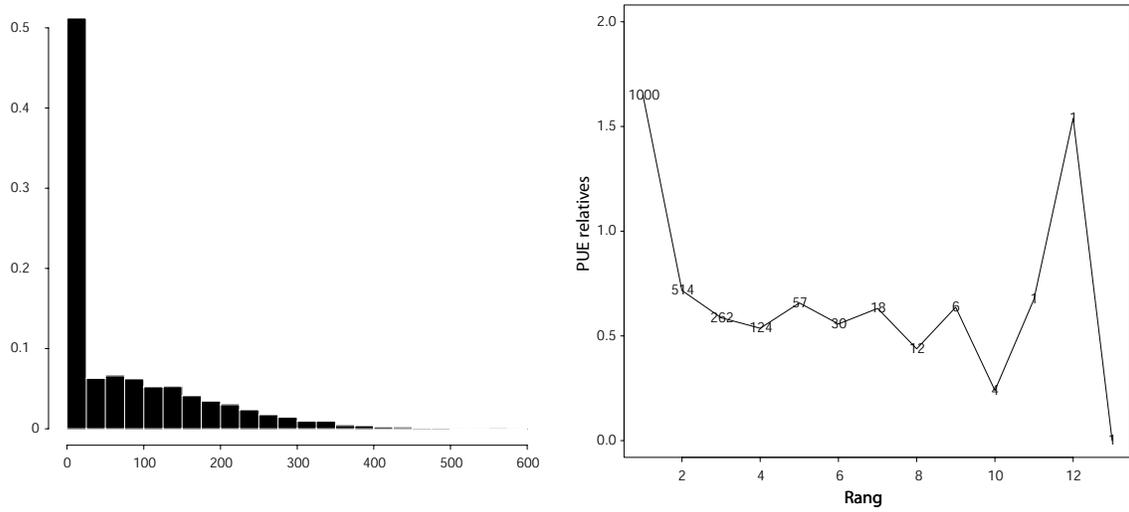
Cette règle consiste à supposer qu'un navire exploite de façon intensive une zone tant que les PUE sont supérieures à la médiane des PUE réalisées par ce même navire. En d'autres termes, pour une localisation géographique donnée, si la PUE correspondant est supérieure à la médiane des PUE du navire, cette position est exploitée une nouvelle fois. Ainsi, il est possible à l'aide d'une telle règle de réaliser des séries de captures doublonnées. Si on suppose que la distribution des PUE d'un navire est normale centrée sur la moyenne des PUE du navire, alors cette règle de décision des pêcheurs entraînerait une diminution de 50% du nombre de série pour chaque nouveau rang.

Afin de vérifier cette hypothèse, nous nous proposons de simuler des séries de PUE doublonnées à partir d'une loi normale. 1000 séries ont été simulées de la façon suivante. Pour chaque rang une valeur de PUE est tirée suivant une loi normale de moyenne 20 et d'écart-type 150. Chaque valeur négative est ramenée à zéro. Après cette transformation, la distribution des PUE simulées a pour moyenne 70. Les paramètres de la loi ont été définis à partir de la distribution des PUE commerciales. La distribution des PUE simulées (fig. 5.6a) est très proche de la distribution des PUE des séries de doublons. Pour chaque nouveau rang, une PUE est tirée suivant la distribution choisie, et si la PUE est inférieure à la médiane de la distribution, la série est arrêtée. Pour le rang 1 une contrainte supplémentaire est introduite, obligeant toutes les PUE de rang 1 à être supérieures à la valeur de la médiane de la distribution. Ensuite chacune des séries est pondérée par sa moyenne et l'ensemble des séries est ensuite moyennée (cf. 5.1). Le profil moyen obtenu est présenté à la figure 5.6b. Par construction la moyenne des PUE de rang 1 est largement supérieure aux autres rangs. Pour chaque rang, on observe une diminution de près de 50% du nombre de séries. Contrairement aux PUE doublonnées, on n'observe pas de tendance à la diminution au cours des rangs. Ce résultat semble donc confirmer que la règle de décision proposée ne permet pas d'observer une diminution progressive des PUE en moyenne, et qu'un effet d'épuisement local a bien été mis en évidence.

Ce résultat est confirmé par l'observation des PUE terminant chaque série. Seulement 26% d'entre elles sont supérieures à la moyenne et 44% supérieures à la médiane de l'ensemble des PUE du navire. La règle de décision proposée ne semble pas être vérifiée, et l'hypothèse de l'épuisement local de la ressource semble donc plus plausible.

% de PUE supérieures à	
la moyenne	la médiane
26	44

TAB. 5.1 – Pourcentages des PUE terminant chaque série de doublon par rapport à la moyenne et la médiane des PUE de toutes les séries de doublons.



(a) Histogramme des PUE simulées

(b) Profil moyen des PUE

FIG. 5.6 – Profils moyens des séries de PUE doublonnées simulées.

5.3 Détermination de la loi de répartition de l'efficacité locale de pêche

5.3.1 Méthode et hypothèse

Nous avons montré que la répétition des opérations de pêche entraîne une diminution progressive des PUE, ce qui s'interprète aisément si on suppose qu'il n'y a aucune migration de poisson vers la position chalutée, qu'aucun autre navire n'a pêché à cette position entre deux PUE doublonnées de rangs successifs et qu'il n'y a pas de fuite des individus après une opération de pêche. Sous ces conditions et si l'efficacité locale de pêche est constante, la décroissance des PUE doublonnées de chaque série est exponentielle (fig. 5.7).

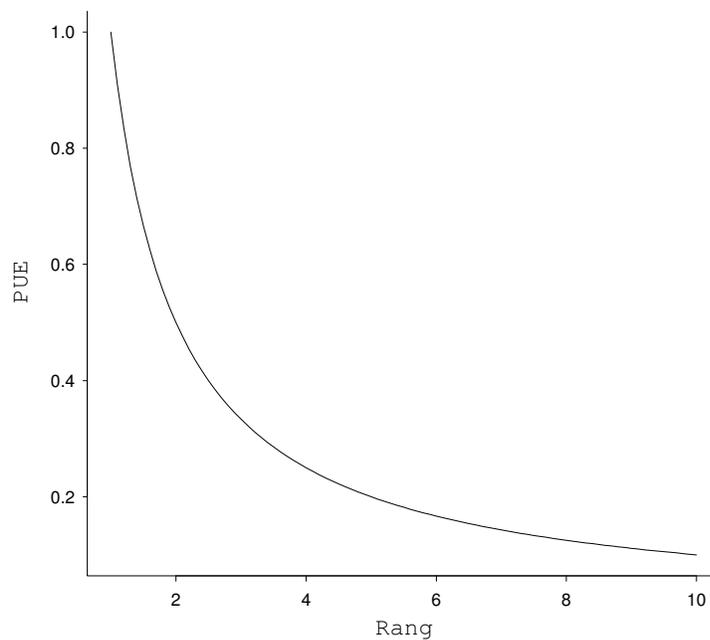


FIG. 5.7 – *Modèle d'épuisement utilisé.*

Cependant, les séries de doublons offrent une grande diversité de profils. Très peu correspondent au modèle d'épuisement précédemment cité (fig. 5.7). Les résultats s'interprètent donc difficilement dans un cadre où l'efficacité locale de pêche est constante. J'ai donc envisagé un modèle dans lequel l'efficacité locale de pêche est modélisée par une variable aléatoire, notée Φ . Dans ce cadre, l'augmentation des PUE au cours d'une série de doublons peut s'interpréter comme une augmentation de l'efficacité locale de pêche. L'hypothèse de recolonisation du secteur exploité entre deux opérations de pêche étant rejetée, le fait de rendre aléatoire dans le modèle l'efficacité locale de pêche d'un coup de chalut à l'autre permet d'obtenir les différents profils observés tout en conservant un effet d'épuisement local moyen. Ainsi il est possible d'obtenir, à partir du modèle proposé, l'allure des séries de PUE observées. Le modèle proposé s'exprime

de la façon suivante :

$$\text{On note } \begin{cases} U_i & \text{la PUE observée au } i^{\text{ième}} \text{ rang d'une série de doublons} \\ z & \text{la densité locale} \\ \Phi_i & \text{l'efficacité locale de pêche au } i^{\text{ième}} \text{ rang d'une série de doublons} \end{cases}$$

Dans le cadre de ce modèle, les Φ_i sont considérées comme des réalisations indépendantes et identiquement distribuées d'une variable aléatoire Φ . Les PUE d'une même série peuvent donc se présenter ainsi :

$$\begin{aligned} U_1 &= \Phi_1 \cdot z \\ U_2 &= \Phi_2 \cdot (z - \Phi_1 \cdot z) \\ U_3 &= \Phi_3 \cdot (1 - \Phi_1) \cdot z \end{aligned}$$

Cette formulation est valable à condition que le temps de pêche n'évolue pas au cours des rangs. Or si l'on observe les profils des moyennes des temps de chalutage des séries de PUE doublonnées, on ne constate aucune évolution (fig. 5.8).

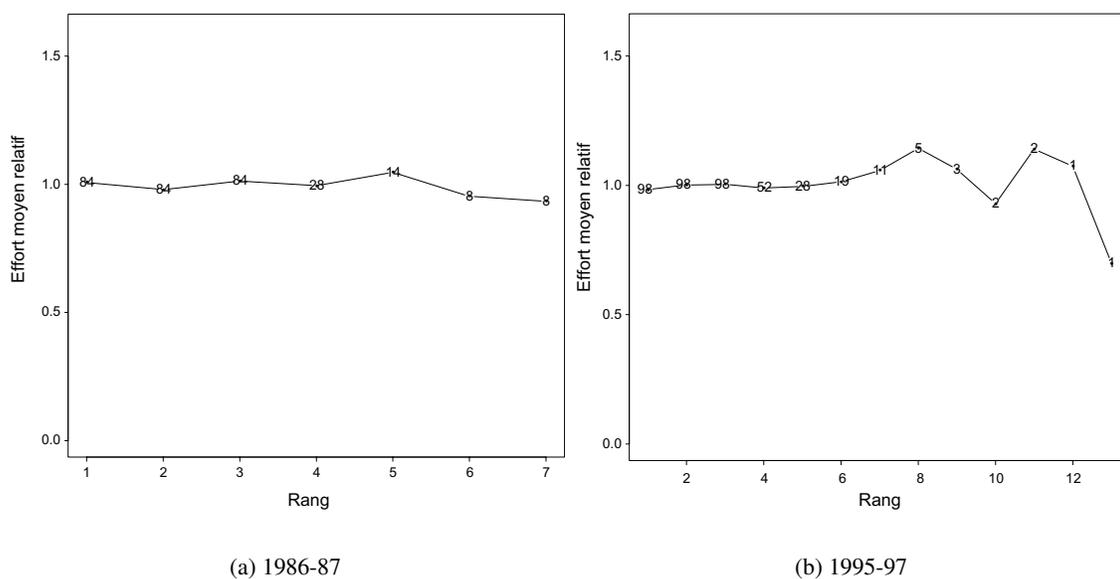


FIG. 5.8 – Profils moyens de temps de pêche des captures doublonnées.

Pour le n ^{ième} rang, on obtient la relation suivante :

$$U_n = \Phi_n \cdot \prod_{k=1}^{k=n-1} (1 - \Phi_k)z$$

Le rapport, $R_{i+1,i}$, de deux PUE successives s'obtient de la façon suivante, où $\Psi_i = \frac{1-\Phi_i}{\Phi_i}$:

$$R_{i+1,i} = \frac{U_{i+1}}{U_i} = \frac{\Phi_{i+1} \cdot \prod_{k=1}^{k=i} (1 - \Phi_k)z}{\Phi_i \cdot \prod_{k=1}^{k=i-1} (1 - \Phi_k)z} = \frac{\Phi_{i+1}}{\Phi_i} \cdot (1 - \Phi_i) = \Phi_{i+1} \cdot \Psi_i$$

Nous avons supposé que l'efficacité locale de pêche, Φ , suivait une loi *Bêta* de type I, de paramètres n et p :

$$b_1(x) = \frac{1}{B(n,p)} x^{n-1} (1-x)^{p-1}$$

avec $n, p > 0$ et $x \in [0, 1]$.

$$\text{où } B(n,p) = \frac{\Gamma(n+p)}{\Gamma(n)\Gamma(p)}$$

où $\Gamma(n)$ désigne une loi gamma de paramètre n .

$$\begin{cases} E(\Phi) &= \frac{n}{n+p} \\ Var(\Phi) &= \frac{np}{(n+p+1)(n+p)^2} \end{cases}$$

La loi bêta a été choisie parcequ'elle est définie entre 0 et 1 et qu'elle offre une grande diversité de formes. D'ailleurs, ces lois sont souvent utilisées en statistique bayésienne pour représenter la distribution a priori de la probabilité d'un événement (Saporta, 1990). Par définition, Ψ suit une loi *Bêta* de type II, notée b_2 de paramètres p et n (Saporta, 1990), dont la densité est :

$$b_2(x) = \frac{1}{B(p,n)} x^{p-1} (1-x)^{n-1} \text{ avec } 0 \leq x \leq \infty$$

$$\begin{cases} E(\Psi) &= \frac{p}{n-1} \\ Var(\Psi) &= \frac{p(p+n-1)}{(n-1)^2(n-2)} \end{cases}$$

Le rapport, $R_{i+1,i}$, est donc le produit de deux variables aléatoires, Φ et Ψ , de lois *Bêta*₁(n, p) et *Bêta*₂(p, n) respectivement :

$$\begin{cases} \Phi_i &\stackrel{\mathcal{L}}{=} \Phi \sim b_1(n,p) \\ \Psi_i &\stackrel{\mathcal{L}}{=} \Psi \sim b_2(p,n) \\ R_{i+1,i} &\stackrel{\mathcal{L}}{=} R \sim f(r) \end{cases}$$

Il est possible d'accéder expérimentalement à $f(r)$ au travers de l'histogramme des rapports $R_{i+1,i}$, calculés à partir des séries de doublons. L'objectif de ce qui suit est de définir théoriquement le lien qui existe entre les lois de R , Φ et Ψ , afin de pouvoir estimer les paramètres n et p . Si on suppose l'indépendance entre Φ_{i+1} et Ψ_i , alors la loi de $R_{i+1,i}$ est égale au produit des lois de Φ_{i+1} et Ψ_i . On obtient donc que :

$$E(R_{i+1,i}) = \int_{D_\Phi} \int_{D_\Psi} x.y b_1(x) b_2(y) dx dy$$

avec $D_\Phi = [0, 1]$ le domaine de définition de Φ et $D_\Psi = [0, \infty[$, le domaine de définition de Ψ . On pose $x = t$ et $y = \frac{r}{t}$, d'où :

$$\begin{aligned} E(R_{i+1,i}) &= \int_{D_R} \int_{D_T} r.b_1(t) b_2\left(\frac{r}{t}\right) \left| \frac{D(x,y)}{D(r,t)} \right| dr dt \\ &= \int_{D_R} r dr \underbrace{\int_{D_T} b_1(t) b_2\left(\frac{r}{t}\right) \frac{dt}{t}}_{f(r)} \end{aligned}$$

avec $D_R = [0, \infty[$ et $D_T = [0, 1]$.

La densité $f(r)$ recherchée est donc :

$$f(r) = \int_0^1 b_1(t) b_2\left(\frac{r}{t}\right) \frac{dt}{t}$$

Après développement, on trouve que :

$$f(r) = \frac{r^{p-1}}{B(n,p)^2} \int_0^1 \frac{x^{n-p-1} (1-x)^{p-1}}{\left(1 + \frac{r}{x}\right)^{n+p}} dx$$

Cette fonction dépend uniquement de r et des paramètres n et p . La démarche poursuivie est donc la suivante :

1. Calcul de l'histogramme des rapports $R_{i+1,i}$;
2. Ajustement par une procédure itérative basée sur la minimisation de la somme des carrés des résidus (Splus) de l'histogramme expérimental des $R_{i+1,i}$, par la fonction $f(r)$;
3. Récupération des paramètres n et p ;
4. Représentation d'une loi $Bêta_1$ de paramètres n et p issus de l'ajustement et comparaison avec l'histogramme expérimental.

Un paramètre mesurant la qualité de l'ajustement, noté GOF (*Goodness Of Fit*), a été utilisé. Il est construit à partir la somme des carrés des résidus. On note R^* le profil expérimental, R le modèle et k le nombre d'échantillons expérimentaux :

$$GOF = \frac{\sum_k [R_{i+1,i} - R_{i+1,i}^*]^2}{\sum_k [R_{i+1,i}^*]^2}$$

Le GOF est donc sans unité. Plus il est proche de 0, plus la qualité de l'ajustement est bonne. Il est important de noter que cette méthode ne permet pas d'estimer l'efficacité locale de pêche coup par coup mais uniquement d'accéder à leur distribution. Cette méthode ne peut donc être utilisée pour corriger les données mais uniquement pour comparer des bateaux ou des périodes de pêche.

5.3.2 Résultats

Dans un premier temps, la loi de répartition de l'efficacité locale de pêche, Φ , a été estimée pour chacune des deux périodes de pêche. Au cours de la première période de pêche (fig. 5.5.9(a)), on observe que l'ajustement réalisé est très proche du profil expérimental. Le *GOF* est de 0,04. La distribution de l'efficacité est très large, allant de 0 à 0,9. Au cours de la seconde période (fig. 5.5.9(b)), la qualité de l'ajustement est légèrement moins bonne puisque le *GOF* est de 0,07. La distribution de l'efficacité est beaucoup moins large allant de 0 à 0,4. On observe donc un resserrement des efficacités locales de pêche entre les deux périodes de pêche, ainsi qu'une diminution de la valeur moyenne (fig. 5.10). La loi de répartition de l'efficacité locale de pêche pourrait permettre de sélectionner un navire référence, en sélectionnant celui dont la distribution des efficacités de pêche est la plus étroite, c'est à dire celui dont le lien entre PUE et abondance est le plus stable. Parce qu'elles présentent une distribution très étroite, les PUE de la seconde période permettraient une estimation plus fidèle d'un indice d'abondance de la ressource que celles de la première période.

L'ajustement de l'histogramme des rapports $R_{i+1,i}$ s'avère délicat, lorsque le nombre de données est peu élevé. C'est le cas du navire 19 (fig 5.5.11(a)), qui a tout de même été conservé pour le comparer au 192 (fig. 5.5.11(b)). Nous illustrerons par la suite à l'aide d'un exemple, la grande sensibilité de la distribution résultante de l'efficacité locale de pêche, aux paramètres n et p . Par le manque de série de doublons, les paramètres n'ont pu être estimés que pour 3 navires ayant opéré au cours des années 1986-87 (les navires 29 (fig. 5.5.13(a)), 46 (fig. 5.5.9(b)) et 19 (fig. 5.5.11(a))) et les deux navires de la seconde période (fig. 5.5.11(b); fig. 5.5.13(c)). Pour les navires 54 et 192, les profils expérimentaux de chaque campagne sont comparables à celui obtenu en confondant toutes les campagnes. Les différentes campagnes de pêche ont donc été confondues afin de travailler à partir d'un échantillon comportant le plus grand nombre de séries. Il apparaît que l'évolution de la distribution de l'efficacité locale de pêche pour le navire 19 entre les deux périodes de pêche (fig. 5.12) présente la même évolution que pour l'ensemble des navires. La distribution de l'efficacité locale de pêche du bateau 46 (fig. 5.5.14(b)) est proche de celle concernant tous les bateaux de la première période. Cette distribution est étalée allant de 0 à 0,9. Le navire 29 s'oppose au navire 46 du point de vue de l'efficacité de pêche, alors que ces deux navires ont pêché au cours de la première période. La distribution de l'efficacité locale de pêche du navire 29 (fig. 5.5.14(a)) est plus resserrée. Il pourrait donc être un bon candidat pour jouer le rôle de navire référence. Cependant, il aurait fallu disposer des efficacités locales de pêche de tous les navires afin de pouvoir véritablement sélectionner un navire référence.

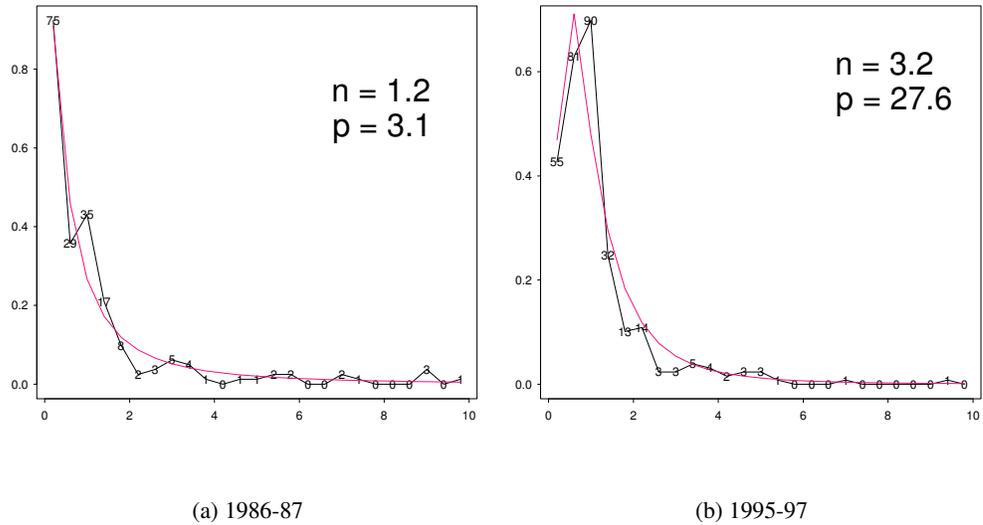


FIG. 5.9 – Histogrammes expérimentaux des rapports $R_{i,i+1}$ et ajustement obtenu à partir des paramètres n et p .

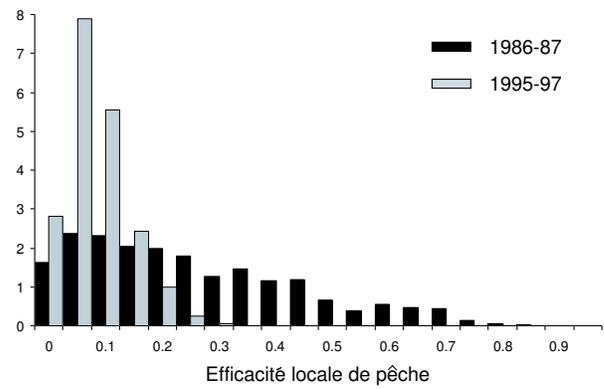


FIG. 5.10 – Densité de probabilité de l'efficacité locale de pêche pour les deux périodes d'étude.

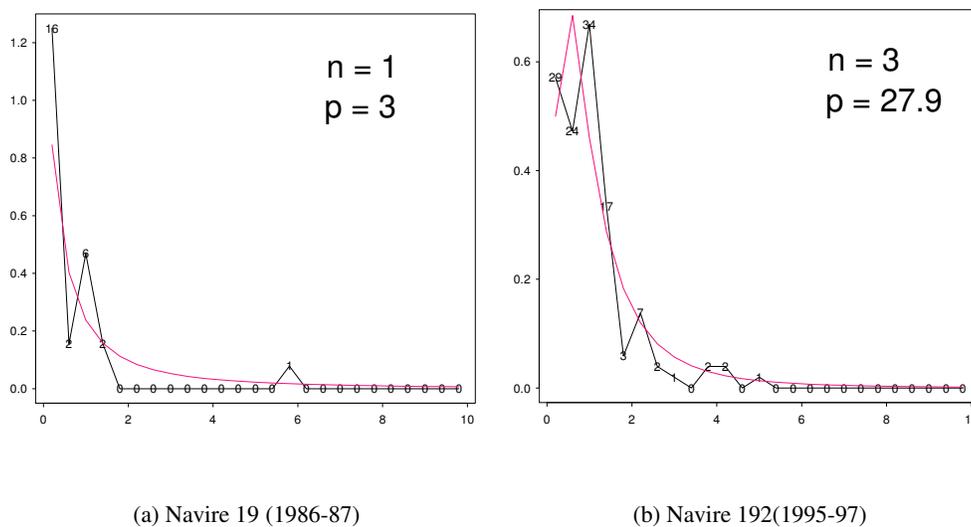


FIG. 5.11 – Histogrammes expérimentaux des rapports $R_{i,i+1}$ du navire 19(192) et ajustement obtenu à partir des paramètres n et p .

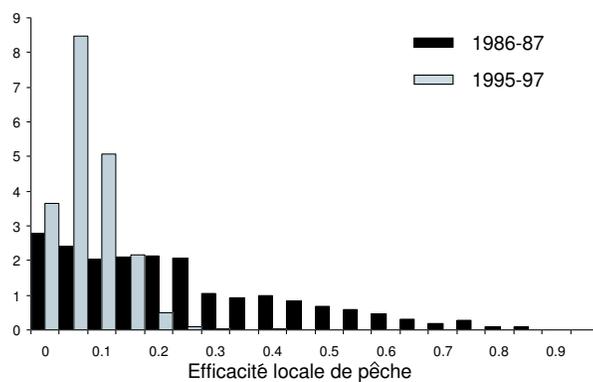


FIG. 5.12 – Densité de probabilité de l'efficacité locale de pêche du navire 19(192).

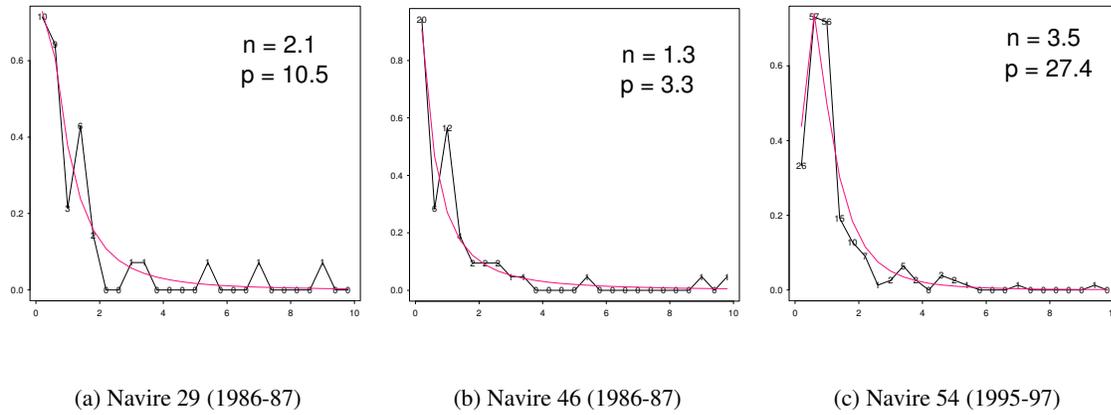


FIG. 5.13 – Histogrammes expérimentaux des rapports $R_{i,i+1}$ des navires 29, 46 et 54. Ajustements obtenus à partir des paramètres n et p .

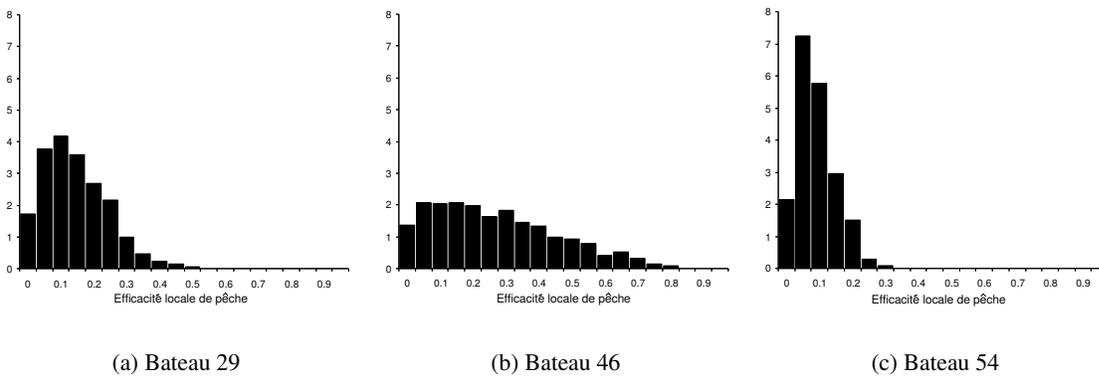


FIG. 5.14 – Densité de probabilité de l'efficacité locale de pêche pour les navires 29, 46 et 54.

5.3.3 Interprétations

La réglementation concernant les quotas de pêche a évolué entre les deux périodes. Au cours de la première période, un quota de pêche global était fixé pour la zone des îles Kerguelen, alors qu'au cours de la seconde période les quotas de pêches étaient individuels. Il me semble possible d'associer cette évolution de la réglementation et le comportement des pêcheurs. En effet, on peut penser que les navires de la première période soumis à un quota global ont tenté de capturer le plus de poissons possible avant que le quota global soit atteint. Les pêcheurs auraient alors pris plus de risques vis à vis du matériel de pêche et des zones exploitées (la zone 1 a été délaissée au cours de la seconde période car les risques de casse de matériel sont plus importantes qu'au sein des zones 2 et 3). Les navires 54 et 192 auraient pris moins de risque et n'auraient pas cherché à réaliser des coups de pêche "miraculeux", contrairement aux navires de la première période. Ce comportement peut être comparé à une gestion dite en "bon père de famille", qui consiste à revenir sur une zone riche à plusieurs reprises en réalisant des opérations de pêche non risquées vis à vis du matériel, comme par exemple ne pas surcharger le chalut (nous avons observé que les pourcentages de doublons étaient important pour cette période de pêche). Cette évolution du comportement des pêcheurs se retrouve dans les distributions de l'efficacité locale de pêche, puisque les efficacités locales de la première période de pêche présentent une moyenne plus forte et une distribution plus large. Ces différents comportements et résultats ont été confirmés par Guy Duhamel sur la base des rapports des contrôleurs de pêche. Depuis 1998, les navires ont l'obligation de ne pas exploiter une même zone de pêche plus de 5 jours. L'observation d'un effet d'épuisement local vient donc, si nécessaire, confirmer a posteriori le bien fondé de cette nouvelle réglementation. Enfin, parce que l'épuisement local semble plus prononcé pour le poisson des glaces et le colin que pour la légine, on peut penser que la disparition du poisson des glaces est lié à sa grande vulnérabilité par rapport à des opérations de pêche répétitives.

L'exploitation de la légine sur le plateau des îles Kerguelen a débuté en 1984. En 1986-87, les pêcheurs ne possédaient pas une aussi bonne connaissance de la zone de pêche et du stock qu'en 1995-97. De plus, suite à dix années d'exploitation l'abondance du stock de légine a diminué. Cette diminution de l'abondance du stock et la meilleure connaissance de la zone de pêche par les pêcheurs peuvent également expliquer l'évolution de la distribution de l'efficacité locale de pêche. La forte abondance du stock en 1986-87 expliquerait en partie les très fortes efficacités obtenues, et la faible connaissance de la ressource et de la zone expliquerait les forts pourcentages de PUE nulles. Pour la période, 1995-97, la meilleure connaissance de la zone explique les faibles pourcentages de PUE nulles, et la diminution de l'abondance du stock explique le resserrement de la distribution de l'efficacité locale de pêche. Les innovations technologiques, la diminution de l'abondance de stock, la meilleure connaissance de la zone et le changement de la réglementation des quotas induisent une évolution des distributions des efficacités locales de pêche, qui se traduit pour cette pêcherie par un resserrement de ces dernières (fig. 5.15).

L'estimation de la loi de répartition de l'efficacité locale de pêche est réalisée à partir des PUE doublonnées. Or, les PUE ont été doublonnées au sein de secteurs riches en poissons. Il aurait été intéressant de comparer les efficacités locales de pêche à partir de PUE doublonnées en secteurs riches et en secteurs pauvres. Cette comparaison aurait fourni des informations quant à l'évolution de la capturabilité en fonction de la densité de la ressource et aurait permis de conclure quant à la densité-dépendance de l'efficacité de pêche.

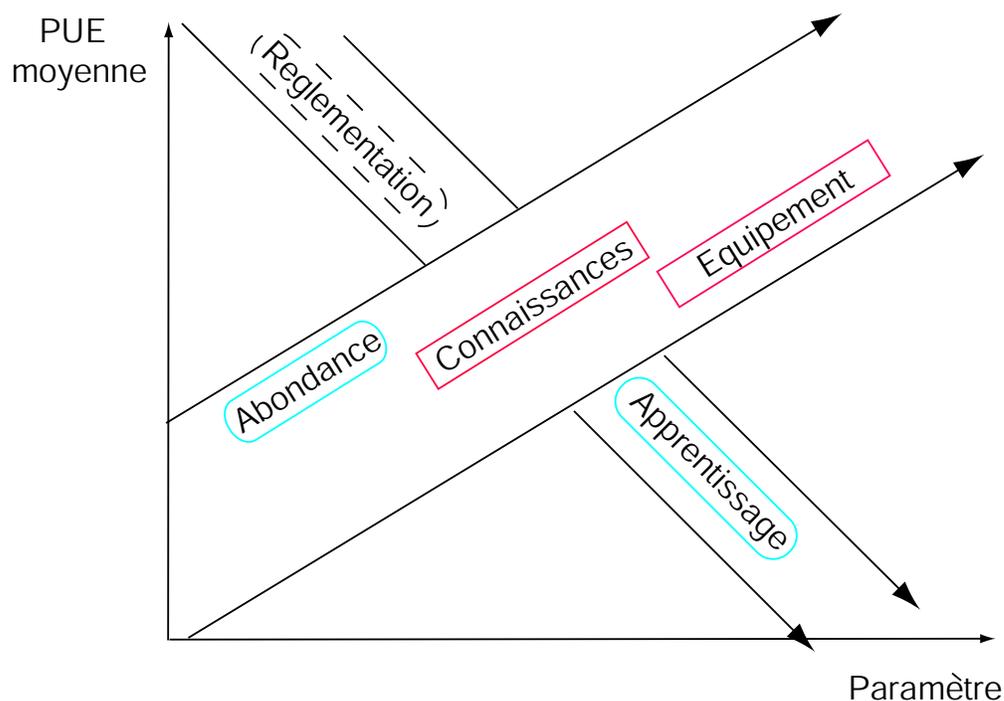


FIG. 5.15 – Schéma récapitulatif des différents paramètres, mis en évidence, affectant la PUE moyenne. Les rectangles symbolisent les paramètres relatifs aux pêcheurs, les rectangles arrondis symbolisent les paramètres relatifs à la ressource et en pointillé le paramètre relatif à la pêcherie.

5.3.4 Remarque sur la sensibilité du modèle

Nous nous proposons d'observer graphiquement l'influence des paramètres n et p sur l'ajustement de l'histogramme des rapports $R_{i+1,i}$ et sur la distribution de l'efficacité locale de pêche résultante. Trois couples de valeurs pour les paramètres n et p ont été utilisés :

- $n = 1$ et $p = 3$;
- $n = 1$ et $p = 6$;
- $n = 2$ et $p = 6$.

Pour les cas $n = 1, p = 3$ et $n = 1, p = 6$, les ajustements du modèle par rapport à l'histogramme expérimental sont quasiment confondus or les distributions résultantes sont différentes (fig. 5.16 et 5.17). Ce problème lié à l'ajustement limite les possibilités du modèle. Dans la pratique, on cherchera à interpréter les grandes tendances comme par exemple l'existence d'histogrammes des rapports $R_{i+1,i}$ distincts afin de différencier les efficacités locales de pêche. Pour la comparaison des distributions de l'efficacité de pêche des deux périodes, les deux profils expérimentaux étaient très différents, on peut donc considérer que si les valeurs n et p ne sont pas très précises, les différences observées sur les distributions des efficacités de pêche sont significatives et fondées.

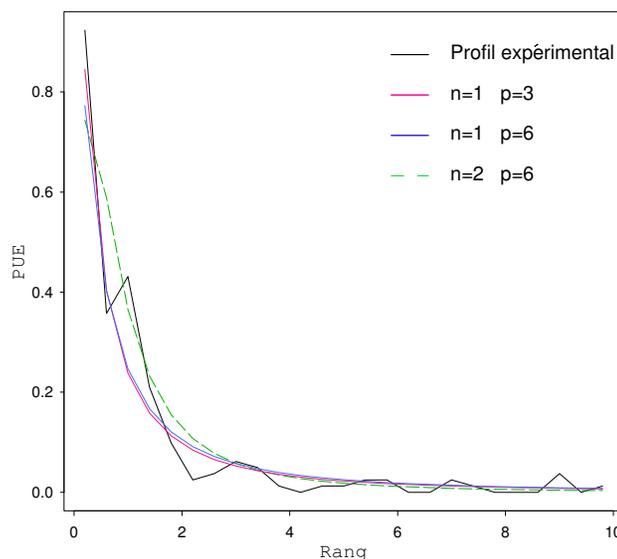


FIG. 5.16 – Histogramme $R_{i,i+1}$, et ajustement à l'aide de trois paires différentes de paramètres n et p .

Les captures nulles ont nécessité une attention particulière, puisque l'apparition d'une PUE nulle rend infini son rapport avec la suivante, le rapport $R_{i+1,i}$. Ces valeurs infinies ont été regroupées dans une classe maximale lors du calcul de l'histogramme. Cette classe n'a pas été prise en compte lors de l'ajustement. Cependant, seuls 7% des PUE des séries de doublons sont nulles.

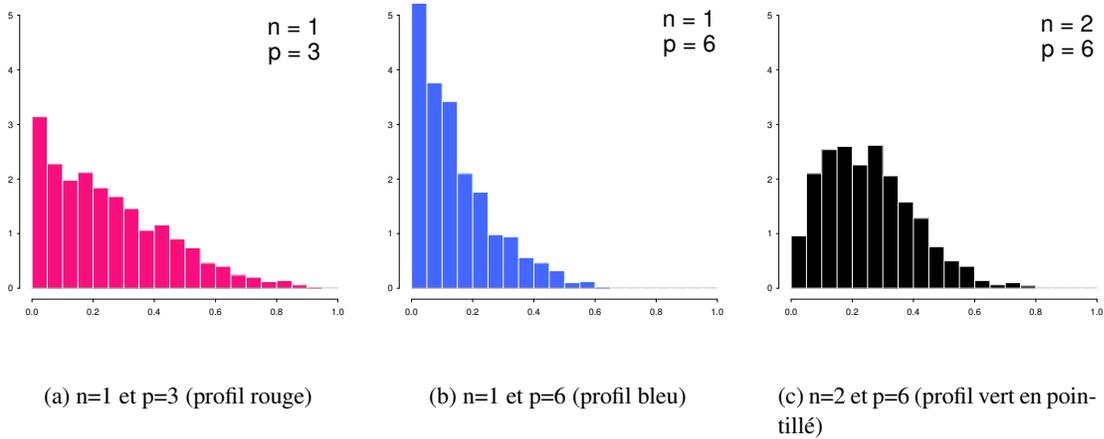


FIG. 5.17 – Sensibilité du modèle aux paramètres n et p . Histogramme de l'efficacité locale de pêche.

5.4 Traitement de la variabilité locale intra-bateau

L'épuisement local a deux conséquences importantes. Premièrement, les PUE d'une même série de doublons ne reflètent pas la même abondance locale. Deuxièmement, pour une même position géographique les PUE sont très différentes les unes des autres, ce qui augmente artificiellement le niveau de la variabilité locale, et perturbe les premiers pas de calcul du variogramme. Il semble donc nécessaire de tenir compte de l'effet d'épuisement afin de déterminer la répartition spatiale de la ressource. Pour tenir compte de cet effet, nous avons opté pour le remplacement de toutes les PUE d'une même série par une unique valeur. Suite à l'observation des séries de PUE, conserver uniquement la première PUE de chaque série est irréaliste du fait que certaines PUE de rang 1 sont nulles alors que la PUE de rang 2 de cette même série ne l'est pas. La solution proposée consiste à remplacer toutes les PUE d'une même série par la moyenne des 3 premières PUE de chaque série pour une date correspondant à la première PUE de la série. Ce choix fait suite à différents tests consistant par exemple à ne sélectionner que la première PUE de chaque série, ou à utiliser une moyenne pondérée des PUE de chaque série donnant une importance plus grande aux faibles rangs, etc.

A partir des données projetées, il a été possible de comparer les variogrammes expérimentaux de cette zone avec traitement des doublons ou non (fig. 5.18). L'exemple proposé concerne les PUE réalisées par le navire 38 au sein de la zone à légine (zone 1) au cours de sa première marée. Il apparaît que la variance expérimentale a fortement diminué, de 3680 à 2440. De plus, le variogramme obtenu une fois la variabilité locale intra-bateau traitée n'est plus décroissant. Le traitement de la variabilité locale intra-bateau permet donc de diminuer la variance locale des PUE et d'obtenir pour le navire 38 un variogramme croissant à l'origine. L'observation de ce variogramme permet de mettre en évidence la faible structuration spatiale de la population de légine au sein de la zone 1. Cependant, certaines positions géographiques ont été exploitées par différents navires. L'utilisation de toutes les PUE réalisées par l'ensemble des navires imposent donc leur standardisation afin de pouvoir les rendre comparables et de déterminer la structure spatiale de la ressource.

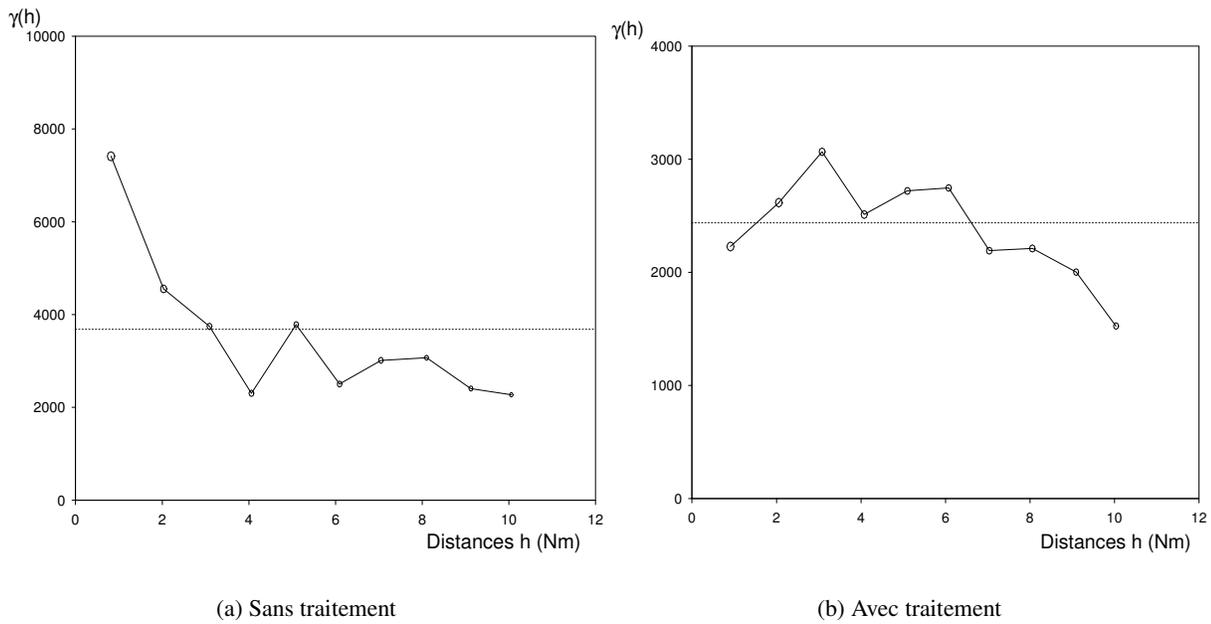


FIG. 5.18 – Variogramme expérimental omnidirectionnel des PUE commerciales de la zone 1 du navire 38, avant et après traitement de la variabilité locale intra-bateau.

5.5 Conclusions

L'étude de séries de PUE doublonnées a permis de mettre en évidence en moyenne une diminution de l'abondance locale au cours de la répétition des captures. Cet effet a pour conséquence de ne pas rendre représentatives de l'abondance, les PUE réalisées pour une même localisation géographique et de surestimer la variabilité locale de la ressource. Les profils des PUE de chaque série sont très hétérogènes et très peu suggèrent un effet d'épuisement. C'est pour cette raison que nous parlerons d'un effet *moyen* d'épuisement. Pour la légine, cet appauvrissement de l'abondance local est plus net au cours de la période 1995-97. C'est au cours de cette même période que les pourcentages de PUE doublonnées par navire sont les plus forts. Pour la première période, l'effet d'épuisement semble plus important pour le colin et que le poisson des glaces que pour la légine. En fonction de leurs comportements, les espèces semblent plus ou moins sensibles aux stratégies d'occupation de l'espace. Ainsi, le poisson des glaces est plus sensible que la légine aux PUE doublonnées par son comportement grégaire. La pente de la diminution des doublons au cours des répétitions peut être considérée comme un indice très indirect permettant d'une part de classer les navires et d'autre part d'appréhender la structure spatiale de la ressource.

A partir des séries de PUE doublonnées, un modèle représentant l'évolution des PUE de chaque série a été proposé. Ce modèle est basé sur l'épuisement local à condition de supposer l'efficacité locale de pêche constante. Or, il est apparu que peu de séries de PUE doublonnées mettaient en évidence l'épuisement local de la ressource. Afin de rester en accord avec ce résultat, l'efficacité locale de pêche a été supposée variable (aléatoire) d'une opération de pêche à l'autre. Il a été possible de déterminer pour chacune des périodes de pêche et pour quelques navires, la loi de distribution de l'efficacité locale de pêche. La distribution de l'efficacité locale de pêche est plus homogène pour les navires de la seconde période que pour les navires de la période 1986-87. Les PUE des navires 192 et 54 seraient donc plus à même pour estimer un indice d'abondance et donc la répartition spatiale de la ressource. Ce changement de comportement des pêcheurs est en partie dû à l'évolution de la réglementation des quotas de pêche, aux innovations technologiques, à la diminution de l'abondance du stock et à la meilleure connaissance de la zone par les pêcheurs. L'attribution de quotas individuels a entraîné une diminution de la prise de risque par les pêcheurs vis à vis des zones de pêche et du volume de la capture par coup de chalut. Combiné à cette évolution de la réglementation, l'apparition d'innovations technologiques, telle que le GPS, a permis et a incité les pêcheurs à réaliser une part importante de PUE doublonnées.

Pour tenir compte de l'effet d'épuisement, chacune des PUE d'une série a été remplacée par une unique valeur, obtenue à partir de la moyenne des PUE des trois premiers rangs de chaque série. Cette transformation a permis de diminuer la variance et d'obtenir un variogramme non décroissant à l'origine. Chaque série de PUE doublonnées ne comprend que des PUE réalisées par un même navire. Nous avons accès par l'intermédiaire des séries de doublons à la variabilité locale intra-bateau mais pas à la variabilité locale inter-bateaux. Pour cela il nous est nécessaire d'estimer les puissances locales de chaque navire, afin de standardiser chaque PUE par la puissance locale du navire correspondant.

Quatrième partie

Etude de la variabilité locale inter-bateau

Chapitre 6

Analyse et estimation des puissances de pêche

Sommaire

Un point de l'espace peut être exploité par un même navire à plusieurs reprises et/ou par différents navires. La variabilité locale inter-bateau peut être accessible à l'aide des puissances locales de pêche, qui quantifient la capacité de chaque bateau à exploiter une zone donnée. Le but de ce chapitre est de présenter la méthode employée pour estimer les puissances locales, puis d'utiliser ces puissances locales estimées afin de standardiser chacune des PUE. La méthode utilisée a été développée par Laurec (1977) pour une pêcherie Thonière du Pacifique, est développée ici en tenant compte des particularités des données (nombre de zéro, ...). Les résultats obtenus seront comparés aux résultats issus d'une méthode d'estimation basée sur les modèles linéaires généralisés (GLM).

6.1 Méthodes

La méthode décrite au cours de cette section est largement inspirée de la méthode proposée par Laurec (1977) pour estimer les puissances de pêche locales de navires thoniers. Nous avons repris les différents développements et équations proposées par Laurec, ce qui nous a permis d'identifier deux erreurs. En outre, lors de l'estimation de puissances de pêche, une erreur de signe a été identifiée entraînant l'inversion des résultats.

6.1.1 Définition des couples de PUE de navires distincts

Pour estimer la puissance locale, il est nécessaire d'éliminer l'influence des variations spatiales de la densité de poisson, puisque deux bateaux n'opèrent jamais au même point de l'espace en même temps. Pour cela, on suppose la continuité spatio-temporelle de la densité. La densité sera alors décrite par une fonction aléatoire à trois dimensions (la longitude, la latitude et le temps). Il vient alors que deux densités en des endroits et des instants proches sont donc deux variables aléatoires non indépendantes. A chaque opération de pêche réalisée par un navire i correspond :

- une position, x_i ;
- un jour, k ;
- une PUE, $U_{i,k}(x)$;
- une densité, $D_{x,k}$.

Dans un souci de simplification, la densité $D_{x,k}$ sera notée $D_{i,k}$ et correspond à la densité associée à la position de la PUE $U_{i,k}(x)$, notée par la suite $U_{i,k}$. Cette méthode implique la présence de plusieurs navires exploitant la même zone pendant la même période. La zone du fer à cheval (zone 1) et l'été 1986-87 ont été retenues au vu du nombre important de PUE réalisées et du nombre de navires présents. La puissance locale du navire i est notée p_i . Au vue de la durée de la période retenue (3 mois) et de la taille de la zone, la puissance locale d'un navire est considérée comme constante. Il s'agit ici de l'estimation de la puissance de pêche locale moyenne de chaque navire pour la zone du fer à cheval pendant l'été 1986-87. ε_{ik} est défini comme un résidu inexplicé :

$$\begin{cases} U_{ik} & = & D_{ik} & \cdot & p_i & \cdot & \varepsilon_{ik} \\ \text{Log}(U_{ik}) & = & \text{Log}(D_{ik}) & + & \text{Log}(p_i) & + & \varepsilon_{ik} \end{cases}$$

A partir du même modèle pour le navire j le même jour k , on obtient :

$$\text{Log}(U_{jk}) = \text{Log}(D_{jk}) + \text{Log}(p_j) + \varepsilon_{jk}$$

de sorte que :

$$\text{Log}\left(\frac{U_{ik}}{U_{jk}}\right) = \text{Log}\left(\frac{p_i}{p_j}\right) + \text{Log}(D_{ik}) - \text{Log}(D_{jk}) + \varepsilon_{ik} - \varepsilon_{jk}$$

$\text{Log}\left(\frac{U_{ik}}{U_{jk}}\right)$ apparaît ainsi comme la somme de deux termes :

- le premier terme, $\text{Log}\left(\frac{p_i}{p_j}\right)$ est déterministe ;
- le second terme, $\text{Log}(D_{ik}) - \text{Log}(D_{jk}) + (\varepsilon_{ik} - \varepsilon_{jk})$ est aléatoire et de variance :

$$\text{var}[\text{Log}(D_{ik}) - \text{Log}(D_{jk})] + \text{var}(\varepsilon_{ik}) + \text{var}(\varepsilon_{jk})$$

On suppose l'indépendance des différents termes dans l'expression de la variance et $\text{var}(\varepsilon_{ik}) = \text{var}(\varepsilon_{jk}) = \nu$. On obtient à partir des hypothèses :

$$\text{var}[\text{Log}(U_{ik}) - \text{Log}(U_{jk})] = 2[\gamma_{\text{Log}}(h_{ijk}) + \nu] = \text{vari}(h_{ijk})$$

où $\gamma(h_{ijk})$ est le variogramme du logarithme des PUE, avec h_{ijk} la distance séparant les navires i et j le jour k . D'après la variance observée sur les $\text{Log}\left(\frac{U_{ik}}{U_{jk}}\right)$ pour différents jours où les bateaux étaient à la même distance h , il est possible d'obtenir une estimation de $\gamma(h) + \nu$. L'estimation finale est obtenue en moyennant les résultats obtenus pour différents couples de bateaux (i, j) . Cette estimation de $\gamma(h_{ijk}) + \nu$ nous permet de déterminer la distance, h_c , à partir de laquelle deux PUE réalisées le même jour peuvent être considérées comme indépendantes l'une de l'autre, soit la portée du variogramme. Par contre nous ne pouvons pas estimer l'effet de pépite qui s'ajoute au terme 2ν (fig. 6.1).

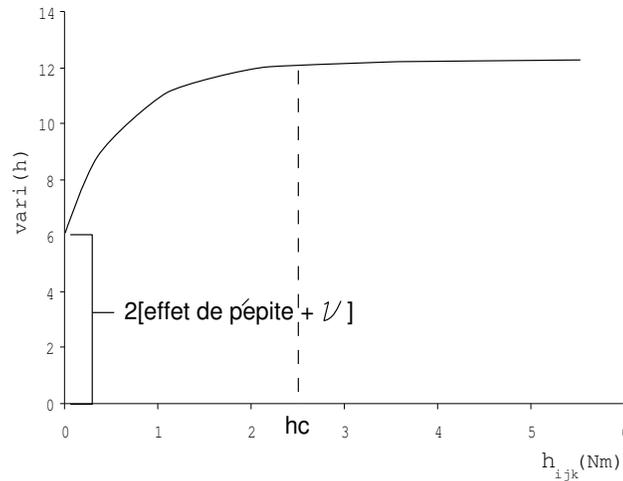


FIG. 6.1 – Exemple de représentation de la fonction $\text{vari}(h_{ijk})$.

6.1.2 Estimation des $\text{Log}\left(\frac{p_i}{p_j}\right)$ des couples de navire

Lorsque deux bateaux opèrent proches l'un de l'autre, la comparaison des PUE offre une estimation du rapport de leurs puissances de pêche locales. Moins ils seront proches dans l'espace et le temps, plus les différences entre leurs captures auront tendance à être importantes intégrant des effets liés aux puissances de pêche des navires et des effets liés à la variabilité de la densité de poisson dans l'espace et le temps. Il est alors impossible d'estimer le *Logratio* des puissances de pêche locale en considérant que le $\text{Log}\left(\frac{U_{jk}}{U_{jk}}\right)$ est une estimation non biaisée de $\text{Log}\left(\frac{p_i}{p_j}\right)$ de variance $\text{vari}(h_{ijk})$, si h_{ijk} est la distance des navires i et j le jour k . En supposant les estimations $\text{Log}\left(\frac{U_{jk}}{U_{jk}}\right)$ comme indépendantes, la moyenne pondérée par les variances fournira l'estimation globale de $\text{Log}\left(\frac{p_i}{p_j}\right)$:

$$R_{ij}^* = \text{Log}\left(\frac{p_i}{p_j}\right) = \frac{1}{M_{ij}} \sum_k w_{ijk} \text{Log}\left(\frac{U_{jk}}{U_{jk}}\right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Avec } M_{ij} = \sum_k w_{ijk} \\ \text{et } w_{ijk} = 1 \quad \text{si } h = 0 \\ w_{ijk} = \frac{2[\nu + \text{effet de pépité}]}{\text{vari}(h_{ijk})} \quad \text{si } 0 < h_{ijk} \leq h_c \\ w_{ijk} = 0 \quad \text{si } h_{ijk} > h_c \end{array} \right.$$

La notion de distance maximale, h_c , permet d'assurer que c'est bien les puissances locales qui sont en jeux et de garantir l'indépendance des divers estimateurs journaliers. A l'aide de cette sélection, on obtient une structure spatiale des *Log* des rapports des PUE. On obtient donc une matrice carré des R_{ij}^* , de dimension n le nombre de navires présents sur zone :

$$\begin{bmatrix} 0 & R_{1,2}^* & \cdots & R_{1,n-1}^* & R_{1,n}^* \\ R_{2,1}^* & 0 & \cdots & R_{2,n-1}^* & R_{2,n}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & R_{n-1,n}^* \\ R_{n,1}^* & \vdots & \vdots & R_{n-1,n}^* & 0 \end{bmatrix}$$

6.1.3 Estimations des puissances de pêche par rapport à un ensemble de référence

A partir de la matrice des R_{ij}^* , il est possible de calculer les $Log(p_i)$ à condition d'imposer une condition supplémentaire. Une solution souvent retenue consiste à choisir arbitrairement un navire référence et à fixer sa puissance de pêche locale à 1. Une seconde solution, choisie ici, consiste à imposer, $\sum_i Log(p_i) = 0$, afin de réduire l'influence du bateau référence choisi. Ce sont alors les variations des $Log(p_i)$ par rapport à leur moyenne qui sont étudiées.

On dispose d'une matrice des R_{ij}^* , estimations des $Log(p_i) - Log(p_j)$. Estimer les $Log(p_i)$ peut donc consister en la minimisation de la quantité suivante :

$$f = \sum_{i,j} M_{ij} \underbrace{[(Log(p_i) - Log(p_j)) - R_{ij}^*]}_{R_{ij} - R_{ij}^*}^2$$

Pour un navire quelconque i_0 , la contribution de $Log(p_{i_0})$ à f est égale à :

$$\sum_{i \neq i_0} M_{i,i_0} [Log(p_i) - Log(p_{i_0}) - R_{i,i_0}^*]^2 + \sum_{j \neq i_0} M_{i_0,j} [Log(p_{i_0}) - Log(p_j) - R_{i_0,j}^*]^2$$

On cherche donc $Log(p_{i_0})$ qui annule la dérivée $\frac{\delta f}{\delta Log(p_{i_0})}$:

$$\frac{\delta f}{\delta Log(p_{i_0})} = -2 \sum_{j \neq i_0} M_{i_0,j} [Log(p_j) - Log(p_{i_0}) - R_{i_0,j}^*] + 2 \sum_{j \neq i_0} M_{i_0,j} [Log(p_{i_0}) - Log(p_j) - R_{i_0,j}^*]$$

En utilisant le fait que $R_{ij}^* = -R_{ji}^*$ et que $M_{ij} = M_{ji}$, on obtient :

$$\frac{\delta f}{\delta Log(p_{i_0})} = 2 \sum_{j \neq i_0} M_{i_0,j} [Log(p_{i_0}) - Log(p_j) - R_{i_0,j}^*]$$

On aboutit au système suivant :

$$\begin{aligned} \sum_j M_{i_0,j} R_{i_0,j} &= \sum_{j \neq i_0} M_{i_0,j} [\text{Log}(p_{i_0}) - \text{Log}(p_j)] \\ \sum_j M_{i_0,j} R_{i_0,j} &= \text{Log}(p_{i_0}) \sum_{j \neq i_0} M_{i_0,j} - \sum_{j \neq i_0} M_{i_0,j} \text{Log}(p_j) \\ \sum_j M_{i_0,j} R_{i_0,j} &= \sum_j c_{i_0,j} \text{Log}(p_j) \\ a_j &= \sum_j c_{i_0,j} \text{Log}(p_j) \end{aligned}$$

Avec :

$$\begin{cases} c_{i_0,i_0} = \sum_{j \neq i_0} M_{i_0,j} \\ c_{i_0,j} = -M_{i_0,j} \\ a_j = \sum_j M_{i_0,j} R_{i_0,j}^* \end{cases}$$

Si on note Lp la matrice des $\text{Log}(p_i)$, C la matrice des c_{ij} et A la matrice des a_i , alors le système que l'on cherche à résoudre est $C.Lp = A$.

$$C = \begin{bmatrix} \sum_{j \neq 1} M_{1,j} & -M_{1,2} & \cdots & \cdots & -M_{1,n} \\ -M_{2,1} & \sum_{j \neq 1} M_{2,j} & \cdots & \cdots & -M_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \sum_{j \neq n-1} M_{n-1,j} & \cdots \\ -M_{n,1} & \cdots & \cdots & \cdots & \sum_{j \neq n} M_{n,j} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{j \neq 1} M_{1,j} \cdot \text{Log}\left(\frac{p_1}{p_j}\right) \\ \sum_{j \neq 2} M_{2,j} \cdot \text{Log}\left(\frac{p_2}{p_j}\right) \\ \vdots \\ \vdots \\ \sum_{j \neq n} M_{n,j} \cdot \text{Log}\left(\frac{p_n}{p_j}\right) \end{bmatrix}$$

S'ajoute à ce système linéaire qui, tel quel comporte une infinité de solutions, la condition $\sum_i \text{Log}(p_i) = 0$. D'après Laurec, une des équations du système peut être remplacée par la condition supplémentaire. Les matrices C et A deviennent donc :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -M_{2,1} & \sum_{j \neq 1} M_{2,j} & \cdots & \cdots & -M_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \sum_{j \neq n-1} M_{n-1,j} & \cdots \\ -M_{n,1} & \cdots & \cdots & \cdots & \sum_{j \neq n} M_{n,j} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 \\ \sum_{j \neq 2} M_{2j} \cdot \text{Log}\left(\frac{p_2}{p_j}\right) \\ \vdots \\ \vdots \\ \sum_{j \neq n} M_{nj} \cdot \text{Log}\left(\frac{p_n}{p_j}\right) \end{bmatrix}$$

La solution est fournie par $C^{-1} \cdot A$. Ainsi, il est possible d'obtenir une estimation des *Log* des puissances de pêche locales relatives, $\text{Log}(p_i)$, pour chaque navire.

6.2 Résultats

Dans un premier temps, une zone et une période de pêche ont été sélectionnées. La période choisie concerne les mois d'octobre 1986 à janvier 1987, et la zone retenue est la zone du fer à cheval. Cette zone et cette période ont été sélectionnées car elles nous permettaient de travailler avec un grand nombre de navires ayant opéré ensemble au sein de la même zone. Sept navires ont exploité cette zone au cours de cette période. Après traitement de la variabilité locale intra-bateau (épuisement local lié aux PUE doublonnées, voir le chapitre 6), les PUE sélectionnés ont été projetées le long des accores du plateau (fig. 6.2).

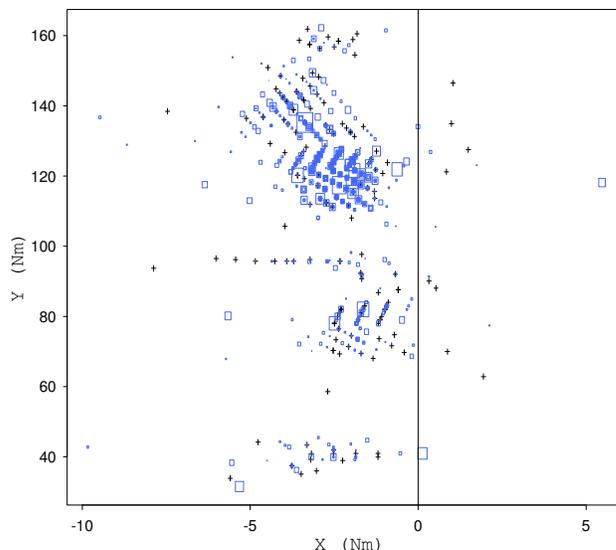
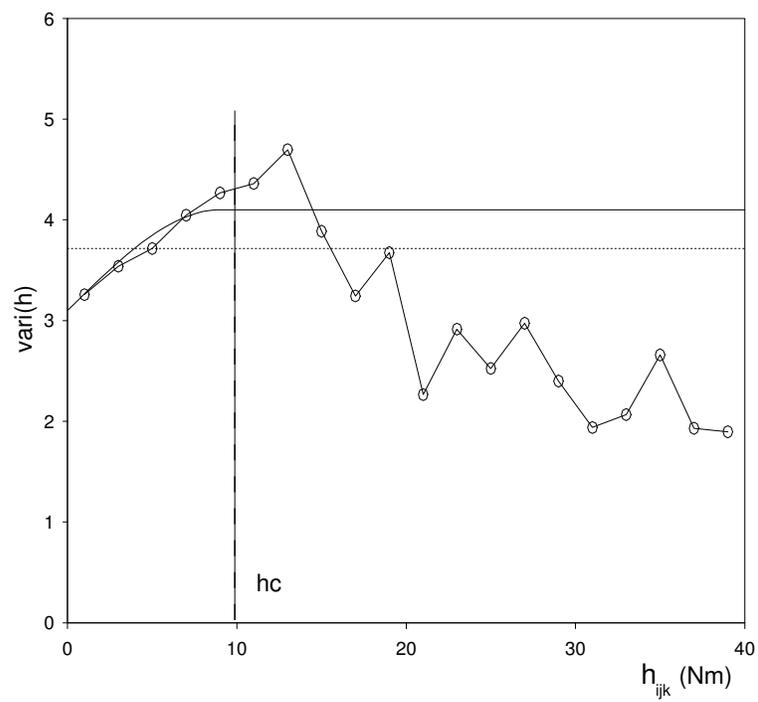


FIG. 6.2 – Représentations symboliques des PUE de légines réalisées au sein de la zone 1 d'octobre 1986 à janvier 1987 après projection le long des accores. La surface des carrés est proportionnelle à la PUE et les croix symbolisent les PUE nulles.

Les PUE nulles ont posé un problème lors du calcul des rapports des $\text{Log}(\frac{U_{ijk}}{U_{jk}})$. Ce problème a été contourné en additionnant à chaque PUE une unité. Ainsi aucune PUE n'est nulle, et les rapports de PUE sont calculables. A partir du calcul de la variance des $\text{Log}(\frac{U_{ijk}}{U_{jk}})$ réalisées le même jour, la fonction $\text{vari}(h_{ijk})$ est estimée. La figure 6.3 représente le profil expérimental de la fonction $\text{vari}(h_{ijk})$. Cette fonction nous permet de définir la distance, h_c , à partir de laquelle deux PUE peuvent être considérées comme indépendantes. La distance h_c retenue est de 10 miles nautiques.

FIG. 6.3 – Estimation de la fonction $\text{vari}(h)$.

A partir de la méthode présentée précédemment, les puissances de pêche locales relatives sont estimées. Le tableau 6.1 résume les puissances de pêche locales relatives, ainsi que les PUE moyennes et les pourcentages de captures doublonnées au sein de la zone 1 au cours de la période sélectionnée. Les PUE moyennes sont calculées à partir des PUE obtenues après le traitement de la variabilité locale intra-bateau. Le pourcentage de captures doublonnées est calculé à partir des PUE de légine avant traitement de la variabilité locale intra-bateau.

Code bateau	Nombre d'opérations	PUE moyenne de légines	Pourcentages de doublons	Puissances de pêche locales relatives
19	171	27	68	0,87
38	267	30,7	72	2,36
41	73	12	52	1,01
43	139	21,3	40	0,45
44	61	18,1	36	0,64
45	143	19	64	0,88
46	259	17,9	84	1,9

TAB. 6.1 – Estimations des puissances de pêche locales relatives.

La figure 6.4 et le tableau 6.1 mettent en évidence qu'il n'existe pas de relation nette entre les PUE moyennes de légines et les puissances de pêche locales ($R^2 = 0,2$). La capacité à capturer le poisson disponible (i.e. la puissance de pêche locale) ne permet pas d'expliquer les écarts de PUE moyennes entre les différents navires. Ces écarts sont plutôt dus à la capacité des navires à localiser les zones riches (i.e. puissances de pêche globale).

Par contre, les pourcentages de doublons sont nettement et positivement corrélés avec les puissances locales (fig. 6.5) et négativement corrélés avec les pourcentages de captures nulles (fig. 6.6). De plus, il apparaît à la figure 6.7 que plus le pourcentage de captures doublonnées est important, plus le pourcentage de captures nulles est faible. Les répétitions spatiales des opérations de pêche permettraient de diminuer le pourcentage de PUE nulle. De ce fait, les puissances locales de pêche relatives augmentent avec les pourcentages de doublons.

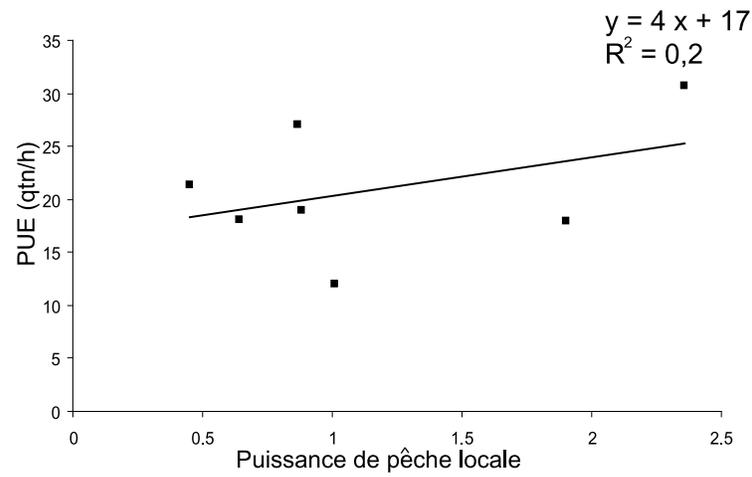


FIG. 6.4 – PUE moyennes en fonction des puissances locales de pêche.

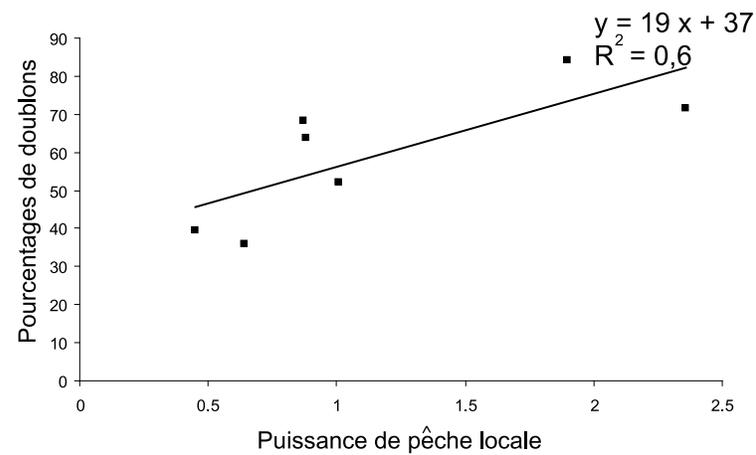


FIG. 6.5 – Pourcentages de captures doublonnées en fonction des puissances de pêche locales.

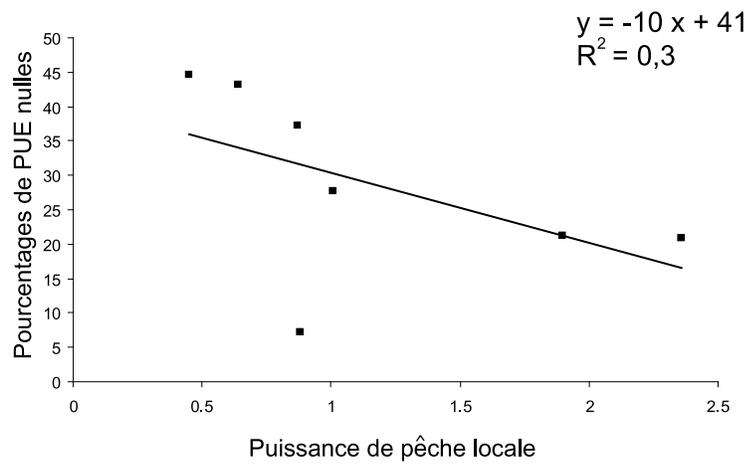


FIG. 6.6 – Puissance de pêche locale en fonction du pourcentage de captures nulles.

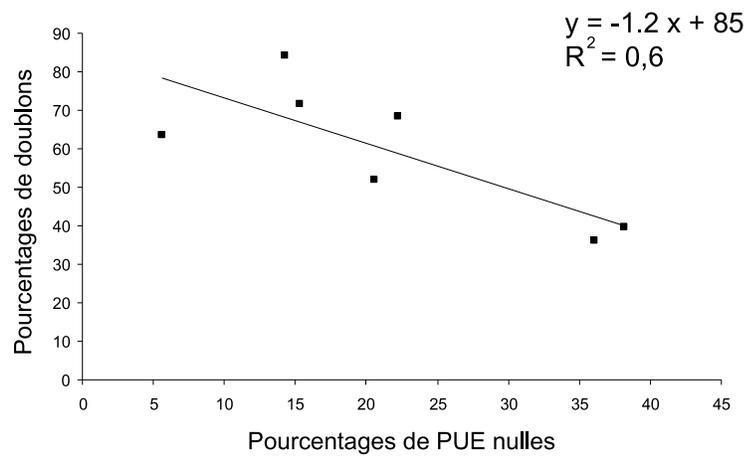


FIG. 6.7 – Pourcentages de captures doublonnées en fonction des pourcentages de PUE nulles.

6.3 Estimation à l'aide d'une analyse de variances

L'analyse de variance recouvre un ensemble de technique de tests et d'estimation destinés à apprécier l'effet de variables qualitatives sur une variable numérique. On note Y_i la variable réponse pour l'observation j et x_{ij} les variables explicatives pour l'observation j . Pour le cas présent, on cherchera à exprimer le $\log(PUE + 1)$ en fonction d'une combinaison linéaire de différentes variables discrètes. Dans un souci d'opérationnalité de la méthode, la non linéarité des relations entre les variables explicatives et la variable réponse, en l'occurrence les PUE, sur l'ensemble des valeurs de chaque variable peut être résolue par la discrétisation des variables explicatives. Six variables explicatives ont été testées :

- 1 la distance inter-chalutage (*DIC*) discrétisée en 4 classes :
 - la première classe concerne les *DIC* strictement inférieures à 4 miles nautiques ;
 - la seconde classe concerne les *DIC* comprises entre 4 et 10 miles nautiques ;
 - la troisième classe concerne les *DIC* comprise entre 10 et 20 miles nautiques ;
 - la dernière classe concerne les *DIC* supérieures à 20 miles nautiques.
- 2 le navire avec une classe pour chaque navire ;
- 3 le secteur de pêche avec 3 secteurs définis (fig. 6.8) ;
- 4 la profondeur discrétisée en 6 classes :
 - les profondeurs inférieures à 200 mètres ;
 - les profondeurs comprises entre 200 et 300 mètres ;
 - les profondeurs comprises entre 300 et 400 mètres ;
 - les profondeurs comprises entre 400 et 500 mètres ;
 - les profondeurs comprises entre 500 et 600 mètres ;
 - les profondeurs supérieures à 600 mètres ;
- 5 un effet jour/nuit ;
- 6 un effet mois ;

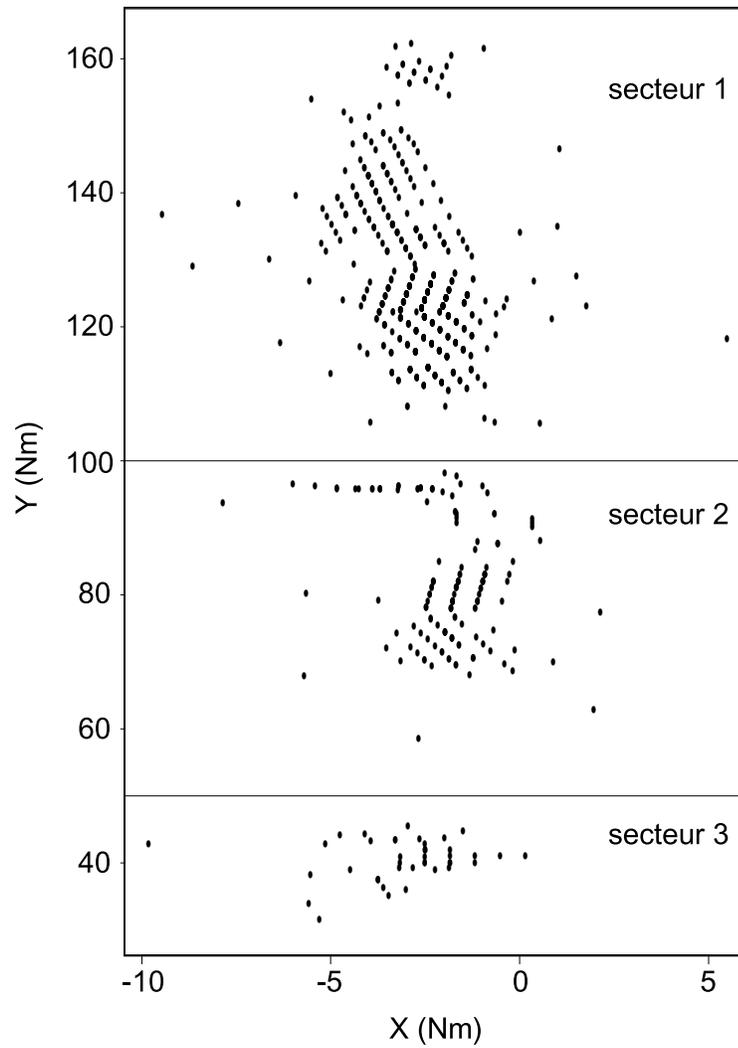


FIG. 6.8 – Localisations des zones utilisées lors de l'analyse GLM. En X, la direction perpendiculaire aux accores et en Y la direction parallèle aux accores.

Une analyse de variance classique permet de mettre en évidence les effets les plus significatifs (tab. 6.2).

Effets testés	Degrés de liberté	Pourcentage expliqué	Facteur F	Pr(F)
tactique	3	63	21,7	0,0000
bateau	6	13	4,7	0,0001
secteur	3	18	5,9	0,0028
profondeur	2	5	1	0,3560
jour/nuit	1	0	0	0,8862
mois	3	1	0,1	0,9108

TAB. 6.2 – Analyse de variance des $\log(PUE+1)$ de la zone 1 au cours de l'été 1986-87.

Au vue des résultats, les effets *profondeurs*, *jour/nuit* et *mois* n'ont pas été retenus, seuls les effets *tactique*, *bateau* et *secteur* ont été conservé pour la phase d'estimation. Dans le cas du modèle linéaire général, nous sommes amenés à poser le modèle :

$$\log(PUE + 1) = \beta_0 + \beta_1.tactique + \beta_2.bateau + \beta_3.secteur + \epsilon$$

L'estimation des effets retenus a été réalisée à l'aide du modèle linéaire général. Les résultats sont présentés au tableau 6.3.

Le modèle permet d'estimer la puissance de pêche relative de chaque navire (tab. 6.4). A titre de comparaison, les puissances locales de pêche estimées à partir de la méthode "Laurec" sont rappelées. La méthode basée sur l'analyse de variance ou modèle linéaire général différencie uniquement le navire 38 des autres navires (fig. 6.10). Pour les 6 autres navires, les puissances estimées fluctuent autour de 1 et ne permettent pas de conclure quant à des différences significatives entre les navires. Les différences entre les puissances estimées à l'aide de la méthode Laurec sont plus importantes qu'avec la méthode du modèle linéaire général (CV). La méthode Laurec estime les puissances de pêche locales à partir des couples de PUE réalisées le même jour par des navires différents dans un rayon de 10 miles nautiques. Cette méthode prend donc en compte la variabilité des données, alors que la méthode GLM utilise une régression pour estimer les différents effets. Pour la méthode Laurec, les couples de PUE distants de plus de 10 miles nautiques ne sont pas pris en compte lors de l'estimation des puissances de pêche alors que pour la seconde méthode les secteurs délimité sont importants et permettent de prendre en compte des PUE distantes de beaucoup plus de 10 miles nautiques. La méthode du modèle linéaire général réalise donc implicitement un lissage lors des estimations et permet donc uniquement de différencier des navires présentant des puissances de pêche locales très différentes. La méthode Laurec revêt un caractère plus local que la méthode du modèle linéaire généralisé.

<i>DIC</i>	coefficient du modèle	écart type
$DIC < 4Nm$	0	
$4Nm < DIC \leq 10Nm$	-0,13	0,06
$10Nm < DIC \leq 20Nm$	-0,23	0,05
$DIC > 20Nm$	-0,18	0,04
moyenne	-0,13	
Code bateau	coefficient du modèle	écart type
19	0	
38	0,39	0,09
41	-0,05	0,07
43	-0,05	0,05
44	0,03	0,05
45	0,07	0,03
46	-0,01	0,02
moyenne	0,05	
Secteur	coefficient du modèle	écart type
secteur Nord	0	
secteur Centre	-0,02	0,13
secteur Sud	0,15	0,05
moyenne	0,04	

TAB. 6.3 – Coefficients obtenus à partir du modèle linéaire général.

Code bateau	Estimations des puissances de pêche locales relatives	
	Modèle linéaire générale	Méthode "Laurec"
19	1	0,87
38	1,48	2,36
41	0,95	1,01
243	0,95	0,45
44	1,03	0,64
45	1,07	0,88
46	0,99	1,9
CV	0,17	0,6

TAB. 6.4 – Comparaison des estimations des puissances de pêche locales relatives obtenues à partir de deux méthodes différentes.

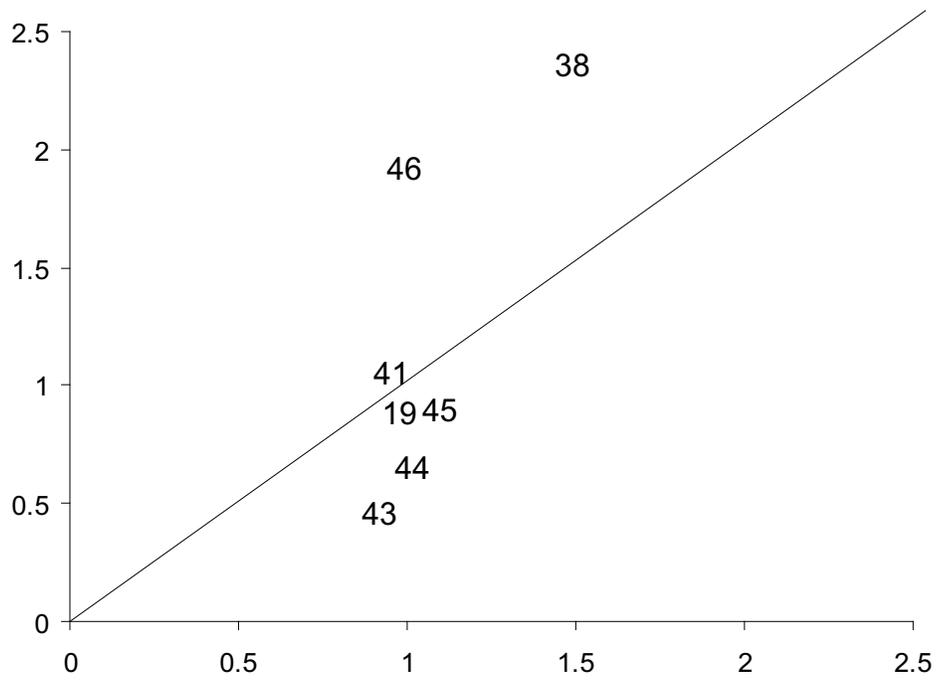


FIG. 6.9 – Comparaison des puissances de pêche locales obtenues pour chacune des méthodes employées. Le code des navires est reporté sur la figure.

6.4 Conclusions

Contrairement à la puissance de pêche globale, la puissance de pêche locale ne prend pas en compte la capacité des pêcheurs à exploiter les secteurs les plus riches de la zone prospectée, mais leurs capacités à prélever du poisson pour une zone géographique donnée présentant une densité donnée. Dans cette optique, on ne peut travailler que sur des densités identiques, c'est à dire comparer des PUE réalisées par des navires étant proches dans l'espace et le temps. Laurec (1977) a montré qu'à partir d'une information suffisamment détaillée, l'information est connue pour chaque opération de pêche (PUE, position géographique, date, ...), il est possible de déterminer les puissances de pêche locales relatives entre navires.

La zone du fer à cheval et l'été 1986-87 ont été retenues pour cette étude. Les puissances de pêche locales relatives ont été estimées pour 7 navires. Il est apparu que les répétitions spatiales des opérations de pêche permettraient de diminuer le pourcentage de PUE nulle. De ce fait, les puissances locales de pêche relatives augmentent avec les pourcentages de doublons.

La méthode du modèle linéaire général semble réaliser une étude plus globale au vu des résultats. Seul un navire se distingue des six autres par une puissance de pêche plus grande. Par contre, la méthode "Laurec" prend en compte la variabilité des données et permet donc de différencier des navires présentant des puissances de pêche du même ordre de grandeur. De plus, la non linéarité des relations entre les variables explicatives et la variable réponse a nécessité une discrétisation des variables explicatives.

Chapitre 7

Etude des PUE après traitement de la variabilité locale intra et inter bateaux

Sommaire

Afin d'utiliser l'ensemble des PUE réalisées par les navires commerciaux pendant l'été 1986-87 au sein de la zone du fer à cheval, les PUE ont été standardisées par les puissances de pêche estimées précédemment. Ainsi, il a été possible de déterminer et de modéliser la structure spatiale de la légine pour la zone et la période choisies. Une cartographie représentant l'indice d'abondance de la légine a été obtenue par krigeage permettant de distinguer une zone de forte abondance.

7.1 Répartition spatiale de la légine au sein de la zone du fer à cheval

Afin de traiter la variabilité locale inter-bateau, les PUE ont été standardisées par les puissances locales calculées précédemment (méthode Laurec). La période d'étude s'étendant d'octobre à janvier, seuls les couples de PUE séparées par au plus de 7 jours ont été utilisés lors du calcul du variogramme expérimental. Cette contrainte permet de ne pas comparer des PUE réalisées à des intervalles de temps trop grands. Le variogramme résultant est présenté à la figure 7.1. La variabilité locale intra et inter-bateaux a été traitée. Le modèle proposé pour ce variogramme est le suivant :

- un effet de pépité de 3900 ;
- un modèle sphérique de palier 3100 et de portée 3,3 miles nautiques.

Le modèle sphérique a été préféré au modèle linéaire au vue des valeurs prises par le variogramme pour des distances comprises entre 3 et 5 miles nautiques. Il apparaît que l'effet de pépité est très important, et la portée du modèle est très courte. Ces caractéristiques signifient que la légine est peu structurée dans l'espace

(cf. étude du support, chapitre 2).

Afin de ne pas utiliser des PUE trop espacées dans le temps, un krigeage par semaine a été réalisé. La période sélectionnée recouvre 15 semaines et a été divisée en sous-périodes de 7 jours. 15 cartes krigées ont été obtenues. La méthode de krigeage utilisée est un krigeage ordinaire à moyenne inconnue avec un voisinage glissant de dimensions 10 miles nautiques en direction est-ouest et de 30 miles nautiques en direction nord sud. La grille de krigeage utilisée a été construite dans le système de coordonnées polaires (longitudes, latitudes), avec un pas de 1 mile nautique pour les deux directions (nord-sud, est-ouest). Puis chaque nœud de la grille a été projeté le long des accores du plateau. Le grille de krigeage utilisée est donc la grille projetée, car le modèle de variogramme a été déterminé à l'aide des données projetées. Au vu du faible nombre de PUE réalisées au cours d'une semaine, nous avons opté pour un grand voisinage de krigeage comme le montre la figure 7.2, afin de prendre en compte le plus de points expérimentaux lors des estimations. Pour chaque carte krigée et chaque nœud de la grille, une estimation de l'indice d'abondance et une variance de krigeage sont calculées. Les variances de krigeage offrent un critère de qualité concernant l'estimation, carte hebdomadaire par carte hebdomadaire. La figure 7.3 représente l'histogramme des variances de krigeage de tous les nœuds de la grille pour les 15 cartes krigées. On observe une bimodalité dans la distribution des variances de krigeage, voir une trimodalité si on considère l'atome représenté par les variances égales à 14 000 (deux fois la valeur du palier du modèle). Une variance de 14 000 est obtenue lorsqu'il y a un seul point dans le voisinage de krigeage. Les fortes variances de krigeage correspondent aux extrémités de la zone krigée, c'est à dire aux extrapolations de krigeage qui sont symbolisées en rouge sur la figure 7.2. En d'autres termes, l'indice d'abondance de la légine à ces positions est estimé à partir de très peu de points expérimentaux. Les estimations présentant une variance de krigeage supérieure à 10 000 ont donc été écartées.

Une carte moyenne est ensuite produite en calculant, pour chaque nœud de la grille, la moyenne de l'indice d'abondance sur la période étudiée. Avec n , le nombre de semaines où le noeud de la grille a pu être estimé, $z_i^{ko}(x)$ la valeur krigée à l'aide d'un krigeage ordinaire à la position x de la $i^{\text{ème}}$ semaine.

$$Z^{ko}(x) = \frac{\sum_i^n z_i^{ko}(x)}{n}$$

La variance quant à elle ne se déduit simplement des cartes hebdomadaires que sous hypothèse d'indépendances de ces dernières. La carte proposée à la figure 7.4 présente l'estimation de la moyenne de l'indice d'abondance de la légine au sein de la zone du fer à cheval au cours des mois d'octobre 1986 à janvier 1987. Il s'agit donc de la moyenne des 15 cartes krigées. Les cartes krigées ont été obtenues à partir des PUE de légine obtenues après le traitement de la variabilité locale intra-bateau et pondérées par la puissance de pêche globale. Il ne s'agit donc plus de PUE mais d'indice d'abondance. La cartographie obtenue permet d'identifier la répartition spatiale de la légine au sein de la zone et de la période d'étude mais ne permet pas d'estimer l'abondance de la ressource. Un agrandissement du secteur le plus fréquenté par les pêcheurs est présenté à la figure 7.5. Ce secteur est le plus riche de la zone 1 et se situe autour de 49 degrés de et 30 minutes de latitude sud.

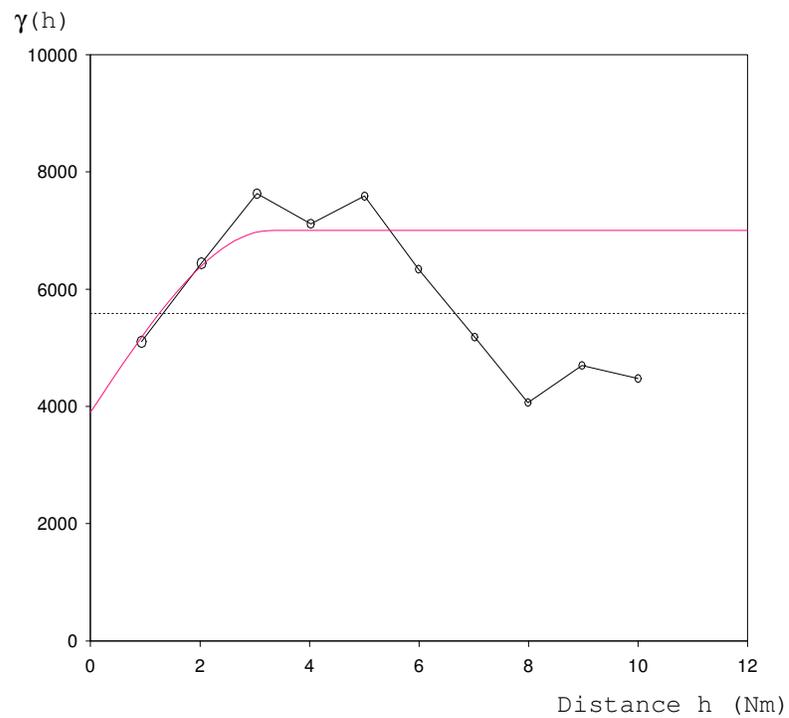


FIG. 7.1 – Variogramme des PUE de la zone 1 après transformation par les puissances locales. Le modèle de variogramme est représenté

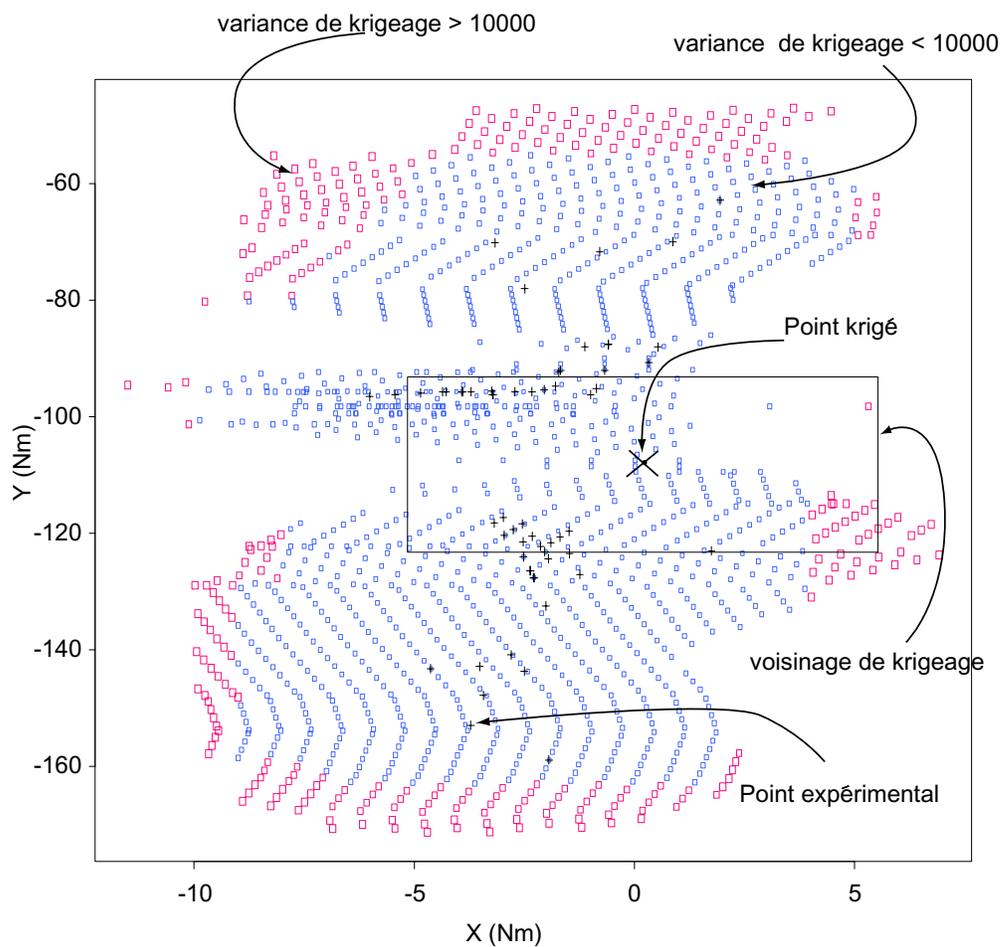


FIG. 7.2 – Représentation symbolique de la variance de krigage de la première semaine. La surface des carré est proportionnelle à la variance de krigage. En rouge les variances de krigage > 10000 et bleu < 10000. Les croix noires symbolisent les points expérimentaux.

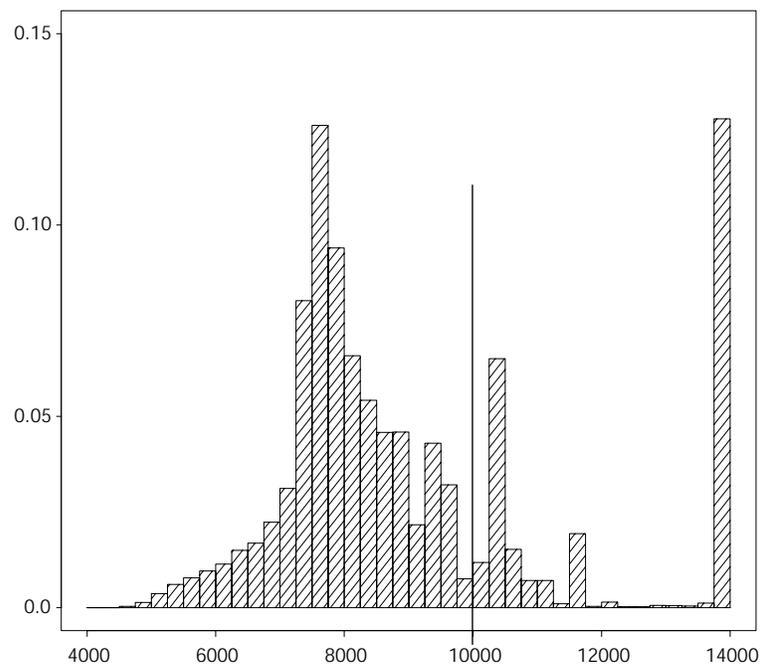


FIG. 7.3 – Histogrammes des variances de krigeage des 15 cartes (en fréquences).

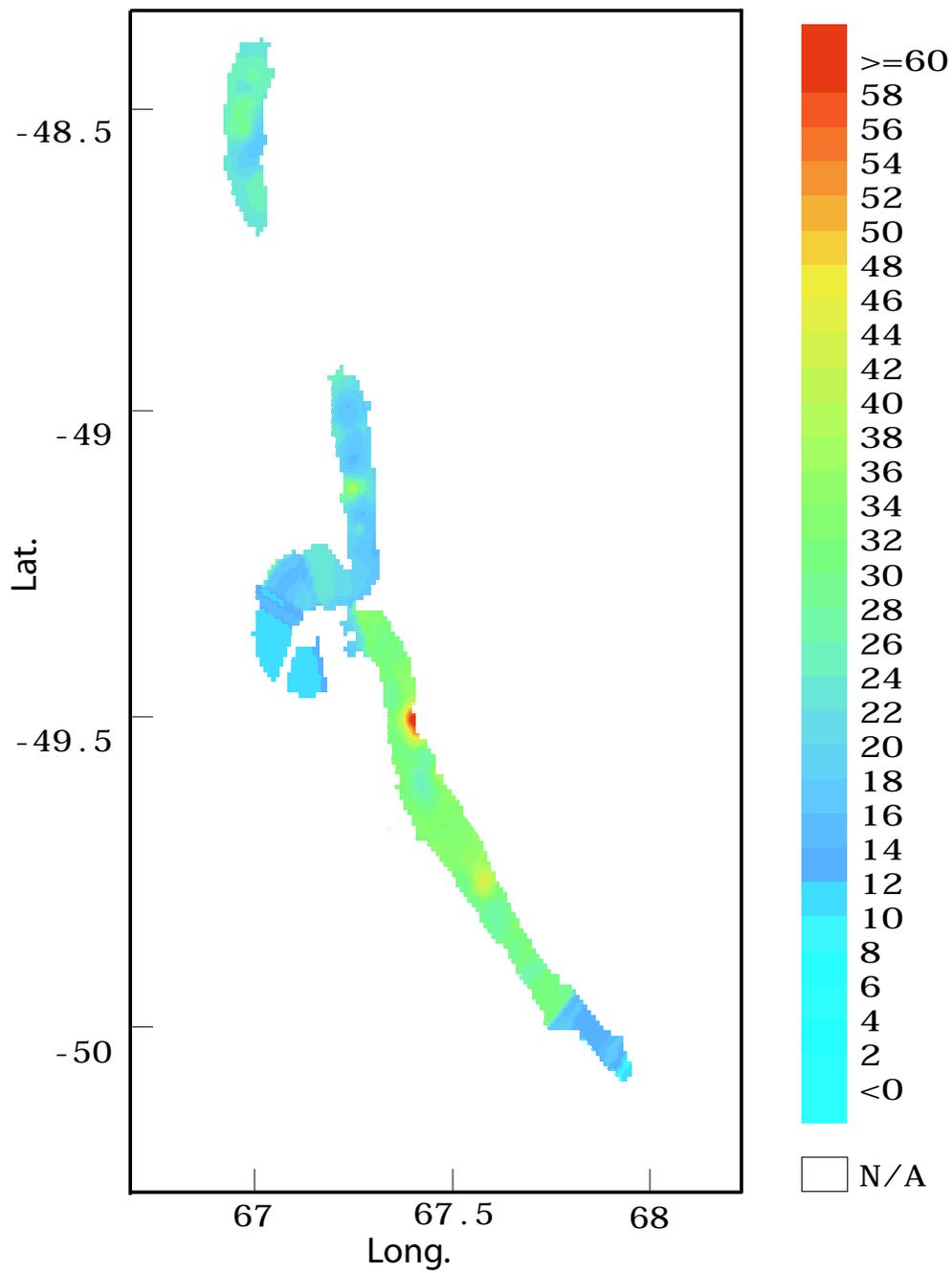


FIG. 7.4 – Moyenne de l'estimation de l'indice d'abondance de légine par krigeage.

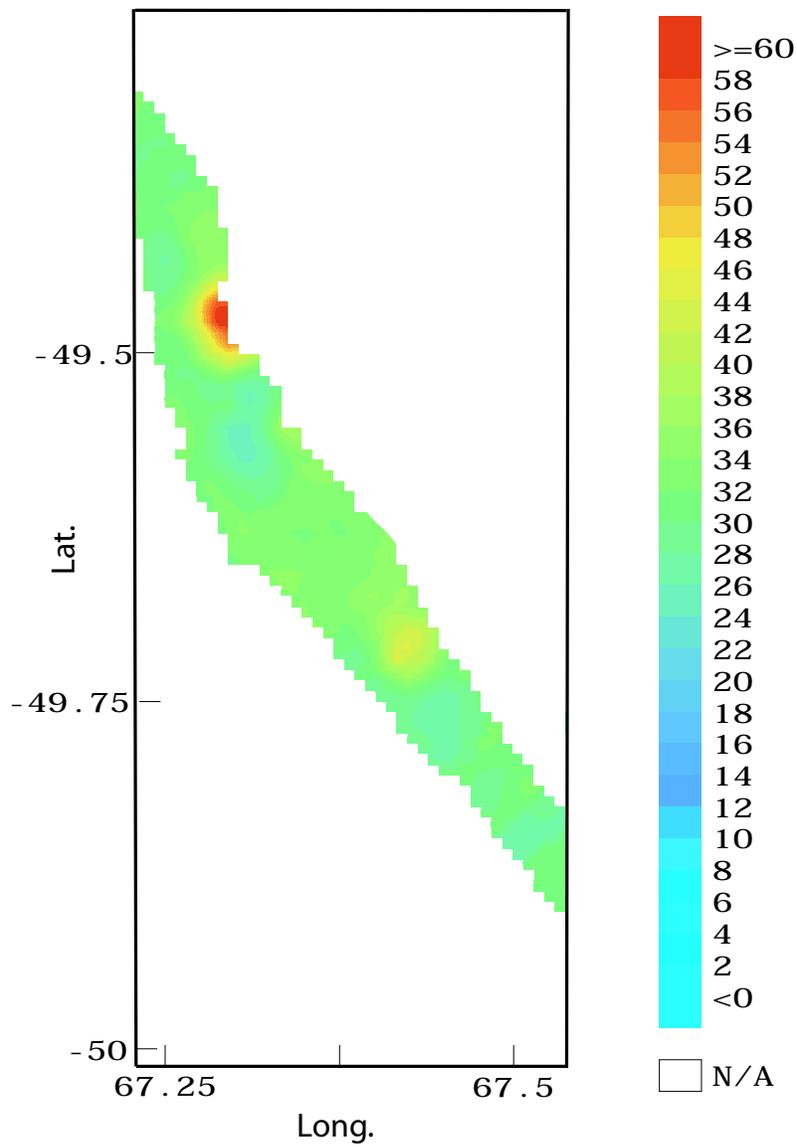


FIG. 7.5 – Moyenne de l'estimation de l'indice d'abondance de légine par krigage, agrandissement de la région centrale.

7.2 Bilan du traitement de la variabilité locale

Pour l'étude présentée ici, l'analyse des PUE doublonnées a permis de mettre en évidence un effet d'épuisement local de la ressource en moyenne ou du moins une diminution de l'abondance locale. Cet effet a pour conséquences :

- deux PUE réalisées par un navire à la même position géographique ne sont pas représentatives de la même abondance locale ;
- une augmentation artificielle de la variabilité locale induisant des variogrammes expérimentaux décroissants à l'origine.

Le traitement de cette variabilité locale intra-bateau présentée, à la troisième partie, a permis de diminuer la variance et d'obtenir un variogramme croissant à l'origine. L'estimation des puissances locales de pêche a permis de standardiser les PUE et donc d'utiliser l'ensemble des PUE réalisées par les navires commerciaux. A partir des PUE standardisées, une structure spatiale de la légine a pu être identifiée au sein de la zone du fer à cheval pendant l'été 1986-87. Le modèle de variogramme retenu présente un effet de pépité important soulignant la faible structuration dans l'espace de cette espèce. Une cartographie de l'indice d'abondance de la légine met en évidence une zone riche autour de 29 degrés de latitude sud.

Cinquième partie

Retour sur analyse : Bilan méthodologique et interprétations halieutiques

Chapitre 8

Retour sur analyse : bilan méthodologique et interprétations halieutiques

Sommaire

Ce chapitre a pour but de revenir sur les différents résultats et concepts énoncés au cours de cette thèse. Dans un premier temps, un retour sur les interprétations halieutiques est présenté. Les causes et les conséquences des différentes tactiques ou des comportements de pêche seront reprises, ainsi que la nécessité de la standardisation des PUE. Dans un second temps, un bilan méthodologique est réalisé. L'accent sera mis sur l'inadaptation du variogramme pour l'étude de PUE commerciales.

8.1 Interprétations et incidences halieutiques

La notion d'effort de pêche est primordiale en halieutique, car elle est la base de nombreux diagnostics concernant l'état des stocks. La gestion de l'effort est généralement considérée comme un moyen de régulation de l'activité de pêche. Les estimations de stocks sont basées sur la relation linéaire qui relie les PUE à l'abondance. Cependant, un grand nombre de travaux ont montré que les PUE et l'abondance n'évoluent pas nécessairement de façon linéaire. Cette non linéarité est généralement attribuée à différents phénomènes, comme l'hétérogénéité spatiale de la ressource, les stratégies de pêche employées par les pêcheurs ou les puissances de pêche des différents navires. Ces trois paramètres sont étroitement liés et donc interagissent ensemble. Par exemple une stratégie de pêche peut être rendue obligatoire par le métier utilisé et donc conditionner la distribution spatiale de l'effort.

Les différentes puissances de pêche engendrées par les différences d'efficacité entre les engins de pêche et par les différents niveaux d'équipement embarqué (sonar, GPS, ...), ou par les caractéristiques des navires (taille, puissance moteur, vétusté, ...) représentent certainement le paramètre ayant l'influence la plus évidente sur les niveaux de captures globales. Un nombre important de travaux ont été menés sur les efficacités des engins de pêche et leur évolution dans le temps. A titre d'exemple, nous citerons une étude réalisée pour la pêcherie finlandaise de hareng, où Rahikainen et Kuikka (2001) ont montré que la taille moyenne des engins de pêche a presque triplé en 20 ans et que cette augmentation coïncidait avec l'accroissement de pouvoir de capture de la flotille. Il résulte de ce constat que les modèles calibrés à partir des PUE donnent lieu à des erreurs et qu'il est nécessaire d'utiliser des procédures de standardisation permettant de quantifier l'effort de pêche en tenant compte des caractéristiques des navires et de leur évolution. Ainsi, l'effort de pêche nominal est fréquemment standardisé (effort effectif) et s'exprime en heure de pêche d'un bateau ou d'un type de navire référence. Cependant, l'impact engendré par une innovation telle que le GPS est difficilement quantifiable. Ce type d'équipement offre la possibilité aux pêcheurs de modifier leur tactique de pêche, mais n'a pas d'influence directement mesurable sur l'efficacité des navires. Pour la pêcherie des Kerguelen, cette technologie a permis aux pêcheurs de réaliser un nombre important de doublons et donc de modifier leurs répartitions spatiales et leur niveaux de captures.

Les estimations de stocks ignorent le plus souvent les réactions dynamiques des pêcheurs vis à vis des évolutions de la ressource, qu'elles soient d'ordre quantitative (abondance) ou qualitative (distribution spatiale) (Hilborn et Walters, 1992). Entre autre, la distribution spatiale de l'effort de pêche est rarement prise en compte, or son hétérogénéité est une des raisons avancées de la non linéarité de la relation entre abondance et PUE. Que ce soit pour la flotille de pêche des Kerguelen ou la flotille péruvienne, nous avons observé l'hétérogénéité de la distribution dans l'espace de l'effort de pêche. Comme il a été énoncé lors de la présentation des deux chantiers d'étude, ces deux pêcheries s'opposent pour un nombre important de critères, comme le métier utilisé, les espèces ciblées (pélagique et démersales, prédateurs ou proies, la valeur ajoutée...), les volumes de captures, ... Le fait d'observer la non uniformité de la distribution spatiale de l'effort pour ces deux pêcheries incite à penser que ce phénomène est présent pour la grande majorité des pêcheries. A l'heure actuelle, les moyens d'observations permettent de quantifier de façon fine et routinière ces phénomènes. Par exemple, Jennings et al. (1999) ont mis en évidence pour les pêcheries de mer du Nord, l'hétérogénéité de la distribution de l'effort de pêche dans l'espace et les fortes concentrations de navires au sein de zones relativement réduites. De 1990 à 1995, l'effort de pêche total annuel était inférieur à 2000 heures pour 29% des rectangles statistiques et inférieures à 10 000 heures pour 66% d'entre eux. Pour 4% des rectangles statistiques il excède 40 000 heures. Ces chiffres soulignent l'importance de l'hétérogénéité spatiale des pêcheurs.

Contrairement aux PUE issues des campagnes scientifiques, les PUE commerciales ne sont pas réparties aléatoirement dans l'espace mais dépendent d'un nombre important de paramètres. A titre d'exemple, nous citerons la pêcherie péruvienne, où les pêcheurs exploitent les individus les plus proches de la côte. Dans un souci de rentabilité, les pêcheurs limitent leurs déplacements entre les lieux de pêche et le port, tant que les niveaux de captures sont suffisants. Le contexte économique d'une pêcherie influe donc sur la répartition spatiale des pêcheurs. L'abondance du stock et les facteurs économiques (prix de vente des différentes espèces, prix du fuel, ...) sont les bases sur lesquelles le pêcheur s'appuie pour ses prises de décision. En 1991, D. B. Sampson a montré à l'aide de deux modèles, la relation de dépendance entre l'abondance

du stock, des facteurs économiques et les localisations des captures. Pour le cas du Pérou, le suivi des centres de gravités de la population d'anchois et de l'effort de pêche au cours du temps a mis en évidence l'étroite relation entre les facteurs économiques et la répartition spatiale des pêcheurs. Lors de la présence du phénomène "El Niño", le stock d'anchois décroît fortement et permet au stock de sardines de prospérer. En réponse les pêcheurs modifient leur espèce cible en focalisant leur effort sur la sardine et modifient donc leur répartition spatiale, car l'aire de répartition de la sardine se trouve plus au large que celle de l'anchois. L'adaptation des pêcheurs aux différents niveaux d'abondance des espèces montre clairement leur forte capacité de réaction face aux évolutions possibles des différents stocks. Ne pas prendre en compte cette capacité de réaction des pêcheurs risque d'entraîner des constats erronés lors des estimations de stock. Comme par exemple, conclure à une augmentation de l'abondance de la population de sardines en situation "El Niño".

L'identité de chaque pêcherie est définie par différents paramètres qui interagissent et qui ont une influence direct sur le comportement des pêcheurs. La répartition spatiale des opérations de pêche est en partie liée aux paramètres suivants :

- le métier pratiqué et la ou les espèces exploitées ;
- le niveau technologique de la flottille de pêche (taille des navires, engin de pêche, électronique embarquée, ...);
- contexte économique de la pêcherie (cours des différentes espèces, prix du carburant, ...) ;
- les niveaux d'abondance des différentes stocks ;
- l'ancienneté de la pêcherie qui conditionne les niveaux d'abondance, le niveau de connaissance des pêcheurs vis à vis de la zone et de la ressource ainsi que le comportement des poissons vis à vis de la pression de pêche.

Cette énumération n'a pas pour but d'être exhaustive mais d'éclairer le lecteur vis à vis du nombre important et de la grande variabilité des paramètres présentant une influence sur le comportement des pêcheurs et donc de la complexité de l'analyse des PUE commerciales. Une innovation telle que le GPS a été cité comme étant une des causes de la répétition des opérations de pêche. De même, le type d'engin de pêche impose des contraintes aux pêcheurs. Ainsi, dans la zone de fer à cheval des îles Kerguelen, la pêche au chalut est dangereuse alors qu'il s'agit de la zone la plus riche. Nous avons montré que la diminution de la prise de risque des pêcheurs entraînait une diminution de l'exploitation de cette zone. Le métier pratiqué impose des contraintes aux pêcheurs vis à vis des zones et des espèces exploitables.

Les stratégies de pêche influencent les niveaux de captures, et leur prise en compte semble nécessaire lors des estimations de stock. Les deux tactiques de pêche définies pour les navires commerciaux présents sur la zone des Kerguelen présentent des niveaux de captures différents. La tactique basée sur l'épuisement local de la ressource est plus efficace en terme de captures ainsi qu'en terme de puissance de pêche locale. Il semble possible d'envisager qu'il existe un phénomène de coopération entre les tactiques. Une partie des navires prospecte (nous qualifierons ces navires employant la tactique 2 de prospecteurs) la zone à la recherche des localisations les plus riches pendant que les autres navires exploitent intensivement ces positions (les navires de tactique 1 ont été qualifiés d'exploiteurs). Dans le cadre de la pêcherie chalutière de poissons démersaux en mer du Nord, Rijnsdorp et al. (2000) a montré que la campagne d'un navire se décompose en deux phases distinctes, une phase d'exploration et une phase d'exploitation. La phase d'exploration est

caractérisée par un faible taux de captures et de longues distances entre les opérations de pêche, tout comme la tactique exploratoire définie dans cette thèse. Inversement, la phase d'exploitation est caractérisée par un taux de captures supérieures et des distances inter-chalutage plus faibles (tactique basée sur l'épuisement local de la ressource). On retrouve les critères définissant les deux tactiques employées par les pêcheurs des Kerguelen, à la différence que pour, la mer du nord, chaque navire réalise sa propre prospection. Cette différence suggère qu'il existe une compétition entre les navires de mer du nord et une coopération entre les navires des Kerguelen. Il semble nécessaire de traiter séparément les PUE réalisées pour chacune des phases ou pour chacune des tactiques. Au cours de la phase d'exploitation, l'effort de pêche est limité à des zones réduites, ce qui entraîne un effet de co-localisations des opérations de pêches. A partir des PUE doublonnées des Kerguelen, nous avons mis en évidence un effet d'épuisement local moyen de la ressource, avec une diminution de 10% de taux de capture entre chaque PUE successives doublonnées réalisées par le même navire. De même, Rijndrop et al. (2000) ont montré que pendant l'exploitation de concentrations locales de la ressource, le taux de captures d'un navire décroît en moyenne de 10% sur une période de 48 heures. Les PUE co-localisées ou doublonnées ne sont donc pas représentatives de la même abondance locale. Inversement, au cours de la phase d'exploration, les opérations de pêches sont distantes les unes des autres et sont donc, sous réserve d'une capturabilité constante, représentatives des abondances locales. La non prise en compte de l'épuisement local de la ressource risque de sous estimer l'abondance de la ressource. De Oliveira et al. (1999) ont utilisé des captures successives co-localisées afin de comparer la PUE moyenne obtenue en prenant en compte l'effet d'épuisement ou non. La prise en compte de l'épuisement local de la ressource augmente la PUE moyenne. Cependant, il s'avère que la différence entre les deux PUE moyennes n'est pas significative. Les PUE co-localisées sont réalisées au sein de zones à priori riches en poissons. Les PUE correspondantes sont donc dans l'ensemble plus fortes que les PUE des autres secteurs, moins riches, et compensent l'effet d'épuisement.

La répartition spatiale de la ressource n'est pas seule responsable de l'hétérogénéité spatiale des pêcheurs. La réglementation en vigueur dans une pêcherie impose des contraintes importantes aux pêcheurs, que ce soit au niveau de quotas de pêche, de la taille autorisée de capture, des zones exploitables, ... L'évolution ou des changements intervenant dans la réglementation modifient les comportements de pêche, de façon à ce que le pêcheur maximise ses captures tout en respectant cette dernière. Pour la pêcherie des Kerguelen, le passage d'un quota global imposé à tous les navires à des quotas individuels a incité les pêcheurs à prendre moins de risque, en d'autres termes à adopter une gestion de leurs campagnes de pêche dite en bon "père de famille". Ce comportement est mis en évidence par les différences de distribution de l'efficacité locale de pêche. La mise en place des quotas individuels est en partie responsable du resserrement de la distribution de l'efficacité locale de pêche, et donc du changement de comportement du pêcheur. Au cours des années 1995-97, la part des PUE doublonnées a augmenté. Cette modification de la réglementation est aussi responsable de la diminution de la part des opérations de pêche réalisées au sein de la zone du fer à cheval ; cette zone étant risquée pour l'engin de pêche. En réponse à l'augmentation de la part des PUE doublonnées, les autorités en charge de la gestion des ressources halieutiques des îles Kerguelen ont imposé une nouvelle réglementation visant à limiter le nombre de jours pêche successifs au sein d'une zone afin d'éviter d'épuiser localement la ressource. En 1997, M. W. Dorn a étudié, dans le cadre de la pêche au merlu du Pacifique (*Merluccius productus*), le changement de comportement de pêche d'un navire durant une période d'interdiction provisoire de la pêche nocturne. L'enchaînement des opérations de mise à l'eau, de pêche et de remontée du chalut a été modélisé en appliquant un coût différent à chacune. Durant la pé-

riode où la pêche a été interdite la nuit, les bateaux ont accumulé plus de poisson le jour, et les revenus nets quotidiens n'ont pas baissé dans une mesure significative. Si les autorités de réglementation ne tiennent pas compte des contraintes et des arrangements qui caractérisent l'exploitation des bateaux de pêche, leurs objectifs pourraient n'être pas réalisés ou avoir des effets nuisibles inattendus.

Tout comme le comportement des pêcheurs, l'abondance des stocks et le comportement de la ressource évoluent au cours du temps. Premièrement, les poissons réagissent vis à vis de la pression exercée par la pêche. Un nombre important d'études ont mis en évidence les capacités de réaction des poissons vis à vis de l'engin de pêche. Pour le métier en question, le chalut, C. B. Bublitz a mis en évidence deux comportements distincts d'évitement de poissons démersaux, caractérisés par un changement brusque de direction de 180 degrés des poissons. Les engins de pêche suivant leurs caractéristiques présentent des efficacités différentes. M. K. Broadhurst (1996) a comparé les efficacités de différents type de maillage, et Glass et Wardle ont mis en évidence que la proportion de poissons évitant le chalut était faible mais augmentait avec l'addition d'un tunnel noir. Les espèces réagissent différemment vis à vis de l'engin de pêche (Craig et Nunnallee, 1998 ; Suuronen, Lethonen, et Wallace, 1997). Ainsi, Dremière et al. (1999) ont mis en évidence l'importante variabilité des échappements selon la taille des individus d'une même espèce. Il est apparu par exemple que le chinchard (*Trachurus sp.*) a une meilleure résistance quant à la capacité de nage vers l'avant à l'intérieur du chalut que le sparailon (*Diplodus annularis*). Des comportements d'échappement différents selon la taille ou l'espèce entraînent que la composition spécifique et les distributions de longueurs des poissons pour une opération de pêche ne reflètent pas exactement les distributions réelles de tailles et d'espèces.

Deuxièmement, le niveau d'abondance du stock a une influence sur la capturabilité. Cette relation peut être qualifiée de relation de densité-dépendance. De nombreux travaux (MacCall, 1976 ; Pitcher, 1995 ; MacKinson et al., 1997) ont mis en évidence que la capturabilité était inversement proportionnelle à l'abondance du stock. Donc considérer la capturabilité comme constante sur l'ensemble de la zone risque d'entraîner des erreurs lors des estimations de stock.

Suite à ces différentes études et résultats, il est donc nécessaire de tenir compte de l'espèce ciblée lors des estimation de stock. Pour cela la pêcherie des Kerguelen s'est avérée être un chantier d'investigation idéal du fait de la monospécificité des opérations de pêche. Ainsi, il a été montré qu'une stratégie basée sur l'épuisement locale de la ressource est plus préjudiciale au poisson des glaces qu'à la légine. Cette différence de sensibilité est en grande partie due à la forte grégarité du poisson des glaces. Les différents engins de pêche sont plus ou moins efficaces suivant l'espèce ciblée mais la tactique de pêche employée s'avère elle aussi être plus ou moins efficace en fonction de la biologie de l'espèce ciblée. Rijnsdorp et al. (2000) cite les changements de comportement des poissons en réponse à la pression de pêche et la diminution de l'abondance comme cause de la diminution des taux des PUE co-localisées. Ce phénomène que nous qualifierons d'apprentissage de la ressource permettrait aux poissons d'augmenter leur capacité d'évitement et donc de diminuer la capturabilité.

Le matériel embarqué (engin de pêche et équipement), les différents paramètres économiques de la pêcherie, les niveaux d'abondance du stock, le comportement des poissons vis à vis de l'engin de pêche et la réglementation en vigueur influent sur la répartition spatiale de l'effort de pêche et sur les tactiques

de pêche employées par les pêcheurs (fig. 8.1). Les pêcheurs s'adaptent à l'évolution des contraintes qui leur sont imposées que ce soit par la ressource (abondance, réactivité vis à vis de l'engin de pêche), ou par la pêcherie (réglementation, rentabilité des espèces ciblées, ...). Cette réactivité des pêcheurs fait que les plans d'échantillonnage sont très déséquilibrés, car les pêcheurs cherchent à maximiser leurs revenus. Les pêcheurs offrent donc "des plans qui vont à l'encontre des capacités d'analyse des variabilités spatio-temporelles" (Laloë et al. 2002) .

De plus, cette information est disponible sur la quasi totalité de l'année. L'étude des PUE commerciales, qu'elle soit quantitative ou qualitative permet par exemple d'évaluer la variabilité locale de la ressource, de mettre en évidence des phénomènes de saisonnalité, ou d'informer sur les stratégies de pêche employées et leurs impacts sur le stock afin d'adapter la réglementation. Petitgas et al. (1999) ont montré récemment que les informations fournies par les campagnes scientifiques et les captures commerciales sont complémentaires et améliorent l'estimation d'un stock donné. La variance des PUE commerciales peut apporter une aide non négligeable lors de l'estimation de l'abondance à partir de données scientifiques. La prise en compte de la répartition spatio-temporelle de l'effort semble donc nécessaire d'une part afin d'améliorer les estimations de stock et d'autre part d'adapter la réglementation aux stratégies de pêche.

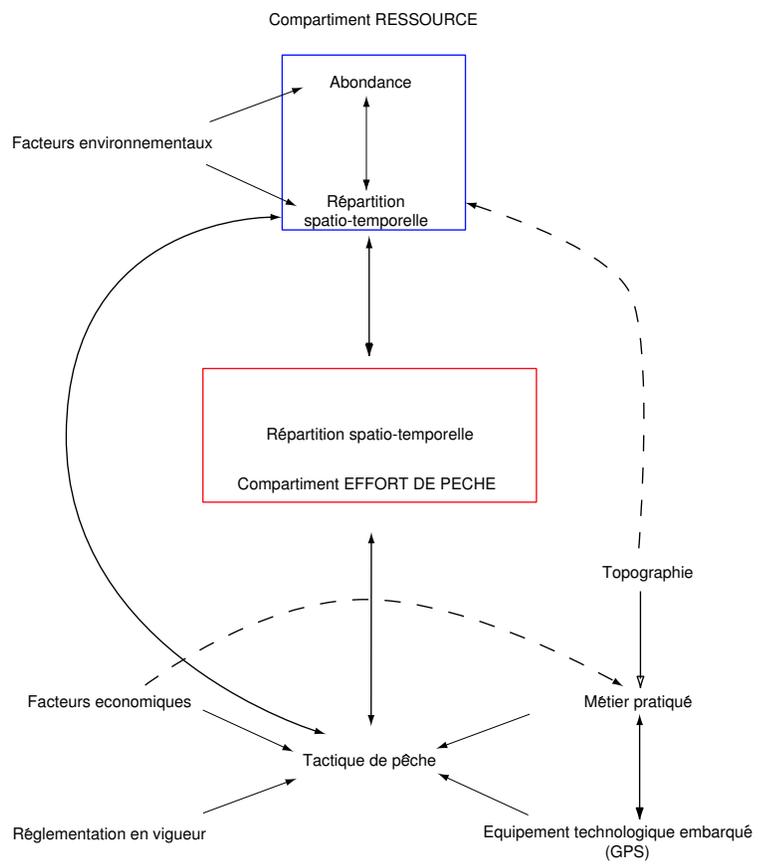


FIG. 8.1 – Schéma récapitulatif des relations pêcheurs-ressource mises en évidence.

8.2 Bilan méthodologique : Outils géostatistiques et PUE commerciales

La géostatistique fut développée par G. Matheron en 1960 pour estimer des ressources minières, et son application à l'estimation des ressources biologiques marines date de 1985 (Gohin, 1985 ; Conan, 1985 ; Laloë, 1985). Le premier intérêt de la géostatistique a été sa capacité à fournir une variance d'estimation de stock, afin d'évaluer les erreurs d'échantillonnage. Par la suite, les applications géostatistiques se sont multipliées et diversifiées en étant appliquées à différentes problématiques, comme l'analyse spatiale de données issues de campagnes acoustiques (Petitgas, 1991 ; Guiblin, 1997), aux statistiques individuelles (Bez, 1997 ; Bez, 2002). Depuis plusieurs années, les méthodes géostatistiques sont reconnues dans le domaine de l'halieutique. Cependant, les applications de la géostatistique à des PUE commerciales restent rares, et ce principalement pour les problèmes de plans d'échantillonnage évoqués précédemment.

8.2.1 Référentiel spatial de la ressource

Chaque espèce animale ou végétale est directement dépendante des conditions environnementales qui influent sur son comportement, sa distribution dans l'espace, sa dynamique, ... La plupart des espèces utilisent un référentiel spatial qui leur est propre et donc rarement compatible avec le système de coordonnées polaires utilisées par les pêcheurs ou les campagnes scientifiques. Pour la légine des Kerguelen ou l'anchois péruvien, les données ont été projetées respectivement le long des accores du plateau et le long des côtes du Pérou. La biologie de chacune de ces espèces a imposé cette prise en compte d'un référentiel spatial différent de celui des données. Par exemple, la légine ne remonte que très rarement sur le plateau, les accores représentent donc une frontière bathymétrique pour la légine. Les localisations des poissons vont donc dépendre d'un grand nombre de facteurs, comme la température, les concentrations en nutriments, la profondeur, ..., et vont leur rendre impossible l'accès à certaines zones, ou profondeurs.

Ce type de problème se rencontre pour de nombreux stocks de poissons. Rivoirard et al. (2000) ont utilisé une technique similaire afin de respecter le référentiel spatial des poissons. Le système de projection proposé s'est avéré opérationnel pour les deux pêcheries étudiées. La prise en compte du référentiel des poissons concernant leurs dispositions dans l'espace me semble primordial et nécessaire car il conditionne leur structure spatiale. Les outils géostatistiques tel que le variogramme tiennent compte de la distance qui sépare les différents échantillons. Il est donc nécessaire de prendre en compte la distance qui sépare les échantillons dans le référentiel spatial de l'espèce ciblée.

8.2.2 Intérêt des outils globaux

Les outils globaux, tels que le centre de gravité ou l'inertie d'une population présentent un intérêt majeur lors d'études préliminaires visant à intégrer une importante quantité d'information. Ces outils permettent de résumer une importante quantité d'information et d'identifier les grandes tendances. L'exemple proposé concernant la population d'anchois du Pérou illustre l'intérêt de ce type d'outil. Ainsi, la représentation de l'évolution des centres de gravité de l'effort de pêche ou de la ressource a permis de conclure quant au décalage des pêcheurs par rapport aux zones de fortes concentrations de la ressource. D'autres outils

comme l'inertie ou l'indice de co-location (Bez et Rivoirard, 2000), ont été utilisés et ont permis d'orienter les analyses. Leur facilité d'accès et leur simplicité d'utilisation, leur confèrent un intérêt majeur lors d'une première approche.

8.2.3 Importance de la taille du support

Pour la pêcherie des Kerguelen, nous avons montré que le temps de chalutage a augmenté entre les deux périodes d'étude. Cette augmentation de la taille du support a entraîné une diminution de la part des captures nulles, et donc une normalisation de la distribution des PUE. Le changement de support est en partie responsable de l'évolution de la distribution des PUE entre les deux périodes d'étude, car d'autres phénomènes interviennent comme le niveau d'abondance de la ressource, les connaissances des pêcheurs de la zone et des espèces. L'étude de l'évolution des PUE moyennes en fonction de la taille du support a permis d'intuiter la structure spatiale de la légine. Il s'est avéré que les structures spatiales étaient de faibles portées. Le support a donc une incidence sur les statistiques (moyenne, variance) des PUE. A ce stade de l'étude, il aurait été logique de stratifier les PUE en fonction de la taille du support. Or si l'on observe les profils des moyennes des temps de chalutage des séries de PUE doublonnées, on ne constate aucune évolution (fig. 8.2). Donc, pour la suite de l'étude, les PUE de tous supports ont été utilisées pour chaque période.

8.2.4 Variabilité locale et variogramme

En 1965, Matheron a introduit la notion de fonction aléatoire qui permet de prendre en compte deux aspects d'une mesure, un aspect aléatoire expliquant les irrégularités locales et un aspect structuré reflétant les tendances du phénomène à grande échelle. Une variable régionalisée évolue donc à l'intérieur d'une certaine zone définie dans l'espace. Pour l'étude en question, les variables régionalisées sont les PUE pour chaque espèce et les temps de chalutage par exemple. La valeur observée à chaque point de mesure est la réalisation $z(x)$ d'une variable aléatoire notée $Z(x)$. Le variogramme expérimental permet de calculer expérimentalement la variabilité des échantillons en fonction de la distance qui les sépare.

Si on désigne par x_i, x_j , l'ensemble des paires de points de données, par h une distance quelconque tel que $h = x_i - x_j$ et par $N(h)$ le nombre de couple d'échantillons distant de h , alors le variogramme expérimental est égal à :

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i,j} [z(x_i) - z(x_j)]^2$$

L'étude de la structure spatiale de stock de poissons est confrontée à différents problèmes qui ont été abordés au long de ce travail. En premier lieu, nous avons été confronté à un premier problème concernant la distribution statistique disymétrique des PUE. Ce type de distribution rend compte des proportions importantes de valeurs faibles, voire nulles, et de très longues queues de distribution. Un grand nombre de travaux ont montré que le variogramme n'était pas adapté à ce type de distribution (Srivastava et Parker, 1989 ; Jeannée et de Fouquet C., 2000 ; Jeannée, 2001). Les paires "valeur forte - valeur faible" apportent les contributions les plus importantes lors du calcul du variogramme expérimental et donc gouvernent la structure du variogramme. Une longue queue de distribution induit un nombre de paires "valeur forte - valeur faible" important qui va déstabiliser la structure du variogramme.

Deuxièmement, seules les PUE réalisées au sein des secteurs spécifiques à chaque espèces ont été conservées. L'utilisation du variogramme nécessite la délimitation de l'aire de répartition de l'espèce afin de déterminer sa distribution spatiale. Bez (1997) a utilisé le covariogramme afin de ne pas à avoir à délimiter de zones d'étude. Cette méthodologie a été appliquée à des campagnes scientifiques acoustiques et s'est avérée efficace. Cependant, les PUE commerciales ne sont pas réparties uniformément dans l'espace et n'échantillonnent pas la totalité de l'aire de répartition de l'espèce cible, contrairement aux campagnes scientifiques. Il est donc difficile d'identifier l'aire de répartition de l'espèce, car les pêcheurs cherchent à maximiser leur profit et non pas à échantillonner l'ensemble de la zone.

Troisièmement, la forte co-localisation des opérations de pêche s'est avérée être un problème majeur lors de l'utilisation des outils géostatistiques. La part importante de PUE doublonnées et leur forte variabilité fausse le calcul du variogramme. En théorie, la présence de répliquats devraient permettre d'estimer la variabilité locale de la ressource ainsi que les erreurs de mesure. Or la présence du phénomène d'épuisement local ne permet pas d'estimer la variabilité locale mais l'augmente artificiellement. En d'autres termes, la préférentialité de l'échantillonnage va à l'encontre des conditions idéales d'analyses statistiques. Lors des campagnes scientifiques, les localisations des échantillons sont déterminées de façon indépendante. Les positions des opérations de pêche sont donc indépendantes entre elles. Pour la pêcherie des Kerguelen, la

localisation d'une PUE commerciale n'est pas indépendante des localisations et des niveaux de captures des PUE précédentes, ce qui se traduit par un sous-échantillonnage des zones les moins riches à priori. Ainsi très peu de PUE ont été réalisées en zone 6 par les navires commerciaux et un nombre important de PUE sont doublonnées. Les forts pourcentages de captures doublonnées ont deux conséquences directes. Une première conséquence concernant la non représentativité des PUE doublonnées de l'abondance locale et une seconde concernant l'augmentation de la variabilité locale des PUE. Le fort niveau de variabilité locale induit par les PUE doublonnées perturbe le variogramme expérimental.

Quatrièmement, l'utilisation des PUE d'une flotte commerciale comme indices d'abondance d'un stock implique que toutes les unités d'effort déployées par chaque navire soient équivalentes (Gulland, 1983). Or, les navires de pêche présentent des différences de puissance de pêche. En d'autres termes, deux PUE réalisées au même moment et à la même position géographique (donc pour une même densité de poissons) par deux navires développant des puissances de pêche différentes ne seront pas égales (Beverton et Holt, 1957). Il est donc nécessaire de standardiser les PUE en fonction des puissances de pêche développées par chaque navire. Les procédures de standardisation des PUE traditionnellement utilisées en halieutique sont basées sur les caractéristiques des navires. Les causes des différences de puissance de pêche entre les navires sont alors la longueur du navire, la puissance moteur développée par le navire, l'expérience du capitaine du navire, l'âge du vaisseau, l'équipement technologique embarqué,... (Gulland, 1956 ; Beverton et Holt, 1957 ; Robson, 1966 ; Kimura, 1981 ; Hilborn et Walters, 1992). Cependant, les stratégies de pêche employées sont rarement prises en compte, alors qu'elles jouent un rôle important sur les niveaux de captures. Au lieu de construire un modèle à partir des variables ayant une influence sur les puissances de pêche des différents navires, nous avons estimé les puissances de pêche relatives à partir des comparaisons des PUE réalisées le même jour par des bateaux différents. Salthaug et Godø(2001) ont utilisée une méthodologie comparable afin d'estimer les puissances de pêche d'une flotte de chalutiers hollandais. Ils ont mis en évidence une corrélation positive entre la puissance de pêche d'un navire avec sa longueur et sa puissance moteur. Pour cela, les PUE réalisées au sein d'un même carré statistique le même jour par des navires différents ont été utilisées. La méthode utilisée pour estimer les puissances a été développée par Laurec en 1977. Elle est basée sur les rapports des PUE réalisées par des navires différents le même jour en fonction de la distance qui les sépare. A la différence de la méthode utilisée par Salthaug et Godø(2001), la méthode exposée au cours de cette thèse permet de déterminer une distance critique à partir de laquelle deux PUE peuvent être considérées comme indépendantes. Cette méthode nécessite la connaissance des PUE réalisées pour chaque opération de pêche.

Cette thèse porte sur une pêcherie particulière offrant l'assurance de la fiabilité des données ainsi qu'une forte proportion de PUE co-localisées. La présence d'un nombre important de PUE doublonnées augmente d'une part la variabilité locale mais aussi entraîne un effet d'épuisement local de la ressource qui est une des causes de la non linéarité entre PUE et abondance. La présence de PUE fortement co-localisées ne semblent pas être spécifique à cette pêcherie (Rijnsdorp, van Mourik Broekman, et Visser, 2000). En effet, les pêcheurs cherchent à maximiser leurs profits, ils vont donc exploiter de façon intensive les localisations reconnues comme riches. La non prise en compte de l'effet d'épuisement local diminue la PUE moyenne d'un navire, même si cet effet est en partie compensé par la richesse des secteurs intensivement exploités. Il semble donc nécessaire de prendre en compte la distribution spatio-temporelle de l'effort de pêche. De plus, l'effet d'épuisement local est d'autant plus important qu'une espèce est grégaire. C'est en grande partie, les PUE doublonnées qui sont responsables de l'effondrement du stock de poissons de glaces des îles Kerguelen.

Cette problématique posée par les PUE doublonnées me semble donc particulièrement importante et la non prise en compte de ces conséquences risque d'entraîner des erreurs lors des estimations de stock. Les techniques et les méthodologies proposées dans cette thèse ont permis d'estimer un indice d'abondance de la ressource mais non pas permis d'estimer l'abondance de la ressource. Les techniques actuelles basées sur l'analyse des cohortes semblent donc de ce point de vue toujours indispensables afin d'estimer l'abondance de la ressource.

Pour conclure, je voudrais revenir sur la notion d'échelle spatio-temporelle des différentes études et analyses réalisées. La figure 8.2 permet de placer les différents paramètres étudiés au cours de cette thèse les uns par rapport aux autres au sein d'une échelle spatio-temporelle. Cette étude nous a amenés à travailler à des échelles spatio-temporelles de plus en plus fines, des PUE moyennes par bateau à des PUE doublonnées. Il nous a été possible d'expliquer et pour certains cas de modéliser des phénomènes expliquant des résultats observés à une échelle plus importante. C'est le cas par exemple des PUE doublonnées et PUE moyennes par bateau. La connaissance des différents paramètres de chaque coup de chalut a permis de travailler à une échelle spatiale très fine afin d'explicitier et de traiter des phénomènes observés à des échelles plus importantes, comme la forte variabilité locale.

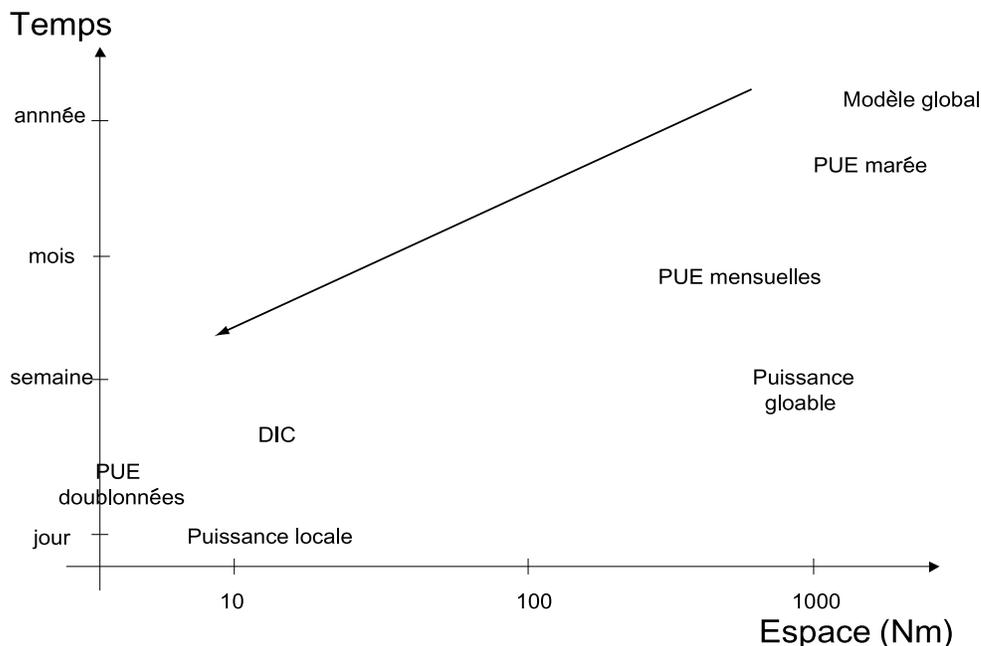


FIG. 8.2 – Echelles spatio-temporelles des différents paramètres étudiés.

8.3 Bilan et Perspectives

Le caractère préférentiel de la prospection des navires commerciaux va à l'encontre des conditions requises lors d'analyses statistiques, et particulièrement lors d'analyse des variabilités spatiales. Cependant, l'information contenue dans les PUE commerciales est considérable et mérite que l'on cherche à l'exploiter. Compte tenu de la remarque précédente, les applications de type "boîte noire" sont probablement impropres car non spécifiques des données. Ce constat nous a amené à développer des outils permettant de contourner le problème posé par le caractère préférentiel de l'échantillonnage et d'extraire des informations de nature structurale. Par exemple, l'étude des statistiques élémentaires par classe de durée de temps de pêche (i.e. par classe de support) a permis d'intuiter des structures de courtes portées. L'étude des *DIC* et de leur distribution pour chaque navire a permis quant à elle d'établir une classification des navires en fonction de leur tactique de pêche ; une première tactique basée sur l'épuisement local et une seconde tactique exploratoire ont été identifiées. Cet outil peut être considéré comme un indicateur de la distribution spatio-temporelle de l'effort de pêche. Il est directement opérationnel à partir des suivis satellitaires des campagnes de pêche des navires (données type V.M.S.). Pour ces raisons, il me semble être un bon indicateur du comportement des pêcheurs vis à vis de la ressource.

Le caractère préférentiel de "l'échantillonnage" des navires commerciaux a aussi pour conséquence un nombre important d'opérations de pêche doublonnées entraînant une augmentation artificielle de la variabilité locale des PUE. Une position géographique peut être exploitée à plusieurs reprises par un même navire *et/ou* par différents navires. De ce fait, la variabilité locale a été décomposée en deux composantes, une composante intra-bateau et une composante inter-bateau.

L'identification des captures doublonnées par navire (variabilité intra-bateau) et le suivi des séries de PUE doublonnées a mis en évidence une diminution moyenne des PUE de 6% au cours des répétitions. Rijnsdorp et al. (2000) ont mis en évidence le même phénomène pour une pêcherie démersale de mer du nord. Ainsi, s'il s'avère par des études complémentaires de ce type que le chiffre de 10% est un ordre de grandeur acceptable pour des pêcheries démersales, il semblerait donc possible, dans la perspective où des données "VMS" deviendraient disponibles (i) de détecter les doublons et (ii) de corriger les PUE doublonnées en fonction de leur rang dans la série par un coefficient moyen de 10%.

L'étude des PUE doublonnées intra-bateau a permis de construire un modèle permettant d'estimer la loi de distribution de l'efficacité locale de pêche. Il s'est avéré que la moyenne de l'efficacité locale de pêche a diminué et que sa distribution s'est resserrée entre les deux périodes d'étude. Cette évolution a pu être rattachée à différents paramètres définissant la pêcherie, comme la réglementation en vigueur, l'abondance du stock, les connaissances des pêcheurs sur la zone de pêche, les caractéristiques des navires, ... Les différents résultats et la pertinence des outils développés nécessitent toutefois d'être confirmés en les confrontant avec les PUE issues de pêcheries différentes du point de vue de l'espèce ciblée, du métier pratiqué, de la région, etc.

Le traitement de la variabilité locale inter-bateau et l'utilisation de l'ensemble des PUE des navires commerciaux implique la standardisation des PUE par les puissances de pêche des navires. Dans cette optique, la méthode proposée par Laurec en 1977 a été réactualisée (et corrigée). La standardisation par les puissances

de pêche ainsi obtenues a permis d'obtenir un modèle de variogramme modélisable (c'est à dire, pour cette étude, croissant à l'origine) et de cartographier par krigeage un indice d'abondance de la légine.

La comparaison entre les résultats obtenus à partir de la méthode "Laurec" et de la méthode GLM a permis de mettre en évidence le caractère global, lissant et peu discriminant de l'estimation des puissances de pêche par la méthode GLM. La méthode "Laurec" prend en compte la variabilité des données et permet de différencier des navires présentant des puissances de pêche du même ordre de grandeur.

Une perspective envisageable serait de considérer chaque navire comme un échantillonneur du même phénomène, en l'occurrence la structure spatiale de la ressource. Une étude géostatistique multi-variable, où une variable correspondrait aux PUE d'un navire particulier, permettrait donc de dégager la structure commune à l'ensemble des navires, c'est à dire la structure spatiale de la ressource. Cependant, les navires commerciaux sont des échantillonneurs hétérotopiques, c'est à dire qu'ils n'échantillonnent pas les mêmes positions, en tous les cas à un instant donné. Dans cette situation, seuls la covariance croisée et le pseudo-variogramme croisé sont utilisables. Le pseudo-variogramme croisé est ici pertinent puisque chaque navire fournit des PUE exprimées dans des unités identiques. Cependant, la covariance croisée n'est réellement utilisable que dans des situations où l'hypothèse de stationnarité est justifiée. Si la perspective d'une approche multi-variable semble intéressante, des obstacles pratiques et théoriques devront donc être levés pour sa mise en œuvre.

Enfin, l'objectif premier de cette thèse était d'étudier la densité-dépendance de la répartition spatiale des pêcheurs ou de la capturabilité. Pour cela, il était nécessaire de déterminer la structure spatiale et d'estimer un indice d'abondance de la ressource à partir d'un jeu de données de référence. A l'aide des outils développés et du traitement proposé concernant les PUE doublonnées, il serait intéressant de reprendre cet objectif en utilisant la structure spatiale de la légine obtenue en fin de cette thèse, et d'étudier les modifications de capturabilité des PUE en fonction de l'abondance de la ressource.

Sixième partie

Bibliographie

Références

- Anonyme (1999). *La gestion halieutique et la conservation de la nature en milieu marin. Document COM(99)363 final du 14.07.1999*. CEE. Conseil au Parlement Européen.
- Babcock, E. A. et E. K. Pritchard (2000). A dynamic programming model of fishing strategy choice in a multispecies trawl fishery with trip limits. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 57, 357–370.
- Baranov, F. I. (1918). On the questions of the biological basis of fisheries. *Nauchnyi Issled Ikhtiol Onst Izv 1*, 81–122.
- Beverton, R. J. H. et S. J. Holt (1957). *On the dynamics of exploited fish populations* : Chapman and Hall.
- Bez, N. (1997). *Statistiques individuelles et géostatistique transitive en écologie halieutique*. Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.
- Bez, N. (2002). Global fish abundance estimation from regular sampling : the geostatistical transitive method. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 59, 1921–1931.
- Bez, N. et J. Rivoirard (2000). Indices of collocation between populations. *Report of a workshop on the use of the continuous underway dish egg sampler (CUFES) for mapping spawning habitats of pelagic fish*, San Sebastian, France, p. 48–52. Global Ocean Ecosystem Dynamics.
- Broadhurst, M. K., S. J. Kennelly, et B. Isaken (1996). Assessments of modified codends that reduce the by-catch of fish in two prawn-trawl fisheries in new south wales, australia. *Fisheries Research* 27, 89–111.
- Bublitz, C. G. (1995). Quantitative evaluation of flatfish behaviour during capture by trawl gear. *Fisheries Research* 25, 293–304.
- Conan, G. Y. (1985). Assessment of shellfish stocks by geostatistical techniques. *International Council for the Exploration of the Sea council meeting paper*, p. K :30.
- Craig, S. R. et E. P. Nunnallee (1998). A study of changes in groundfish trawl catching efficiency due to differences in operating width, and measures to reduce width variation. *Fisheries Research* 36, 139–147.
- Dagorn, L. (1990). Dynamique des populations des espèces exploitées autour des îles kerguelen. Rapport technique, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes. Mémoire de fin d'étude.
- Deoliveira, E., N. Bez, et E. Prévost (2000). Impact of local pollution on fish abundance using geostatistical simulations. M. P., A. D., et F. R. (Eds.), *geoENV III - Geostatistics for Environmental Applications*, p. 181–191.
- Dorn, M. W. (1997). Fine-scale fishing strategies of factory trawlers in a midwater trawl fishery for pacific hake (*Merluccius productus*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55, 180–198.

- Dremière, P.-Y., L. Fiorentini, G. Cosimi, I. Leonori, A. Sala, et A. Spagnolo (1999). Escapement from the main body of the bottom trawl used for the mediterranean international trawl survey (medits). *Aquat. Living Resour.* 12(3), 207–217.
- Duhamel, G. (1981). Caractéristiques biologiques des principales espèces de poissons du plateau continental des îles kerguelen. *Cybiurn* 1, 19–32.
- Duhamel, G. (1990). The biological and demographic peculiarities of the icefish *Cahamprosocephalus gunnari* from the kerguelen plateau. *CCAMLR* 2, 21–34.
- Duhamel, G. (1993). The *Dissostichus eleginoides* fishery in the division 58-5-1 (kerguelen islands). *WG-FSA-93/15. CCAMLR Scientific abstracts*.
- Duhamel, G. (2000). Note sur la pêche française de légine *Dissostichus eleginoides* dans la zone française de kerguelen et crozet. biologie de l'espèce, captures, tendances récentes des rendements. Rapport interne. Museum National d'Histoire Naturelle de Paris.
- Duhamel, G. et D. J. Agnew (1990). A re-analysis of the kerguelen shelf and skiff bank stocks of *Campsocephalus gunnari*. *WG-FSA-90/17. CCAMLR Scientific abstracts*.
- Fox, D. S. et R. M. Starr (1996). Comparison of commercial fishery and research catch data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53, 2681–2694.
- Fréon, P. et O. A. Misund (1999). *Dynamics of pelagic fish distribution and behaviour : effects on fisheries and stock assessment* : Fishing News Book.
- G. Matheron (1970). *La théorie des variables régionalisées et ses applications* : Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématiques. Fascicule 5, ENSMP, France.
- Gaertner, D., M. Pagavino, et J. Marcano (1999). Influence of fishers' behaviour on the catchability of surface tuna school in the venezuelan purse-seiner fishery in the caribbean sea. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 56, 394–406.
- Gascuel, D. (1993). Efforts et puissances de pêche : Redéfinition des concepts et exemple d'application. G. D., D. J. L., et F. A. (Eds.), *Les recherches françaises en évaluation quantitative et modélisation des ressources et des systèmes halieutiques*, p. 159–181. ORSTOM Éditions.
- Gauthiez, F. (1997). *Biométrie*. Thèse, Université de Lyon.
- Gillis, D. M. et R. M. Peterman (1998). Implications of interference among fishing vessels and the ideal free distribution to the interpretation of cpue. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55, 37–46.
- Gillis, D. M., R. M. Peterman, et A. V. Tyler (1993). Movement dynamics in a fishery : application of ideal free distribution to spatial allocation of effort. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 50, 323–333.
- Glass, C. W. et C. S. Wardle (1995). Studies on the use of visual stimuli to control fish escape from codends. the effect of a black tunnel on the reaction behaviour of fish in otter trawl codends. *Fisheries Research* 23, 165–174.
- Gohin, F. (1985). Planification des expériences et interprétation par la théorie des variables régionalisées : application à l'estimation de la biomasse d'une plage. *International Council for the Exploration of the Sea council meeting paper*, p. D :3.
- Graham, M. (1935). Modern theory of exploiting a fishery, an application to north sea trawling. *J. Conc. int. Explor. Mer* 10, 264–274.
- Guiblin, P. (1997). *Analyse géostatistique de campagnes (acoustique et chalutage) sur le hareng écossais*. Thèse, Ecole Nationale des Mines de Paris, France.

- Gulland, J. A. (1956). On the fishing effort in english demersal fisheries. *Fish. Invest. London* 20(5), series 2, 1–41.
- Gulland, J. A. (1965). Estimating of mortality rates. *Annex to the report of the meeting of the ICES Arctic Fisheries Working Group*. CIEM.
- Gulland, J. A. (1983). *Fish stock assessment : A manual of basic methods*, New York : Wiley.
- Hilborn, R. et C. J. Walters (1992). *Quantitative fisheries stock assessments : Choice, dynamics and uncertainty*, New York : Chapman and Hall.
- Hilborn, R. et C. J. Walters (1987). A general model for simulation of stock and fleet dynamics in spatially heterogeneous fisheries. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 44, 1366–1369.
- Jeannée, N. (2001). *Caractérisation géostatistique de pollutions industrielles de sols. Cas des hydrocarbures aromatiques polycycliques sur d'anciens sites de cockeries*. Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.
- Jeannée, N. et de Fouquet C. (2000). With experimental variogram for the structural inference. M. P., A. D., et F. R. (Eds.), *geoENV III - Geostatistics for Environmental Applications*, p. 357–368.
- Jennings, S. (1999). Fishing effects in northeast atlantic shelf seas : patterns in fishing effort, diversity and community structure. iii. international trawling effort in the north sea : an analysis of spatial and temporal trends. *Fisheries Research* 40, 125–134.
- Kimura, D. K. (1981). Standardised measures of relative abundance based on modelling log(cpue), and their application to pacific ocean perch (*Sebastes alutus*). *J. Const. Int. Explor. Mer.* 39, 211–218.
- Laloë, F. (1985). Contribution à l'étude de la variance d'estimateurs de biomasse de poisson obtenus par échantillonnage. *Océanogr. trop.* 20(2), 161–169.
- Laloe, F., D. Gaertner, et F. Ménard (2002). Modèles mixtes et données halieutiques. *Journal de la Société Française de Statistique* tome 143, n° 1-2, 131–138.
- Laurec, A. (1977). Analyse et estimation des puissances de pêche. *J. Const. int. Explor. Mer* 37(2), 173–185.
- Laurec, A. (1993). Etalonnage de l'analyse des cohortes en halieutique. Lebreton et Asselain (Eds.), *Biométrie et environnement*. Masson. 332 p.
- Laurec, A. et J. C. LeGuen (1981). *Dynamique des populations marines exploitées. Tome I : Concepts et Modèles* : Centre National pour l'Exploitation des Océans. Rapports scientifiques et techniques n° 45-1981.
- MacCall, G. R. (1976). Density dependence and catchability coefficient in the california sardine, *Sardinops sagax caerulea*, purse seine fishery. Rapport Technique 18, California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports. pp. 136-148.
- Mackinson, S., U. R. Sumaila, et T. J. Pitcher (1997). Bioeconomics and catchability : fish and fishers behaviour during stock collapse. *Fisheries Research* 31, 11–17.
- Matheron, G. (1976). Estimer et choisir. Rapport technique, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématiques de Fontainebleau.
- Matheron, G. (1982). *Simulations des FAI-k discrètes [N- 751]*. Fontainebleau, France : Centre de géostatistique, Ecole des Mines de Paris.
- Maury, O. et D. Gascuel (2002). Local overfishing and fishing tactics : Theoretical considerations and applied consequences in stock assessment studied with a numerical simulator of fisheries. *Aquat. Living Resour.*, 203–210.

- Maury, O., D. Gascuel, F. Marsac, A. Fonteneau, et A. L. D. Rosa (2001). Hierarchical interpretation of nonlinear relationships linking yeallowfin tuna (*Thunnus albacares*) distribution to the environnement in the atlantic ocean. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 58, 458–469.
- Petitgas, P. (1991). *Contributions géostatistiques à la biologie des pêches maritimes*. Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.
- Petitgas, P., J. C. Poulard, et A. Biseau (1999). Comparison of commercial and scientific cpue data to analyse catchability : megrim in the celtic sea. *ICES CM 1999/R :08*.
- Pitcher, T. (1995). The impact of pelagic fish behaviour on fisheries. *Scientia Marina* 59 (3-4), 295–306.
- Rahikainen, M. et S. Kuikka (2002). Fleet dynamics of herring-trawl-change in gear size and implications for interpretation of catch per unit effort. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 59, 531–541.
- Ricker, W. E. (1945). A method of estimating minimum size limits for obtaining maximum yield. *Copeia* 2, 84–94.
- Rijnsdorp, A. D., P. L. van Mourik Broekman, et E. G. Visser (2000). Competitive interactions among beam trawlers exploiting local patches of flatfish in the north sea. *ICES journal of Marine Science* 57, 894–902.
- Rivoirard, J., J. Simmonds, K. G. Foote, P. Fernandes, et N. Bez (2000). *Geostatistics for estimating fish abundance* : Blakwell Science.
- Robson, D. S. (1966). Estimation of the relative fishing power of individual ships. *Int. Comm. Northw. Atlant. Fish. Res. Bull.* 3, 5–14.
- Salthaug, A. et O. R. Godø(2001). Standardisation of commercial cpue. *Fisheries Research* 49, 271–281.
- Sampson, D. B. (1991). Fishing tactics and fish abundance, and their influence on catch rates. *ICES J. mar. Sci.* 48, 291–30.
- Saporta, G. (1990). *Probabilités, analyses des données et statistique*, Paris : Technip.
- Schaefer, M. B. (1954). Smme aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries. *Bull. Int. Am. Trop. Tuna Comm.* 1, 25–56.
- Srivastava, R. et H. Parker (1989). Robust measures of spatial continuity. M. Armstrong (Ed.), *Geostatistics*, Volume 1. pp. 295-308.
- Suuronen, P., E. Lethonen, et J. Wallace (1997). Avoidance and escape behaviour by herring encountering midwater trawls. *Fisheries Research* 29, 13–24.
- Troadeac, J. P. (2001). Pour une rationalisation de la pêche. *Encyclopaedia Universalis, La Science au Présent*. inconnu.
- Verdoit, M. et D. Pelletier (2000). Characterizing the spatial and seasonal dynamics of the withing population in the celtic sea from analysis of commercial catch and effort data and scientific surveys data. *ICES CM 2000/K :36*.
- Vignaux, M. (1996). Analysis of vessel movements and strategies using commercial catch and effot data from the new zealand hoki fishery. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53, 2126–2136.

Septième partie

Annexes

Identification automatique de clusters

A partir des localisations journalières des opérations de pêche, il est possible d'identifier des concentrations journalière qui ont été définie sous le terme de *cluster*. L'identification est réalisée pour chaque journée, et toutes les opérations de pêche appartenant à un même cluster sont distantes de moins de 2 miles nautiques (fig. VII). La méthode d'identification suivie se décompose ainsi :

1. Détermination pour chaque point de son plus proche voisin et estimation de la distance qui les sépare ;
2. Identification et regroupement des points distants de moins de 2 miles nautiques. ;
3. Tracé de l'enveloppe convexe pour chaque groupe de points.

La localisation géographique, la surface, le nombre d'opération de pêche, le nombre de navires différents sont connus par cluster.

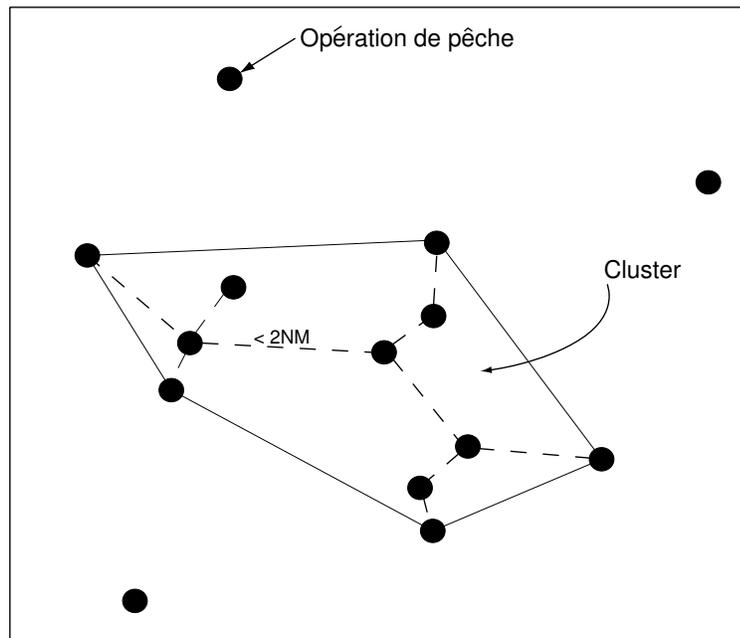


FIG. 3 – Identification d'un cluster.

Compositions spécifiques et zones exploitées

Les graphiques suivants présentent pour chaque bateau la composition spécifique de la capture globale, ainsi que la part des opérations de pêche effectuées pour chaque zone pour chaque bateau. Pour les navires de la seconde période, chaque campagne a été représentée séparément.

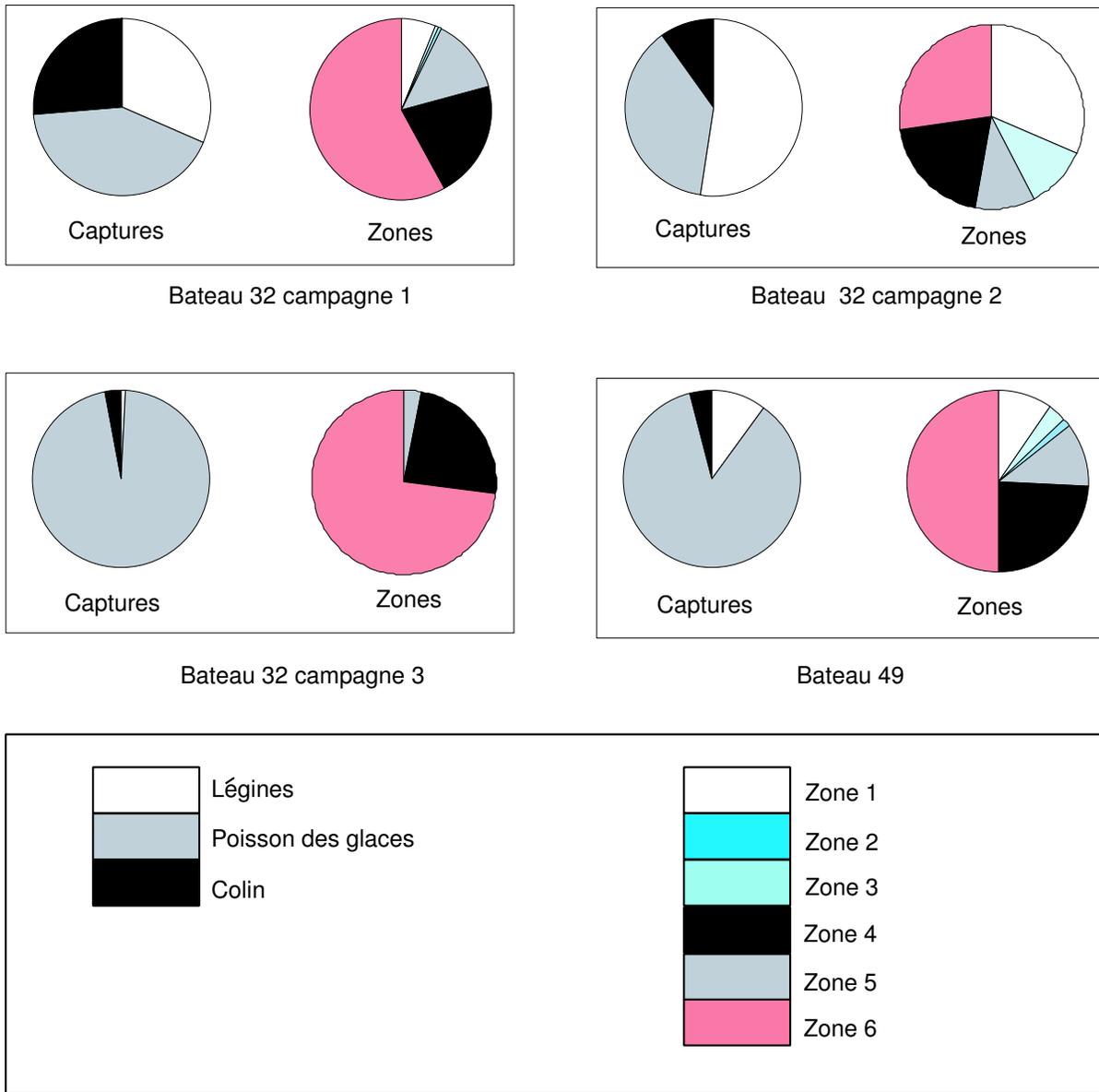


FIG. 4 – Navires Scientifiques. Composition spécifique des captures et exploitation des différentes zones de pêche.

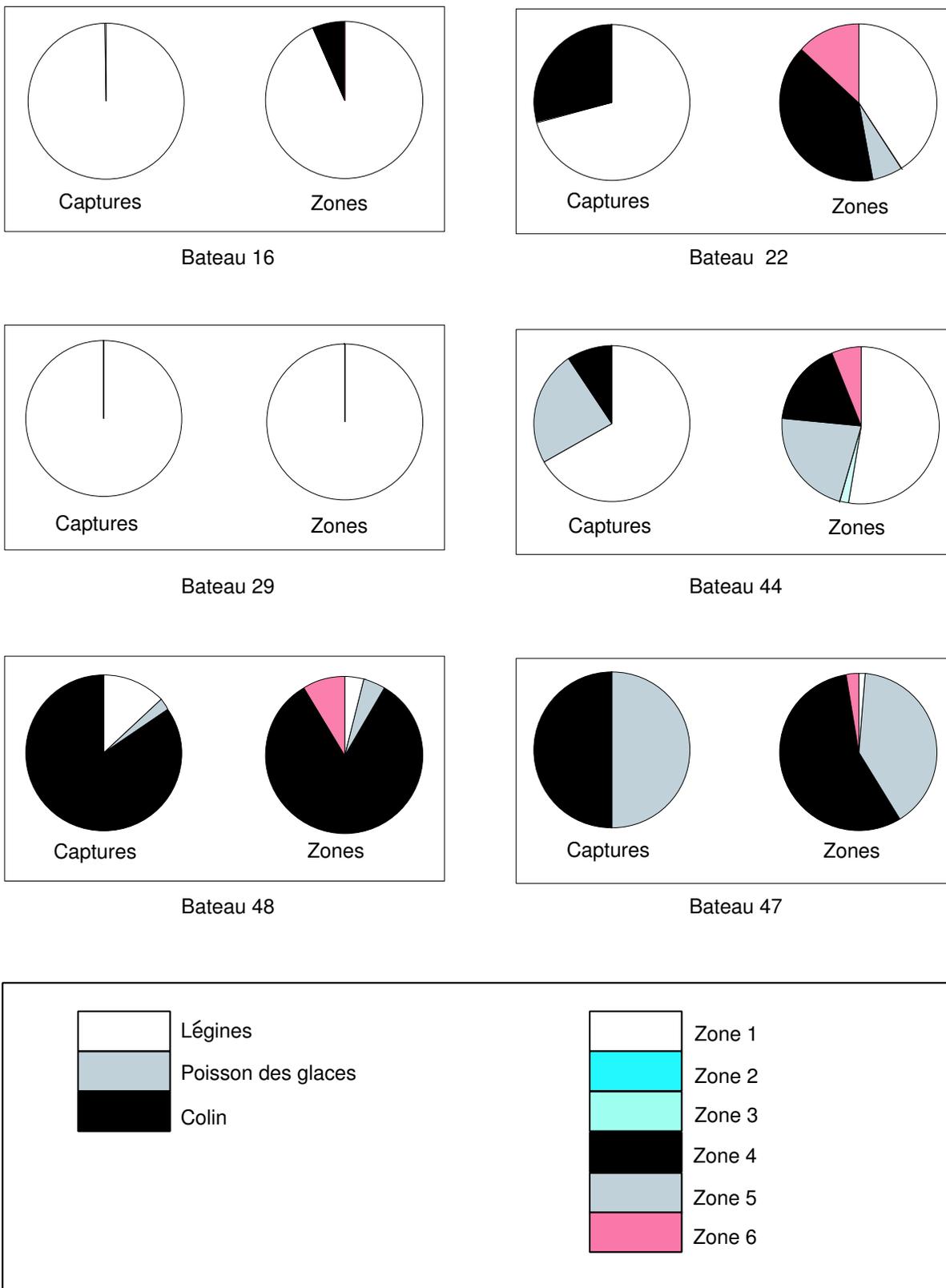


FIG. 5 – Navires de la première période (1/2). Composition spécifique des captures et exploitation des différentes zones de pêche.

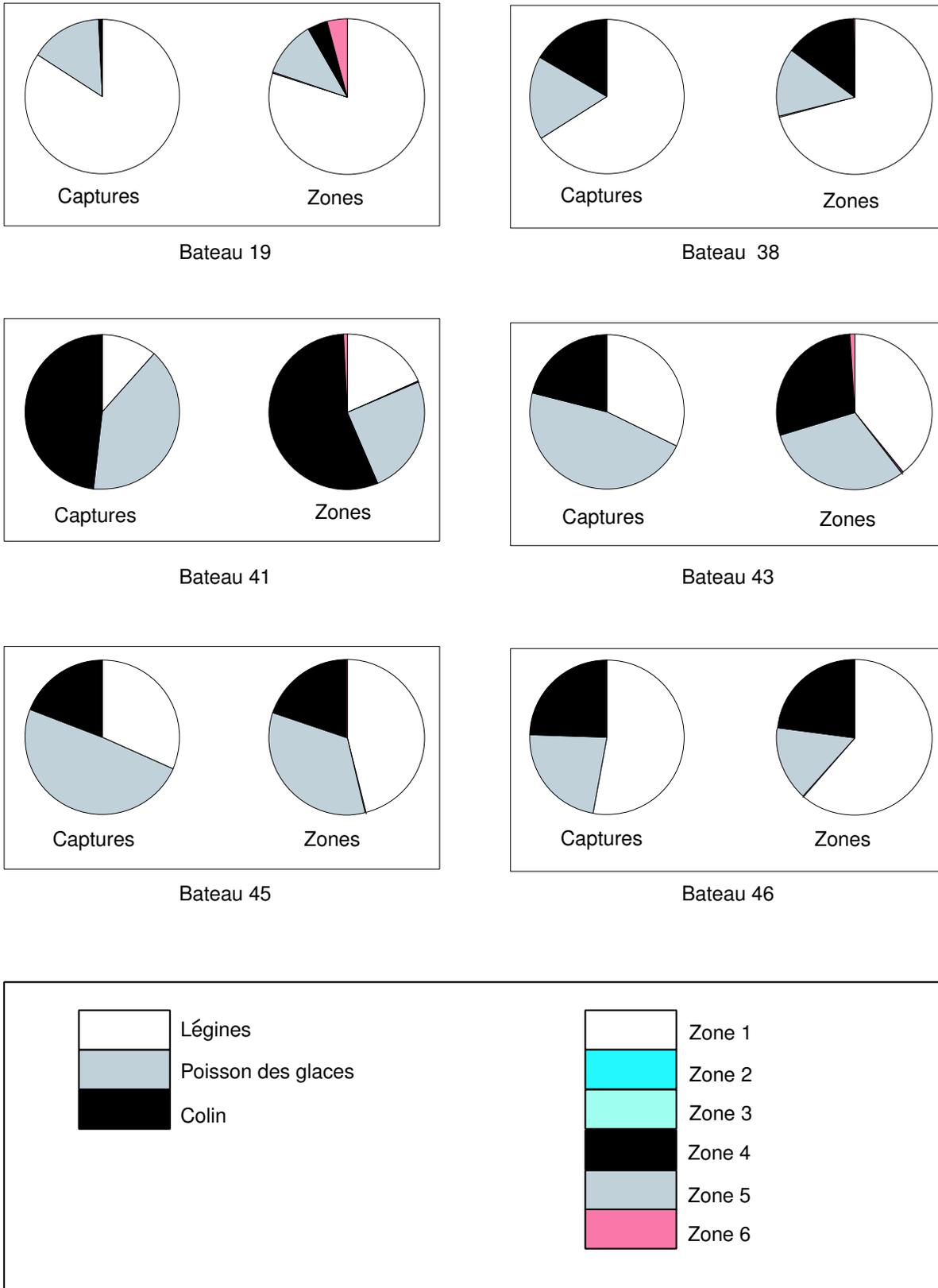


FIG. 6 – Navires de la première période (2/2). Composition spécifique des captures et exploitation des différentes zones de pêche.

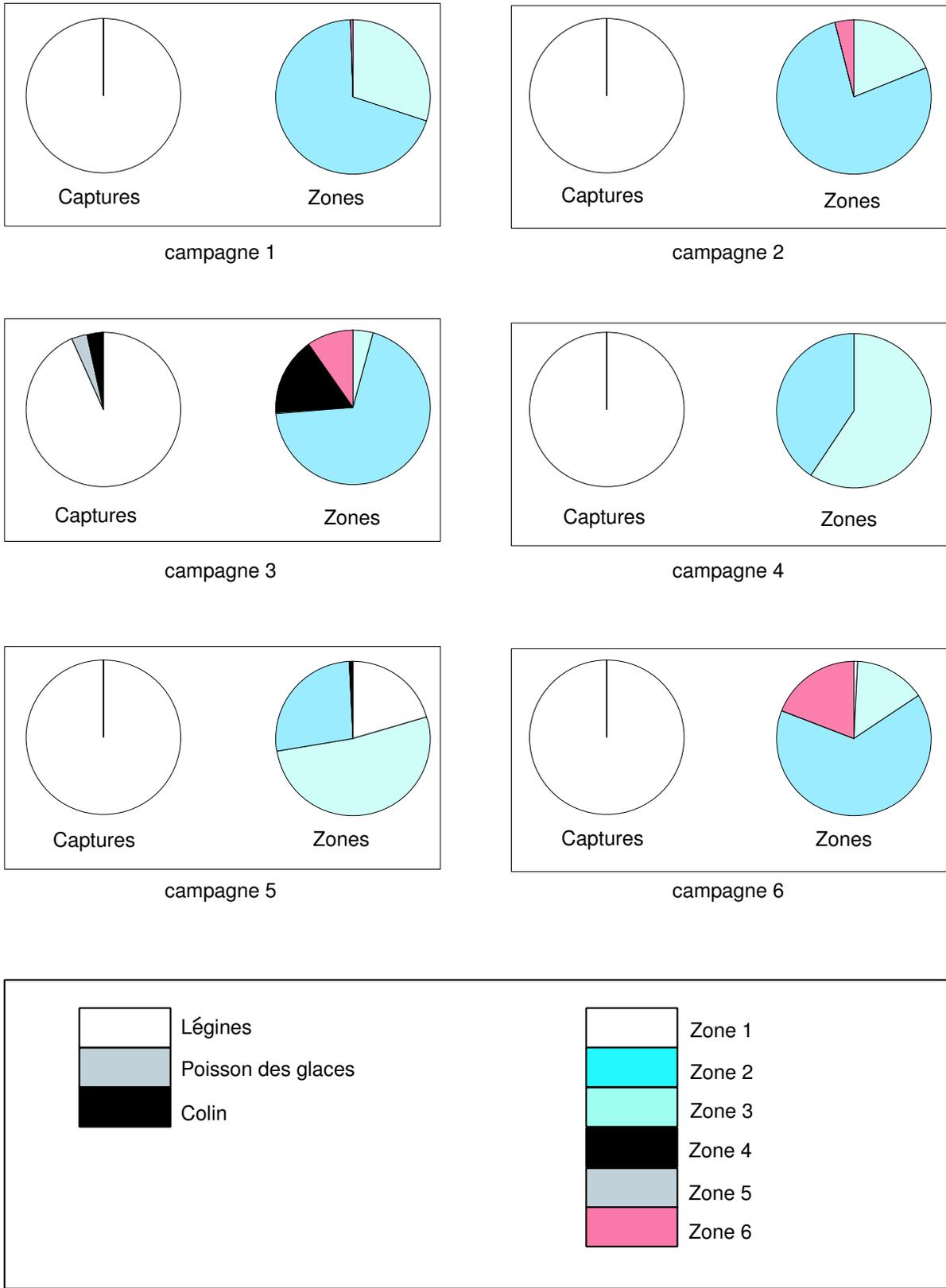


FIG. 7 – Navire 54. Composition spécifique des captures et exploitation des différentes zones de pêche.

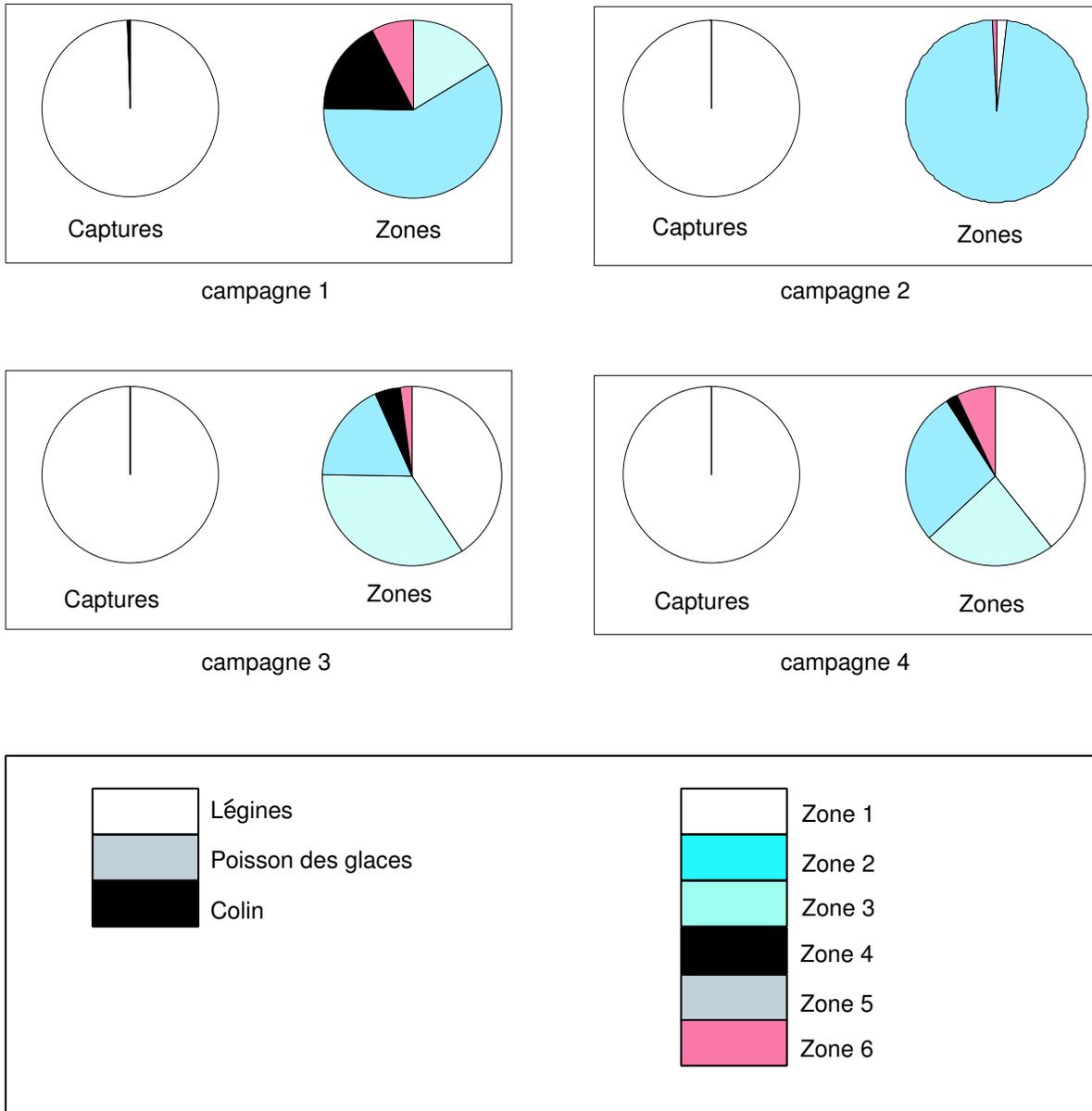


FIG. 8 – Navires 192. Composition spécifique des captures et exploitation des différentes zones de pêche.

Abstract

A local analysis of the spatiotemporal distribution of fishing activity targeting Patagonian tooth fish in Kerguelen Island is performed, using data supplied by fishing observers on board. The main problem is the large number of co-located catches at least when computing variograms. Variograms are the key tool used in geostatistics to describe spatial structures. They theoretically increase when the distance increases. However, in the present study they happened to be decreasing and thus unusable. A geographical position can be exploited by one vessel several times or by different vessels, so the local variability of catches has been decomposed in two components, intra and inter-vessels. Three causes of high variability are then analyzed.

First, 179 series of collocated catches composed of at least three replicats, have been used to establish and model a local depletion of resource along the repetition. The depletion rate is about 6% per tow and implies that catches are not representative of the same local abundance and they increase the local variability. Secondly, fluctuations around average depletion have been interpreted as random variations of fishing efficiency, that is, the ratio between the quantity of vulnerable fishes and the number of fishes effectively caught. The evolution of the distribution laws of the local fishing efficiency is regarded as a consequence of the change of fishery regulations, of stock abundance, the knowledge of the fishermen and the vessels characteristics.

Third, the local fishing powers which quantify vessel capacity to exploit an area and which are regarded as an inter-vessel component of the overall variability. and by taking into account the distance between catches. The results of this method are compared to that obtained using a general linear model (variance analysis). After having correcting fishes catches for these three effects, a kriging map is performed.

Finally, the discussion section emphasizes the importance of the parameters defining a fishery on : the fishing behavior, on the fishing tactics and on level of catches. Usual geostatistical tools were inappropriate to analyze these commercial fishing data, and suitable methods have been developed.

Key Words :

commercial CPUE, fishing effort, local depletion effect, local fishing efficiency and local fishing power efficacy, co-located catches, local variability, variogram

Résumé

En s'appuyant sur des données fournies par des observateurs embarqués, une analyse fine de la distribution spatio-temporelle de l'activité de pêche ciblant la légine (îles Kerguelen) est réalisée. Le problème majeur de cette étude réside dans le nombre important de captures réalisées aux mêmes endroits (doublons géographiques). Le variogramme expérimental est l'outil privilégié des analyses géostatistiques. Il doit théoriquement croître avec la distance. Or pour cette étude, le variogramme expérimental se révèle décroissant et donc inutilisable directement. Une position géographique pouvant être exploitée à plusieurs reprises par un ou plusieurs navires, la variabilité locale a été décomposée en des composantes intra et inter-bateaux. Ainsi, trois causes possibles de la forte variabilité locale observée sur le variogramme sont analysées tour à tour. Dans un premier temps, 179 séries de doublons composées chacune d'au moins trois réplicats, ont

servi à établir et à modéliser un effet d'épuisement moyen de l'abondance locale au cours des répétitions. Cet épuisement, de l'ordre de 6%, implique que l'ensemble des captures ne sont pas représentatives de la même abondance locale, et participe d'une augmentation de la variabilité locale. Dans un deuxième temps, les fluctuations autour de l'épuisement moyen ont été interprétées comme des variations aléatoires de l'efficacité locale de pêche, c'est à dire du ratio entre la quantité de poissons vulnérables à la capture et la quantité effectivement capturée. L'évolution des lois de distribution des efficacités locales de pêche a été rattachée aux changements de réglementation, d'abondance du stock, de connaissance des pêcheurs et des caractéristiques des navires de pêche. La composante inter-bateau correspond aux puissances locales de pêche qui quantifient la capacité de chaque bateau à exploiter une zone donnée. Leur estimation est basée sur les comparaisons des captures réalisées le même jour par des navires différents en fonction de la distance qui les sépare. Comparée à un modèle linéaire général, l'approche proposée se révèle moins lissante et plus discriminante vis à vis des différents navires. Après prise en compte de ces trois effets, une cartographie par krigeage est réalisée. L'analyse fine de la répartition spatiale de l'activité de pêche met en évidence l'im-

portance des différents paramètres définissant une pêcherie sur le comportement ou les tactiques de pêche employés et leurs conséquences sur les niveaux de captures. L'inadaptation des outils géostatistiques usuels et des approches de type "boîte noire" a appelé le développement de méthodes adaptées.

Mots clefs :

PUE commerciales, effort de pêche, épuisement local, efficacité et puissance de pêche locale, doublons, variabilité locale, variogramme