

François Poisson¹, Marc Taquet²

¹ IFREMER - Centre de Recherche Halieutique Méditerranéenne et Tropicale,
Sète

² IFREMER – Centre de Tahiti

Convention : Référence Ifremer 98/1212978/F

L'espadon : de la recherche à l'exploitation durable

Programme Palangre Réunionnais
Rapport final

Novembre 2001

L'espadon : de la recherche à l'exploitation durable

Ce programme, réalisé entre juillet 1998 et décembre 2001, accompagne le développement de la pêche palangrière réunionnaise ciblant l'espadon dans le sud-ouest de l'océan Indien.

La première étape de conception et de mise en place du système de suivi de l'activité de la flottille a conduit à la collecte des données nécessaires à une description précise de l'évolution de la pêche. Les travaux biologiques développés sur l'espadon apportent les premiers points de référence sur la croissance et la reproduction de l'espèce dans cette région. La mise en œuvre de palangres instrumentées à bord de navires professionnels permet d'analyser les stratégies de pêche à différentes échelles temporelles et d'étudier le comportement des espèces pélagiques vis-à-vis de l'engin de pêche. Le phénomène de déprédation par les mammifères marins fait l'objet d'une étude bibliographique. Les pertes occasionnées sont quantifiées. Les résultats d'une première série de tests de répulsifs sont présentés et discutés.

This programme took place between July 1998 and December 2001 and aimed at monitoring the activity of the local longline swordfish fishery in the south-western Indian Ocean.

The design and set up of the monitoring system has resulted in a collection of data enabling a precise description of the evolution of this fishery. Biological studies on swordfish have led to some breakthroughs regarding their growth and reproduction parameters in this region. Experimental longline fishing using sensors conducted on board commercial vessels has led to the analysis of fishing strategies at different temporal scales and the study of the behaviour of pelagic fish in relation to the gear employed. A literary review has been made on marine mammal depredation and the results of repellent pinger tests are presented and discussed.

Programme Palangre Réunionnais



L'espadon : de la recherche à l'exploitation durable

François Poisson
Marc Taquet

L'espadon : de la recherche à l'exploitation durable

Programme Palangre Réunionnais (PPR)



Ifremer

Laboratoire Ressources
Halieutiques de La Réunion



L'espadon : de la recherche à l'exploitation durable

François Poisson, Marc Taquet

Programme Palangre Réunionnais
Rapport final, Novembre 2001
Convention : Référence Ifremer 98/1212978/F



Remerciements

Pour avoir favorisé la mise en place
de ce programme :

*François René, Michel Petit, Emmanuel Tessier,
Nicole Lacroix, André Forest, Marc Labelle,
Dominique Pelletier.*

Pour son appui méthodologique en matière
de systèmes d'information géographique :

Vincent Mardbel.

Aux stagiaires universitaires

pour leur participation aux expérimentations :

*Gaëlle Bailly, Roseline Baronce, Manuella Cadet,
Emmanuelle Conte-Devolx, Frédéric Lebrun,
Nicolas Zuel.*

Pour leurs conseils lors de la phase de relecture :

Bernard Stéquent, Pascal Bach et Julien Barde.

Pour leur participation active à la collecte
des données et pour l'accueil amical à bord
des navires de pêche :

*Les armateurs, les patrons, les équipages et l'ensemble
de la profession.*

Pour leur contribution dans le cadre
de la coopération :

*Rose-Marie Bargain, Philippe Michaud et l'équipage
du navire « Amitié ».*

À nos amis partis trop tôt :

Léo Calvard

Francis Gréval

Pierre Houchois

Hervé Kermarec

Hervé Troadec

Résumé

Le développement de la pêche palangrière à La Réunion

À l'inverse de la situation en Europe, La Réunion est le seul département français dont la pêche a connu, depuis cinq ans une croissance importante et ceci aussi bien pour la pêche artisanale associée aux DCP, pour la pêche semi-industrielle palangrière que pour la pêche industrielle dans les terres australes.

Deux évènements capitaux contribuent au développement rapide de la pêche thonière et donnent à La Réunion, l'accès à ses ressources pélagiques. L'implantation en 1988 des premiers DCP par l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) engendre un véritable bouleversement au sein de la pêcherie artisanale et relance un secteur en perte de vitesse depuis 1980.

En 1991, au vu du succès des palangriers asiatiques débarquant à La Réunion, un armement local équipe son bateau de 12 m d'une palangre semi-automatique et procède à des essais qui se révèlent prometteurs. Quelques mois plus tard, l'incitation à l'investissement par des défiscalisation, le soutien des collectivités locales à la filière pêche, ainsi que l'arrivée de pêcheurs métropolitains poussés par la crise de la pêche en Europe, suscitent des vocations dans le secteur. C'est l'émergence d'une flottille ciblant l'espadon (*Xiphias gladius*) destiné principalement au marché européen et approvisionné par fret aérien.

Conformément aux objectifs définis au niveau international par la commission thonière de l'océan Indien (CTOI), la France, en tant qu'État pêcheur, se doit de contribuer au développement durable de l'exploitation et à la gestion à long terme des ressources pélagiques.

La recherche en appui pour un développement durable

C'est dans ce contexte que l'Ifremer a initié un programme scientifique et technique d'accompagnement au développement de la pêcherie hauturière des grands pélagiques à La Réunion, appelé « **Programme**

Palangre Réunion » (PPR). Ce programme est piloté par le laboratoire Ressources halieutiques de l'Ifremer/Réunion. Il a été mené en collaboration scientifique étroite avec l'Institut de recherche pour le développement (IRD), le laboratoire d'Écologie marine de l'université de La Réunion (Écomar) et différents laboratoires métropolitains de l'Ifremer. Il a bénéficié de la participation active des armements locaux.

Le PPR a démarré en 1998 et il s'achèvera fin décembre 2001. Le budget global du projet s'élève à 11 MF. Il est cofinancé par l'Union européenne (Fonds FEDER), le conseil régional, le conseil général, l'État, l'Ifremer, l'IRD et l'université de La Réunion.

L'ensemble des travaux scientifiques est réparti en 6 actions

- *Action 1* : collecte, compilation et communication des données de pêche sur l'activité palangrière.
- *Action 2* : étude des caractéristiques biologiques de l'espadon (*Xiphias gladius*).
- *Action 3* : étude sur le comportement à méso-échelle des principales espèces capturées par la pêcherie palangrière.
- *Action 4* : optimisation de la pêche par l'étude des relations entre distribution de la ressource et conditions océanographiques (étude traitée en partenariat avec l'IRD).
- *Action 5* : optimisation de la stratégie de pêche.
- *Action 6* : étude de la croissance du thon patudo (*Thunnus obesus*) (étude traitée par le laboratoire Écomar).

Les principaux résultats du PPR

Action n° 1 - Chapitre I

Elle a permis de définir, de mettre en place et de faire fonctionner le système statistique de suivi de la pêcherie palangrière. Elle s'inscrit dans une démarche de pêche responsable dont les résultats permettent aux professionnels et aux gestionnaires réunionnais de mesurer l'impact de leur pêcherie sur les stocks de poissons pélagiques partagés avec les pays riverains et pêcheurs de l'océan Indien. Concernant l'espèce cible

principale, l'espadon, les débarquements annuels de la flottille réunionnaise sont de l'ordre de 2000 tonnes. Ils représentent donc moins de 6 % des captures totales de l'espèce dans l'océan Indien (35 000 tonnes). Le système mis en place dans le cadre de cette action va permettre de pérenniser le suivi de l'activité palangrière réunionnaise et de fournir à la commission thonière de l'océan Indien (CTOI), les données indispensables aux évaluations et à la gestion durable de cette ressource partagée.

Action n° 2 - Chapitre III

Elle a permis d'étudier, pour la première fois, les caractéristiques biologiques de l'espadon de l'océan Indien. Les travaux ont été centrés sur les paramètres indispensables à la gestion de cette ressource, à savoir : la croissance par l'étude des pièces osseuses et la reproduction. Les résultats acquis ont pu être comparés à ceux obtenus dans les autres océans. Ils apportent des connaissances nouvelles sur l'espèce et constituent une contribution importante de La Réunion à la gestion des stocks d'espadon de l'océan Indien.

Action n° 3 - Chapitre II

Les expérimentations menées dans le cadre de cette action permettent d'améliorer les connaissances du comportement des poissons pélagiques vis-à-vis de l'engin de pêche (caractéristiques de l'engin, type d'hameçon, longueur de ligne, etc.) et des paramètres extérieurs comme la marée, la lune et l'heure du jour. Les résultats montrent que des progrès sensibles pourraient être obtenus en changeant certaines caractéristiques actuelles de l'exploitation.

Action n° 4

Elle a été confiée à l'IRD. Les résultats du croisement des données d'environnement (acquisition par satellite) et des données de pêche (collectées par l'Ifremer), montrent que le lien environnement/ressources mérite d'être approfondi et pris en compte dans les futurs travaux halieutiques. Les méthodes développées, basées sur les principes de la vie artificielle, sont particulièrement innovantes. Elles apportent une contribution scientifique fondamentale pour l'étude des ressources pélagiques.

Action n° 5 - Chapitre IV

La première partie de l'action n° 5 a permis de mettre au point une technique de capture des grands pélagiques à l'aide d'anes-thésiant diffusé par des hameçons injecteurs. L'objectif initial était de réduire le stress de l'animal à la capture et donc d'améliorer la qualité de la chair. Bien que les résultats sur ce point soient satisfaisants, la mise en œuvre opérationnelle à grande échelle reste actuellement difficile. Par contre, la technique s'est avérée très efficace pour des opérations de pêche scientifique, en particulier pour le marquage des grands poissons pélagiques, animaux généralement très combattifs. La réduction du stress réduit sensiblement le taux de mortalité après marquage.

Les mammifères marins, principalement les pseudorques (*Pseudorca crassidens*) et les globicephales (*Globicephala macrorhynchus*), exercent une prédation sur les palangres qui limite considérablement la rentabilité de cette filière. Le phénomène est mondial, toutes les flottilles palangrières des trois océans le subissant dans des proportions qui peuvent atteindre 17 % de la capture totale. Cette action a permis d'évaluer à 4 % les pertes occasionnées par cette prédation dans la zone d'activité de la flottille réunionnaise. Des tests de matériels répulsifs (émetteurs acoustiques) ont été effectués dans un cadre expérimental, mais les résultats obtenus montrent que l'efficacité de ce matériel n'est pas suffisante au regard des inconvénients liés à leur mise en œuvre.

Action n° 6

Elle concerne l'étude de la croissance du Patudo (*Thunnus obesus*). Elle a été confiée au laboratoire Écomar. Les résultats obtenus sont de la plus grande importance puisqu'ils permettent de quantifier un paramètre indispensable à l'évaluation et à la gestion de cette ressource à l'échelle de l'océan Indien, données jusque-là indisponibles pour la zone. Il s'agit d'une contribution déterminante, apportée par la recherche réunionnaise, à l'effort de gestion des ressources de grands migrateurs gérées à l'échelle de l'océan Indien, dans le cadre des travaux de la CTOI.

Le développement de la pêche à La Réunion repose sur un concept de haute valorisation des ressources, chaque poisson devant produire le maximum de richesse, autant pour tirer le meilleur profit d'une ressource limitée que pour pallier aux contraintes d'éloignement des grands marchés. La stratégie de développement a été basée sur une flottille locale qui doit s'intégrer dans une filière parfaitement maîtrisée, de la capture à la consommation.

Par une meilleure connaissance des ressources et l'optimisation des modes d'exploitation, la recherche contribue au développement harmonieux de la filière dans le respect des principes d'une exploitation durable de ces ressources partagées. Dans le cadre du Programme Palangre Réunion (PPR) les équipes se sont concentrées sur des objectifs de recherche finalisée. Les collaborations et la complémentarité entre les partenaires scientifiques (Ifremer, IRD, Université), ainsi que la participation des professionnels, ont permis d'acquérir des connaissances concrètes, indispensables à l'exercice d'une pêche responsable.

Ce programme de Recherche a également permis de développer de nombreuses collaborations avec les organismes scientifiques d'autres pays de l'océan Indien. Les résultats montrent que La Réunion peut, grâce à son potentiel de recherche et au dynamisme de ses professionnels de la pêche, jouer un rôle moteur dans le développement durable et la gestion rationnelle des ressources halieutiques de la zone du sud-ouest de l'océan Indien.

François Poisson et Marc Taquet

Sommaire

Résumé	3	Premiers essais de marquages d'espadon (<i>Xiphias gladius</i>) à l'aide de marques intelligentes archives de type « pop up »	128
Chapitre I - Collecte, compilation et communication des données de pêche sur l'activité palangrière		François Poisson, Rose-Marie Bargain, Marc Taquet	
Structuration et mise en place d'une base de données halieutiques spatio-temporelles géoréférencées pour le suivi des pêcheries palangrières dans le sud-ouest de l'océan Indien	9	Chapitre III - Étude des caractéristiques biologiques de l'espadon (<i>Xiphias gladius</i>) dans le sud-ouest de l'océan Indien	
François Poisson		Étude de la croissance de l'espadon (<i>Xiphias gladius</i>)	139
Chapitre II - Description et analyse des stratégies de pêche et du comportement des espèces cibles		Karine Vanpouille, François Poisson, Marc Taquet, André Ogor, Hervé Troadec	
Description de la technique et des stratégies de pêche de la flottille palangrière réunionnaise	61	Biologie de la reproduction de l'espadon (<i>Xiphias gladius</i>)	170
François Poisson, David Guyomard		François Poisson, Corentin Marjolet, Christian Fauvel	
Étude du comportement des principales espèces pélagiques capturées par la pêcherie réunionnaise	79	Chapitre IV - Optimisation de la pêche	
François Poisson, Jean-François Reynaud		Régulation du stress lors de la capture des grands poissons pélagiques	215
Analyse des interactions entre les captures de grands pélagiques de la flottille palangrière réunionnaise et les conditions de pêche (caractéristiques techniques, environnement)	106	David Roos, Agnès Riom, François Poisson	
Jean-Claude Gaertner, François Poisson, Marc Taquet		Évaluation du phénomène de déprédation dû aux mammifères marins	231
		François Poisson, Corentin Marjolet, Kim Mété, Marc Vanpouille	

Signalement bibliographique

Monographie :

Poisson F., Taquet M., 2001. L'espadon : de la recherche à l'exploitation durable. Programme Palangre Réunionnais, Rapport final, 248 p.

Article :

Poisson F., Marjolet C., Fauvel C., 2001. Biologie de la reproduction de l'espadon (*Xiphias gladius*). In: L'espadon : de la recherche à l'exploitation durable. Poisson F., Taquet M. (coord). Programme Palangre Réunionnais, Rapport final, 170-211.

Chapitre I

Collecte, compilation et communication des données de pêche sur l'activité palangrière

Structuration et mise en place d'une base de données halieutiques spatio-temporelles géoréférencées pour le suivi des pêcheries palangrières dans le sud-ouest de l'océan Indien

François Poisson

lfremer, laboratoire Ressources halieutiques, rue Jean Bertho, BP 60, 97822 Le Port Cedex, La Réunion, France

Introduction

L'archivage puis la valorisation des informations recueillies au cours de l'exécution des différentes actions de ce programme passent par la constitution d'une base de données bien structurée qui permet d'accéder rapidement à l'information. Ce chapitre a pour but de décrire avec précision la base de données conçue pour archiver l'ensemble des données collectées au cours du programme. La mise en place et l'entretien de cette base permettent de répondre aux objectifs fixés : suivre l'évolution de l'activité de la flottille locale à travers des indicateurs d'efforts et de rendements, restituer des synthèses et analyses de l'information collectée aux décideurs et aux professionnels, contribuer à la gestion de cette ressource en communiquant les données requises à la commission thonière de l'océan Indien (CTOI).

L'évolution de la pêcherie réunionnaise de 1994 à 2000 sera présentée et commentée. Un bilan des fluctuations interannuelles, saisonnières et géographiques des efforts de pêche, des prises et des rendements est dressé. Pour rendre accessible rapidement ces informations, un atlas des pêcheries a été conçu à l'attention des professionnels. La présentation de cet atlas, fourni sous forme d'un cédérom, fait l'objet de la dernière partie de ce document.

Sources des données

Les données d'activité de la flottille

Des carnets de pêche ont été mis à la disposition de toutes les unités palangrières réunionnaises. Ils sont collectés à fréquence régulière auprès des armements et patrons de pêche. Ces registres de bord apportent des informations géoréférencées sur l'effort et les prises pour chaque opération de pêche.

Les données à caractère biologique

Plusieurs plans d'échantillonnage ont été mis en place pour collecter régulièrement des données à caractère biologique. Les observateurs scientifiques embarqués à bord des palangriers professionnels mesurent la majorité des individus capturés par l'engin de pêche et prélèvent des pièces biologiques pour les études menées sur la reproduction et la croissance de l'espadon. Ces informations peuvent être reliées à une date et un lieu géographique précis permettant un traitement des données à une échelle spatio-temporelle fine. Les autres opérations d'échantillonnage de taille sur les espèces cibles de la pêcherie sont pratiquées au port de la Pointe des Galets lors des débarquements ou dans les usines de transformation de poissons. Il s'agit d'échantillonnages sans sélection de la taille. Les informations géographiques et temporelles ne peuvent pas être recueillies au cours des échantillonnages effectués lors des débarquements. Ces mesures sont donc reliées à la marée entière du navire.

Les données des pêches expérimentales

Les observations collectées lors d'expérimentations en mer visant à étudier le comportement des espèces cibles vis-à-vis de l'engin de pêche sont aussi intégrées dans la base (voir p. 79). Il s'agit principalement des caractéristiques de « mordage¹ » déterminées à l'aide d'horloges d'hameçons disposées sur une fraction de l'engin de pêche lors de campagnes expérimentales.

Structure de la base de données relationnelle

La base de données Activité des palangriers a été développée sous Access[®]. Ce système de gestion de base de données relationnelle opérant sous Windows peut être mis en œuvre sur tout micro-ordinateur. Microsoft

1. Mordage : action d'attaque d'un poisson sur un hameçon.

Access offre la possibilité de fractionner l'archivage des données en plusieurs tables thématiques hiérarchisées, ce qui permet d'éviter les problèmes de redondance d'informations et de faciliter les opérations de saisie. La base de données s'articule autour de 6 tables principales se rapportant à un thème précis.

Les tables

Bateau

La table Bateau contient les renseignements sur les caractéristiques des unités de pêche (longueur, capacité, année de mise en exploitation, numéro d'immatriculation, nom du propriétaire). Ces informations sont obtenues auprès de la direction départementale des Affaires maritimes. Afin de suivre les recommandations internationales pour les soumissions de données de pêche relatives aux flottilles, certains éléments permettant une identification des navires ont été ajoutés (signal radio, numéro de contrat d'assurance Lloyd, numéro de licence et dates effectives de celle-ci s'il y a lieu). Enfin, d'autres champs autorisant des tris pour des évaluations spécifiques aux recherches du laboratoire complètent cette liste de renseignements (définition de segments en fonction de la longueur du bateau). La clé primaire est affectée au code du bateau. Au total, 23 champs sont prévus dans cette table pour la caractérisation de chaque unité de pêche.

Marée

La table Marée permet de saisir les dates de départ et d'arrivée pour chacun des navires de la flotte. Les champs « biologie », « hook_timer », « répulsifs » sont cochés pour signaler les thèmes de la campagne lors d'embarquements d'agents de l'Ifremer. Pour indiquer qu'un échantillonnage biométrique a bien été effectué dès le retour du bateau, le champ « info » est validé. Cette table est composée de 8 champs.

Pêche

La table Pêche qui compte 81 champs vise à renseigner chacune des opérations de pêche de la marée accomplie. Elle peut être divisée en quatre rubriques principales distinctes. Les champs correspondent directement aux indications figurant sur les carnets de pêche. Six champs sont consacrés aux paramètres météorologiques (direction et force du vent, état de la mer, direction de

la houle, pression atmosphérique, température de l'eau de mer). Le patron décrit sa stratégie et les caractéristiques de l'engin de pêche dans les champs suivants : zone de pêche, type d'appât, nombre d'hameçons, fréquence des leurres lumineux, longueur des orins de bouées, profondeur atteinte par l'engin (estimation), vitesse de filage, longueur de ligne mère, positions géographiques, heures de début et de fin de l'opération de pêche. Quatorze champs détaillent les prises en nombre de poissons et en poids pour 12 espèces ou groupes d'espèces (requins, marlins). Il est par ailleurs demandé aux patrons d'indiquer le nombre de poissons attaqués par les requins ou par les mammifères marins et de mentionner la capture accidentelle de tortues.

Espèce

Les noms vernaculaires, scientifiques ainsi que la nomenclature internationale des espèces les plus représentées dans les captures de la flottille réunionnaise constituent la table Espèce.

Biométrie

Dans la table Biométrie sont reportées les mensurations effectuées sur les poissons lors des débarquements et des campagnes scientifiques. Il est impossible d'affecter la prise à un jour de pêche donné (ou à une position géographique précise) compte tenu du fait qu'aucun plan de cale précis n'est respecté lors de l'opération de « glaçage² » des poissons. Ces données sont donc rapportées à une campagne de pêche.

Biologie

La table Biologie archive les informations liées aux poissons capturés lors des campagnes scientifiques. Ainsi, 18 champs permettent de saisir, pour chaque individu, différentes mensurations, le poids, le sexe et le stade de maturation, le résultat des observations de l'estomac (réplétion, digestion, type de proie), le type de pièce biologique prélevée et les traitements appliqués à ces échantillons (gonade, nageoire anale, coupe de la seconde épine de la nageoire, histologie), l'état de l'animal lors de la capture (survie). Plusieurs rubriques sont spécifiques aux valeurs enregistrées lors de l'emploi d'horloges d'hameçons (numéro de l'hameçon, heure de mouillage, heure de récupération et heure enregistrée sur l'horloge).

2. Glaçage : répartition des poissons dans la cale.

Architecture de la base de données

Afin de manipuler simultanément les données de plusieurs tables, il est indispensable de créer des relations entre elles. Les relations sont du type « un-à-plusieurs », ce qui signifie que chaque enregistrement de la table source peut être associé à plusieurs enregistrements dans la table de destination. Ainsi, un bateau, par exemple, est associé à plusieurs marées. Les règles d'intégrité référentielle garantissent une liaison correcte entre les données et empêchent la suppression accidentelle de données

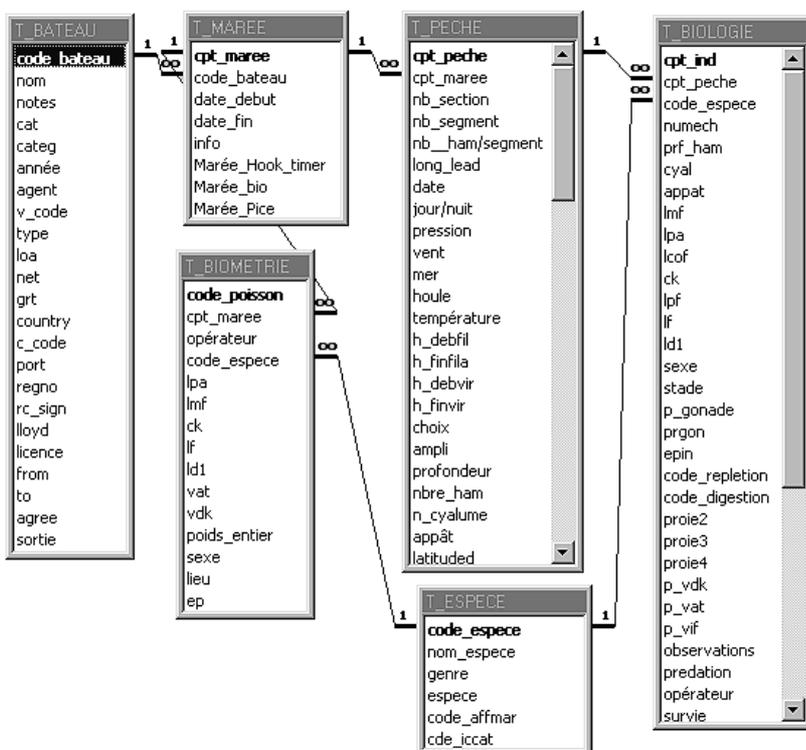


Figure 1- Relations établies entre les tables de la base Activité des palangriers.

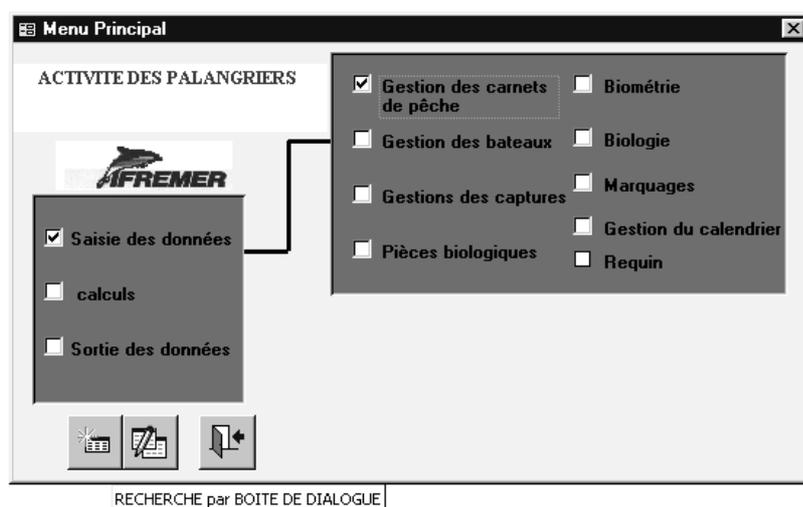


Figure 2 - Formulaire Menu principal.

reliées. La structure actuelle de la base est évolutive, Access® autorise l'introduction, la modification ou la suppression de tables ou de champs.

La figure 1 présente les différentes relations établies entre les cinq principales tables de la base Activité des palangriers : bateau, marée, pêche, espèce, biologie et biométrie.

Les requêtes

L'objet Requête permet d'extraire des données contenues dans une ou plusieurs tables. Les informations répondant à cette interrogation peuvent être visualisées sous forme de tableaux. En adaptant la formulation de la requête, il est par ailleurs possible d'effectuer des tris dans les enregistrements, des calculs à partir des différents champs. Le résultat d'une requête peut aussi servir de base à une autre requête, à un graphique ou à un formulaire. Les requêtes peuvent ensuite être sauvegardées et stockées pour une utilisation ultérieure.

Les formulaires

L'objet Formulaire de la base de données permet à la fois de créer des graphiques, des feuilles de saisie de données ainsi que des menus pour accéder aux différents formulaires de saisie thématique. Les informations sont incrémentées dans la base en respectant un ordre précis induit par les relations établies entre les différentes tables et la règle d'intégrité référentielle. Il convient que les tables Bateau et Marée soient préalablement renseignées avant la saisie d'informations complémentaires (pêche, biologie, biométrie). Le premier formulaire qui apparaît dès l'ouverture de la base permet de choisir le formulaire de saisie recherché (fig. 2).

Le formulaire Gestion des carnets de pêche basé sur une requête spécifique intègre à la fois les tables Marée et Pêche. Ce formulaire peut être ouvert en « mode création » lorsqu'il s'agit de la saisie proprement dite ou en « mode ajout » lorsqu'une ligne de données ou une valeur doit être incrémentée ou corrigée (fig. 3). Dans ce cas, la recherche de la marée concernée s'effectue grâce à un formulaire intermédiaire, appelé Boîte de dialogue, qui autorise la recherche de la marée et l'ouverture du même formulaire sur l'enregistrement recherché (fig. 4). Chaque ligne de ce formulaire renseigne une opération de pêche.

La saisie d'informations dans les tables Biologie et Biométrie nécessite une recherche préalable de la marée considérée via la boîte de dialogue décrite précédemment. Dans les deux cas, chaque ligne correspond à un individu. Pour le formulaire Données échantillonnages biologiques (fig. 5), les informations concernent une opération de pêche alors que, pour le formulaire d'échantillonnages biométriques, les données sont liées à l'ensemble des opérations de pêche d'une marée donnée (fig. 6).

Dans le but d'alléger le système, la base de donnée a été scindée en plusieurs fichiers Access (.mdb) afin d'attribuer à chacun de ces fichiers (ou sous-base de données) une fonction bien particulière. Ainsi, le fichier Access (.mdb) ou base Paltables qui constitue le noyau du système ne contient que les tables présentées ci-dessus. Le fichier Palsaisie est dévolu à l'enregistrement des données et ne contient que des formulaires de saisie et les requêtes qui ont permis de les constituer. Le fichier PalsIG contient des requêtes adaptées aux traitements des données géoréférencées mises en forme avec les logiciels adaptés (SIG). D'autres fichiers (Pal ?) comportant des requêtes de sélection et des formulaires graphiques associés peuvent être générés pour visualiser certains résultats spécifiques à la flottille (évolution des efforts et rendements par exemple). Toutes ces bases périphériques exploitent directement les tables externes de la base principale Paltables. Le lien « attache » est créé avec chacune de ces tables au sein de chaque fichier ou base « satellite » (fig. 7). Il est ainsi possible de créer autant de bases adaptées à des traitements spécifiques en les liant aux tables de référence contenues dans la base principale Paltables (fig. 7).

Liaisons avec les autres bases de données

Base de données de la DDAM

Une seconde base de données Captures des pêcheries réunionnaises développée par l'Ifremer (Tessier & Poisson, 1997) est gérée par la direction départementale des Affaires maritimes (DDAM). Cette base permet d'établir les statistiques de pêche pour les trois secteurs de la pêche réunionnaise (pêche artisanale, pêche côtière et pêche au large) à partir des déclarations volontaires des captures soumises par différents armements et artisans pêcheurs. Les captures nominales correspondent aux débarquements auxquels sont ajoutées les pertes de

cpt_peche	cpt_mare	instrumentation	pice	en_peche	date	jour/nuit	pression	vent	mer	houle	tem
3628	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Non	25/03/96						
3629	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Oui	26/03/96		1012	SE	p aît	modéré	
3630	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Oui	27/03/96		1013	SE	aît	forte	
3631	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Oui	28/03/96		1015	SE	aît	modéré	
3632	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Oui	29/03/96		1013	SE	aît		
3633	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Non	30/03/96						
3634	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Oui	31/03/96		1015	SE	aît		
3635	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Oui	01/04/96		1014	NE	aît		
3636	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Oui	02/04/96		1015	NE	p aît		
3637	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Oui	03/04/96		1016	NE	houleu		
3638	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Oui	04/04/96		1017	SE	aît	forte	
3639	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Non	05/04/96						
3640	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Oui	06/04/96		1015	SE	forte	forte	
3641	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Oui	07/04/96		1015	SE	aît		
3642	591	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Oui	08/04/96		1015	SE	houleu		

Figure 3 - Formulaire Gestion des carnets de pêche.

Nom de bateau	Date
amaryllis	15/11/96
amaryllis	30/09/96
amaryllis	29/07/96
amaryllis	16/06/96
amaryllis	21/04/96
amaryllis	25/03/96
amaryllis	27/02/96
amaryllis	16/01/96

Figure 4 - Formulaire Boîte de dialogue permettant de se positionner sur un formulaire correspondant à une marée déjà enregistrée.

pt_ind	cpt_peche	n° échant	cyalume	nham	lorin	courant	Longueur	espece	lpa	lmf	ck	lcof	lpf	ld1	stade	sexe	gon
36233	11661		oui		15			espadon	38	130	69	112				M	Nc
36234	11661		oui		15			espadon	66	195	111	164			5	F	Nc
36235	11661		oui		15			espadon								I	Nc
36236	11661		oui		15			espadon								I	Nc
36237	11661		oui		15			espadon	29	100	59	85			2	F	Nc
36238	11661		oui		15			espadon									Nc
36412	11661		oui		15			inconnu									Nc
36413	11661		oui		15			inconnu									Nc
36414	11661		oui		15			inconnu									Nc

Figure 5 - Formulaire Données échantillonnages biologiques.

pt_maree	ode_poisson	opérateur	espèce	lpa	lmf	ck	sexe	lf	ld1	vat	vdk	poids_entre
1592	24633	DL	pinde blanc				F	146				0
1592	24634	DL	albacore				I	145				0
1592	24635	DL	albacore				I	151				0
1592	24636	DL	patudo				I	85	27			0
1592	24637	DL	albacore				I	147				0
1592	24638	DL	lancier				I	152				0

Figure 6 - Formulaire Saisie échantillonnages biométriques.

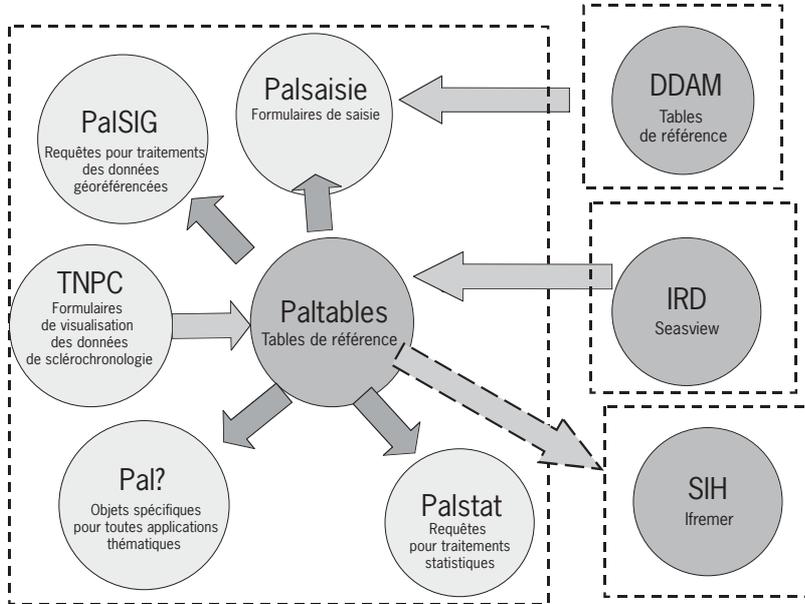


Figure 7 - Schéma représentant les différents fichiers des bases de données gérées par l'Ifremer, la DDAM et l'IRD (les flèches indiquent les liens d'attachement des tables des bases principales avec les fichiers « satellites »).

pois dues aux traitements du poisson à bord. Une enquête auprès des armements et des unités de transformation a permis d'estimer les facteurs de correction (tab. 1).

Cette base est supposée contenir l'ensemble des informations sur les prises totales effectuées par toutes les unités de pêche inscrites à La Réunion. Il est donc permis d'établir une relation entre les deux bases de données présentées et d'estimer un premier taux de couverture (Poisson *et al.*, 1998) défini comme le rapport entre le nombre annuel de marées consignées par les patrons de pêche (base de données Ifremer) et le nombre total de marées enregistrées pour la flottille entière (base de données de la DDAM). Ce pourcentage traduit la participation des professionnels à cette enquête.

Pour être plus précis, un calcul identique est effectué au niveau du nombre d'opérations de pêche (taux de couverture 2) pour permettre des extrapolations des prises et de l'effort de l'ensemble de la flottille par carré statistique de cinq degrés de côté conformément aux exigences de la CTOI.

$$\text{Taux de couverture 1} = \frac{\text{Nombre de marées archivées dans la base de données de l'Ifremer}}{\text{Nombre total de marées déclarées archivées dans la base de données de la DDAM}} * 100$$

$$\text{Taux de couverture 2} = \frac{\text{Nombre d'opérations de pêche archivées dans la base de données de l'Ifremer}}{\text{Nombre total d'opérations de pêche déclarées archivées dans la base de données de la DDAM}} * 100$$

Tableau 1 - Coefficients à apporter aux différents produits transformés débarqués à La Réunion pour estimer le poids vif (VDK : vidé décapité, VAT : vidé avec tête).

Nom des espèces	Code CTOI	Produit	Coefficient (poids vif)
<i>Tetrapturus angustirostris</i>	SSP	VAT	1,14
<i>Tetrapturus angustirostris</i>	SSP	VDK	1,2
<i>Tetrapturus angustirostris</i>	SSP	Longes	2
<i>Euthynnus affinis</i>	KAW	VDK	1,13
<i>Thunnus albacares</i>	YFT	VAT	1,13
<i>Thunnus albacares</i>	YFT	VDK	1,3
<i>Thunnus albacares</i>	YFT	Longes	1,82
<i>Thunnus alalunga</i>	ALB	VAT	1,13
<i>Thunnus alalunga</i>	ALB	VDK	1,3
<i>Thunnus alalunga</i>	ALB	Longes	2
<i>Thunnus obesus</i>	BET	VAT	1,13
<i>Thunnus obesus</i>	BET	VDK	1,3
<i>Thunnus obesus</i>	BET	Longes	2
<i>Istiophorus platypterus</i>	SFA	VAT	1,14
<i>Istiophorus platypterus</i>	SFA	VDK	1,2
<i>Istiophorus platypterus</i>	SFA	Longes	2
<i>Tetrapturus audax</i>	MLS	VAT	1,14
<i>Tetrapturus audax</i>	MLS	VDK	1,2
<i>Xiphias gladius</i>	SWO	VAT	1,18
<i>Xiphias gladius</i>	SWO	VDK	1,33
<i>Xiphias gladius</i>	SWO	Longes	2,05
<i>Xiphias gladius</i>	SWO	Longes extra	4,84
<i>Acanthocybium solandri</i>	WHA	VAT	1,13
<i>Gymnosarda unicolor</i>	DOT	VAT	1,13

L'effort de pêche pourrait être estimé, à partir de la base de données de la DDAM, en nombre de jours de mer. Le croisement des informations figurant sur les fiches de débarquements fournies par les armateurs et sur les carnets de pêche montre des différences non négligeables car la date de fin de marée indiquée sur les fiches est souvent associée au jour du débarquement du produit de la pêche et non à l'arrivée du bateau au port, soit dans certains cas des différences de plusieurs jours. Par ailleurs, il n'est pas rare que les armements cumulent sur cette fiche le résultat de deux ou plusieurs marées. Ce manque de précision limite l'utilisation de toutes les informations ; ainsi, il est impossible par exemple d'utiliser le nombre de jours de mer comme indice d'effort.

Base de données de l'IRD

La station IRD Seas réceptionne, traite et archive des données satellitaires de différents types afin de produire des représentations (cartes) des paramètres suivis (température de surface, couleur de l'eau, topographie à la surface de la mer, vent à la surface de l'eau et vorticité). L'objectif de l'étude est de croiser ces différentes strates d'informations avec des données de la pêcherie palangrière locale. Aussi, des requêtes de sélection permettent d'extraire les informations désirées sur les opérations de pêche aux échelles spatio-temporelles souhaitées. Les liens entre la base de données Activité des palangriers et les autres bases de données existantes sont illustrés ci-contre (fig. 8).

Bilan sur le contenu des tables de la base

La table Bateau

Entre 1993 et 2000, l'ensemble des navires français ayant déclaré leurs prises à l'Administration française a été reporté dans cette table, soit 46 navires. Cette liste n'est en aucun cas à l'image de la flottille actuelle, certains navires ayant abandonné leur activité ou quitté définitivement La Réunion. Un champ spécifique permet d'identifier deux types de navires au sein de la flottille. Ainsi, pour certaines analyses, nous distinguerons les navires d'une taille inférieure ou égale à 16 mètres (segment 1), qui opèrent aux abords de La Réunion (dans une zone de 200 milles), des navires d'une longueur supérieure strictement à 16 mètres (seg-

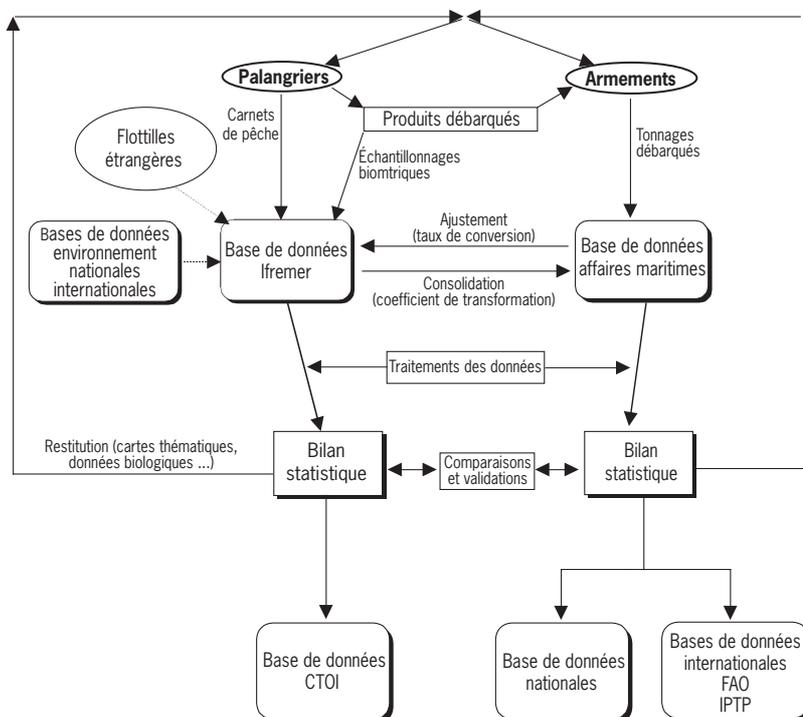


Figure 8 - Différentes actions du programme et liens entre les différentes bases de données en place.

ment 2) qui peuvent opérer dans des zones plus éloignées (Seychelles, canal du Mozambique, côte sud-est malgache).

Les tables Marée et Pêche

Pour la période comprise entre le 10 janvier 1993 et le 31 décembre 2000, 1 815 marées ont été consignées dont 863 sont relatives à la période du programme (1998-2000). Le tableau 2 présente les taux de couverture annuels de la flottille.

Les champs décrivant les conditions météorologiques sont partiellement renseignés, certains navires ne disposant pas de capteurs (pression, température de l'eau). Par ailleurs, les patrons ne considèrent pas cette information comme majeure, sauf cas exceptionnel (direction et hauteur de la houle). Des embarquements réguliers ainsi que des échantillonnages aux débarquements ont montré que les carnets de pêche fournissent des informations fiables sur les positions des filages, sur les techniques utilisées (nombre d'hameçons mouillés, nombre de leurres utilisés, temps de pose de la ligne...), sur les paramètres environnementaux (pression, température de surface...) ainsi que sur le nombre total d'individus capturés (notamment pour les espèces majeures). Les tableaux suivants présentent le nombre d'opérations de pêche

archivées dans la base de données (tab. 3) et les taux de couverture (2) pour les deux segments (tab. 4, 5).

Le premier taux de couverture (1) calculé à partir du nombre de marées donne une première idée de l'efficacité de l'enquête pour chaque année. Mais, compte tenu des fréquentes variations dans la composition de la flottille, il est préférable de suivre l'évolution du second taux établi à partir des nombres de filages. En effet, la taille du navire détermine le nombre d'opérations de pêche par campagne de pêche.

Ce suivi nécessite une mobilisation permanente de l'enquêteur auprès des patrons et des équipages afin de suivre de façon quasi

journalière les mouvements des bateaux mais aussi des marins. Les visites sur les bateaux permettent de récupérer rapidement les fiches de pêche remplies et de distribuer en temps voulu les carnets de pêche vierges. Force est de constater que le taux de retour est supérieur pour les navires du second segment. Du fait de leurs rotations rapides, l'activité du premier segment est plus difficile à suivre. La baisse des taux de couverture dans le temps est le fait cumulé de l'augmentation globale du nombre de navires, et plus particulièrement des palangriers du premier segment, mais aussi du recentrage de l'activité du laboratoire sur les autres actions du programme.

Tableau 2 - Bilan du taux de couverture (1) des campagnes de pêche de la flottille réunionnaise entre 1993 et 2000 établi par le système d'enquête mis en place par l'Ifremer.

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Nombre de marées suivies	55	171	204	182	196	254	361	248
Taux de couverture du nombre de marées	37 %	87 %	99 %	58 %	47 %	57 %	58 %	36 %

Tableau 3 - Nombre de marées et d'opérations de pêche de la flottille réunionnaise entre 1993 et 2000 archivées dans la base de données.

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Nombre de marées suivies	55	171	204	182	196	219	303	250
Nombre d'opérations de pêche décrites	197	788	1136	1512	1384	1406	1815	1267

Tableau 4 - Bilan du taux de couverture (%) des opérations de pêche (2) du premier segment de la flottille réunionnaise entre 1994 et 2000 établi par le système d'enquête mis en place par l'Ifremer.

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Janvier	91	52	100	21	54	28	39
Février	42	65	62	28	51	33	45
Mars	100	72	70	26	54	44	34
Avril	85	54	56	73	31	33	35
Mai	44	85	44	56	27	31	24
Juin	62	91	67	100	49	32	32
Juillet	77	78	56	73	66	33	30
Août	63	91	49	69	68	33	13
Septembre	76	76	36	50	33	35	22
Octobre	93	46	18	54	42	23	14
Novembre	45	100	18	44	64	28	10
Décembre	42	60	17	59	48	34	12

Tableau 5 - Bilan du taux de couverture (%) des opérations de pêche (2) du second segment de la flottille réunionnaise entre 1994 et 2000 établi par le système d'enquête mis en place par l'Ifremer.

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Janvier	0	100	82	100	100	55	92
Février	0	88	77	44	40	100	57
Mars	0	64	78	100	78	100	62
Avril	26	78	81	48	20	52	56
Mai	76	100	75	93	27	39	22
Juin	100	78	84	55	40	36	57
Juillet	55	70	56	54	20	62	43
Août	100	100	91	38	64	52	43
Septembre	80	89	37	100	34	57	34
Octobre	100	96	66	43	100	61	59
Novembre	38	62	55	60	34	70	51
Décembre	100	100	55	38	26	37	60

Par ailleurs, la mobilité perpétuelle des patrons par le changement de bateau, d'armement ou même d'activité (retour sur la métropole) a toujours été l'une des caractéristiques de la flottille palangrière réunionnaise. Cet état de fait, plus marqué ces deux dernières années, peut expliquer la difficulté de récupération d'informations. Ces chiffres font l'objet de révisions permanentes car des carnets de pêche peuvent être obtenus plusieurs mois après le traitement annuel des informations et leur diffusion. Il peut donc y avoir des ajustements par rapport aux publications précédentes des données. Ces modifications n'entraînent par ailleurs pas de changements majeurs dans les résultats produits.

Les tables Biométrie et Biologie

L'espadon

Le tableau 6 récapitule le nombre d'espadons mesurés par mois au cours de l'ensemble des échantillonnages effectués aussi bien à terre qu'en mer pour la flottille réunionnaise.

Le tableau 7 fait le bilan du nombre de mesures pouvant être reliées à une position géographique précise (position de départ de la ligne le jour du filage). Il s'agit d'un sous-ensemble du tableau précédent.

Le nombre d'espadons pour chaque marée n'étant toujours pas déclaré par les armements, le nombre total annuel d'espadons capturés par la flottille n'est pas disponible. Cette valeur est donc estimée en considérant le poids moyen d'un espadon à 50 kg (poids vif) et les captures enregistrées sur la même période. Ces valeurs calculées annuellement permettent de déterminer le pourcentage d'individus échantillonnés par rapport à la totalité d'individus débarqués (tab. 8).

Avec l'augmentation rapide des prises, l'effort d'échantillonnage a dû s'intensifier entre 1994 et 1996 pour représenter au moins 18 % des prises. Ceci est en grande partie dû à une forte participation des pro-

Tableau 6 - Bilan des échantillonnages mensuels de tailles d'espadons entre 1994 et 2000 à partir de la table Biométrie.

Mois	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Janvier	102	339	478	330	315	441	83
Février	46	334	407	307	140	209	141
Mars	262	199	462	425	145	328	118
Avril	300	211	309	393	175	199	151
Mai	140	127	374	219	302	135	136
Juin	398	206	512	188	319	183	58
Juillet	155	553	464	213	349	153	122
Août	412	301	358	270	256	89	126
Septembre	402	385	454	226	93	278	171
Octobre	482	195	399	422	142	190	109
Novembre	260	273	342	341	294	246	118
Décembre	450	296	235	316	103	183	0
Total	3 409	3 419	4 794	3 650	2 633	2 634	1 333

Tableau 7 - Bilan des échantillonnages mensuels de tailles d'espadons entre 1994 et 2000 à partir de la table Biologie.

Mois	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Janvier		251	213	246	302	361	92
Février		228	246	272	136	298	141
Mars		54	416	440	145	216	121
Avril		208	233	355	149	288	175
Mai	22	134	127	223	249	159	138
Juin	25	400	365	207	385	185	61
Juillet	62	343	440	128	208	150	45
Août	45	325	447	255	322	91	52
Septembre	74	161	433	330	136	153	66
Octobre	19	127	385	219	142	114	136
Novembre	16	216	288	318	243	164	127
Décembre		302	397	370	157	205	
Total	263	2 749	3 990	3 363	2 574	2 384	1 154

fessionnels à l'échantillonnage en mer et à l'augmentation de campagnes à bord des navires professionnels. Les taux d'échantillonnages se sont stabilisés durant la première phase du programme, en 1998 et 1999, où des campagnes régulières ont été organisées.

La diminution du nombre d'individus échantillonnés au cours de l'année 2000 s'explique aussi par le recentrage du laboratoire sur les autres actions du présent programme et par une baisse de participation des professionnels (tab. 8).

Tableau 8 - Bilan des différents échantillonnages effectués entre 1994 et 2000.

Année	Prises annuelles (tonnes)	Nb individus estimés	Nb individus échantillonnés (biométrie)	Nb individus échantillonnés (biologie)	% d'individus échantillonnés (biométrie)	% d'individus échantillonnés (biologie)
1994	729	14 580	3 409	263	23,4	1,8
1995	767	15 340	3 419	2 749	22,3	17,9
1996	1 331	26 620	4 794	3 990	18,0	15,0
1997	1 557	31 140	3 650	3 363	11,7	10,8
1998	2 076	41 520	2 633	2 574	6,3	6,2
1999	1 926	38 520	2 634	2 384	6,8	6,2
2000	1 741	34 820	1 333	1 154	3,8	3,3

Traitements spécifiques de l'information spatialisée

Établissement des statistiques pour la CTOI

À l'issue de sa troisième session, la commission a adopté un certain nombre de décisions et de recommandations, parmi lesquelles on trouve un chapitre consacré à la contribution statistique exigée par la CTOI de la part des pays membres. À ce titre, les données fournies doivent répondre à des critères stricts.

La création de requêtes adaptées permet de fournir des informations agrégées par carré statistique conformes aux attentes de cette instance internationale. La CTOI est en charge de la compilation des données suivantes :

1. Captures nominales annuelles par espèce, engin, pays et zone statistique FAO ;
2. Statistiques des captures accessoires et des rejets par les pêcheries thonières au même degré d'agrégation que celui des captures nominales ;
3. Statistiques mensuelles de captures et d'efforts par espèce, engin et zone de pêche (carré statistique) ;
4. Statistiques de fréquence de taille par espèce, engin, zone de pêche et mois ;
5. Statistiques annuelles des flottes de pêche thonière par métier et classe de taille ;
6. Registre des bateaux actifs de pêche thonière dans l'océan Indien, comprenant les spécifications du bateau et l'identité des propriétaires ;
7. Registre des activités des bateaux de pêche thonière étrangers (sur la base des visites au port).

Prises par espèce et efforts par carré statistique

À partir des données de la table Pêche et des taux de couverture établis pour chacun des segments, il est possible d'extrapoler à l'ensemble de la flottille le nombre d'individus de chacune des espèces capturés par carré statistique. Il convient de sommer, pour chaque strate temporelle, le nombre d'individus par carré et d'appliquer le taux de couverture (2) mensuel correspondant :

$$\text{Nb d'ind. par carré} = \sum \text{ind.} * T(2)$$

La somme de la valeur calculée pour les deux segments donne le nombre théorique d'individus capturés par l'ensemble de la flottille réunionnaise. Ces informations sont reportées dans le formulaire spécifique qui doit être transmis à la CTOI au terme de chaque année (<http://www.seychelles.net/iotc/French/TechInfo/Fdatasubs.htm>).

La même démarche est appliquée pour estimer, toujours par carré statistique et par mois, le nombre d'hameçons mis à l'eau par la flottille nationale.

Pertes dues à la prédation

Une estimation des pertes dues à la prédation a été faite à partir des carnets de pêche en recensant, d'une part, le nombre d'opérations de pêche durant lesquelles 100 % des prises ont été détruites par les mammifères marins. D'autre part, les rendements moyens de la flottille par mois et pour chacun des segments ont été calculés. En appliquant le taux mensuel respectif, on obtient le nombre d'espadons perdus ainsi que le tonnage correspondant. En adoptant le même principe, la quantité d'individus attaqués par les requins est aussi évaluée pour l'ensemble de la flottille.

Données de fréquences de tailles par carré statistique

Les données relatives aux tailles étant un élément clé pour l'évaluation des stocks de la plupart des poissons pélagiques, la fourniture de ces données se fait de manière annuelle sur la base de strates de 5° par mois. Les échantillonnages réguliers faits sur l'espadon ont permis d'établir les distributions de fréquence des tailles des prises (respectivement 4 749 et 1 261 individus mesurés) pour les deux carrés directement situés à l'ouest de La Réunion sur la période 1997-2000.

Fiabilité et mise à jour des données

Du point de vue administratif, le suivi de la pêcherie est sous la responsabilité de la direction départementale des Affaires maritimes. Ifremer prépare les tableaux de données à partir des bases de données disponibles (DDAM et Ifremer). Ces informations sont transmises ultérieurement par la voie administrative légale en vigueur aux instances nationales (direction des Pêches maritimes) pour envoi à la commission thonière de l'océan Indien.

D'un point de vue pratique, l'Ifremer, du fait de sa position externe au système de contrôle réglementaire et fiscal, et par sa position de support technique et scientifique à la profession, a pu développer des relations privilégiées avec la majorité de capitaines de pêche, pêcheurs et armements. Ces relations sont basées sur la confidentialité des résultats individuels et permettent d'obtenir des informations fines à des niveaux individuel et collectif (flottille).

Après un accompagnement de l'Ifremer, la responsabilité totale de ces opérations devrait être définitivement confiée à la DDAM. Malgré le caractère obligatoire de la soumission des carnets de pêche, souhaitons que la fiabilité des informations fournies demeure et que les lourdeurs administratives ne soient pas un frein ou une entrave à la cohésion du système actuel.

Afin de connaître l'efficacité du système de collecte d'informations à partir des carnets de pêche, la somme des estimations des prises par carré statistique pour chaque année a été comparée aux tonnages obtenus par le système déclaratif. Il convient d'énumérer aux différentes étapes le type d'erreurs susceptibles d'influencer ces résultats. L'extrapolation par carré est sujette :

- aux erreurs de mesures lors des échantillonnages qui ont permis d'estimer les équations de conversion ainsi que le poids moyen ;
- à l'estimation du taux de couverture.

Les erreurs dans les estimations des tonnages déclarés peuvent être dues :

- aux chiffres fournis par les armements ;
- aux erreurs de saisie de ces informations ;
- aux équations de conversion calculées pour chaque type de produits.

Le tableau 9 présente les estimations annuelles des captures d'espadon obtenues à partir de la base de données Ifremer et les tonnages déclarés (base DDAM). Les écarts entre les deux valeurs figurent dans ce même tableau.

Dans le cas de l'espadon, les écarts entre les valeurs déclarées et les estimations varient suivant les années entre 2,4 et 12,46 % du poids total. Pour les autres espèces et notamment le patudo, les écarts plus importants sont dus au manque de données biométriques. La taille moyenne pour cette espèce est établie sur un nombre d'échan-

tillons faible et ne tient pas compte des variations mensuelles de taille observées. La structure de la base, par sa conception, permet l'intégration de ces valeurs complémentaires et ainsi d'affiner les valeurs historiques en utilisant ces ajustements.

Liens avec Mapinfo

Les programmes d'installation de Microsoft Access® et Mapinfo™ sont équipés d'une option destinée spécialement à l'installation de ODBC (Open data base connectivity technology). ODBC est une interface de programmation permettant d'échanger facilement des données entre différents systèmes de gestion de base de données. Une option d'ouverture de table ODBC dans un menu de Mapinfo™ déclenche l'affichage d'une série de boîtes de dialogue qui permet de charger une table ou le résultat d'une requête directement dans une base Access pour consultation ou mise à jour. La plupart des opérations applicables aux tables Mapinfo™ standards peuvent être exécutées sur des tables liées. Cette option évite les opérations fastidieuses de transfert de fichier et autorise la mise à jour de cartes thématiques d'un format standard après simples changements de paramètres temporels (agrégation par mois ou par année) dans la requête de référence. La position théorique de référence d'une opération de pêche correspond au point de départ du filage.

Description de la pêcherie palangrière de 1994 à 2000

Efforts

Évolution de la flottille réunionnaise

Le développement de la flottille palangrière a été suivi depuis son origine (Poisson *et al.*, 1998 ; Poisson & René, 1999 ; Tessier & Poisson, 2000). Les navires ont été classés en fonction de leur rayon d'action potentiel.

Tableau 9 - Comparaison des estimations et des tonnages déclarés.

Année	Estimations (mt)	Tonnages (mt)	Variations (mt)	Pourcentage
1994	767	729	-38	5,21
1995	851	767	-84	10,95
1996	1 466	1 331	-135	10,14
1997	1 629	1 557	-72	4,62
1998	2 027	2 076	49	2,36
1999	1 877	1 926	49	2,54
2000	1 524	1 741	217	12,46

Nous distinguerons les unités d'une taille inférieure ou égale à 16 mètres (segment 1) des navires de plus grande capacité qui peuvent explorer des zones situées au-delà des 200 milles (segment 2). La figure 9 présente l'évolution de la flottille entre 1991 et 2000. Son analyse permet de distinguer trois phases importantes.

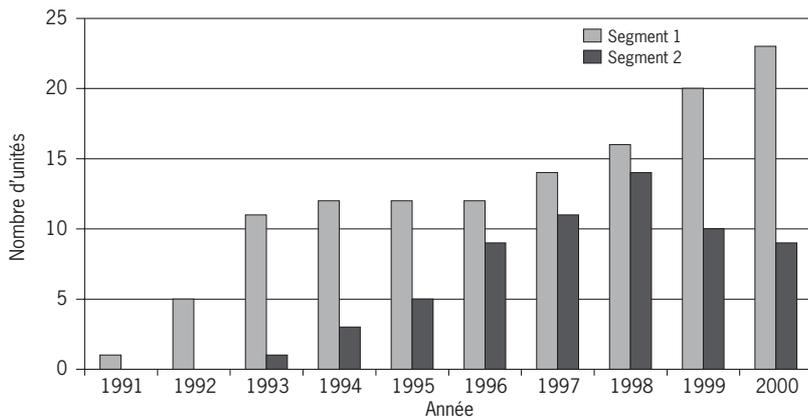


Figure 9 - Évolution de la flottille de palangriers entre 1991 et 2000.

Entre 1991 et 1996, on assiste à une phase de croissance rapide de la flottille. Après des essais concluants menés par un navire de treize mètres armé par une entreprise locale, l'arrivée d'unités de plus de 16 m à La Réunion marque le début de la phase d'exploration de nouvelles zones de pêche. Cette tendance se poursuit les années suivantes avec l'entrée en flotte de cinq catamarans de nouvelles générations et de trois monocoques de trente mètres reconvertis dans cette activité. Parallèlement à l'arrivée continue de bateaux mais aussi d'équipages venant de la métropole, on assiste à une implication progressive de la composante artisanale dans cette activité. Ainsi, en 1993, les collectivités locales décident de financer, à hauteur de 60 %, 3 palangriers de moins de 12 m qui sont confiés à des pêcheurs expérimentés en petite pêche. Une de ces unités est construite dans un chantier local, les deux autres en métropole mais en partenariat avec des entreprises réunionnaises. D'autres armements locaux apparaissent à partir de 1995, ceux existants s'agrandissent. La croissance rapide de ces petites exploitations s'explique en grande partie par un transfert du savoir-faire des patrons présents sur la zone depuis le début de cette pêcherie. Dans un premier temps,

ces petites structures préfèrent louer des bateaux à l'un des armements majeurs. Cela peut traduire pour les uns la volonté de s'imposer sur le marché encore « libre » en augmentant leur production tout en palliant le délai de construction de nouvelles unités. Pour les autres, cette solution leur permet de tester immédiatement la rentabilité d'une telle opération en repoussant les contraintes d'investissement.

Ce développement est accompagné par des actions menées par les organismes de recherche locaux qui ont contribué à l'essor rapide de cette pêcherie (diffusion de cartes satellitaires de température de surface et de résultats des analyses de carnets de pêche). Ces opérations sont menées par l'IRD et l'Ifremer dans le cadre du programme thonier régional entre 1994 et 1996.

En 1996, la flottille est donc constituée de 70 % de navires de moins de trois ans, spécialement adaptés à cette technique de pêche. Les plus grands sont équipés en matériel électronique performant (logiciel d'assistance à la pêche, liaison Inmarsat pour contacts permanents avec leur base et réception de données satellitaires).

La période comprise entre 1997 et 1998 constitue une phase caractérisée par l'augmentation plus rapide du nombre d'unités d'une taille supérieure à 16 mètres.

L'année 1999 semble être une année charnière dans l'évolution de cette flottille. Ainsi, la création d'un nouvel armement en 1999, composé de 3 catamarans de 25 m, ne suffit pas à compenser les départs successifs et réguliers (dès la fin 1998) des plus grandes unités vers d'autres zones de pêche (notamment l'océan Pacifique). Ce phénomène traduit le début d'une nouvelle phase où les navires du premier segment dominent très nettement. Ceci implique une forte concentration de la flotte dans les zones proches de La Réunion.

En 2000, parmi les trente-deux navires opérationnels, seulement 5 ont été reconvertis à cette activité. Les quatre derniers entrés en flotte sortent directement des chantiers et constituent la dernière génération d'un navire « type ». L'expérience des capitaines locaux a été prise en compte pour la conception finale. Ainsi, la dominance de navires typiquement conçus pour cette activité constitue l'une des caractéristiques majeures de cette flottille.

Évolution de l'effort total

La représentation de l'évolution du nombre estimé d'hameçons mis à l'eau par année met aussi en évidence les trois phases décrites précédemment (fig. 10). L'effort du premier segment a quasiment doublé entre 1995 et 1996, soit à la fin de la première phase, pour se stabiliser à un million en 1997 et 1998. En 1999, cette valeur est multipliée par 2,5.

Après une augmentation régulière depuis 1994, l'effort déployé par le second segment décroît depuis 1998, après avoir atteint un pic avec plus de 3 millions d'hameçons. Cette même année, plus de quatre millions d'hameçons ont été « mouillés » par la flottille. Il est à noter qu'il y a égalité de l'effort pour les deux segments en phase croissante en 1995 et en phase décroissante pour le second segment en 1999.

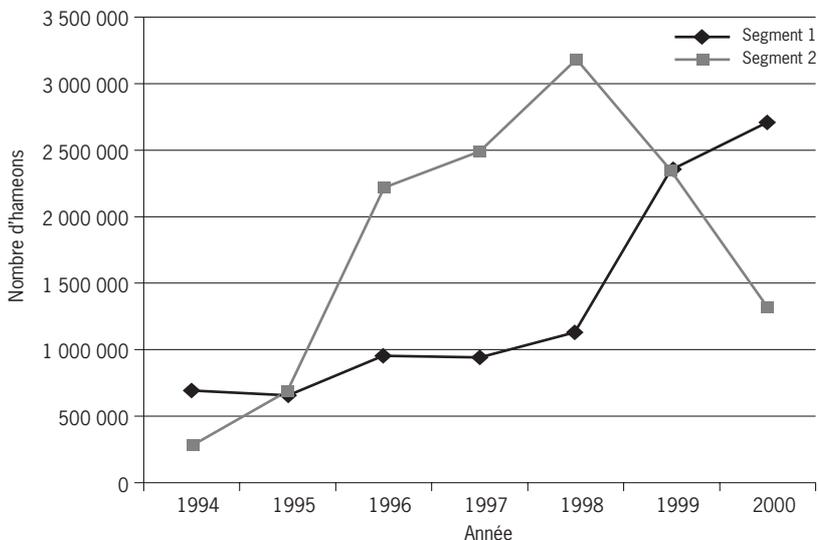


Figure 10 - Évolution du nombre d'hameçons (estimé) mis à l'eau pour les deux segments de la flottille réunionnaise de 1994 à 2000.

Évolution de l'effort moyen

L'évolution du nombre moyen d'hameçons mis à l'eau par type de bateau permet de mettre en évidence les modifications de techniques de pêche au cours des ans (fig. 11). Pour cette représentation, 5 types de navires ont été identifiés :

- type 1 : monocoque < 15 mètres ;
- type 2 : 15 ≤ monocoque < 17 mètres ;
- type 3 : 17 ≤ monocoque < 26 mètres ;
- type 4 : catamaran (20 et 25 m) ;
- type 5 : monocoque ≥ 26 mètres.

L'augmentation du nombre moyen d'hameçons traduit le besoin d'augmenter les tonnages au cours des premières années. Cette tendance a atteint sa limite en 1997, sauf pour les plus grands navires (type 5). Les unités de type 1 sont donc passées de moins de 700 à 1 000 hameçons par filage en 4 ans. Ce chiffre semble être la limite maximale pour ces navires ainsi que ceux de type 2. Cette modification peut être une conséquence de la dérive de la technique de pêche initiale car, sans accroissement de la longueur de ligne, la distance entre deux hameçons a vraisemblablement été réduite. Par ailleurs, l'augmentation des temps de pose et de récupération de la ligne laisse moins de temps pour la préparation du matériel entre deux filages successifs. La réduction du nombre d'hameçons moyen enregistrée à partir de 1997 pourrait être un retour à la technique originelle et cor-

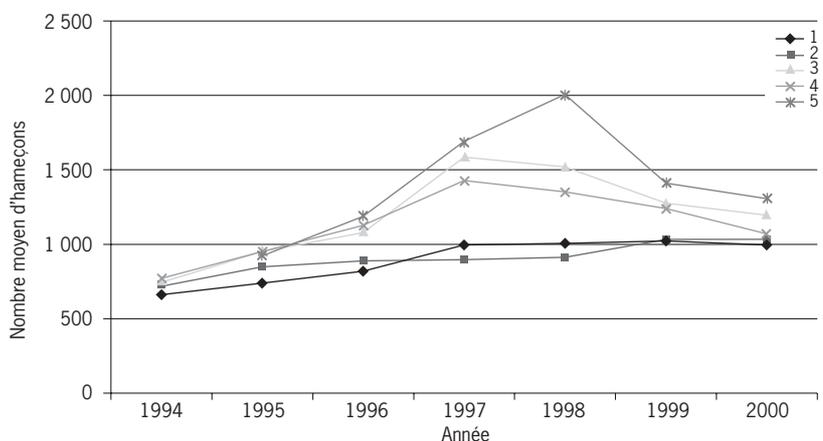


Figure 11 - Évolution du nombre moyen d'hameçons mis à l'eau par filage en fonction du type de navire.

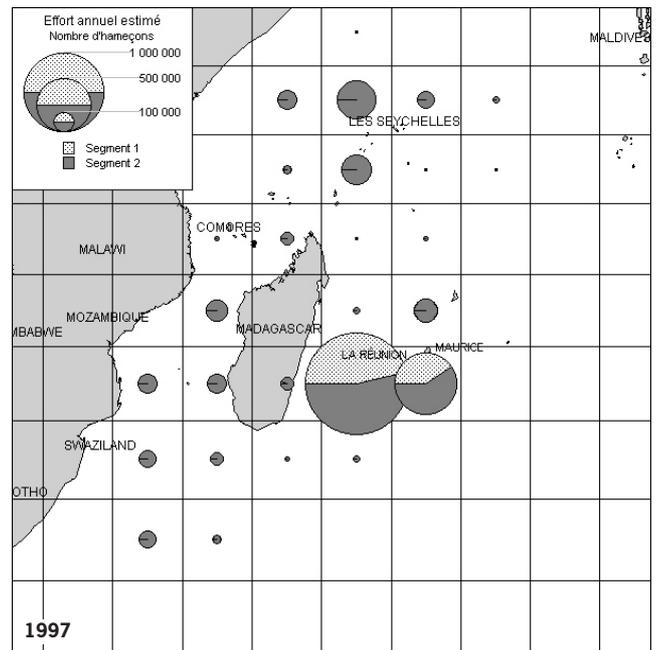
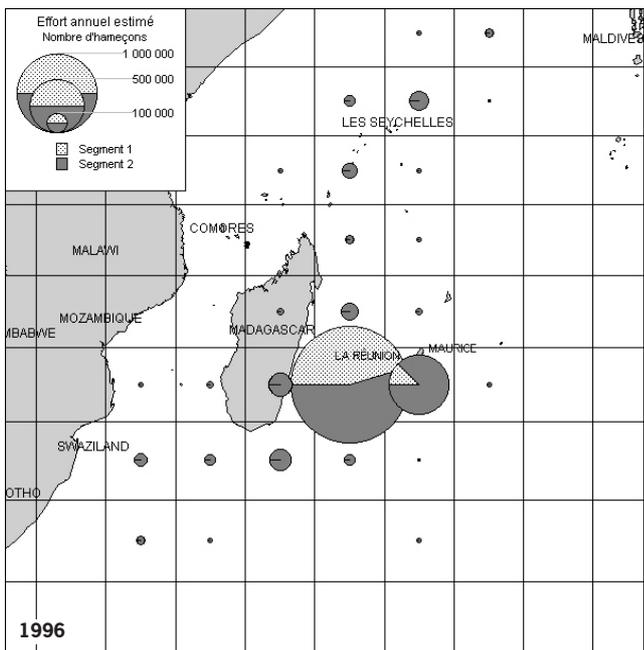
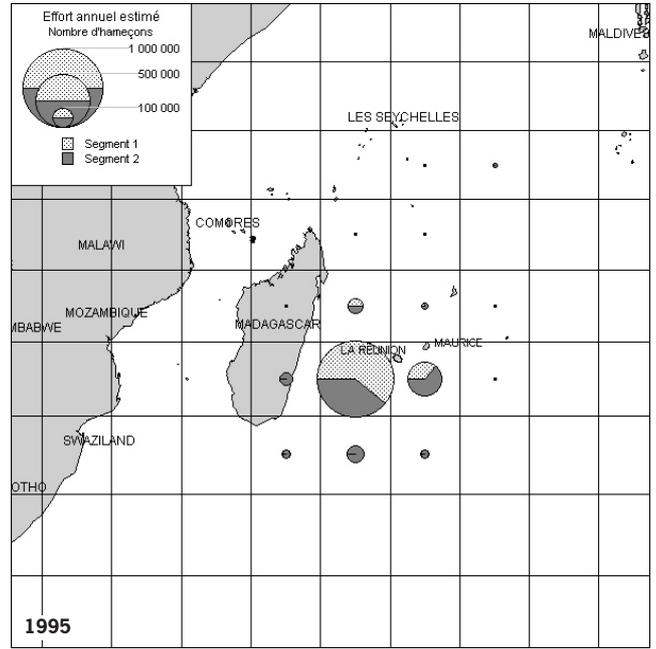
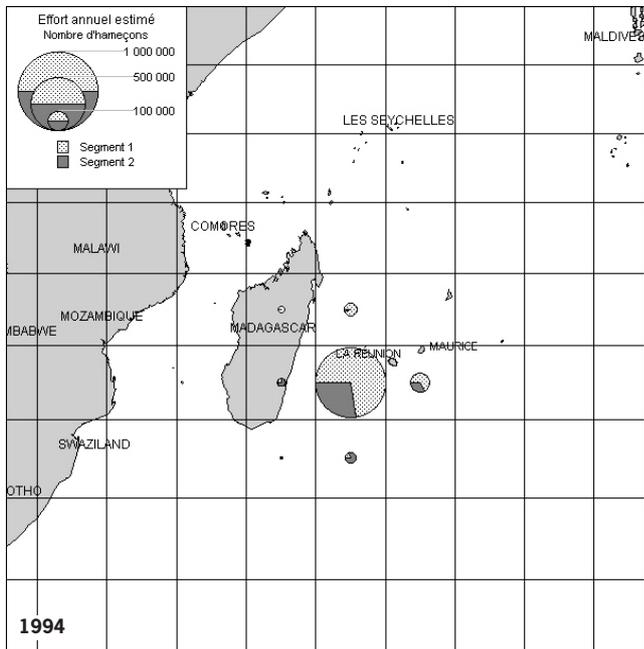
respondre à une tentative d'ajustement de la technique face à la baisse des rendements en espadon, à moins qu'il s'agisse d'une volonté de réduire les coûts de fonctionnements (appâts, leurres lumineux, hameçons...).

Répartition spatiale de l'effort

L'effort annuel (nombre d'hameçons) a été estimé pour l'ensemble de la flottille avec une résolution de grille de cinq degrés de 1994 à 2000 à partir des taux mensuels de couverture présentés précédemment (fig. 12). La surface des cercles est proportionnelle au nombre d'hameçons déployés.

Ces cartes montrent le déploiement progressif de la flottille de 1994 à 1997 qui traduit la phase de prospection menée notamment par les unités possédant des usines de traitement à bord. L'extension, au-delà de la ZEE française, a débuté vers le quart sud-ouest de La Réunion, puis s'est poursuivie par une exploration de la zone sud malgache à 800 milles de La Réunion, puis s'est poursuivie par une exploration de la zone sud malgache à 800 milles de La Réunion et du canal du Mozambique. L'obtention de licences a induit une délocalisation de certains éléments de la flottille dans les eaux

seychelloises une partie de l'année. Cette tendance à l'expansion s'inverse à partir de 1999 avec le départ progressif des navires de grande autonomie et la mise en activité de petites unités supplémentaires. Malgré les différentes stratégies adoptées, plus de 55 % de l'effort annuel (sur la période) est concentré à l'ouest de La Réunion (entre 50 et 55° Est et 20-25° Sud) et plus récemment au carré adjacent (entre 55 et 60° Est). Dans ces deux carrés, l'effort correspondait à 87 % de l'effort total pour l'année 2000.



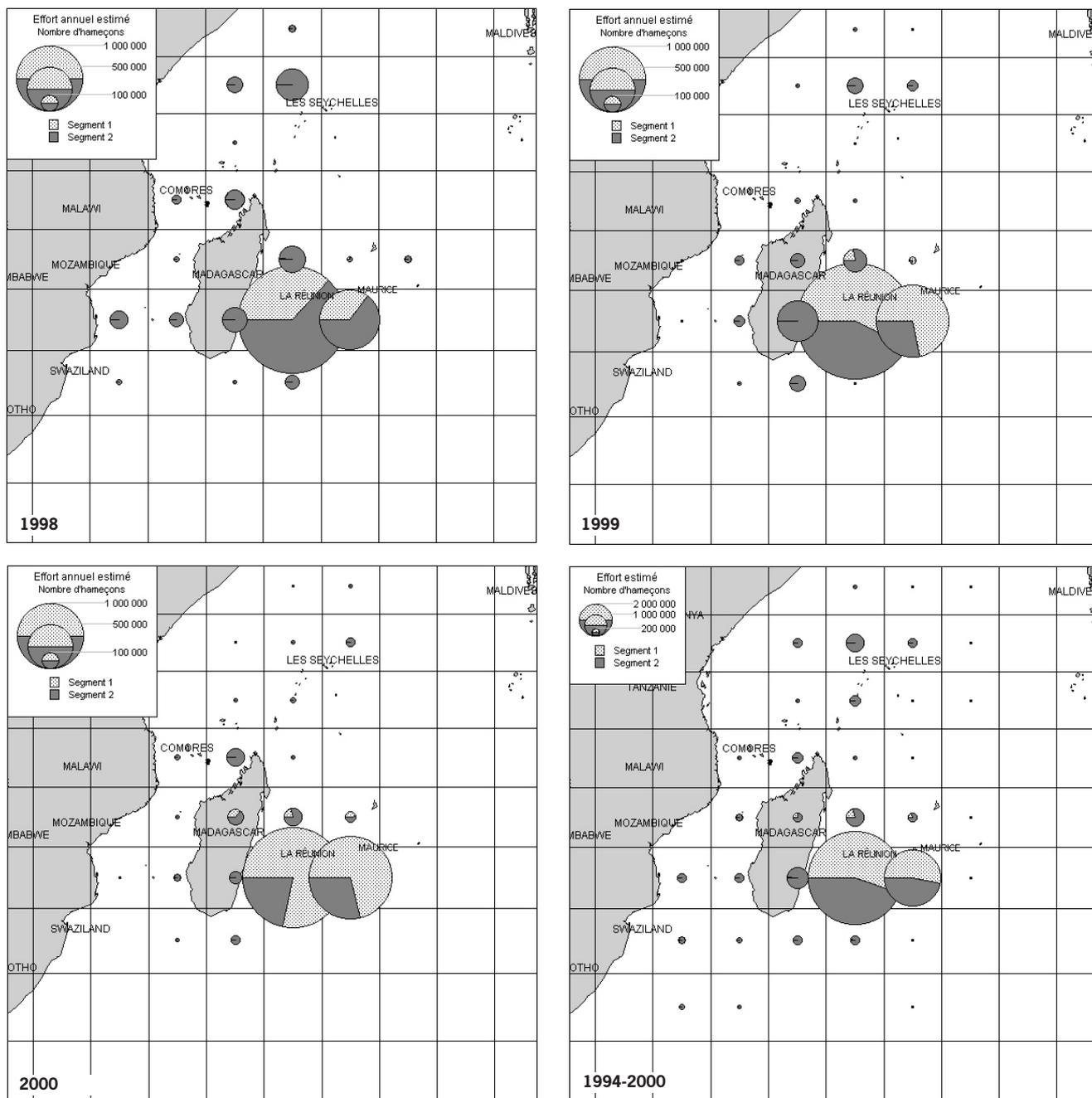


Figure 12 - Effort annuel estimé pour les deux segments de la flotte entre 1994 et 2000 et effort cumulé sur la période 1994-2000.

Cette concentration de palangriers dans une zone réduite explique l'élévation récente de l'effort dans le sud et sud-est de l'île. La mise en flotte d'unités de petite taille entraîne par ailleurs des conflits d'occupation de l'espace maritime avec le secteur artisanal opérant sur les dispositifs de concentration de poissons (Tessier & Poisson, 2000). Il est à noter que l'extension de la flotte s'est faite principalement vers l'ouest, compte tenu des conditions météorologiques beaucoup plus dures de la zone est.

Prises, rejets et rendements

À partir des observations recueillies au cours des embarquements et des échantillonnages lors des débarquements, une liste des espèces capturées a pu être établie (tab. 10).

Pour chaque espèce, les estimations des captures (en poids vif) ont été calculées à partir des déclarations faites par les armements auprès de la DDAM (tab. 11). Les captures couvrant la période entre 1993 et 2000 sont classées par ordre d'importance de l'espèce ou groupe d'espèces.

Tableau 10 - Liste des espèces capturées par les palangriers.

Nom vernaculaire	Nom anglais	Nom scientifique
Espadon	Swordfish	<i>Xipbias gladius</i>
Germon	Albacore	<i>Thunnus alalunga</i>
Albacore	Yellowfin tuna	<i>Thunnus albacares</i>
Patudo	Bigeye tuna	<i>Thunnus obesus</i>
Dorade coryphène	Dolphinfish	<i>Coryphaena hippurus</i>
Voilier	Sailfish	<i>Istiophorus platypterus</i>
Marlin bleu	Blue marlin	<i>Makaira mazara</i>
Marlin noir	Black marlin	<i>Makaira indica</i>
Lancier	Spearfish	<i>Tetrapturus angustirostris</i>
Requin peau bleue	Blue shark	<i>Prionace glauca</i>
Requin mako	Shortfin mako	<i>Isurus oxyrinchus</i>
Requin océanique	Oceanic whitetip shark	<i>Carcharinus longimanus</i>
Requin marteau halicorne	Scalloped hammerhead	<i>Sphyrna lewini</i>
Requin marteau commun	Smooth hammerhead	<i>Sphyrna zygaena</i>
Requin soyeux	Silky shark	<i>Carcharinus falciformis</i>
Requin tigre	Tiger shark	<i>Galeocerdo cuvieri</i>
Requin renard	Thresher	<i>Alopias</i> sp.
Requin crocodile	Crocodile shark	<i>Pseudocarcharias kamoharai</i>
Raie violette	Pelagic stringray	<i>Dasyatis violacea</i>
Poisson-lune	Ocean sunfish	<i>Mola</i> sp.
Escolier noir	Escolar	<i>Lepidocybium flavobrunneum</i>
Ruvet	Oilfish	<i>Ruvettus pretiosus</i>
Escolier	Snoek	<i>Thysitoides marleyi</i>
Barracuda	Barracuda	<i>Sphyaena barracuda</i>
Thon banane	Wahoo	<i>Acanthocybium solandri</i>
Saumon des dieux	Opah	<i>Lampris guttatus</i>
Castagnole	Ponfret	<i>Taractichthys</i> sp.

Tableau 11 - Évolution des prises des huit espèces principales de la flottille réunionnaise entre 1993 et 2000 (SWO : espadon, ALB : germon, YFT : albacore, BET : patudo, MAR : marlin, NCAD : dorade coryphène, SHK : requin, SFA : voilier).

Année	SWO	ALB	YFT	BET	MAR	NCAD	SHK	SFA	Total
1993	278	94	86	3	31	8	12	2	2 507
1994	729	132	93	4	34	10	10	2	3 008
1995	767	115	118	9	50	11	12	2	3 079
1996	1 331	294	212	93	77	20	24	3	4 050
1997	1 557	244	240	87	65	78	64	4	4 336
1998	2 076	271	360	108	104	54	89	11	5 071
1999	1 926	304	236	210	79	100	66	12	4 932
2000	1 741	502	312	162	85	81	58	24	4 965

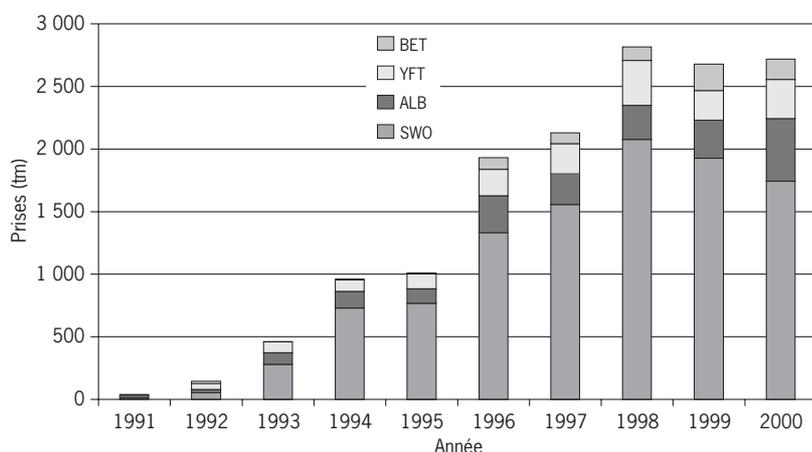


Figure 13 - Évolution des prises des espèces.

Les prises de la flottille réunionnaise sont passées de 2 507 t à 4 965 t entre 1993 et 2000 avec un pic à 5 071 t en 1998. L'espadon, l'espèce cible de cette flottille (fig. 13), représente entre 65 % (année 2000) et 76 % (années 1994 et 1995) des prises. Parmi les autres espèces majeures, nous distinguerons les trois espèces de thons (fig. 14). Les prises de thonidés ont augmenté graduellement au cours des ans, les tonnages de germon sont voisins voire supérieurs aux tonnages des autres espèces, excepté en 1998 où l'on enregistre des prises importantes de thons jaunes (360 t).

Ce n'est qu'à partir de 1995 que l'on voit apparaître les tonnages de patudos dans les statistiques, un pic est atteint en 1999 avec 210 tonnes.

Espèces majeures

Espadon

La représentation des prises d'espadon par segment reflète les différents changements au sein de la flottille. Ce n'est qu'en 1999 que les captures faites par les deux segments s'équilibrent avant de s'inverser en 2000. Les quantités débarquées atteignent un maximum de 2076 t en 1998 (fig. 15). Le poids annuel des espadons a été estimé à partir de la moyenne des poids de la taille de référence (longueur maxillaire-fourche). Cette valeur est obtenue à partir des équations de conversion taille-poids. Sur les sept dernières années, le poids vif moyen de l'espadon est de l'ordre de 50 kilogrammes. Cette valeur a été prise en compte pour la création des cartes de captures suivantes (fig. 16).

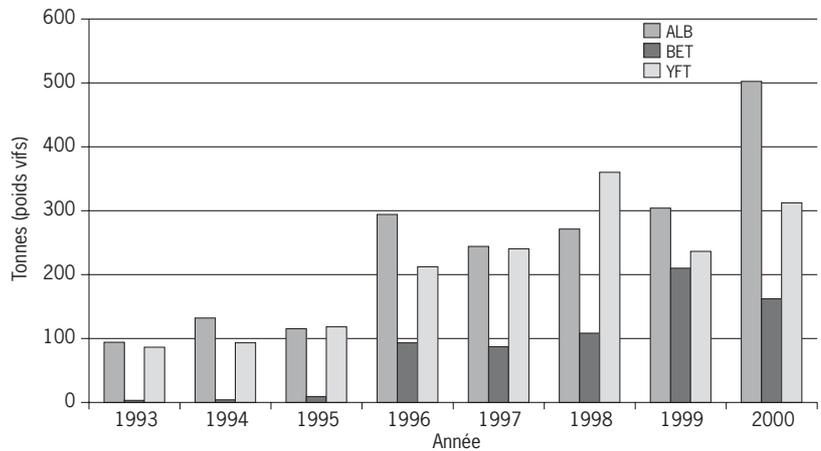


Figure 14 - Évolution des prises des espèces de thonidés capturées par la flottille réunionnaise entre 1993 et 2000.

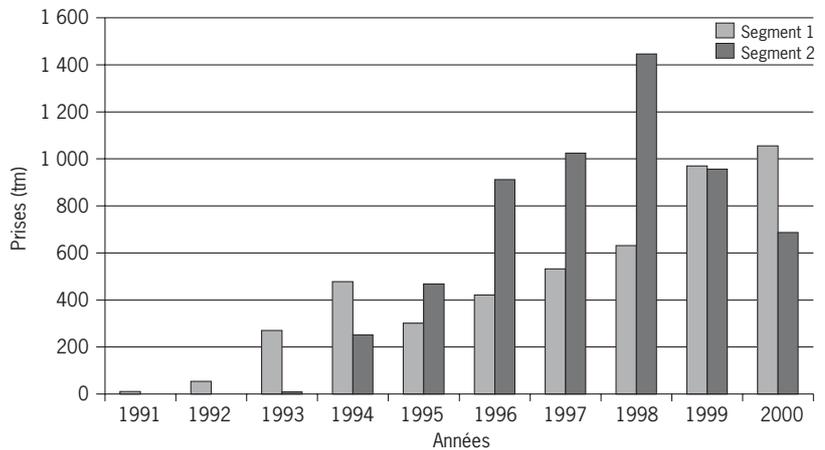
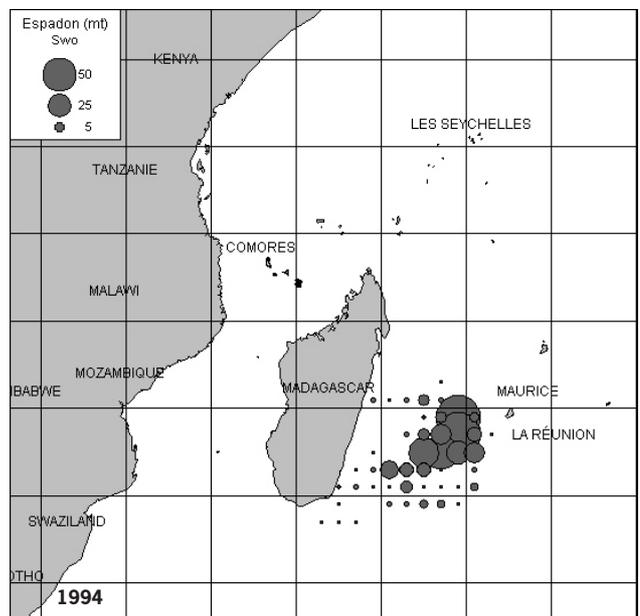
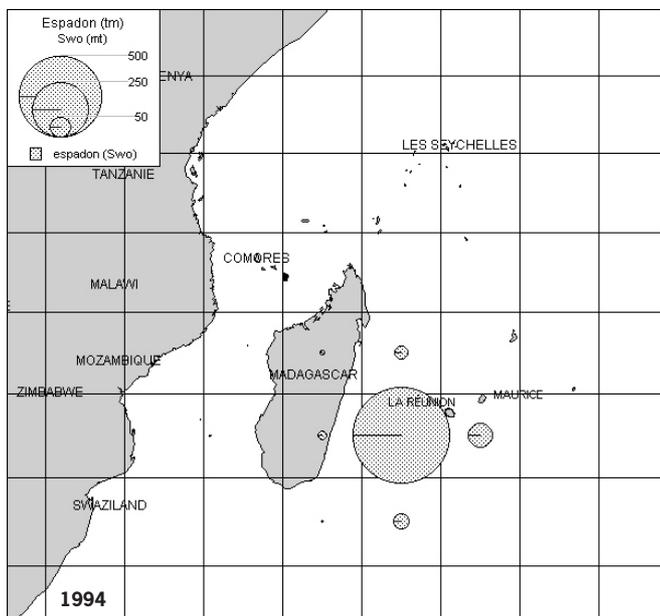
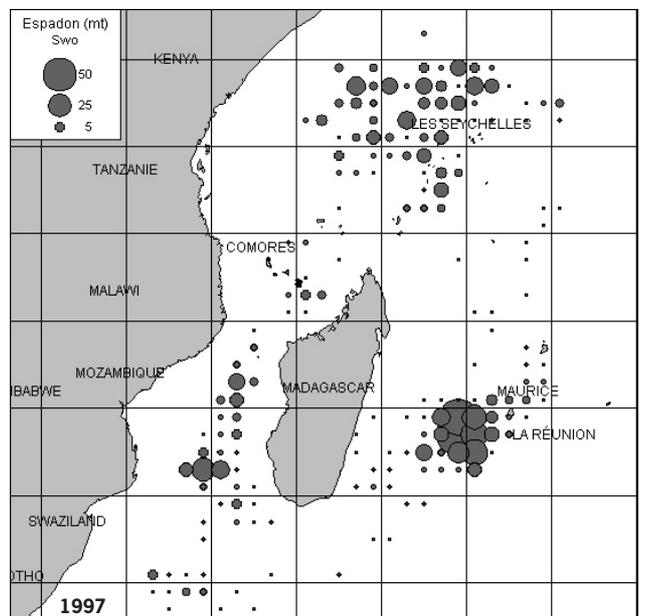
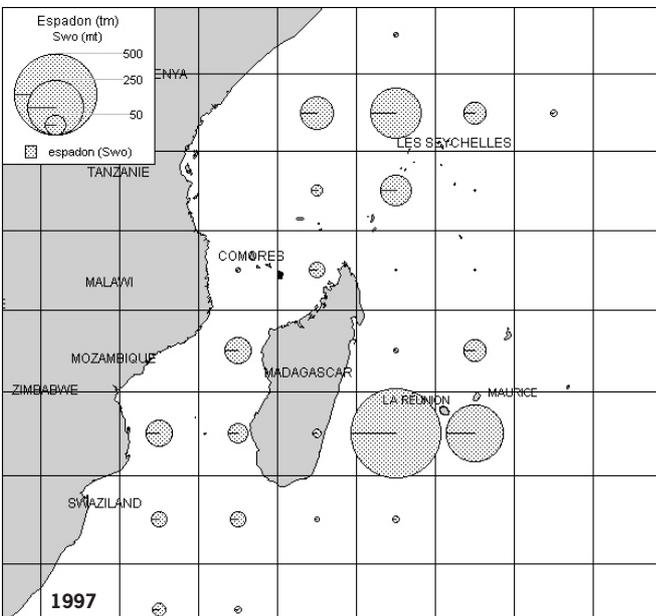
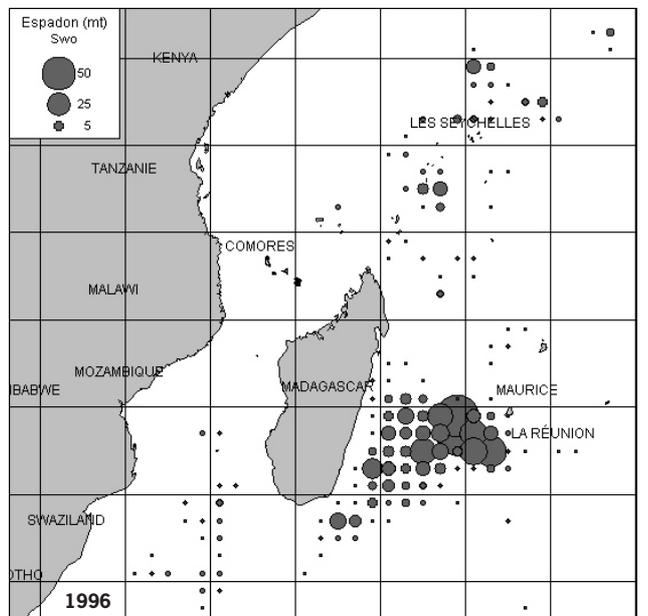
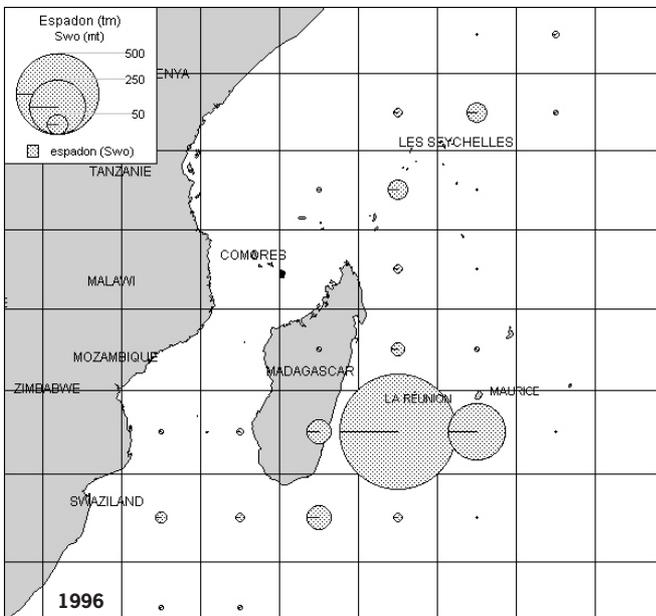
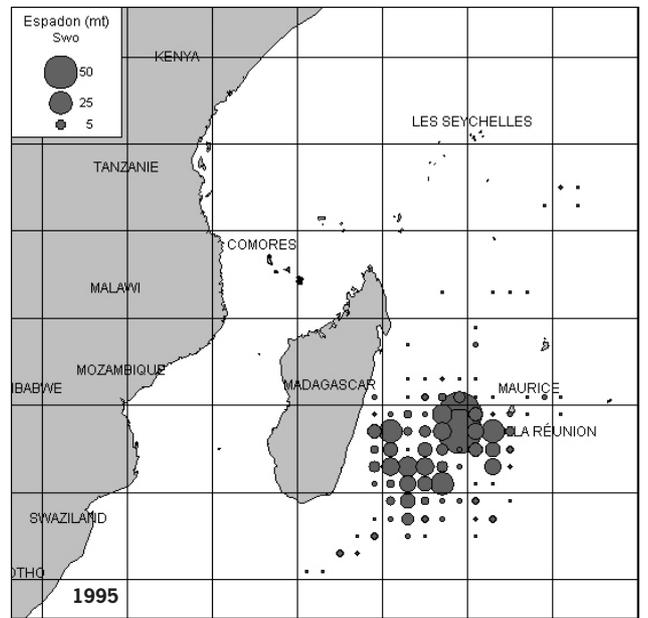
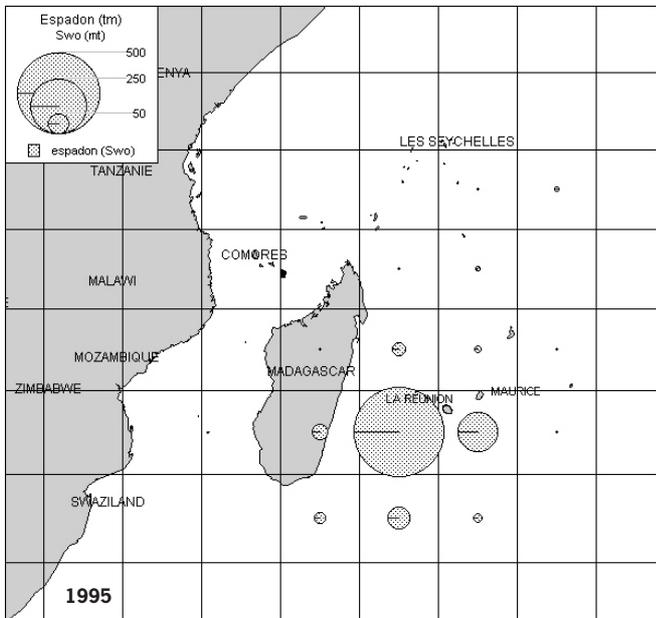
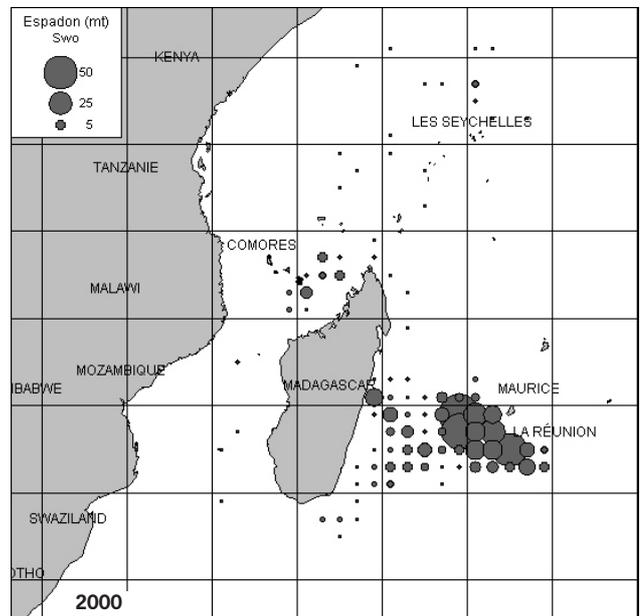
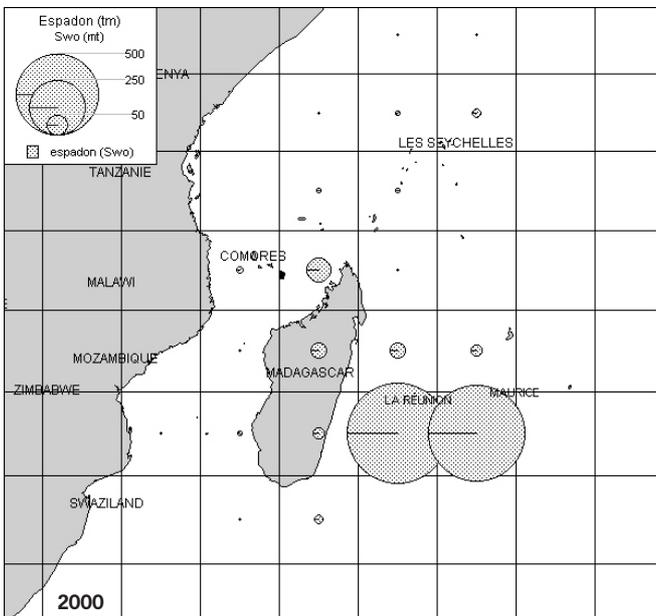
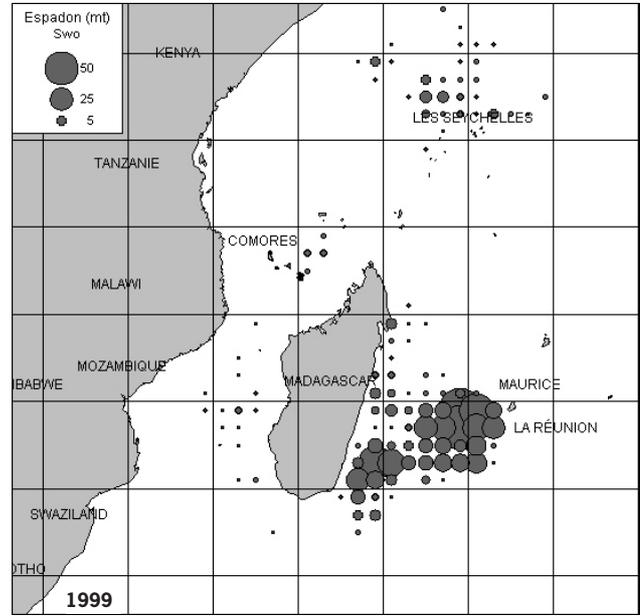
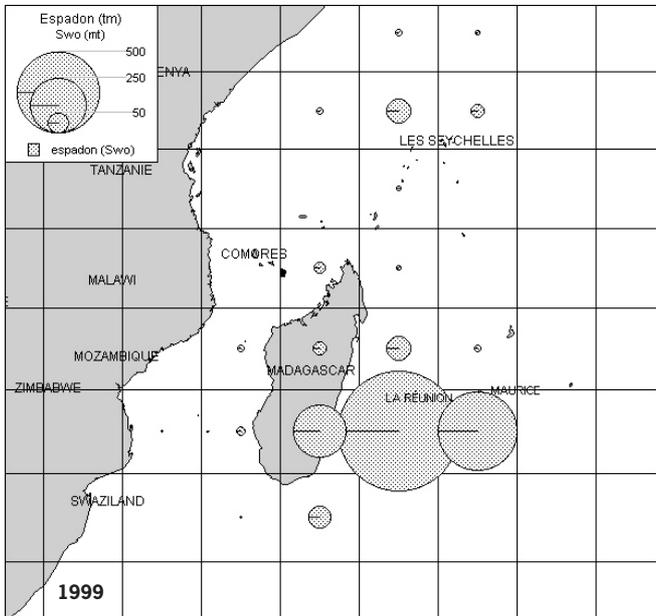
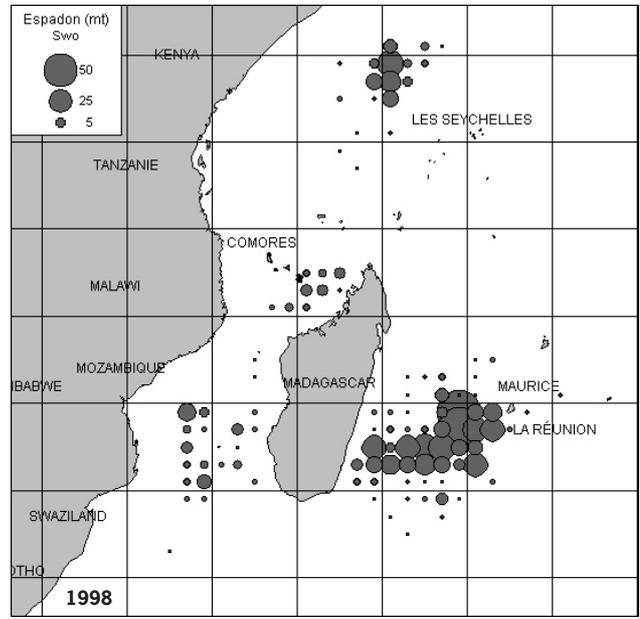
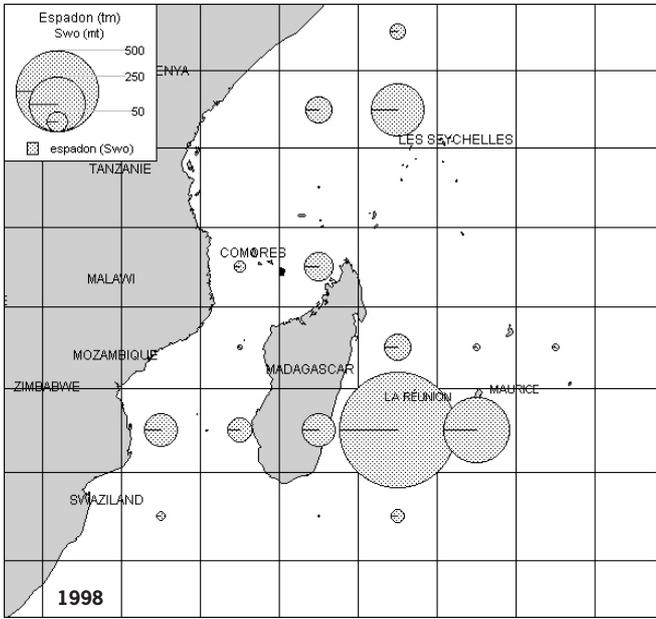


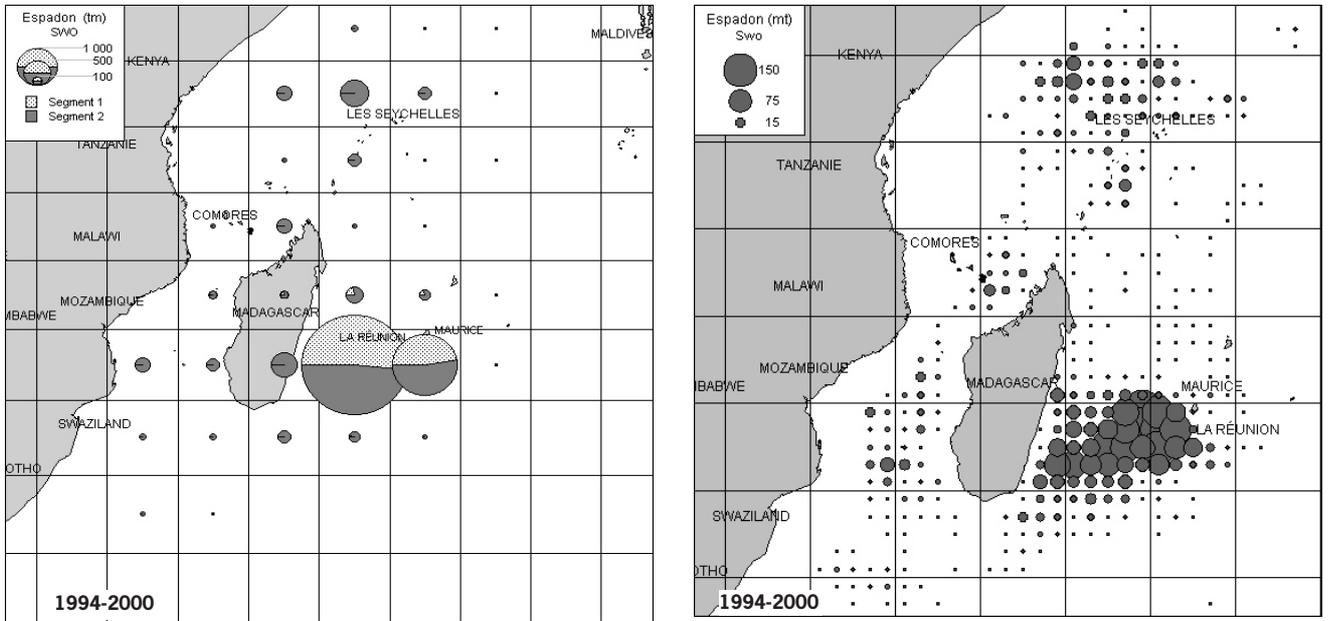
Figure 15 - Évolution des captures d'espadon (poids vif) par segment.

Figure 16
Prises d'espadon estimées par année entre 1994 et 2000 pour l'ensemble de la flottille par carré de 5 degrés, extrapolés à partir des prises agrégées par carré de 1° (données issues des carnets de pêche récoltés); prises d'espadons agrégées sur la période 1994-2000 par carré statistique de 5 degrés pour la flottille entière et pour ses deux segments.









L'examen des cartes de captures indique clairement, comme on pouvait s'y attendre, une très forte similitude avec les cartes d'effort. Ainsi, la quasi-totalité des prises d'espadons s'effectue au voisinage de l'île. D'autres zones se sont montrées très productives malgré un effort plus modeste, c'est notamment le cas de la zone des Seychelles. La nouvelle structure de la flottille, composée majoritairement de navires du premier segment, implique une activité importante aux abords de La Réunion depuis 1998. Devant cette situation, une fraction de la flottille tend à explorer des zones situées dans l'est et le sud-est de l'île. Ces zones étaient peu exploitées auparavant

compte tenu des conditions météorologiques plus difficiles, notamment pendant la saison des alizés.

Les évolutions des rendements moyens annuels globaux et par segment font apparaître deux phases bien distinctes (fig. 17). Lors de la première phase, située entre 1994 et 1996, on assiste à une décroissance rapide des CPUE, « classique » dans le cas d'une pêcherie « jeune ». Les rendements passent ainsi de 16 à 9 individus pour 1 000 hameçons. Lors de la deuxième phase, entre 1997 et 2000, les rendements globaux de la flottille baissent régulièrement jusqu'à 8 espadons pour 1 000 hameçons.

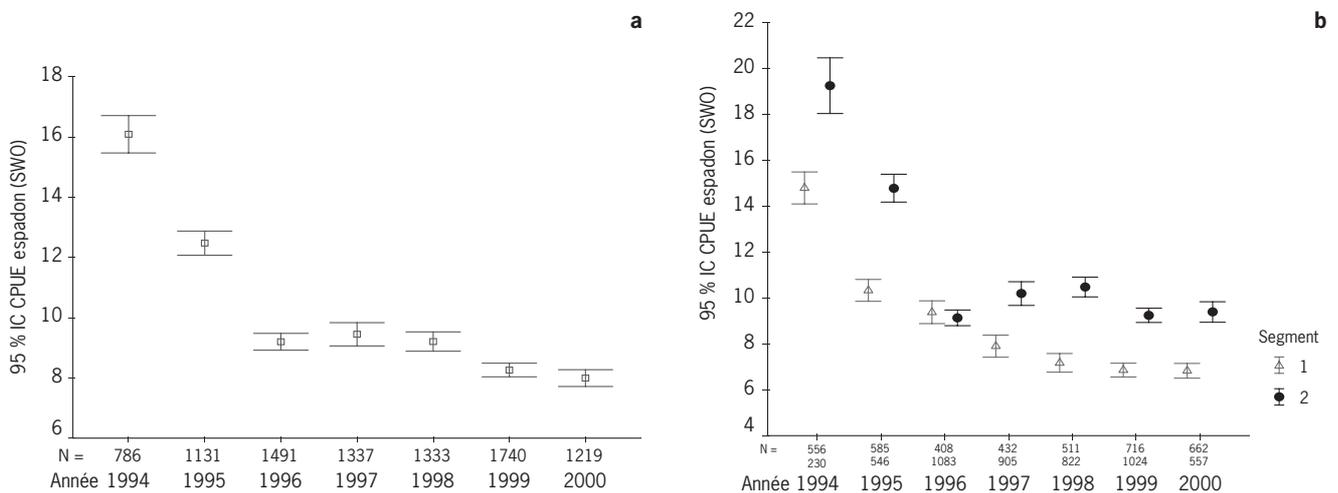


Figure 17 - Évolution des rendements annuels moyens en espadons (en nb d'ind/1 000 hameçons) pour l'ensemble de la flottille et pour chacun des segments.

La stratégie des gros navires, exploitant des zones éloignées, pourrait expliquer les écarts observés entre les deux segments après la première phase.

Les moyennes des rendements mensuels cumulés pour les deux segments semblent indiquer des différences importantes entre les deux phases identifiées (fig. 18). Durant la première phase, les minima et maxima pour les deux segments de bateaux interviennent aux mêmes mois, respectivement en juin et en septembre. Les tendances sont complètement opposées depuis 1997, les navires du second segment s'éloignant de La Réunion. Pendant l'hiver austral, ils travaillent au large de la côte sud-est de Madagascar et dans le sud du canal du Mozambique. L'été, ce sont les zones tropicales qui sont prospectées.

première hypothèse. Si l'on considère un stock géographiquement beaucoup plus étendu, l'hypothèse d'une grande « viscosité » pourrait engendrer des phénomènes de surexploitation locale compatibles avec les baisses de rendements observées. Les déterminations de flux entre les différentes régions et de l'impact des variations des conditions environnementales inter-annuelles pourraient permettre d'apporter des éléments de réponse à cette question. Seules les analyses sur les stocks effectuées dans le cadre des groupes de travail de la CTOI sur des séries historiques plus importantes ainsi que les résultats de campagnes de marquages permettront de confirmer ou non cette hypothèse.

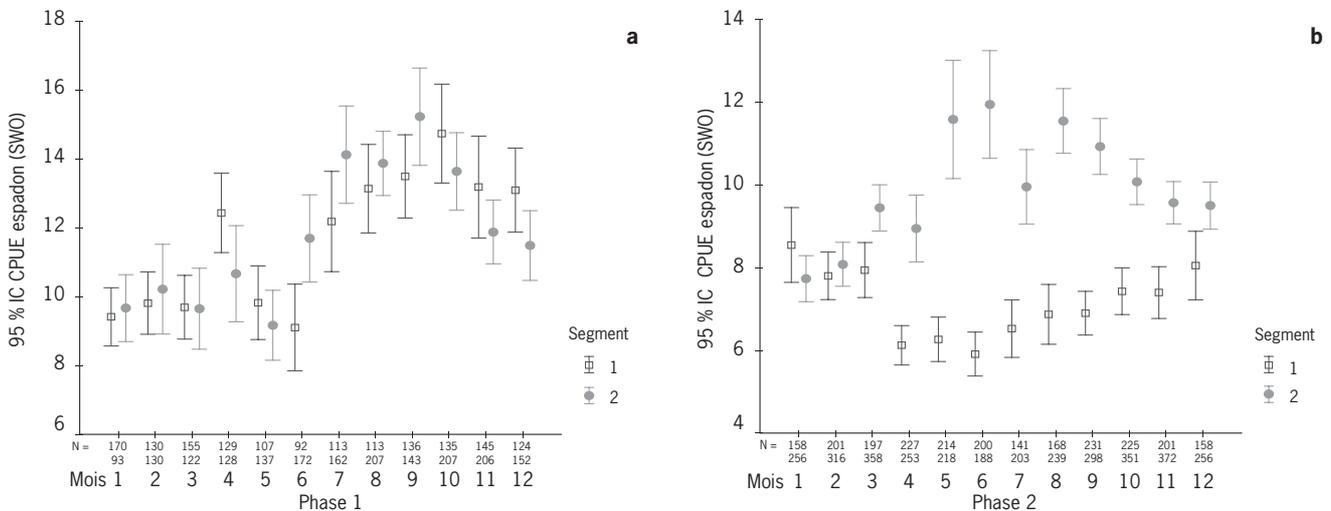


Figure 18 - Évolution des rendements moyens mensuels en espadon par segment pour les deux phases identifiées (phase 1 : 1994-1996 ; phase 2 : 1997-2000).

La figure 19 met en évidence les forts rendements enregistrés au tout début de l'exploitation de la flottille réunionnaise.

La pression de pêche sur l'espadon s'est accrue depuis le début des années 1990 (fig. 20). Elle est exercée notamment par les flottilles étrangères délocalisées. Le lien entre l'augmentation de l'effort de pêche et la diminution des rendements n'est toutefois pas aisément établi car la structure du ou des stocks de l'océan Indien reste à ce jour largement inconnue.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette diminution des CPUE. L'existence d'un stock spécifique pour le sud-ouest de l'océan Indien constitue une

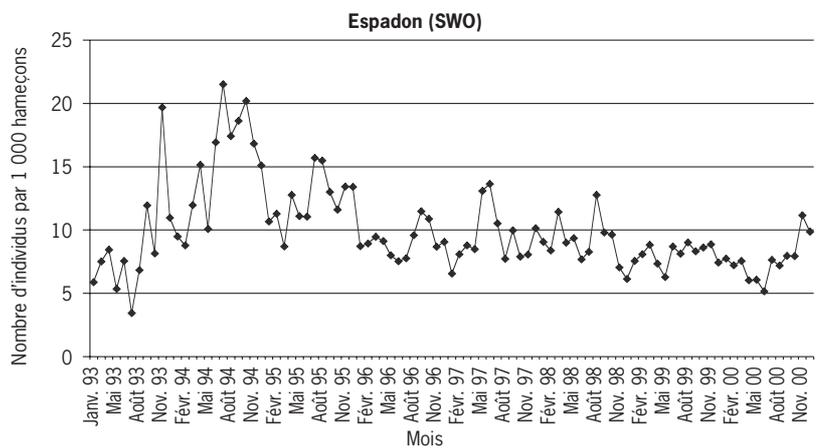


Figure 19 - Évolution des rendements moyens de la flottille (nombre d'individus par 1 000 hameçons).

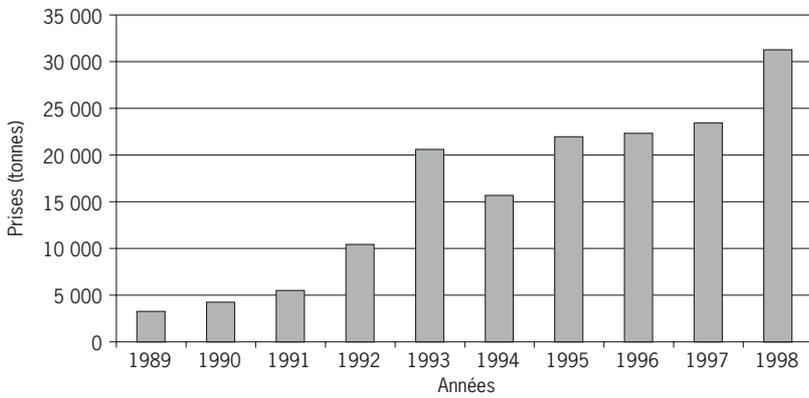


Figure 20 - Évolution des prises d'espadon des pêcheries palangrières dans la zone océan Indien (source CTO).

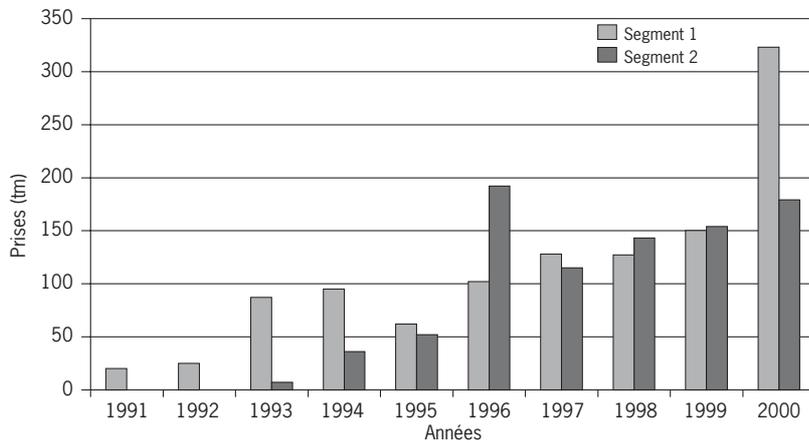


Figure 21 - Évolution des captures de germon (poids vif) par segment entre 1991 et 2000.

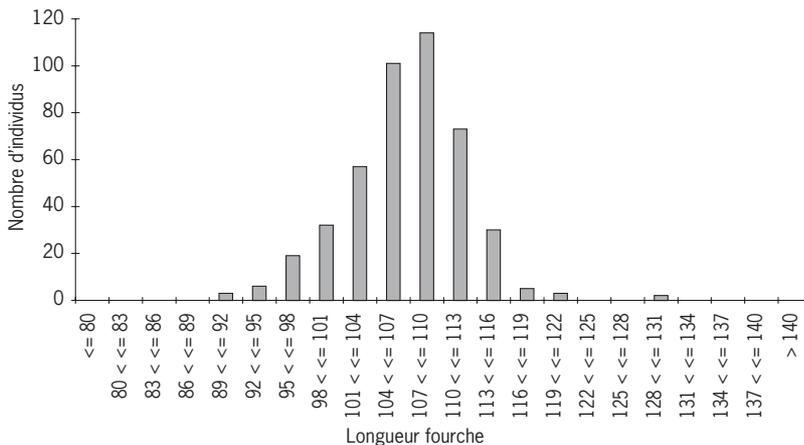


Figure 22 - Histogramme de taille (lf) des germons échantillonnés.

Germon

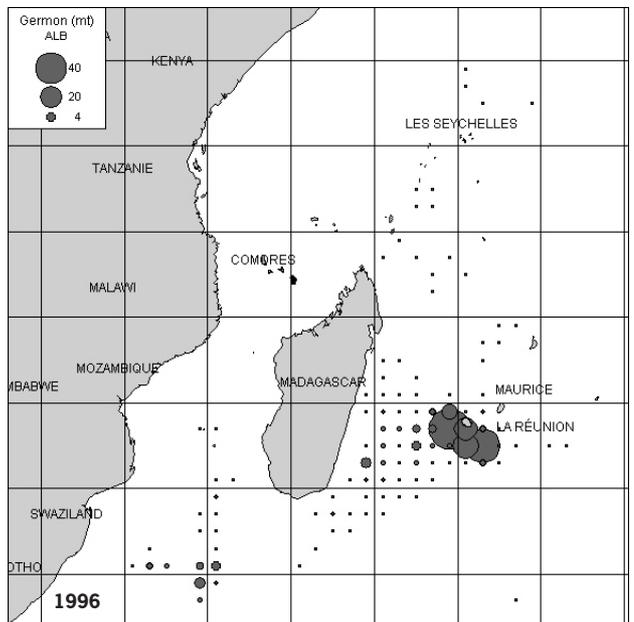
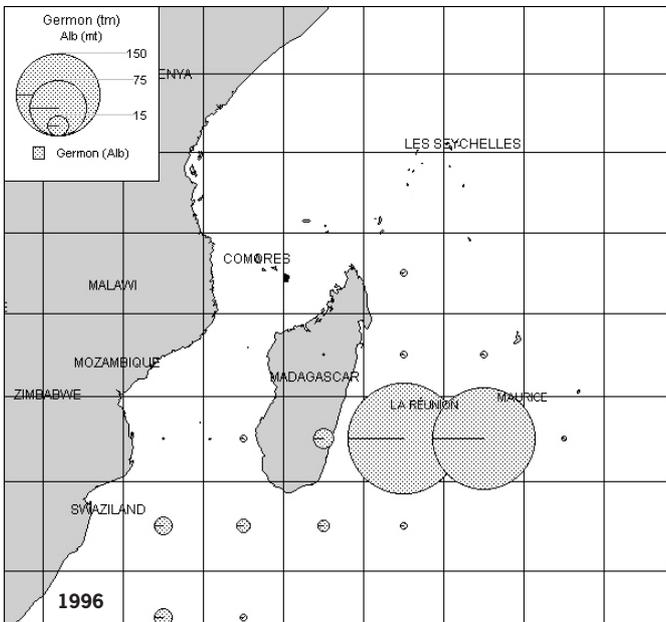
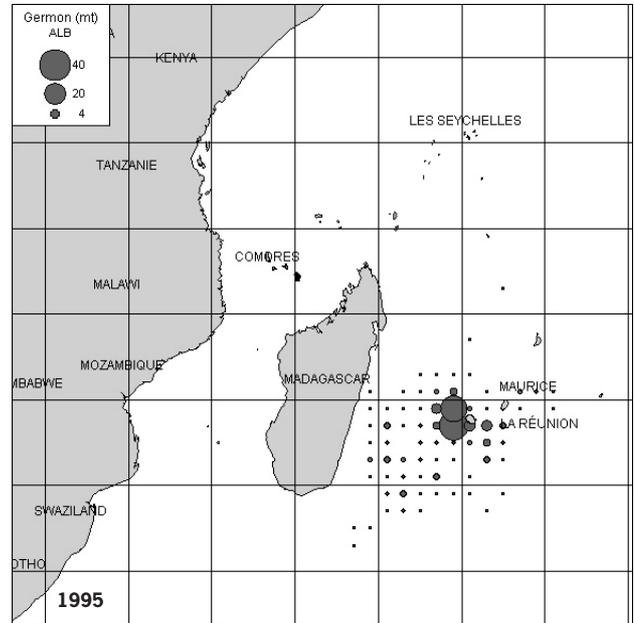
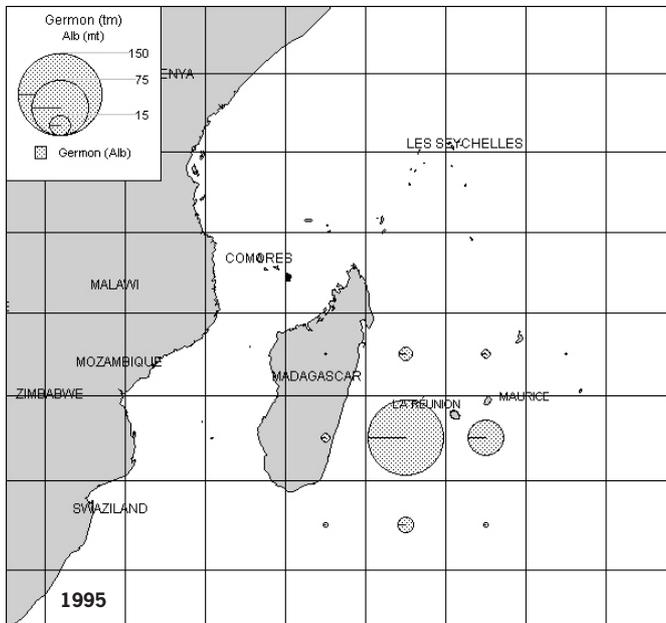
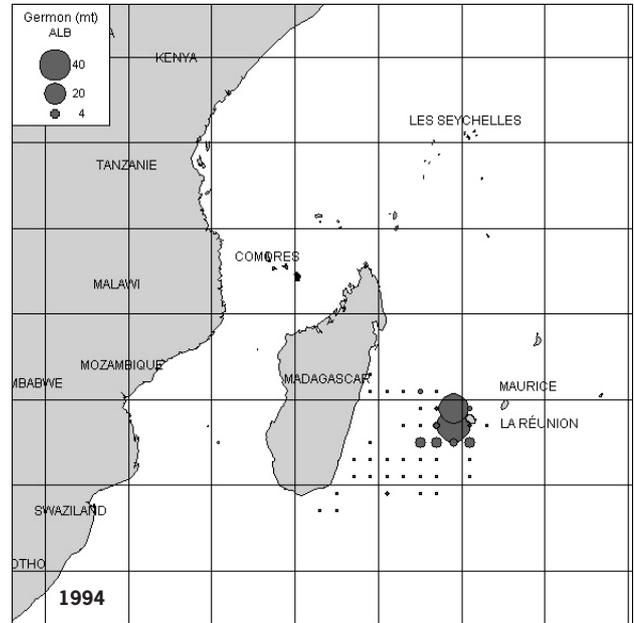
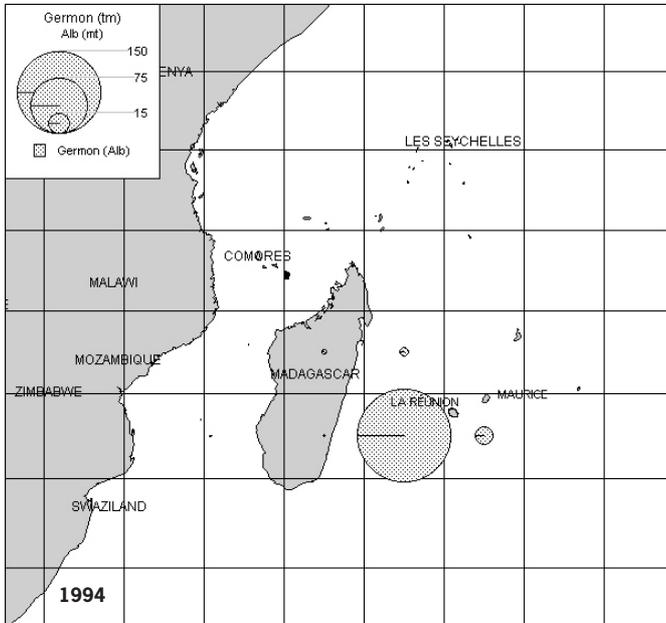
Contrairement au cas de l'espadon, les captures de germon pour les deux segments sont équivalentes entre 1997 et 1999 malgré la dominance des navires du second groupe (fig. 21). Ce phénomène trouve son explication dans les limites écologiques de l'espèce qui n'est que rarement capturée dans les zones situées au-dessus de 10° Nord bien que Stéquert & Marsac (1986) relatent de fortes prises effectuées par les senneurs espagnols et français à l'ouest de la zone économique des Seychelles en 1984 et 1985, au cours du second trimestre. Les captures effectuées par les navires de petite taille dominant très nettement en 2000.

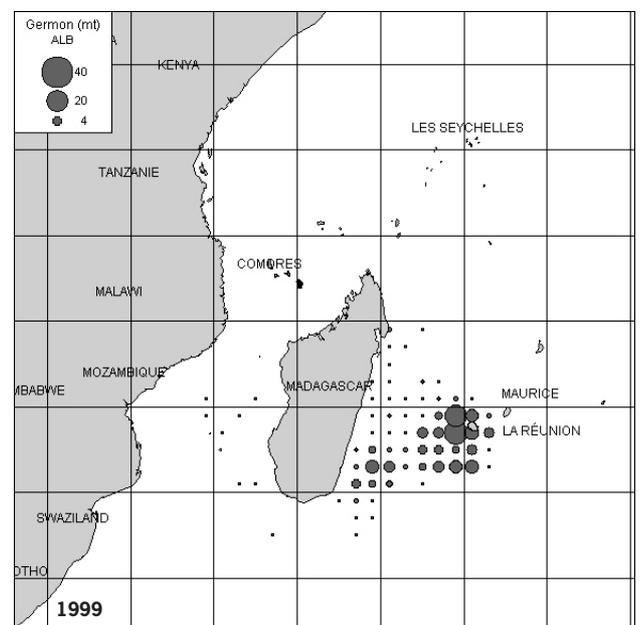
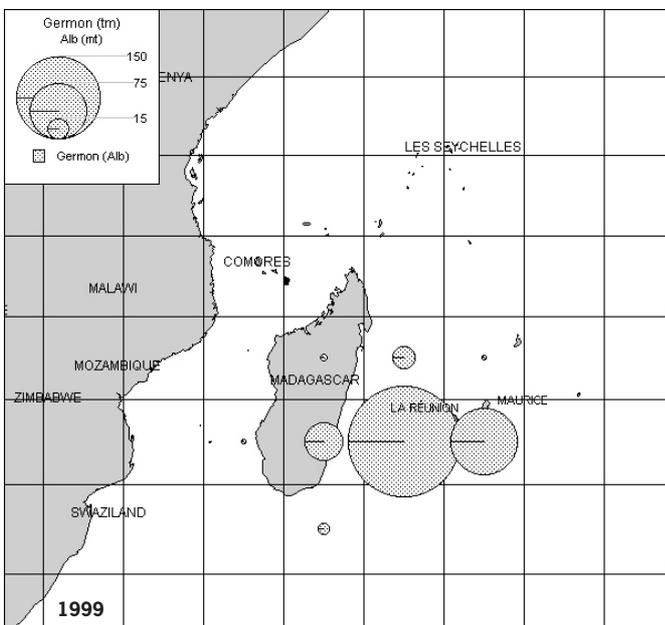
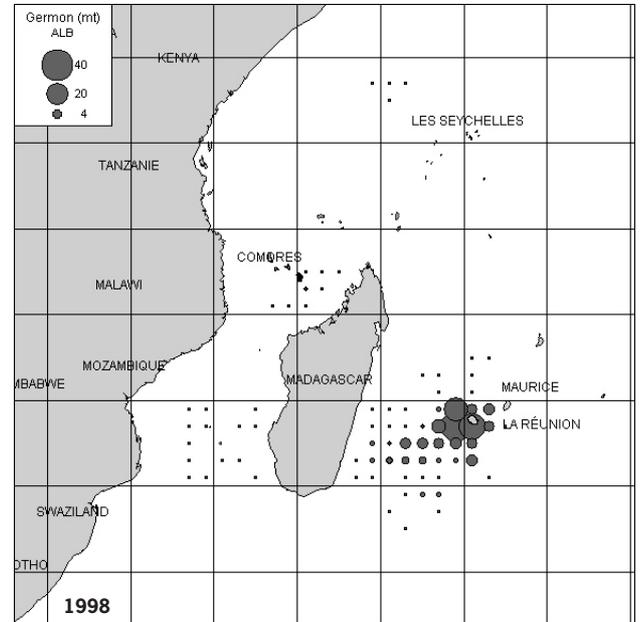
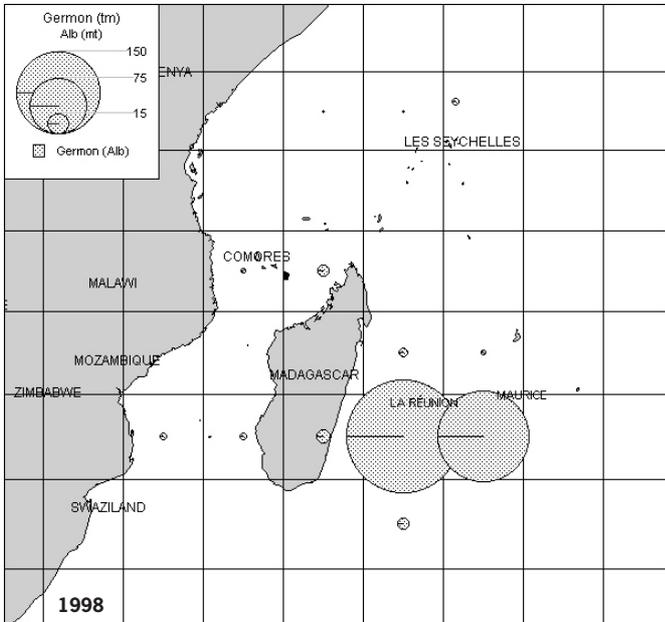
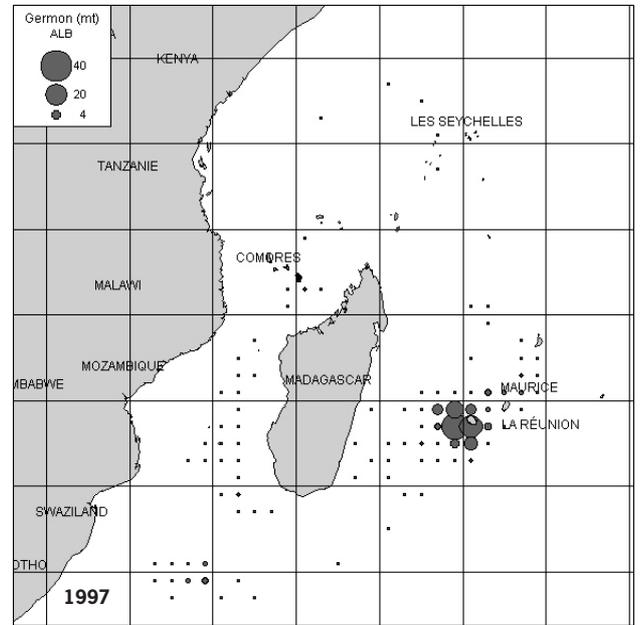
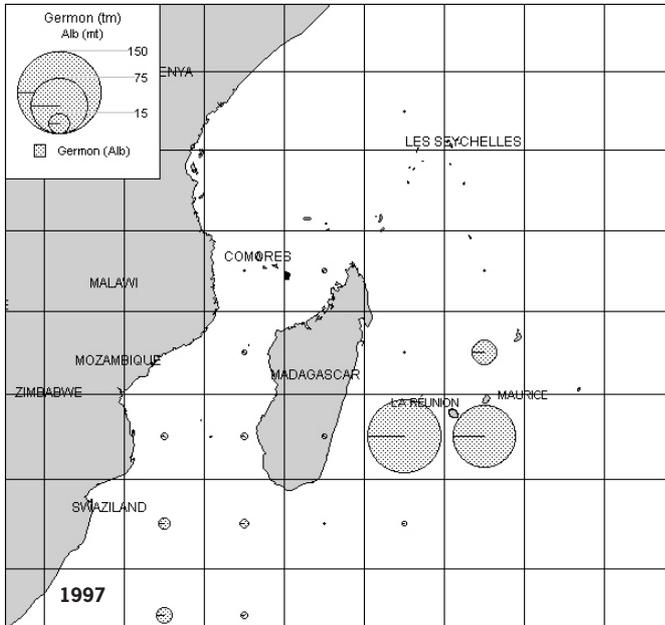
Le poids a été estimé sur la base de mesures effectuées lors des échantillonnages à bord (n=691 ; fig. 22). D'après l'équation taille-poids proposée pour l'Atlantique (Miyake, 1990), le poids vif moyen est estimé à environ 26 kg à partir de la longueur moyenne. Cette équation est définie comme suit :

$$P = 6,303 * 10^{-6} Lf^{3,2825}$$

 P = poids vif
 Lf = longueur à la fourche en centimètre.

Les cartes suivantes confirment la rareté des spécimens de cette espèce, en surface, dans la zone équatoriale. Les prises sont majoritairement effectuées au voisinage de La Réunion (fig. 23).





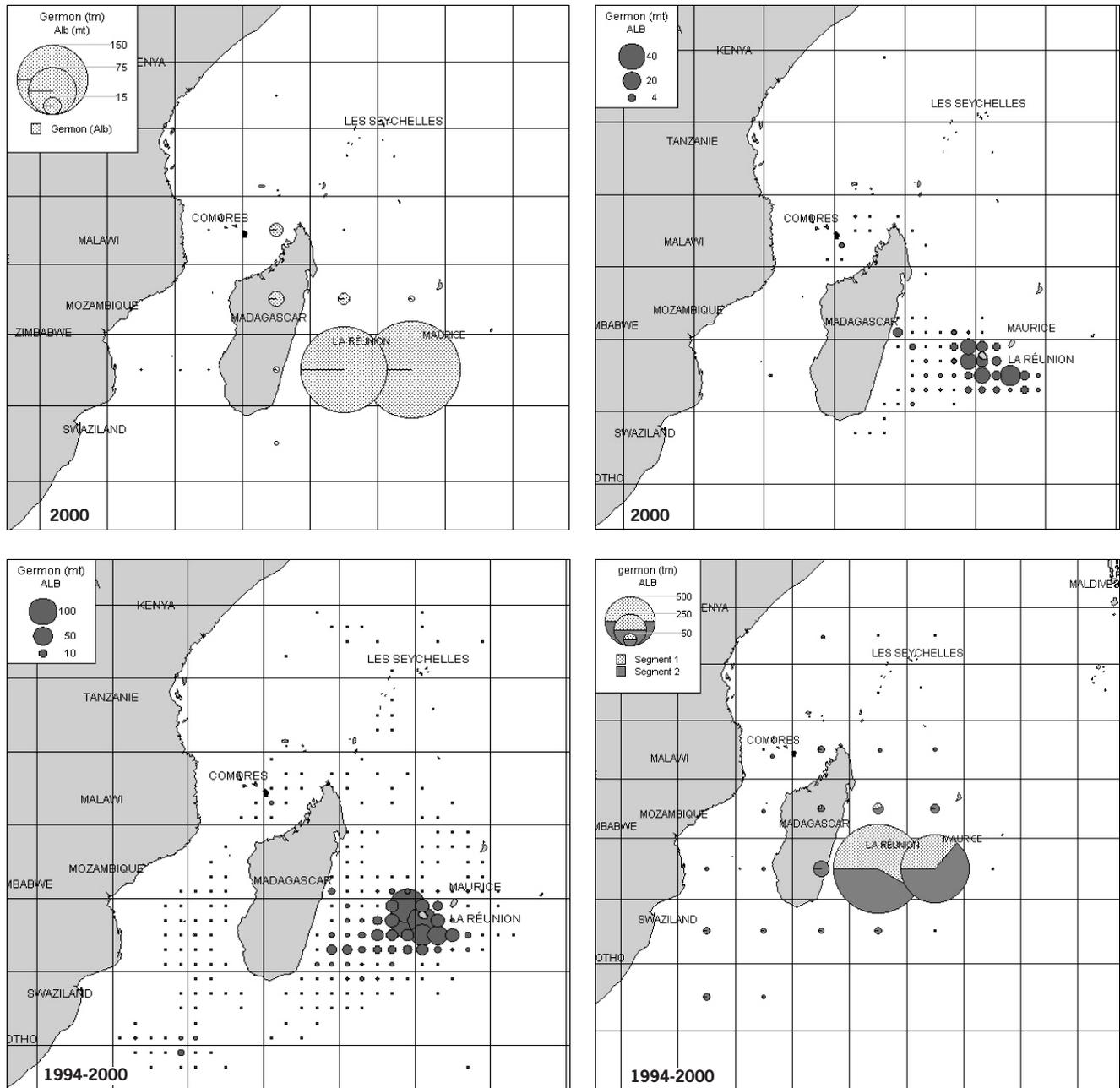


Figure 23 - Prises de germon agrégées par carré statistique de 1 degré (données issues des carnets de pêche récoltés) et par année entre 1994 et 2000; prises de germon estimées extrapolées par année pour l'ensemble de la flottille par carré de 5 degrés; prises de germon agrégées sur la période 1994-2000 par carré statistique de 5 degrés pour la flottille entière et pour ses deux segments.

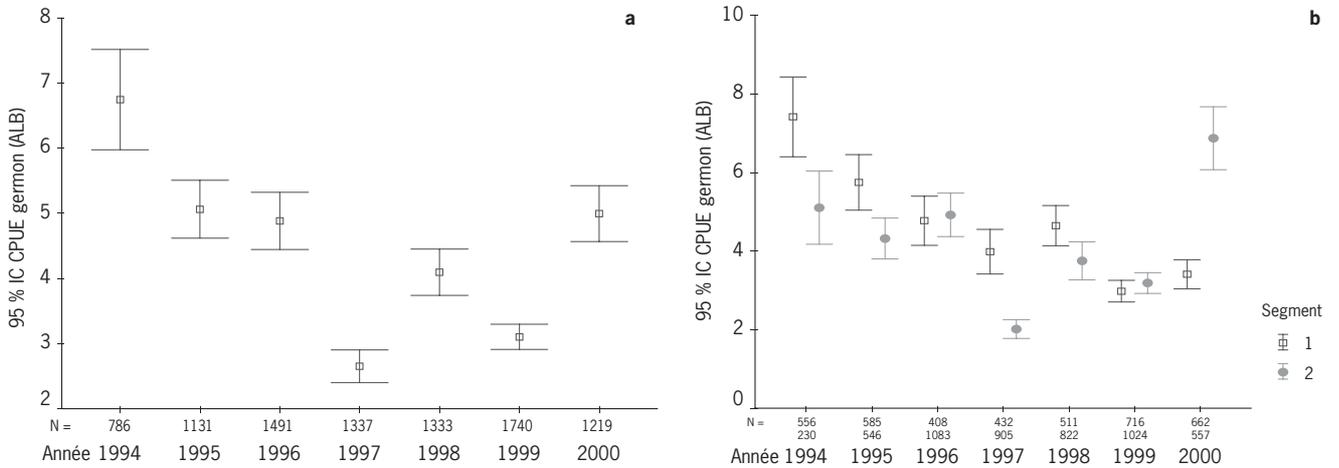


Figure 24 - Évolution des rendements moyens annuels en germon (nombre d'individus par 1000 hameçons) pour l'ensemble de la flottille et pour les deux segments, entre 1994 et 2000.

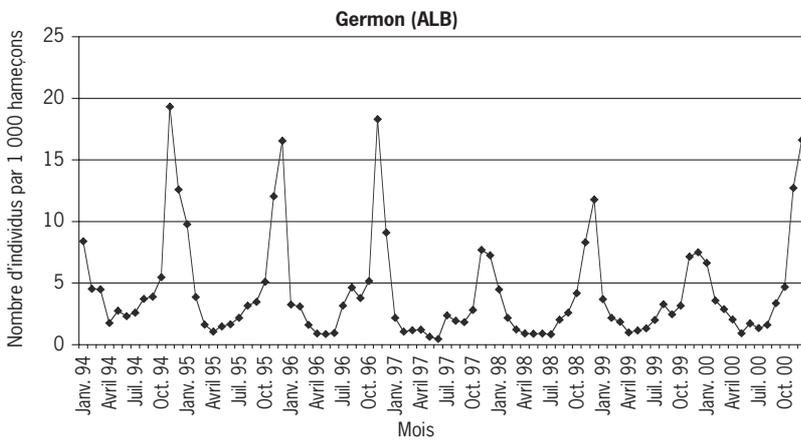


Figure 25 - Évolution des rendements moyens par mois entre janvier 1994 et décembre 2000 (nombre d'individu par 1000 hameçons).

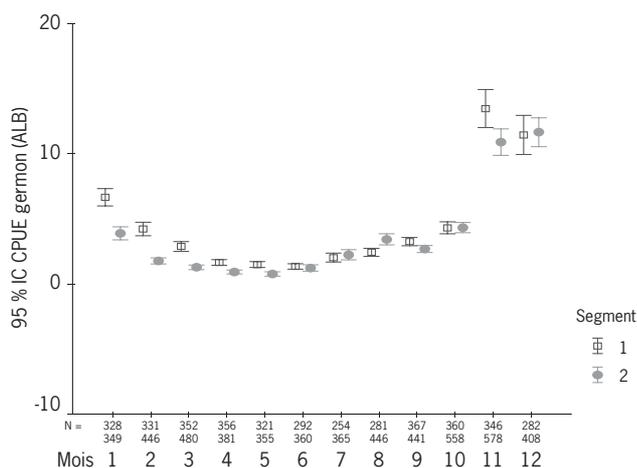


Figure 26 - Évolution des rendements moyens mensuels en germon par segment (nombre d'individu par 1000 hameçons) sur la période comprise entre 1994 et 2000.

Après une chute entre 1994 et 1997, les rendements semblent fluctuer. En 2000, la valeur est voisine de celles observées en 1995 et en 1996. Par contre, des différences significatives des moyennes annuelles sont évidentes entre les deux segments de bateaux (fig. 24). Les résultats enregistrés par le premier segment sont souvent supérieurs ou égaux, sauf pour 2000.

La figure 25 montre la saisonnalité marquée de cette espèce qui, bien que présente toute l'année, se caractérise par des pics de rendement entre novembre et décembre. Les rendements ont atteint des seuils supérieurs à 15 individus pour 1000 hameçons entre 1994 et 1997. Après une diminution de ces valeurs pendant les trois années suivantes, la valeur maximale atteinte en décembre 2000 est supérieure à 15 (fig. 25).

L'évolution moyenne des rendements mensuels pour cette espèce ne montre une différence significative des rendements entre les deux segments de la flottille que pour le mois de novembre (fig. 26).

Albacore

Ce n'est qu'à partir de 1999 que les débarquements des bateaux du segment 1 prédominent à nouveau. Ils atteignent une valeur maximum de 228 t en 2000 (fig. 27).

Le poids a été estimé sur la base de mesures de longueur effectuées lors des échantillonnages à bord (n=222). L'utilisation d'une équation de conversion (Marsac, données non publiées) donne un poids moyen de 45 kilogrammes.

Les distributions spatio-temporelles des prises mettent en évidence des captures importantes effectuées entre 1996 et 1998 dans les eaux seychelloises et dans le canal du Mozambique en 1997 (fig. 28).

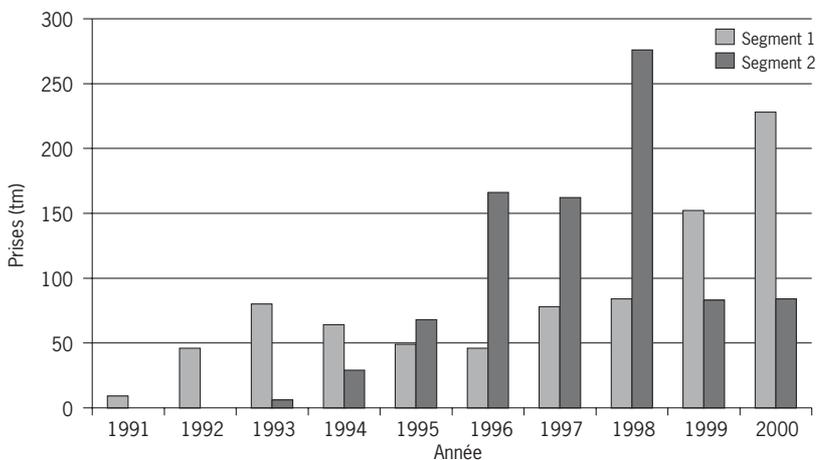
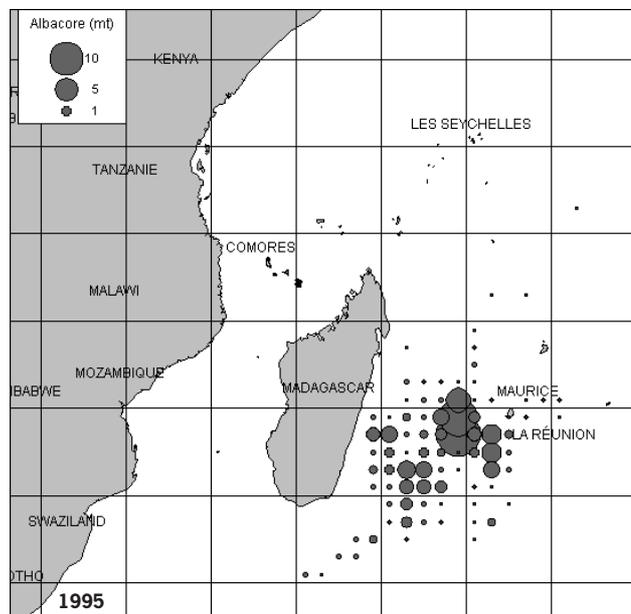
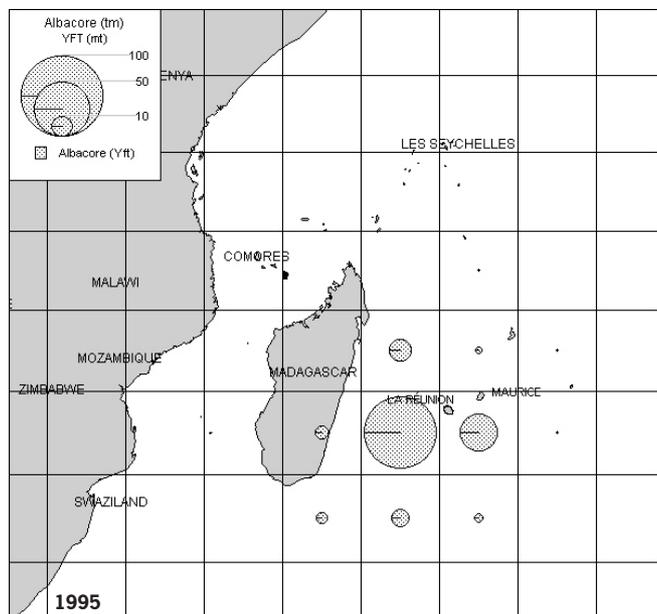
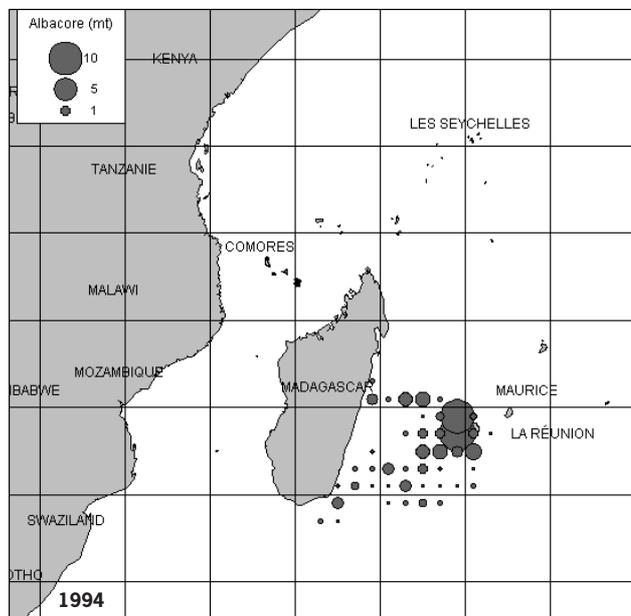
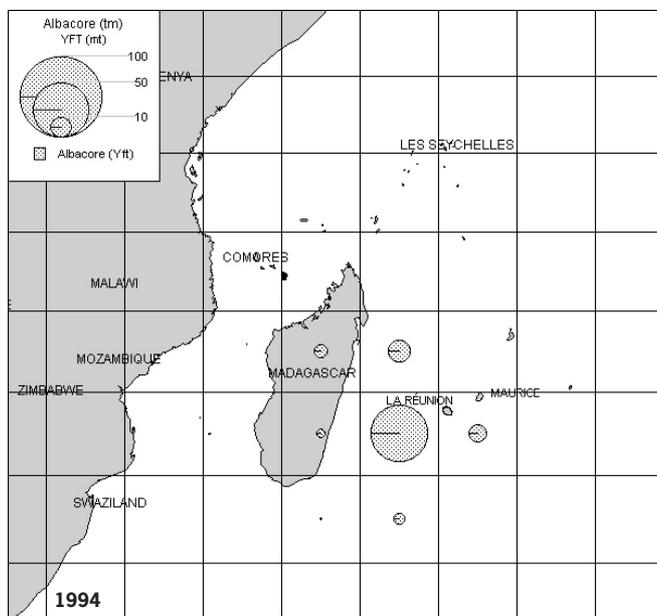
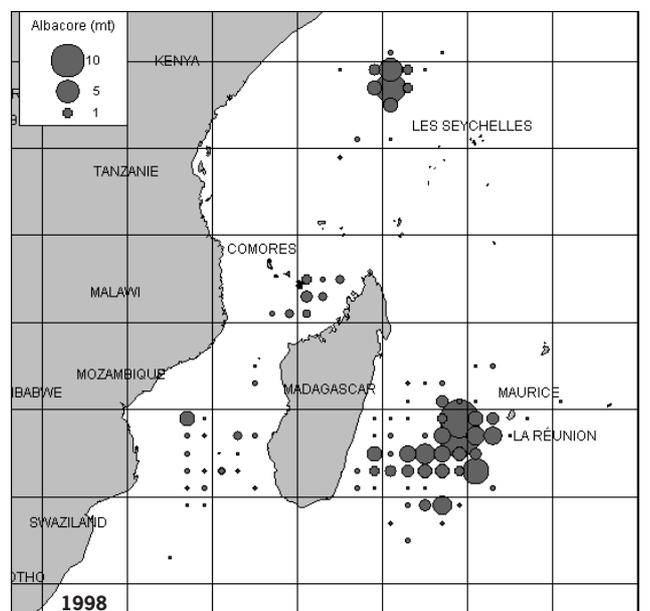
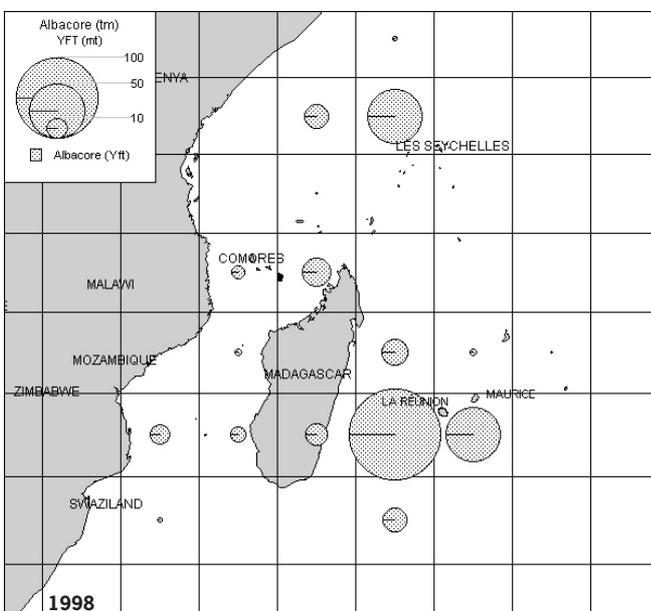
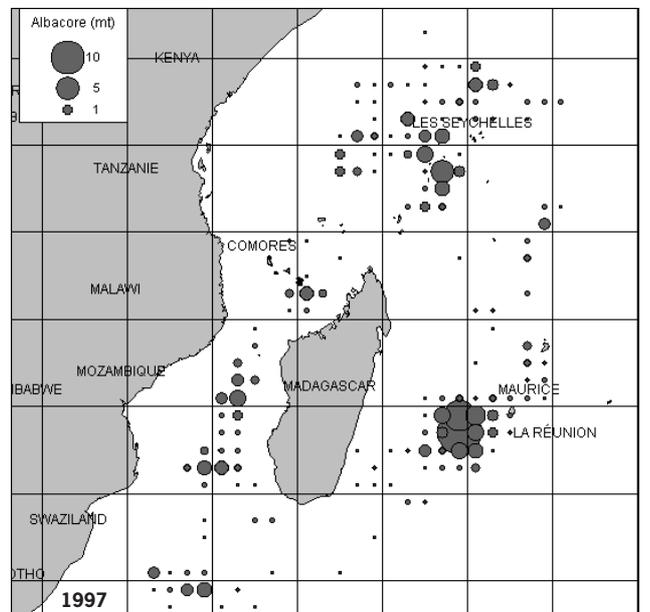
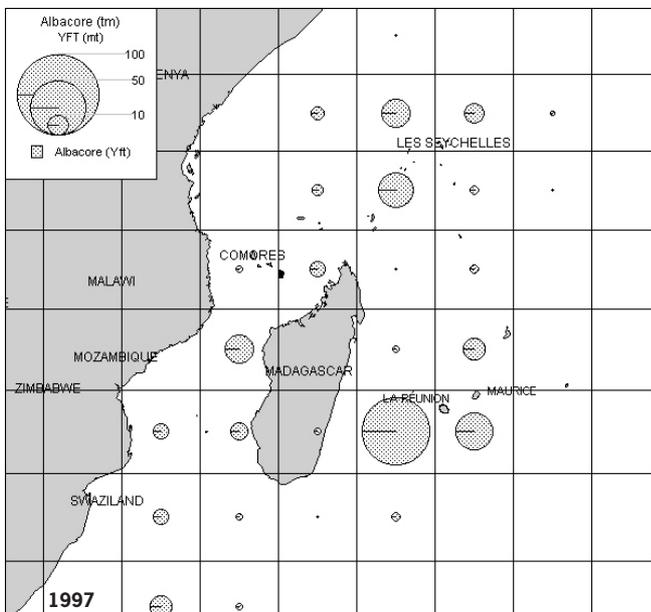
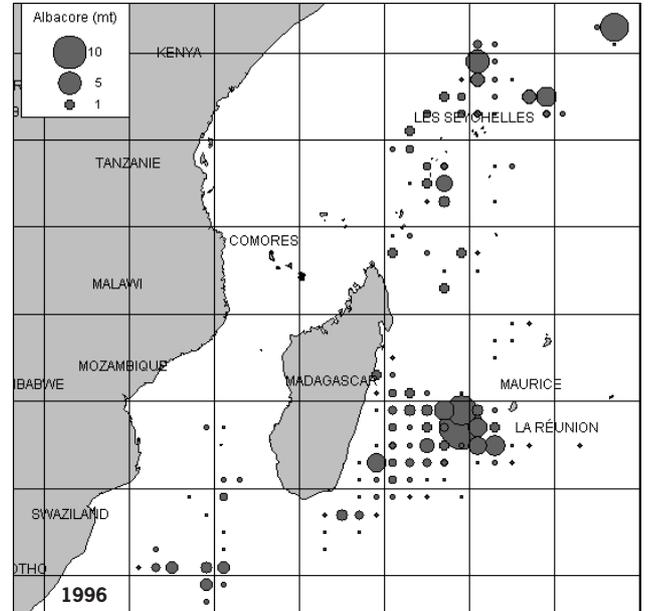
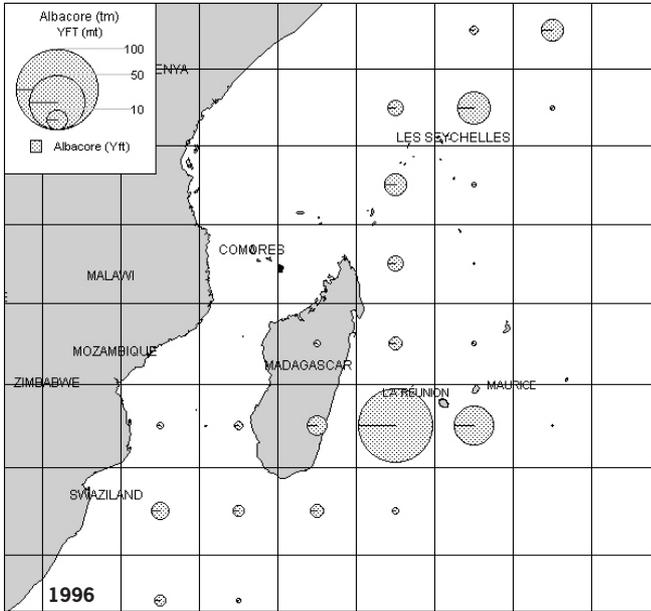
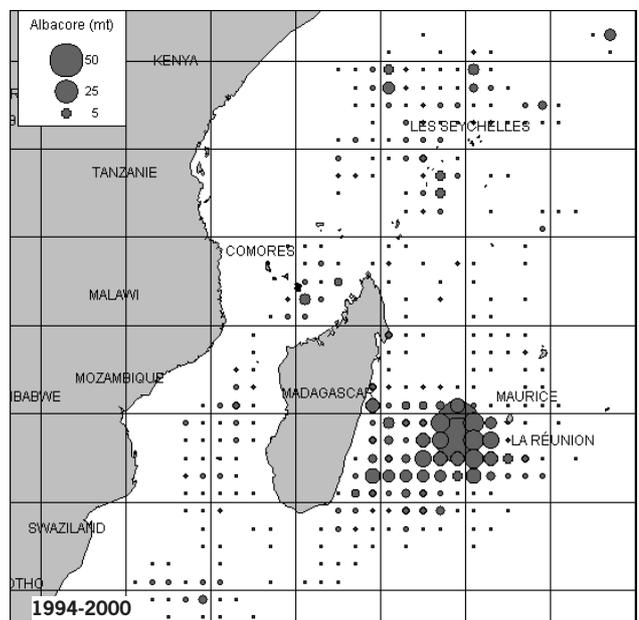
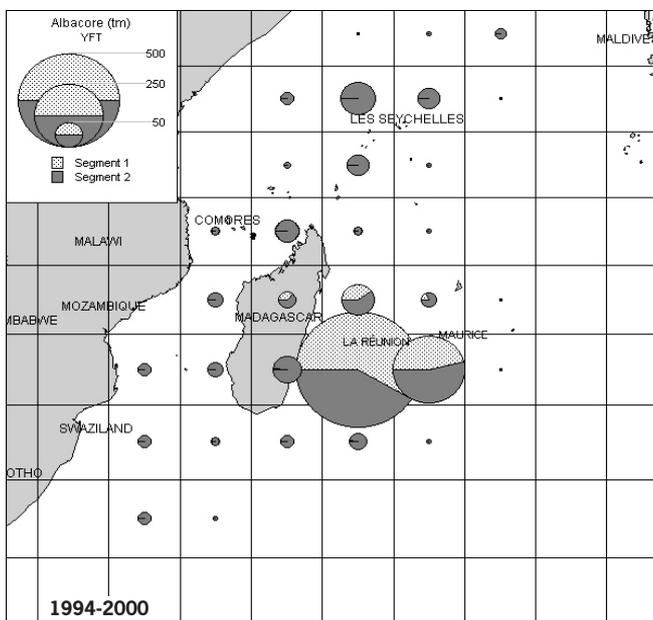
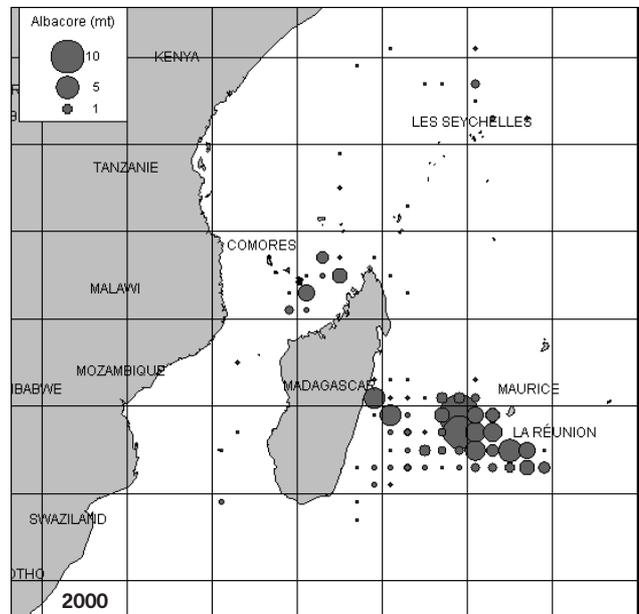
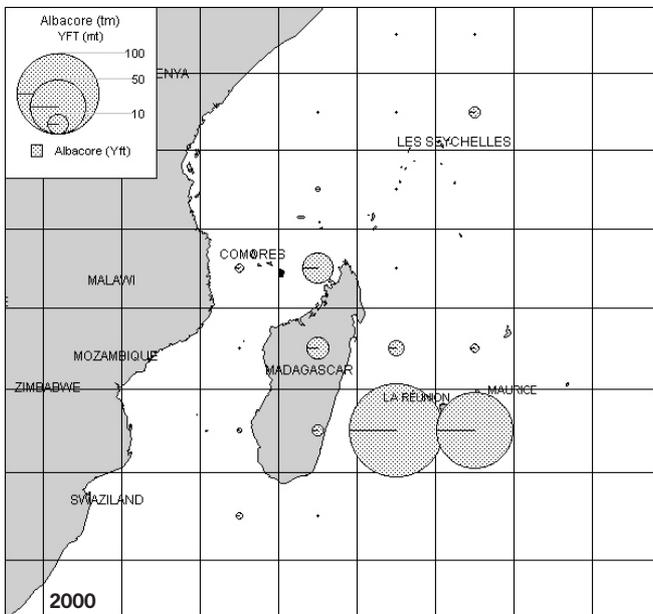
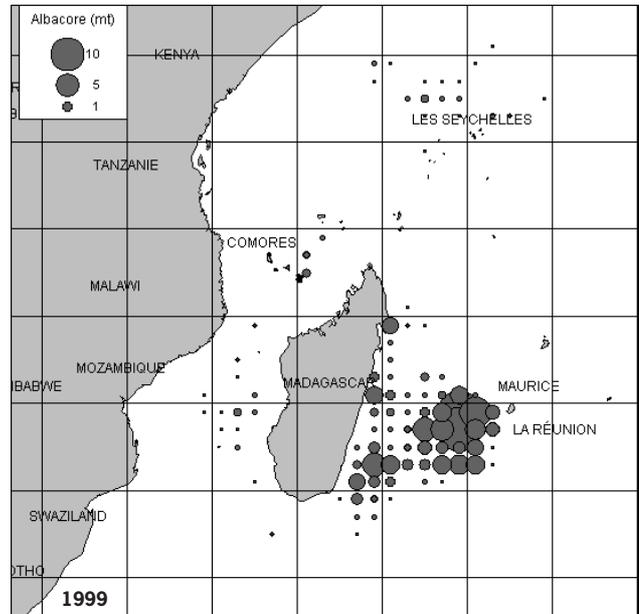
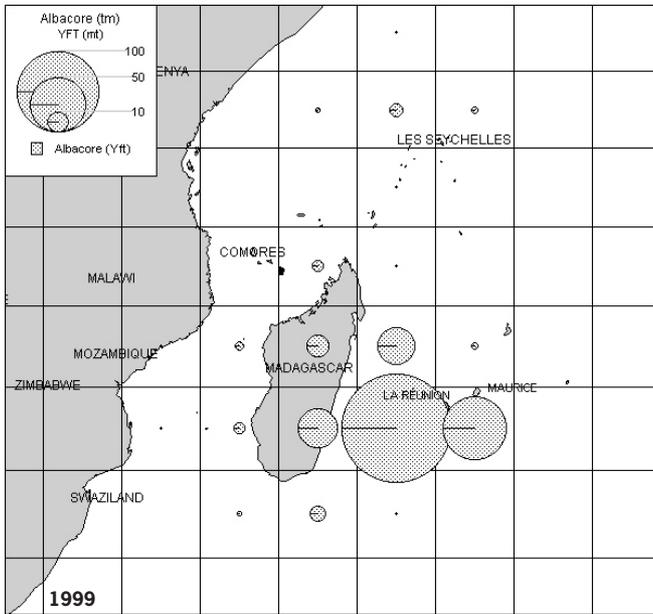


Figure 27 - Évolution des captures d'albacore (poids vif) par segment entre 1991 et 2000.

Figure 28 - Prises d'albacore agrégées par carré statistique de 1 degré (données issues des carnets de pêche récoltés) et par année entre 1994 et 2000; prises d'albacore estimées extrapolées par année pour l'ensemble de la flottille par carré de 5 degrés; prises d'albacore agrégées sur la période 1994-2000 par carré statistique de 5 degrés pour la flottille entière et pour ses deux segments.







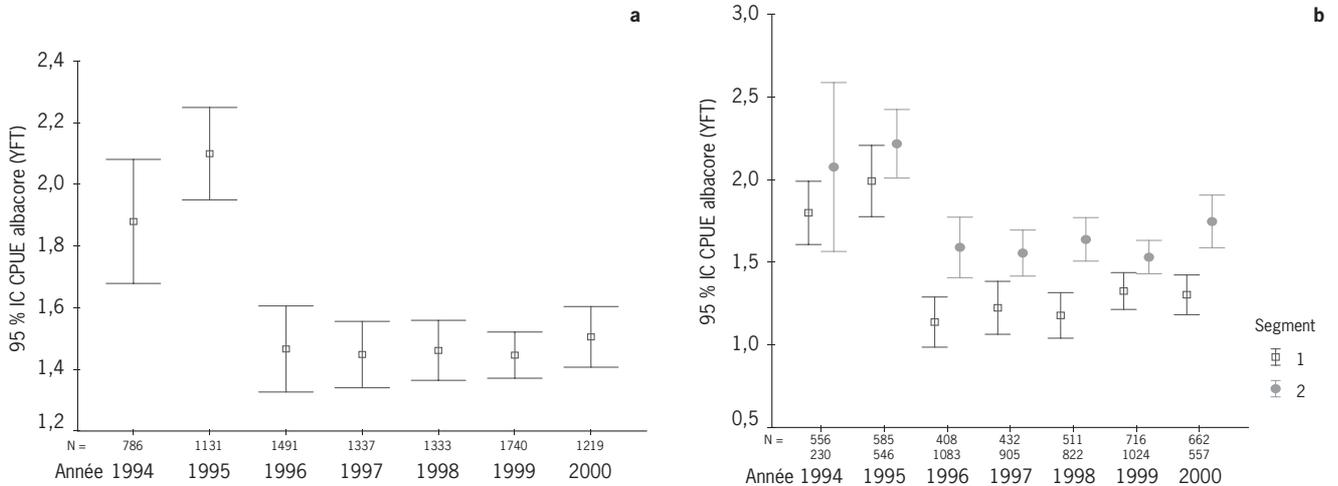


Figure 29 - Évolution des rendements moyens annuels en albacore, globaux et par segment, pour la flottille réunionnaise (nombre d'individus par 1000 hameçons).

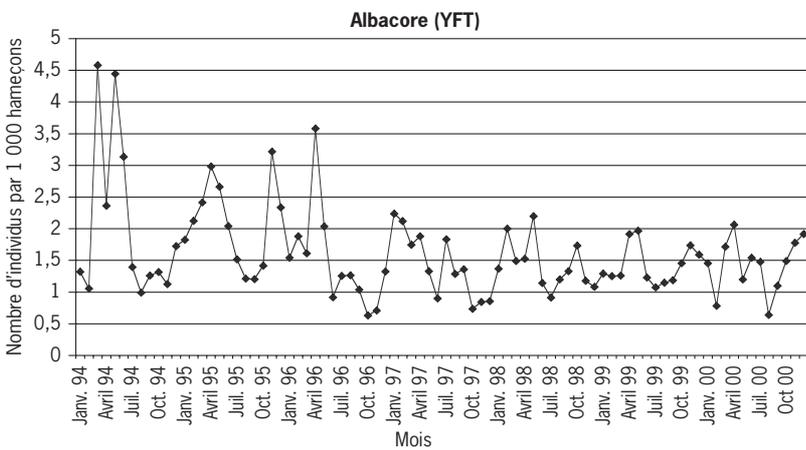


Figure 30 - Évolution des rendements moyens par mois entre janvier 1994 et décembre 2000 (nombre d'individus par 1000 hameçons).

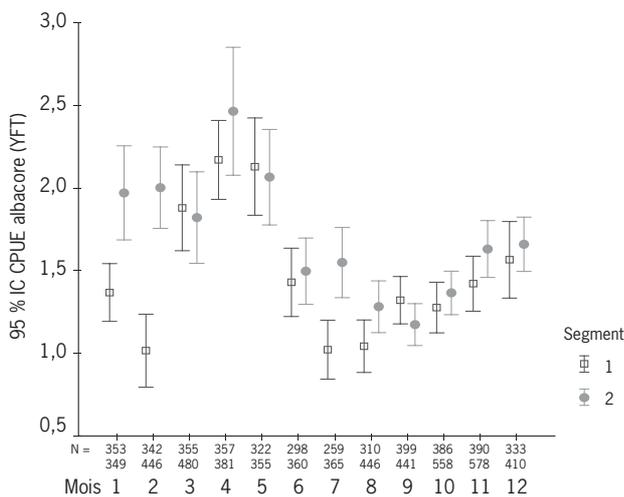


Figure 31 - Évolution de rendements moyens mensuels en albacore par segment (nombre d'individus par 1000 hameçons).

L'évolution des rendements moyens annuels d'albacores, globaux et par segment, pour toute la flottille réunionnaise montre des différences de rendements entre les deux segments de bateaux à partir de 1996 et une stabilité des rendements annuels (1,4 individu par 1 000 hameçons) depuis cette même année, après une décroissance entre 1995 et 1996 (fig. 29).

Après de forts rendements compris entre 3 et 4,5 enregistrés entre mars 1994 et avril 1996, les pics, généralement centrés sur les mois d'avril et mai et dans une moindre mesure en octobre, atteignent des valeurs plus faibles, ne dépassant pas 2,2 individus par 1 000 hameçons (fig. 30).

L'évolution des rendements moyens mensuels pour les deux segments confirme la période la plus favorable centrée sur les mois d'avril et mai (fig. 31). Quelques différences significatives entre les rendements pour les deux groupes peuvent être observées, principalement en janvier et février.

Patudo

Les prises de patudos sont majoritairement réalisées par les navires du second segment (fig. 32).

Le poids moyen a été estimé sur la base de mesures effectuées lors des échantillonnages de taille (n=171 ; longueur à la fourche) lors de campagnes à bord des palangriers. L'équation de conversion suivante estime un poids moyen d'environ 37 kg (Marsac, données non publiées) :

$$\text{Poids vif} = 2,7 * 10^{-5} l^{2,951}$$

Il convient de préciser que cette estimation est faite à partir d'un échantillonnage faible qui ne tient pas compte des variations de taille des individus observés tout au long d'une année. Aussi, devant ce manque de précision, les extrapolations à 5 degrés carrés pour cette espèce n'ont pas été calculées. L'analyse de l'évolution spatiale des prises de patudo indique que celles-ci se font au large de La Réunion, dans la zone des Seychelles, sur la côte sud-est malgache et relativement peu autour de La Réunion, ce qui explique les écarts dans les rendements entre les deux segments.

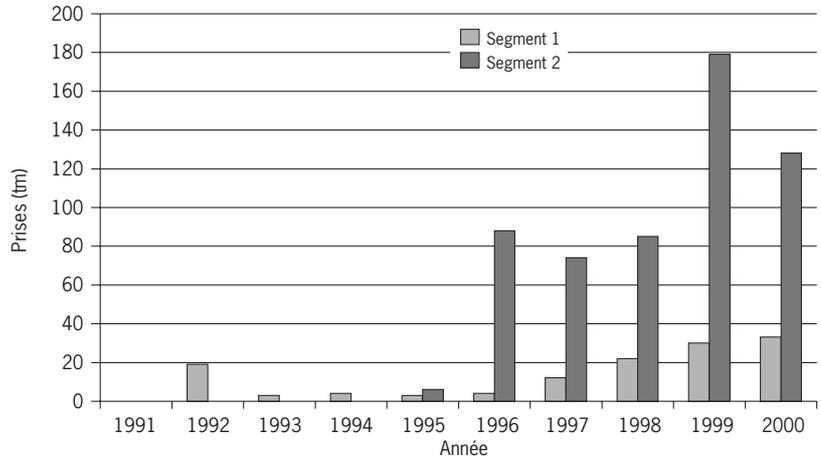
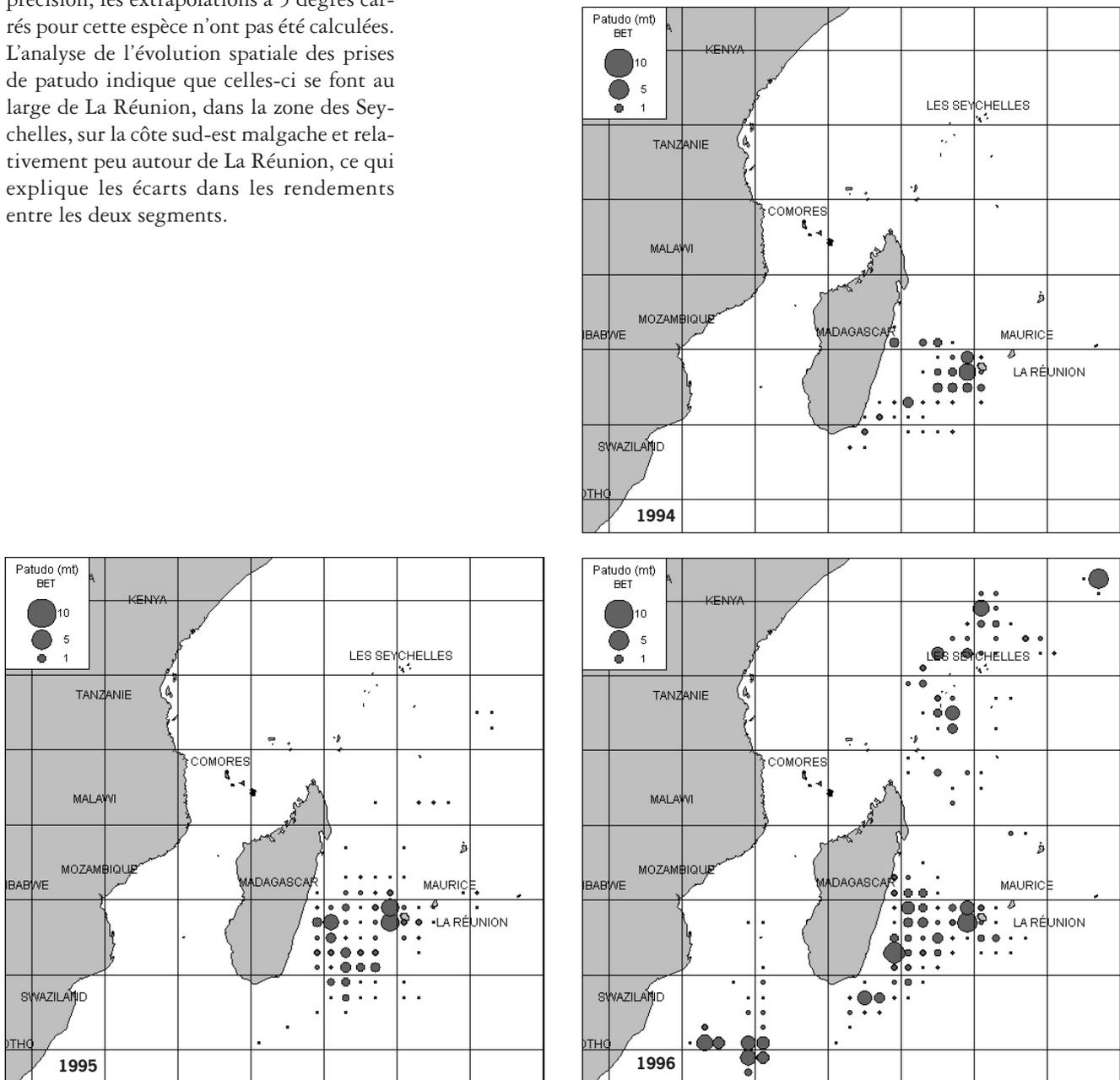


Figure 32 - Évolution des captures des patudos (poids vif) par segment.



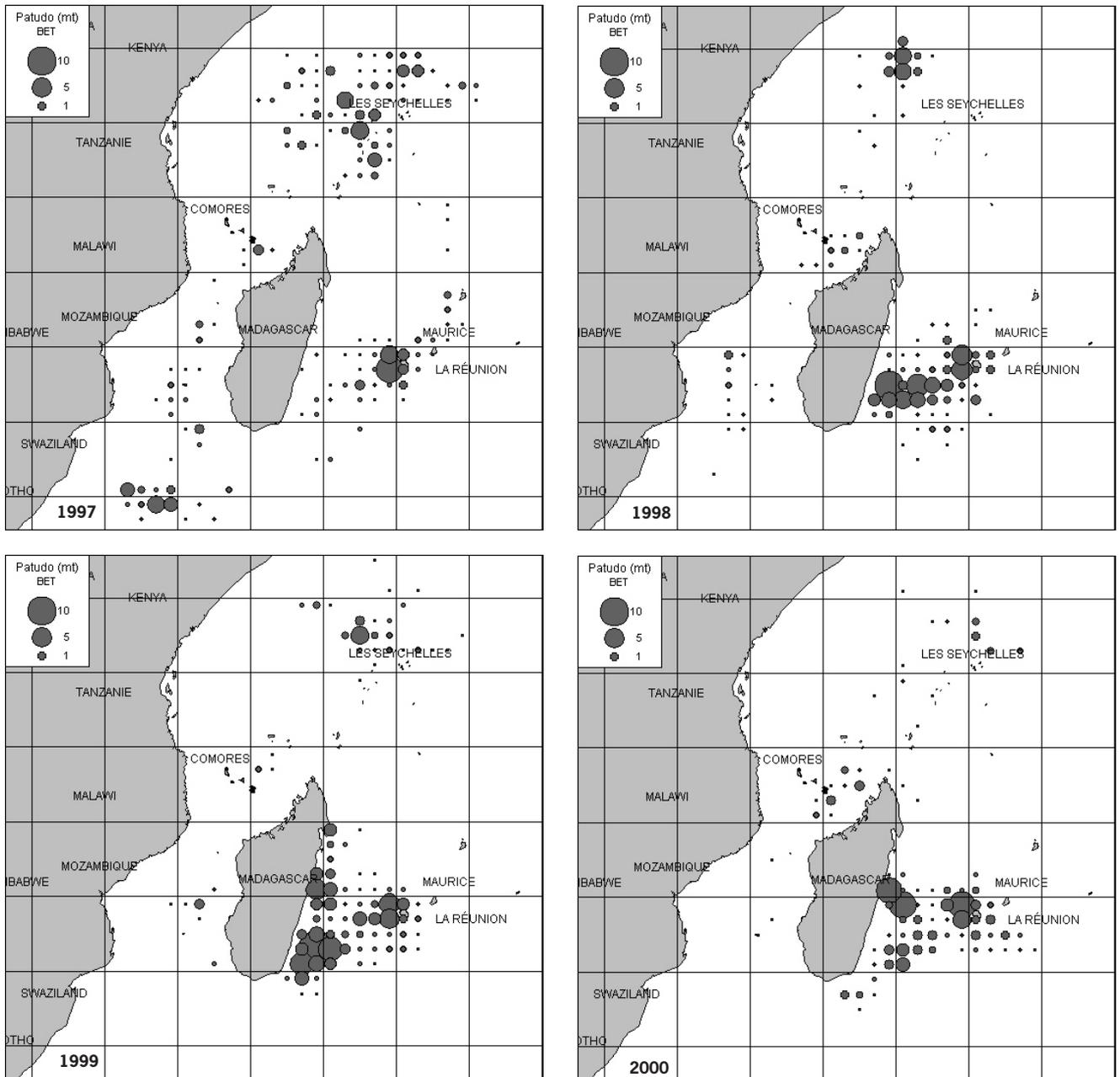


Figure 33 - Prises de patudo agrégées par carré statistique de 1 degré (données issues des carnets de pêche récoltés) et par année entre 1994 et 2000.

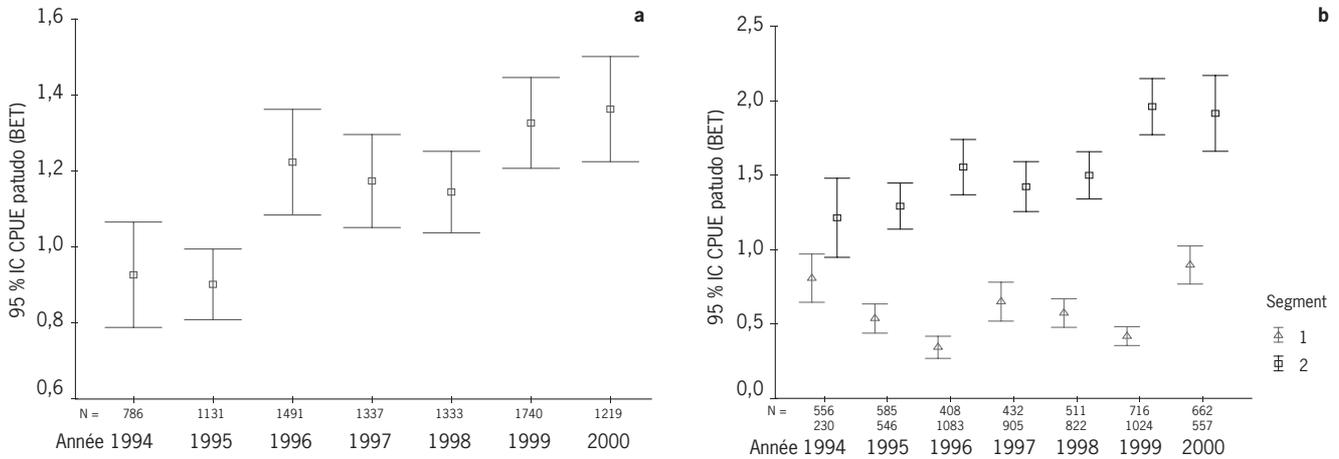


Figure 34 - Évolution de rendements moyens annuels en patudo, globaux et par segment, pour toute la flottille réunionnaise (nombre d'individus par 1 000 hameçons).

La différence de rendements entre les deux groupes est évidente sur l'échelle interannuelle. Ainsi, malgré les fluctuations des rendements du premier segment, la tendance générale des rendements moyens de la flottille à la hausse depuis 1994 est due aux performances des navires du second segment (fig. 34).

Les rendements fluctuent considérablement sur toute la période entre 0,3 et 3,5 individus pour 1 000 hameçons (fig. 35). Les effets de saisonnalité, déjà visibles sur la figure 35, apparaissent clairement sur la figure 36 qui présente l'évolution des rendements mensuels par segment. Deux pics sont identifiés en avril mais surtout en juillet et août, principalement pour les navires du second segment.

Dorade coryphène

Les cartes de captures annuelles agrégées par carré de 5 degrés ne mettent pas en évidence de zone de capture particulière mais indiquent que, globalement, les prises effectuées par les palangriers du premier segment sont plus élevées (fig. 37).

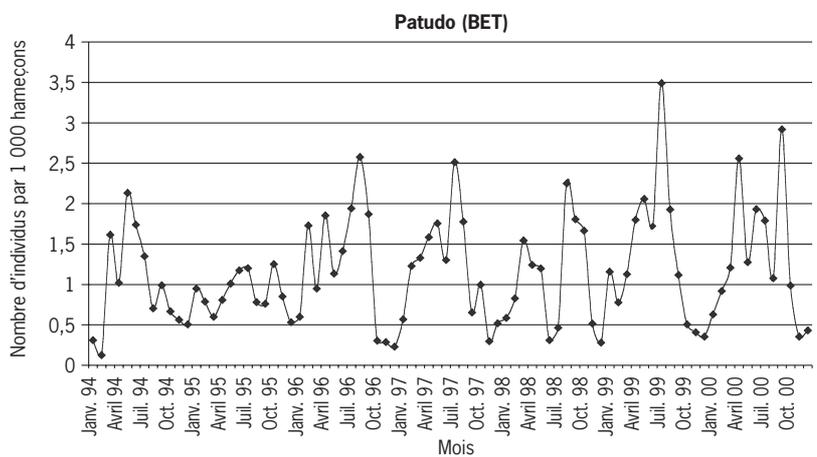


Figure 35 - Évolution des rendements mensuels moyens en patudo de la flottille (nombre d'individus par 1 000 hameçons).

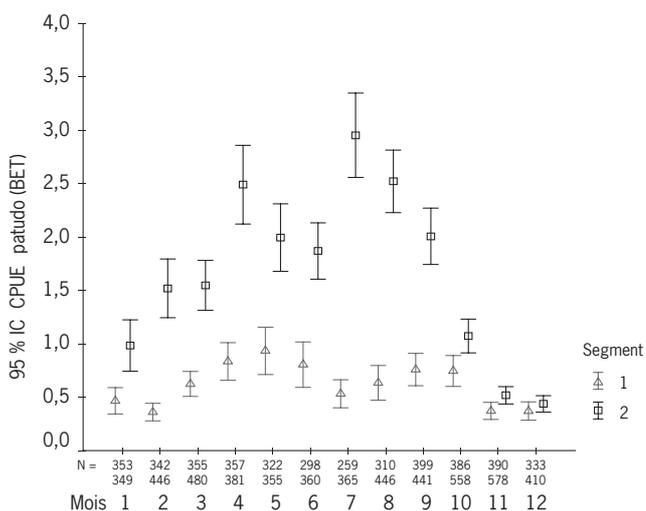
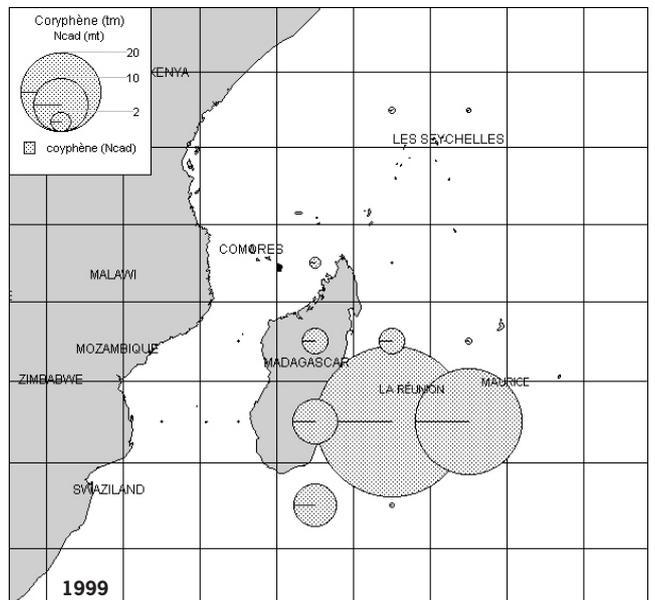
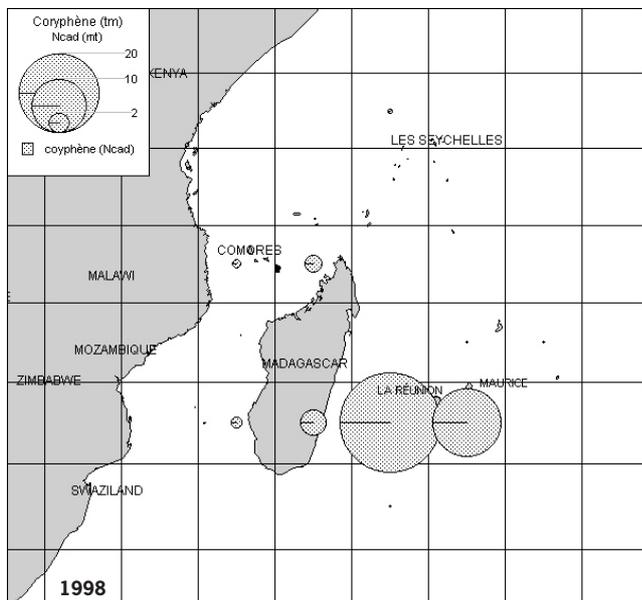
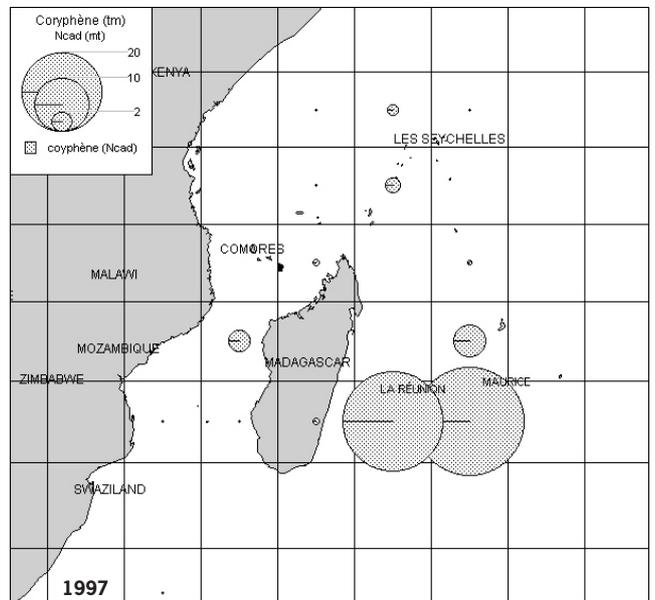
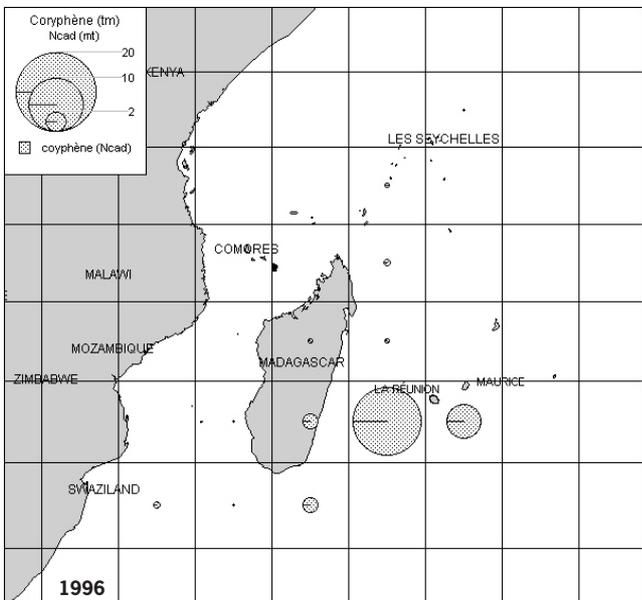
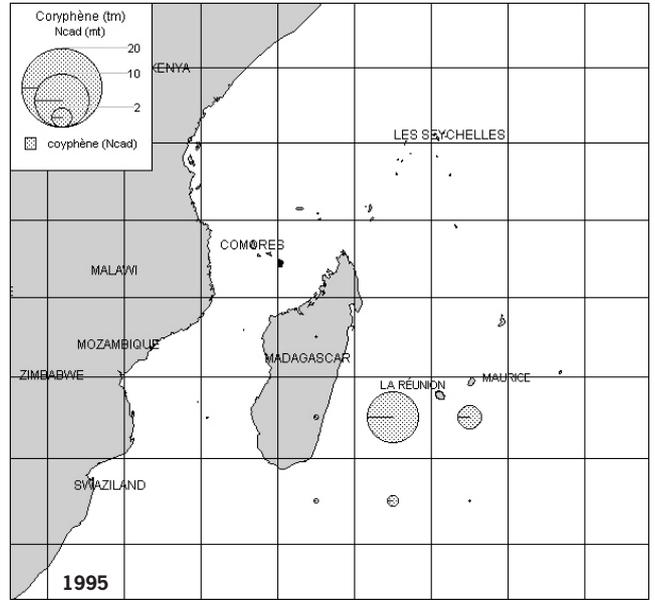
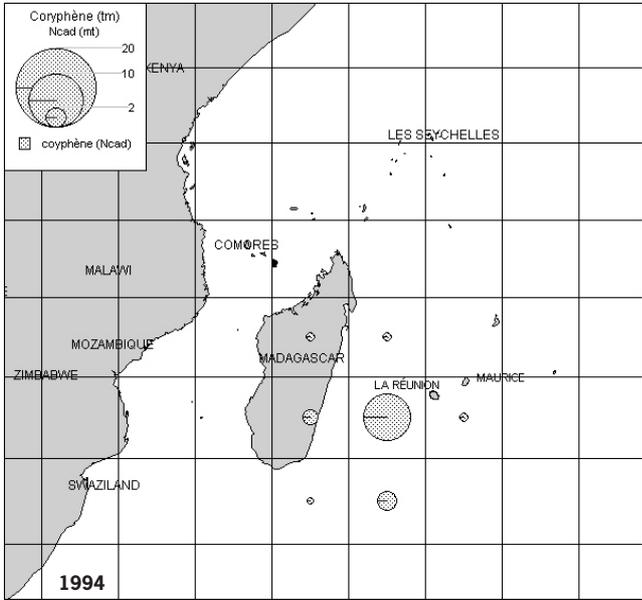


Figure 36 - Évolution de rendements moyens mensuels en patudo par segment (nombre d'individus par 1 000 hameçons).



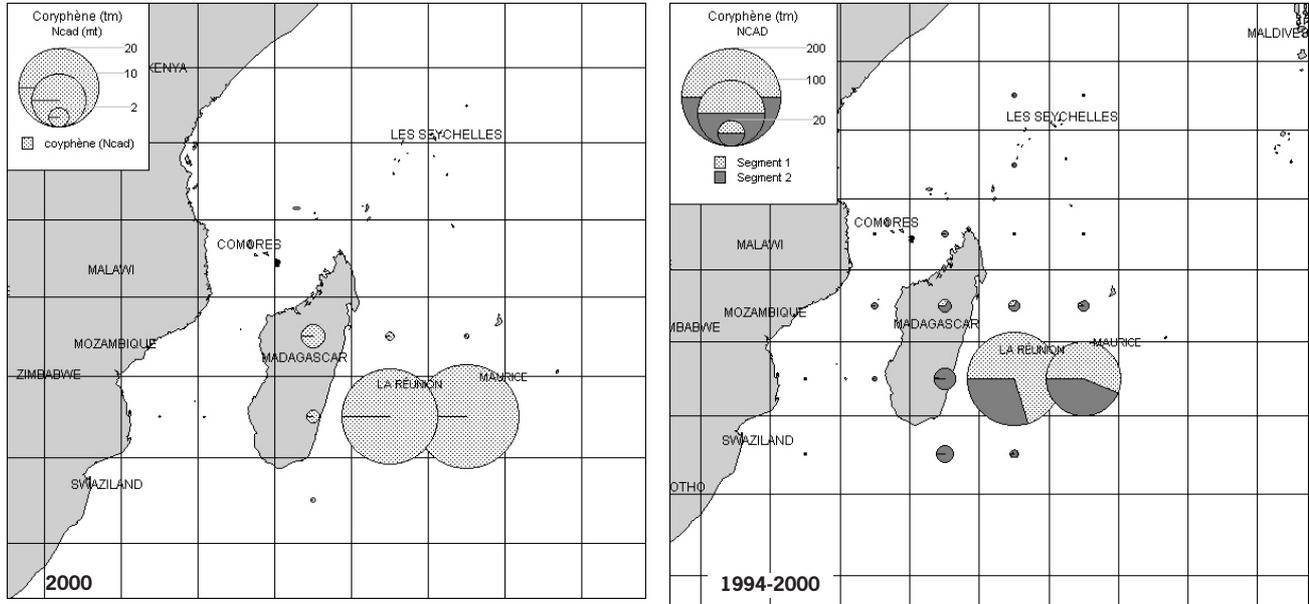


Figure 37 - Prises de dorade estimées extrapolées par année pour l'ensemble de la flottille par carré de 5 degrés; prises de dorade agrégées sur la période 1994-2000 par carré statistique de 5 degrés pour les deux segments de la flottille.

La représentation des rendements moyens mensuels en dorade fait apparaître des pics récurrents en octobre, plus ou moins marqués suivant les années (fig. 38). Les plus fortes valeurs (supérieures à 10 individus pour 1 000 hameçons) ont été enregistrées durant les années 1997 et 1999 (fig. 38). Les meilleurs rendements sont généralement le fait des petites unités tant au niveau mensuel qu'au niveau annuel (fig. 39, 40). Après une tendance à la baisse entre 1994 et 1996, les valeurs ont fluctué au cours des quatre dernières années.

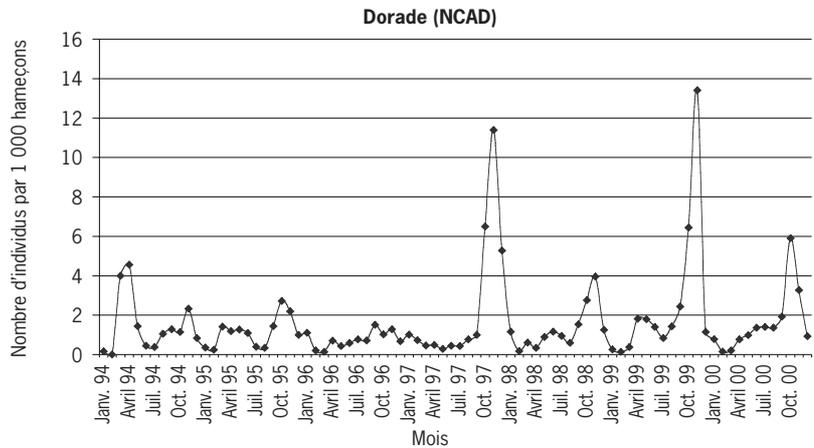


Figure 38 - Évolution des rendements mensuels moyens en dorade de la flottille (nombre d'individus par 1 000 hameçons).

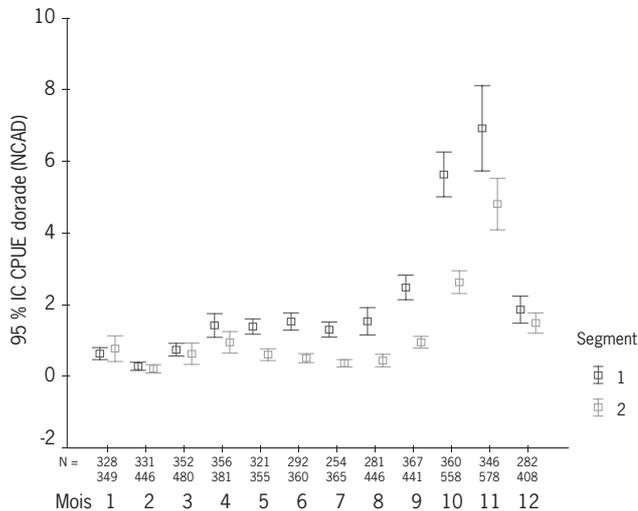


Figure 39 - Évolution des rendements en dorade par segment (nombre d'individus par 1 000 hameçons).

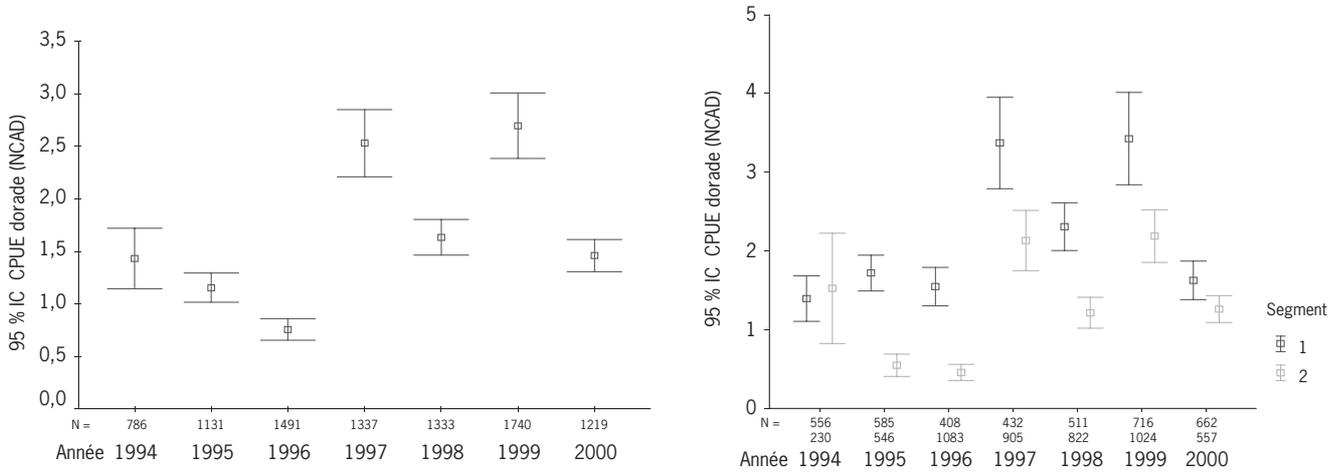


Figure 40 - Évolution de rendements moyens annuels en dorade, par segment et globaux, pour toute la flottille réunionnaise (nombre d'individus par 1 000 hameçons).

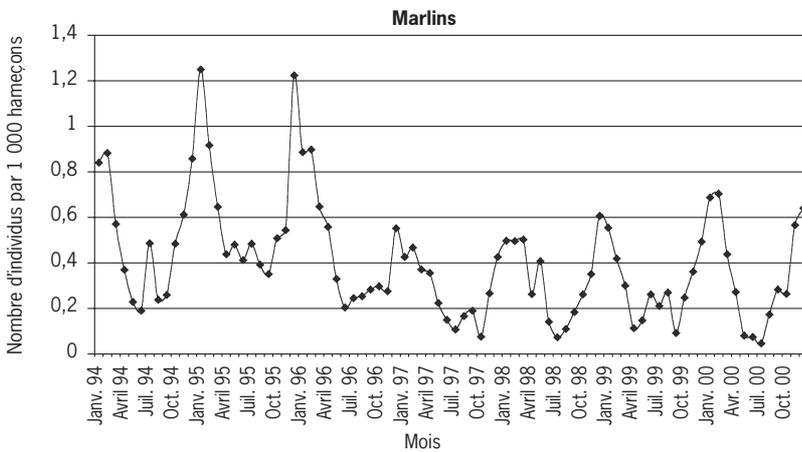


Figure 41 - Évolution des rendements mensuels moyens en marlin bleu et marlin noir de la flottille (nombre d'individus par 1 000 hameçons).

Poissons porte-épée

Marlins

Sous l'appellation marlins sont comptabilisées deux espèces, le marlin noir et le marlin bleu, compte tenu du manque de précision dans les carnets de pêche. En effet, il n'existe pas de différence dans la valeur marchande pour ces deux espèces. Les rendements les plus élevés sont régulièrement observés en décembre, janvier et février. Les rendements mensuels ont atteint des maximums en 1995 et 1996, de l'ordre de 1,2 individu par 1 000 hameçons, avant de baisser de moitié après cette date (fig. 41). Après une baisse des rendements entre 1995 et 1997, les rendements semblent se stabiliser autour de 0,3 individu par 1 000 hameçons entre 1997 et 1999. Une légère tendance à la hausse est à noter en 2000. Des différences notoires sont observées entre les rendements obtenus par les deux segments de navires, les PUE du second segment étant globalement toujours plus importantes depuis 1996, sauf pour l'année 1997 (fig. 42).

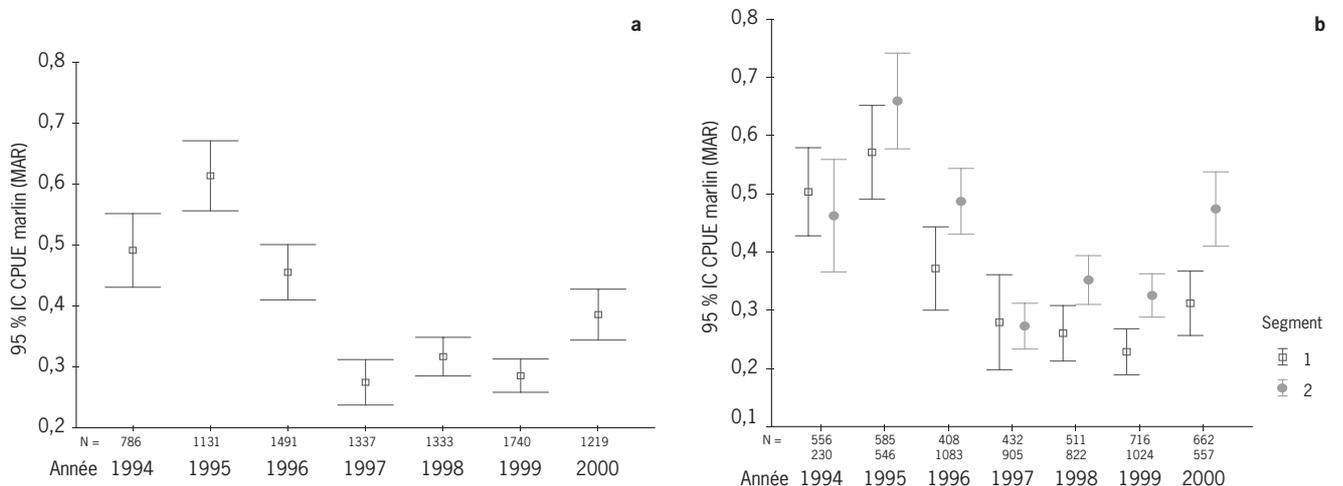


Figure 42 - Évolution de rendements moyens annuels en marlins, globaux pour toute la flottille réunionnaise et par segment (nombre d'individus par 1 000 hameçons).

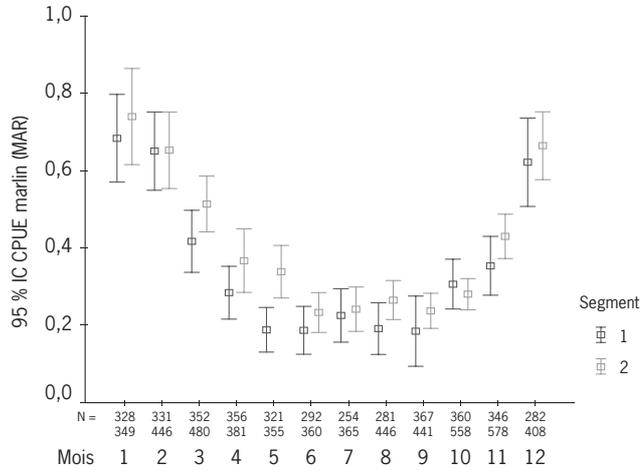


Figure 43 - Évolution de rendements moyens mensuels en marlin par segment (nombre d'individus par 1 000 hameçons).

Lanciers

La saisonnalité pour cette espèce existe mais est moins marquée que pour les marlins ; les pics se distinguent généralement entre octobre et décembre, soit pendant la période estivale. Les rendements, globalement très faibles, peuvent atteindre des valeurs voisines de 0,2 individu par 1 000 hameçons durant cette partie de l'année (fig. 44).

Aucune tendance marquée n'est observée depuis 1994 pour cette espèce. Les rendements les plus importants sont relevés en 1999 (fig. 45).

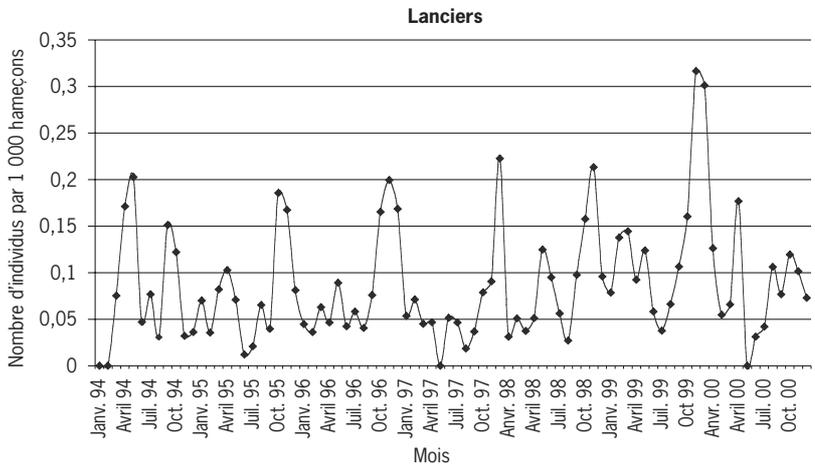


Figure 44 - Évolution des rendements mensuels moyens en lancier de la flottille (nombre d'individus par 1 000 hameçons).

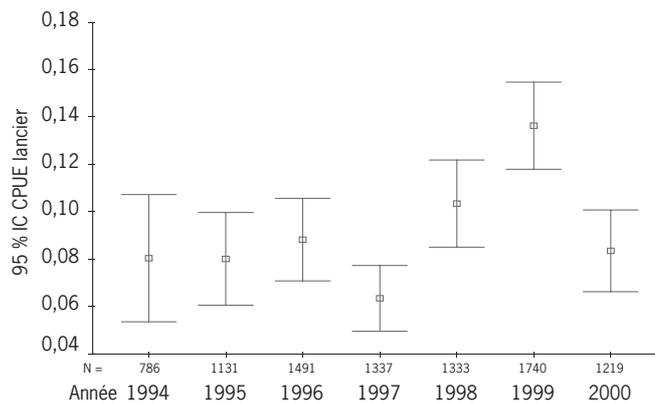


Figure 45 - Évolution annuelle des rendements en lancier (nombre d'individus par 1 000 hameçons).

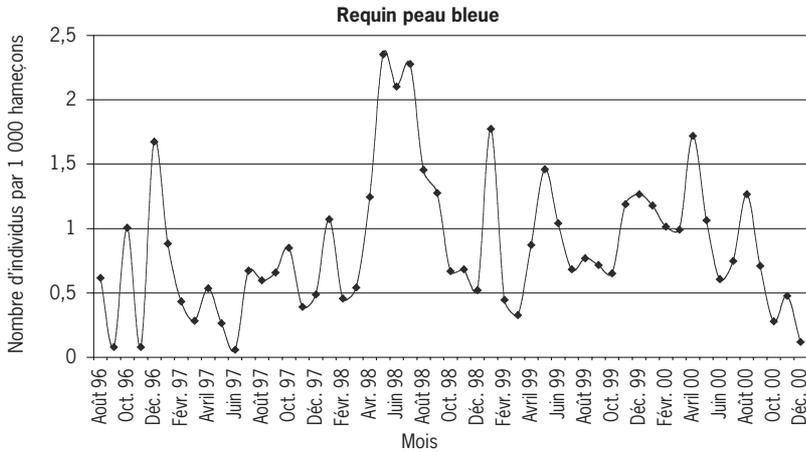


Figure 46 - Évolution des rendements mensuels moyens en requin peau bleue de la flottille (nombre d'individus par 1 000 hameçons) entre août 1996 et décembre 2000.

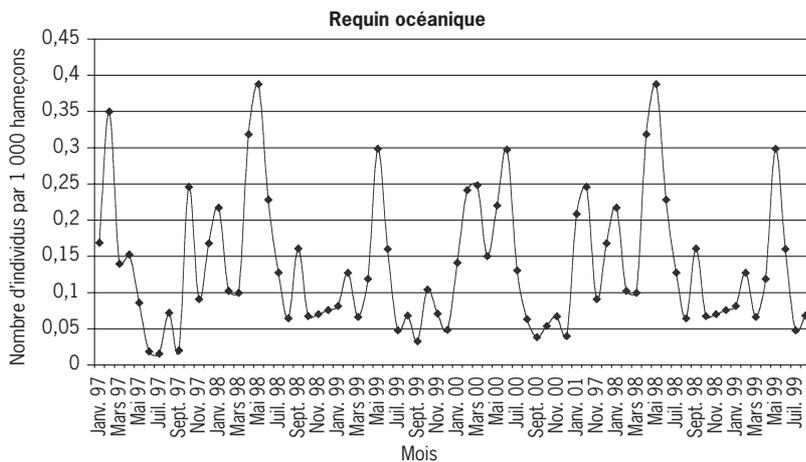


Figure 47 - Évolution des rendements mensuels moyens en requin océanique de la flottille (nombre d'individus par 1 000 hameçons) entre janvier 1997 et décembre 2000.

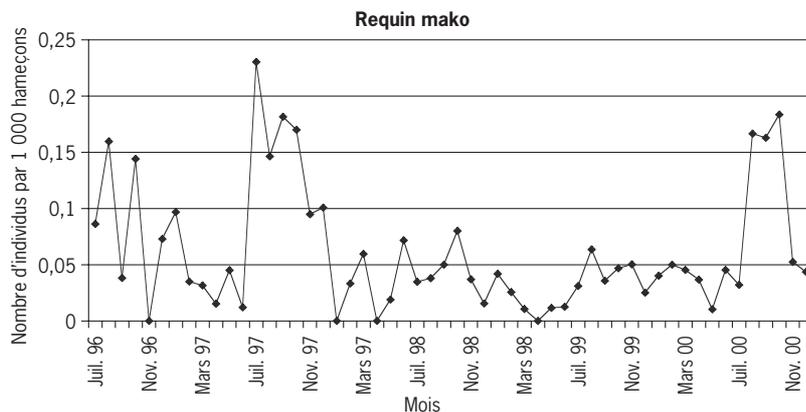


Figure 48 - Évolution des rendements mensuels moyens en requin mako pour l'ensemble de la flottille (nombre d'individus par 1 000 hameçons) entre juin 1996 et décembre 2000.

Requins

Sept espèces de requins ont été recensées dans les captures. L'analyse des données des carnets de pêche montre que le requin peau bleue (*Prionace glauca*) représente 92 % des prises de cette catégorie. Cette espèce n'étant pas commercialisée, la plupart des individus capturés vivants sont relâchés. Dans le cas contraire, seuls les ailerons sont gardés et les carcasses sont rejetées. Parmi les espèces conservées pour la vente (8 %), on compte 5,4 % de requin océanique (*Carcharhinus longimanus*), 2 % de mako (*Isurus oxyrinchus*) et 0,6 % de requin marteau (*Sphyrna* sp.). La capture des autres espèces reste anecdotique. Compte tenu du peu d'intérêt accordé à ces espèces, le report d'informations les concernant a été négligé au début de la mise en place du système de carnets de pêche. Aussi, les représentations graphiques ont été établies sur des périodes plus courtes.

Requin peau bleue

Aucune saisonnalité n'apparaît dans la représentation des rendements moyens mensuels de requins peau bleue pour toute la flottille (fig. 46). Les rendements les plus importants ont été enregistrés en mai et juillet 1998 (2,4 individus par 1 000 hameçons).

Requin océanique

Des pics de rendements apparaissent entre mai et juin, les valeurs maximales atteintes sont de l'ordre de 0,4 individu pour 1 000 hameçons (fig. 47).

Requin mako

Les rendements moyens mensuels sont très faibles, voire nuls certains mois. Les plus forts rendements atteints en juillet 1997 et octobre 2000 sont de l'ordre de 0,2 individu par 1 000 hameçons (fig. 48).

Suivi des tailles

Mesures biométriques

À bord des palangriers réunionnais, le traitement des poissons est principalement dépendant du marché à pourvoir et de la durée du séjour en mer des bateaux de pêche. Trois types de traitement en mer peuvent être appliqués :

- soit le poisson est conservé, vidé, décapité et débarrassé des nageoires (forme VDK : vidé décapité), en frais sous glace dans des cales isolées ou réfrigérées à 0 °C ;
- soit le poisson est conservé, vidé uniquement (forme VAT : vidé avec tête). Ce traitement est appliqué aux espadons d'un poids inférieur à 25 kilogrammes ;
- soit le poisson est transformé en longes de 2 à 3 kg en moyenne, conditionnées sous vide, protégées par un film plastique, congelées à -20 °C (pour le marché européen) ou à -50 °C pour le thon obèse destiné au marché japonais du sashimi³. Cette préparation de longes nécessite un local de transformation, elle est pratiquée à bord par la majorité des bateaux supérieurs à 20 m effectuant des campagnes de plus de 20 jours de mer.

La figure 49 présente les différents types de mensurations actuellement identifiés sur les Istiophoridés et Xiphiidés. Les définitions précises de ces différentes mesures figurent dans le tableau 12. Le choix de la mesure linéaire à retenir dépend de (1) l'état du poisson manipulé, (2) de la facilité, de la rapidité et de la reproductibilité avec lesquelles les mesures peuvent être effectuées, (3) de l'existence d'un rapport

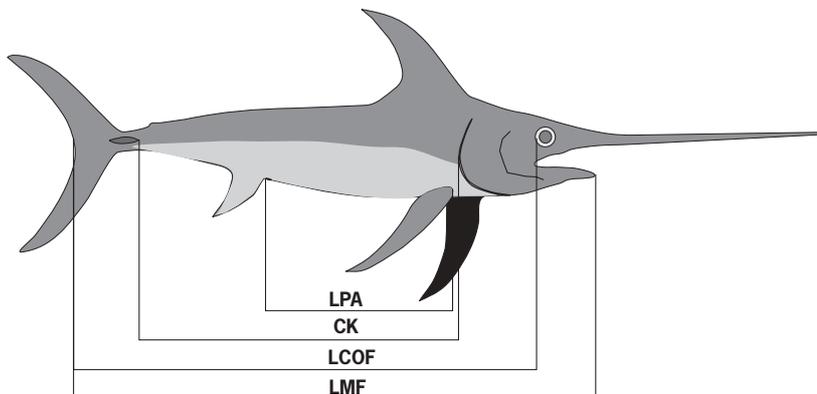


Figure 49 - Mensurations des Istiophoridés et Xiphiidés.

avec une ou plusieurs mesures de taille ainsi qu'avec le poids du poisson, (4) de la compatibilité avec les mesures enregistrées sur la même espèce dans des zones géographiques différentes.

De la même manière, plusieurs types de poids peuvent être enregistrés sur les fiches de débarquement. Les statistiques demandées par les administrations nationales et internationales devant être établies en poids vif, des coefficients ont donc été établis pour permettre de convertir l'ensemble des produits débarqués en poids vif.

Les deux types d'échantillonnages permettent d'obtenir des informations complémentaires (fig. 50). À bord, les observateurs scientifiques peuvent échantillonner tous les individus capturés par l'engin de pêche, procéder à des prélèvements biologiques et enregistrer d'autres observations annexes.

Tableau 12 - Définition des différentes mensurations pour les Istiophoridés et Xiphiidés.

Type de mensuration	Définition
Longueur totale lt ou TL	Longueur en projection horizontale ou longueur courbe de la pointe du rostre à la fourche caudale
Longueur maxillaire-fourche lmf ou LJFL	Longueur en projection horizontale ou longueur courbe de la pointe de la mandibule inférieure à la fourche caudale
Longueur cavité oculaire-fourche lcof ou EOFL	Longueur en projection horizontale ou longueur courbe de l'angle postérieur de la cavité oculaire à la fourche caudale
Longueur dorsale-fourche ldf ou DFL	Longueur en projection horizontale ou longueur courbe de la jonction antérieure de la nageoire dorsale à la fourche caudale
Longueur pectorale-anale lpa ou PAL	Longueur en projection horizontale ou longueur courbe de la jonction antérieure de la nageoire pectorale au pourtour postérieur du sphincter anal
Longueur pectorale-fourche lpf ou PFL	Longueur en projection horizontale ou longueur courbe de la jonction antérieure de la nageoire pectorale à la fourche caudale
Longueur pectorale-dorsale lpd ou PDL	Longueur en projection horizontale ou longueur courbe de la jonction antérieure de la nageoire pectorale à la jonction antérieure de la deuxième dorsale
Longueur cleithrum-queue ck	Longueur en projection horizontale ou longueur courbe entre le bord du cleithrum et le bord antérieur de la quille latérale

3. Spécialité culinaire japonaise apparue dans les années soixante qui consiste à manger les produits de mer crus (poissons et crustacés) accompagnés d'une moutarde forte « wasabi » et de sauce de soja.

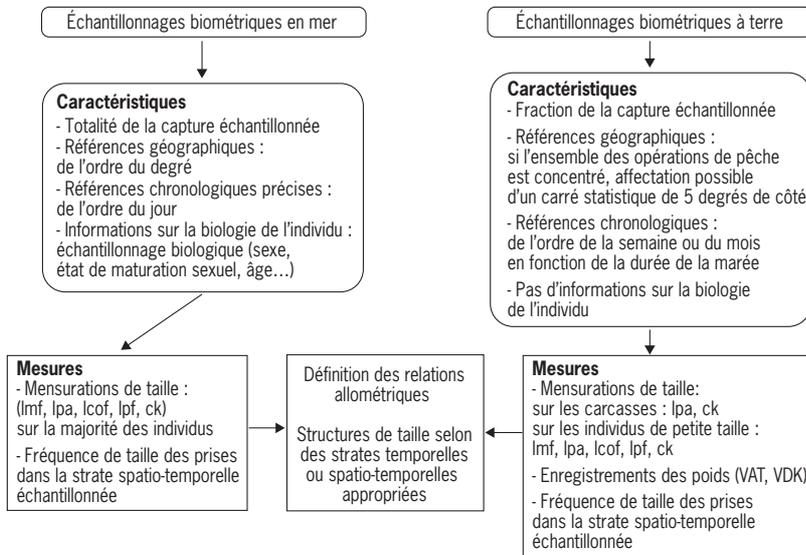


Figure 50 - Caractéristiques et attendus des différents types d'échantillonnages.

Tableau 13 - Caractéristiques des différentes équations de conversion : coefficients de la droite de régression a et b, limites de validité de la droite, grandeur de l'échantillon n et coefficient de détermination.

x (cm)	y (cm)	a	b	x mini (cm)	x maxi (cm)	n	r ²
lpa	lmf	2,5407	25,698	18	105	1806	0,9213
ck	lmf	1,5411	19,605	32	180	801	0,9792
lcof	lmf	1,066	10,449	48	255	123	0,9917
ck	lcof	1,4838	5,404	32	147	113	0,9834
lpa	lcof	2,3901	12,254	19	89	122	0,9532

Tableau 14 - Caractéristiques des différentes relations taille-poids, coefficients de la droite de régression a et b, limites de validité de la droite, grandeur de l'échantillon n et coefficient de détermination.

x (cm)	y (kg)	a	b	x mini (cm)	x maxi (cm)	n	r ²
lpa	vdk	9,9518*10 ⁻⁴	2,6586	22	109	2395	0,878
lmf	vdk	5,8641*10 ⁻⁶	3,0849	90	250	334	0,926
lmf	vat	1,753*10 ⁻⁶	3,3433	51	215	430	0,959
ck	vdk	1,5762*10 ⁻⁴	2,7297	50	158	773	0,924

Les informations recueillies peuvent être reliées à un lieu géographique précis (de l'ordre du degré) ainsi qu'à un jour donné, ce qui permet un traitement des résultats à une échelle spatio-temporelle fine.

Cette précision géographique et chronologique ne peut être recueillie au cours des échantillonnages à terre car, tout au long de la campagne, les poissons sont stockés dans les cales après traitement sans distinction. Ces données s'intègrent à la base Biométrie et permettent d'établir les différentes équations d'allométrie.

La compilation de l'ensemble des mensurations (lpa, lmf) permet de suivre les fréquences de taille par strate temporelle choisie sur toute la zone couverte par les navires échantillonnés.

Relations entre les longueurs

Les relations entre les différentes mensurations sont des fonctions linéaires du type : $y = a*x + b$

Le tableau 13 donne les caractéristiques des cinq droites de régression liant les mesures linéaires.

Parmi l'ensemble de ces mesures, la lpa est la plus courte, ce qui explique que les droites de régression entre les autres mesures et la lpa présentent les coefficients de détermination les moins élevés. En toute logique, la longueur ck devrait être prise préférentiellement sur les carcasses. Or, cette mesure n'est pas toujours accessible car, lors de certains traitements, la queue est coupée bien avant la base antérieure de la quille, ce qui laisse peu de choix lors des échantillonnages.

Relations longueur-poids

À partir des données biométriques (sexes confondus) obtenues lors d'échantillonnages à La Réunion, quatre relations entre les longueurs et les poids ont été établies. Ces relations sont de la forme :

$$y = a*x^b$$

Les caractéristiques de ces différentes équations sont présentées dans le tableau 14.

Les plus forts coefficients de détermination (>0,92) sont obtenus à partir de la longueur maxillaire-fourche (lmf) alors que cette valeur n'atteint que 0,87 pour la corrélation entre la lpa et le poids de la carcasse (VDK).

Suivi temporel

Les classes de taille sont exprimées en intervalles de 1 cm pour la longueur pectorale-anale (lpa) et les fréquences de taille en pourcentages. Les graphiques de la figure 51 montrent l'évolution des distributions de fréquences de taille des espadons entre les années 1994 et 2000. Les distributions se répartissent entre 17 et 100 centimètres. L'examen des histogrammes fait apparaître des variabilités

interannuelles. Un mode centré globalement sur la classe 38-39 cm est observé en 1995, 1998 et 2000. Des analyses statistiques sont à mettre en œuvre pour caractériser et quantifier les variabilités observées. Il est à remarquer que l'effectif pour l'année 2000 est bien inférieur à celui des autres années et cette année doit être interprétée avec précaution car la quasi-totalité de ces mesures a été effectuée sur les bateaux du premier segment.

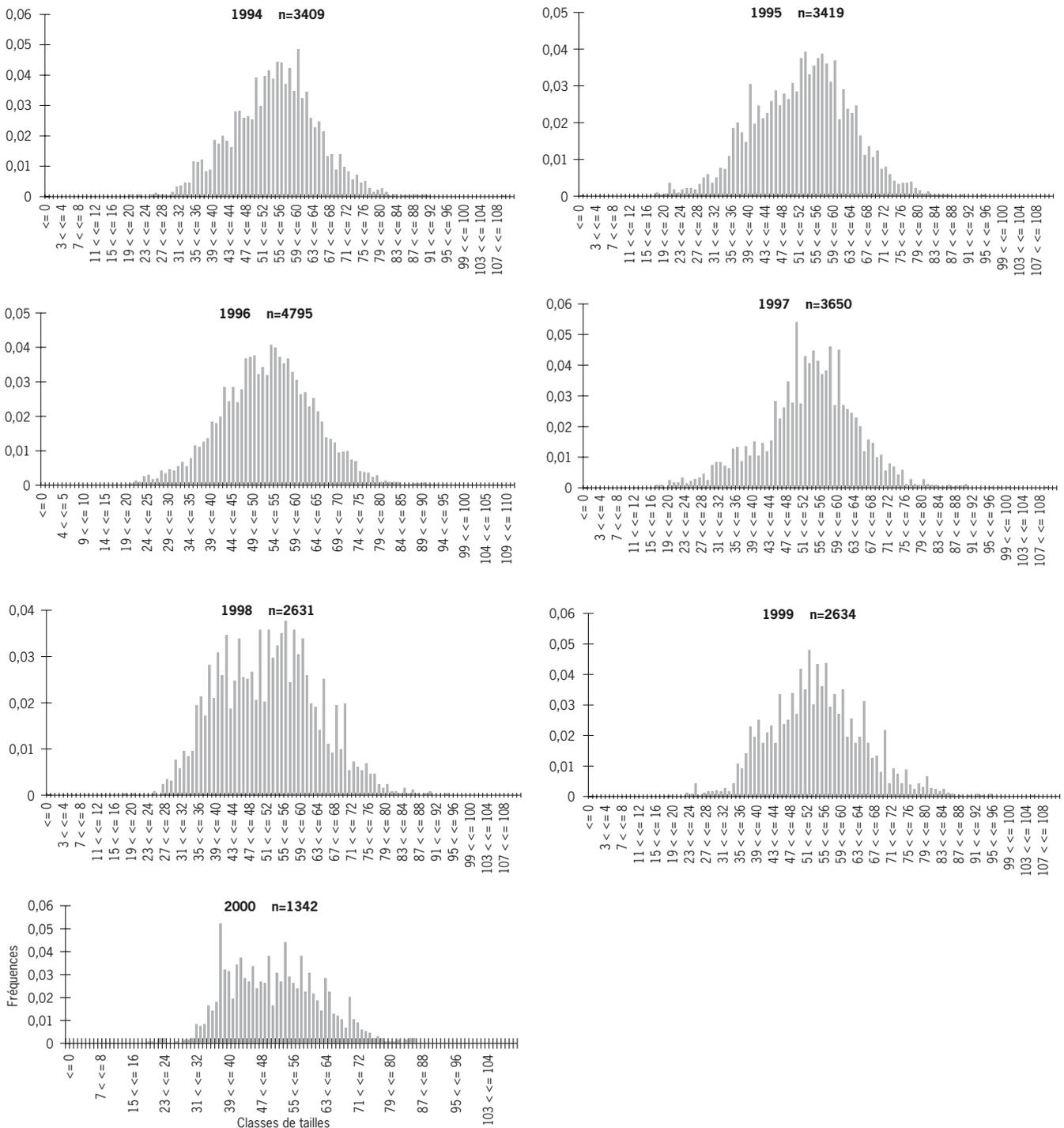


Figure 51 - Distribution des fréquences de taille (lpa) des espadons débarqués à La Réunion entre 1994 et 2000.

La figure 52 met en évidence les fluctuations observées de la taille moyenne annuelle sur la période 1994-2000. Les différentes équations de conversion ont montré que la longueur de référence choisie (lpa) présentait un coefficient de détermination de l'ordre de 0,92. Il paraissait intéressant à ce stade de convertir l'ensemble des mesures prises en une autre longueur, soit la longueur maxillaire-fourche pour suivre cette évolution interannuelle de la moyenne. Ces transformations ont été faites à partir de la longueur cavité oculaire-fourche (lcof), de la longueur cleithrum-quille (ck), ou finalement de lpa si ces deux premières mesures n'étaient pas

disponibles. Les tendances observées sont voisines mais moins marquées avec cette mesure de référence (fig. 52).

La discrimination de la longueur annuelle moyenne pour les deux segments de la flottille fait apparaître des valeurs significativement plus élevées pour les plus grands bateaux en 1995, en 1997 et en 1998. À l'inverse, en 1996, la taille moyenne des espadons pêchés par les navires du premier segment est plus élevée. Enfin, il ne semble pas y avoir de différence en 1994 et 1999. En raison d'un sous-échantillonnage pour le segment 2 en 2000, cette année particulière ne sera pas prise en compte (fig. 53).

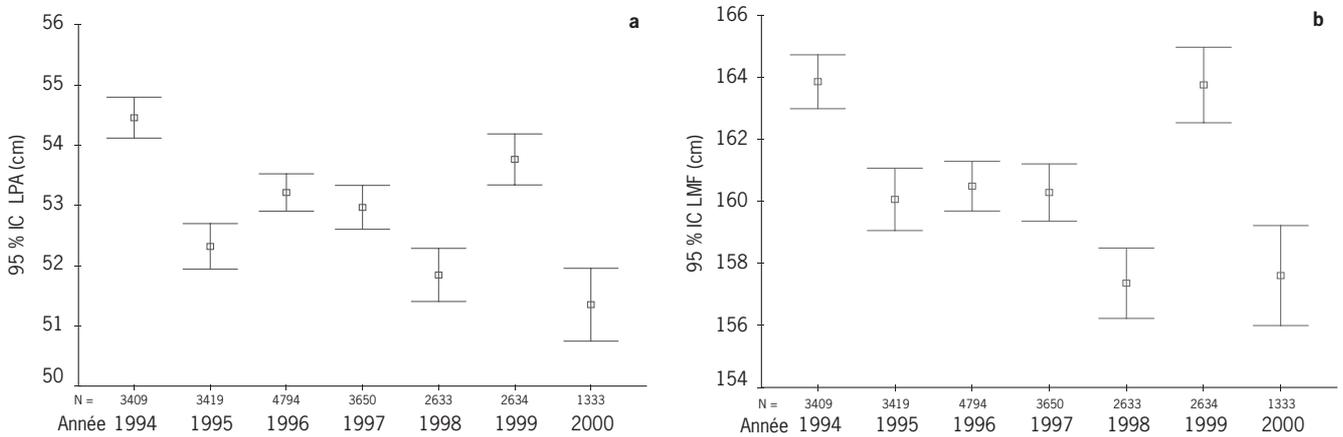


Figure 52 - Évolution des tailles moyennes annuelles (lpa et lmf) de 1994 à 2000 pour l'ensemble de la flottille.

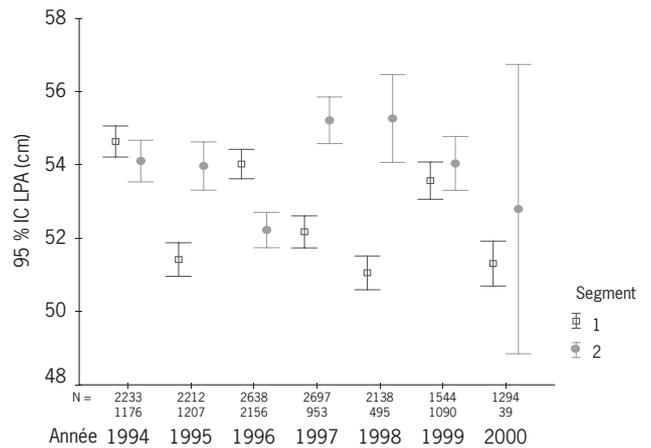


Figure 53 - Évolution des tailles moyennes annuelles (lpa) pour les deux segments de la flottille de 1994 à 2000.

L'évolution des moyennes de la lmf agrégées par mois sur toute la période pour la flottille entière met clairement en évidence des différences mensuelles (fig. 54). Les valeurs augmentent à partir du mois d'août. C'est au mois de novembre que la taille moyenne est la plus élevée. La tendance est identique pour les deux segments, bien que des valeurs supérieures soient observées pour les plus grands bateaux.

Distribution spatiale

Du 19 mai 1994 au 22 janvier 2001, au cours de 1532 opérations de pêche correspondant à la mise à l'eau de 1 439 220 hameçons, la totalité des espadons pêchés a été mesurée (fig. 55).

Les 10 553 individus échantillonnés ont été classés en trois segments de longueur (lmf) (Anonyme, 1999b) : moins de 125 cm, de 125 à 170 cm et plus de 170 centimètres. Les rendements par carré statistique de 1 degré ont été calculés et représentés après agrégation sur toute l'année, puis sur deux périodes bien distinctes basées sur les observations de la maturité sexuelle des espadons aux abords de La Réunion. Ainsi, les périodes comprises entre octobre et avril, d'une part, et mai à septembre, d'autre part, correspondent respectivement à la saison de ponte et au repos sexuel.

La représentation des efforts permet d'identifier les deux zones prospectées : la zone Seychelles et la zone Réunion. Elle met en évidence l'hétérogénéité de l'échantillonnage inter- et intra-zone.

La carte des rendements globaux montre que, si les trois catégories d'individus sont présentes, les rendements en petits espadons (lmf < 125 cm) sont importants. La ségrégation par période n'apporte pas de renseignements complémentaires.

Dans la zone Réunion, les gros espadons (> 170 cm) semblent dominer à l'est de l'île et plus particulièrement durant la saison de ponte. Les représentants de deux autres segments sont capturés toute l'année mais les rendements sont supérieurs dans le sud pendant l'hiver austral.

Ces différents résultats montrent que, dans l'interprétation de l'évolution des tailles moyennes, l'aspect spatial et temporel doit être pris en compte. Il semble donc important de centrer l'analyse sur des strates mensuelles par carré de 5 degrés. Cette limitation réduit malheureusement les effectifs des échantillons.

Atlas interactif des pêcheries palangrières dans les eaux réunionnaises

L'objectif de cet atlas est de donner la possibilité à l'utilisateur de représenter, dans l'espace et dans le temps, des données de prises, d'efforts et de rendements. Des informations relatives à l'activité d'autres pêcheries ont été ajoutées. Elles sont issues des livres de bord de quelques navires des flottilles palangrières taiwanaise et espagnole. Il ne s'agit évidemment pas de données exhaustives car le nombre de bateaux en activité dans la zone est bien supérieur.

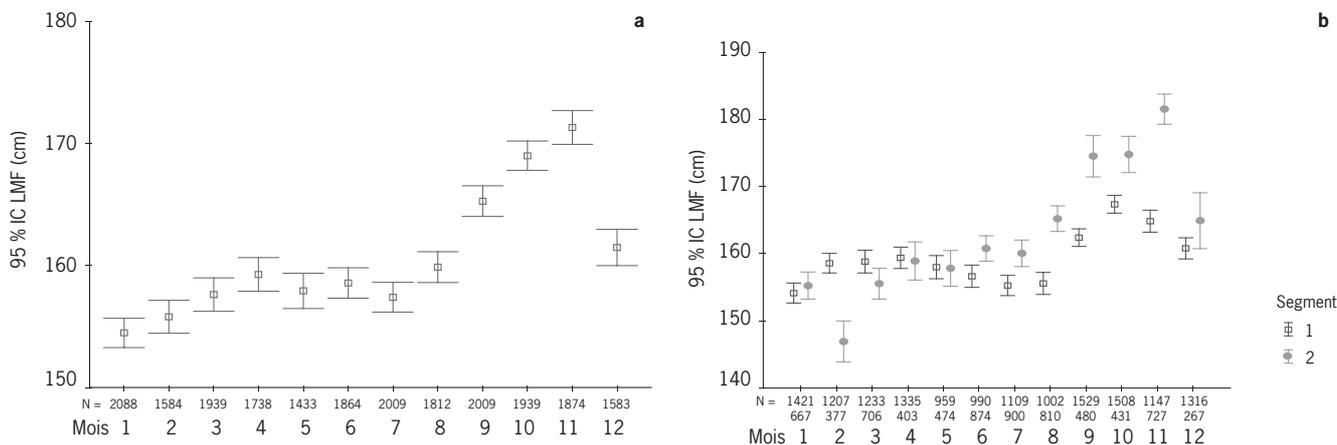
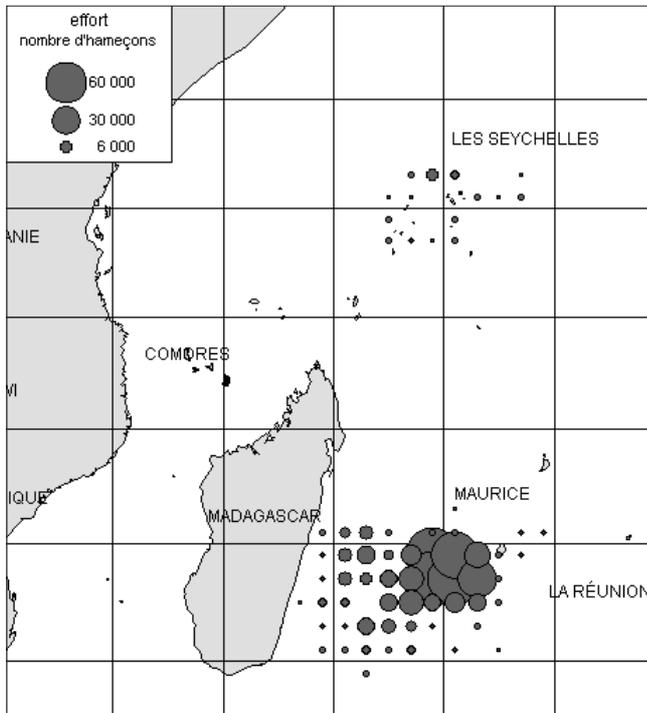
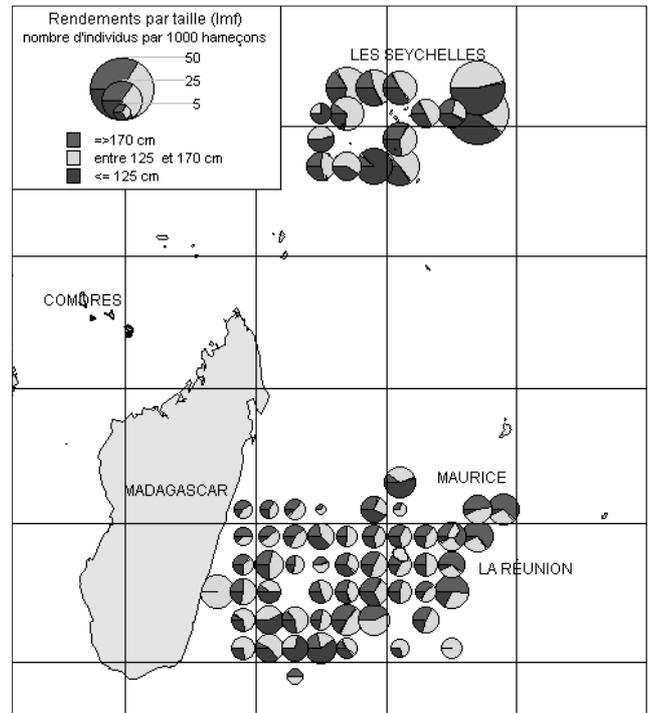


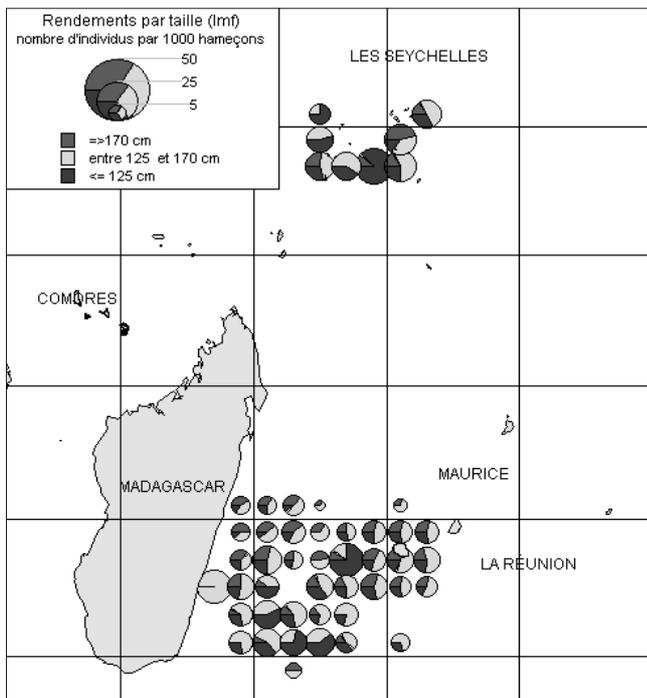
Figure 54 - Évolution des tailles moyennes mensuelles de la longueur maxillaire-fourche (lmf) de 1994 à 2000 et pour les deux segments de la flottille.



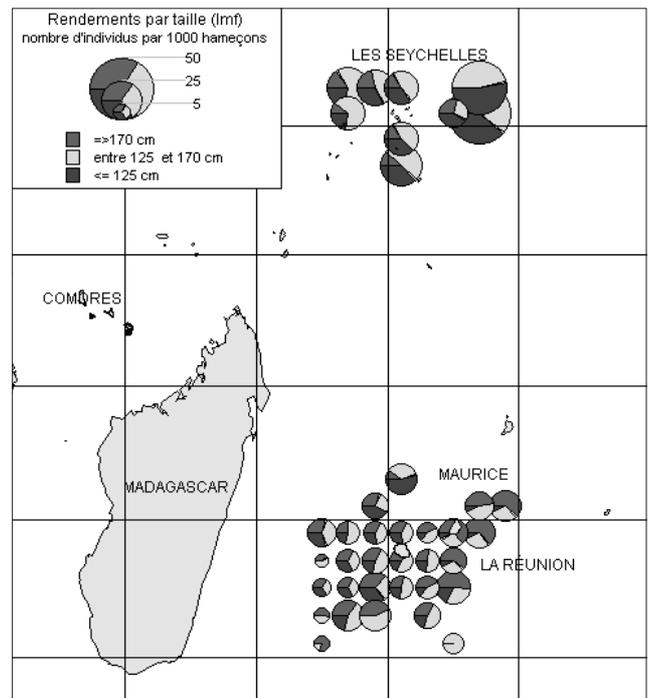
a) effort total (en nombre d'hameçons)



b) rendement sur toute la période d'échantillonnage



c) rendement durant la saison de ponte (d'octobre à avril)



d) rendement de mai à septembre

Figure 55 - Représentation de l'effort total (a) sur la période comprise entre 1994 et janvier 2001 et des rendements par carré statistique de 1 degré suivant trois classes de taille.

Données de la flottille taiwanaise

La tolérance de pêche dans les eaux françaises délivrée par l'administration française aux palangriers exploités par la société Starkist imposait à cet armement de retourner au laboratoire Ifremer les registres de bord (modèle ICCAT, imprimé A; Miyake, 1990), dûment remplis, pour les bateaux ayant opéré dans les eaux françaises. Sur ces fiches devaient figurer à l'issue de chaque opération de pêche, les informations suivantes :

- les positions géographiques précises de la ligne lors du filage et du virage ;
- le nombre d'hameçons mis à l'eau ;
- les captures en nombre et en poids par espèce ou regroupement d'espèces (6 espèces, 4 groupements d'espèces).

Les formulaires n'étant pas envoyés au bateau avant leur départ, l'agent de la société Starkist devait remplir les formulaires demandés à partir du registre de bord personnel du capitaine (libellé en chinois), généralement considéré comme étant complet et fiable.

À l'issue de chaque débarquement, les quantités débarquées au port de la Pointe des Galets (par espèce ou regroupement d'espèces) devaient être signalées. Ce même agent transmettait les chiffres des tonnages débarqués.

Une description des palangres de surface utilisées ainsi que de la technique employée par les navires asiatiques a été faite par Morice (1964). Cette technique, qui nécessite une main-d'œuvre importante, est toujours employée sur les navires taiwanais. La ligne mère est constituée d'un certain nombre de sections (ou « paniers ») nouées bout à bout. La longueur de chaque segment de ligne peut varier de 240 à 600 mètres en fonction de l'espèce ciblée. De la même façon, la profondeur, l'heure de pose de l'engin, la nature de l'appât et la distance entre les hameçons sont adaptées à l'espèce recherchée (Jamet, 1981).

Le tableau 15 présente le nombre d'informations obtenues auprès des navires exploités par la société Starkist entre 1993 et 1995.

Tableau 15 - Bilan de l'enquête menée auprès de la société Starkist entre 1993 et 1995.

	1993	1994	1995
Nombre d'opérations de pêche décrites	1 430	1 703	882
Nombre d'hameçons mouillés (10 ⁶)	4,122	4,541	2,021

Données de la flottille espagnole

Dans le cadre d'une campagne expérimentale de pêche à la palangre de surface visant l'espadon dans les eaux internationales du sud-ouest de l'océan Indien, 5 palangriers espagnols ont opéré de septembre 1993 à août 1994 dans une zone comprise entre 15°N et 38°S et entre 35°E et 70°E. Cette opération de grande envergure, la première du genre entreprise dans la zone sud-ouest de l'océan Indien, a été cofinancée par l'UE (DG XIV) et l'Espagne. Les objectifs étaient de :

- connaître les potentialités des zones prospectées pour ce type de pêche, l'Espagne envisageant un redéploiement d'une partie de sa flotte de palangriers travaillant sur le stock atlantique ;
- recueillir des informations sur la biologie de l'espèce cible et des espèces commerciales associées.

Un observateur scientifique de l'institut océanographique espagnol (IEO) du laboratoire de La Corogne a embarqué sur chacun de ces navires pour suivre les opérations de pêche et procéder à des observations et des prélèvements biologiques. Les informations utilisées proviennent des comptes-rendus de mission rédigés par les biologistes embarqués à bord de ces unités (600 pages au total), remis à la Communauté et transmis à notre laboratoire par les services de la DG XIV au mois de mars 1996 (Areso Goiricelaya, 1994; Arevalo Sanchez, 1994; Costas, 1994; Garcia Merlo, 1994; Gonzalez Blazquez, 1994).

Les cinq rapports espagnols restaient en l'état, peu exploitables tant par les scientifiques que par l'administration et les professionnels. En effet, les données collectées sur des thèmes d'étude communs n'avaient fait l'objet que d'un traitement partiel, aucun traitement global regroupant l'ensemble des informations n'ayant été réalisé. Les données reportées dans les carnets de pêche ont été utilisées pour la constitution des cartes de cet atlas. Pour chaque opération de pêche, figurent les informations suivantes : la position géographique du début du filage, le nombre d'hameçons mouillés, les poids de l'espèce ciblée (l'espadon) et de deux groupements d'espèces (requins et thonidés). Pendant toute la période de prospection, 613 actions de pêche ont été effectuées par les cinq palangriers.

Extraction et exploitation des données de pêche

Flottille Réunion

Afin de rendre l'information disponible sous une forme aisément exploitable, les données de pêche géoréférencées disponibles ont été agrégées par carré de 1 degré suivant deux strates temporelles bien distinctes : l'année et le mois.

L'ensemble des données collectées sur toute la période a d'abord été regroupé et sommé par année, toujours par carré statistique de 1 degré sur la période 1994 à 2000. L'ensemble des fichiers se trouve dans le répertoire « flottille Réunion\année » de l'atlas 2001.

Le même type d'agrégation a été fait mensuellement pour la période s'étendant de janvier 1994 à décembre 2000. Il est donc possible, pour ces deux strates temporelles (84 mois distincts), de créer des cartes thématiques d'effort de pêche (en nombre d'hameçons), de prises (en nombre d'individus) pour sept espèces et deux groupes d'espèces capturées par la flottille palangrière réunionnaise (tab. 16). La valeur figurant dans chacun des carrés statistiques pour la strate concernée correspond à la somme des hameçons ou individus recensés dans la base de données. Le rendement pour une espèce donnée est le rapport entre la somme des individus et le nombre d'hameçons figurant dans un carré statistique, ramené à 1 000 hameçons. L'ensemble des fichiers se trouve dans le répertoire « flottille Réunion\mois année ».

Les 91 fichiers du répertoire « flottille Réunion » correspondant aux différentes strates identifiées sont, dans un premier temps, extraits de la base, exportés sous format de type Dbase. Des cartes thématiques sont ensuite élaborées, à l'aide du logiciel ArcView (SIG), qui génère des fichiers spécifiques de type shapefile (.shp) regroupant les valeurs des différents champs sur un carré statistique pour chaque strate temporelle. Chacun de ces fichiers est appelé Theme.

Le logiciel ArcExplorer 2.0 fournit avec ce cédérom est un produit disponible gratuitement sur le site de ESRI (www.esri.com/arcexplorer). ArcExplorer 2.0 est capable de lire les fichiers générés par Arcview (fichiers shapefile). Les procédures d'installation ainsi que les fonctions les plus usitées seront rapidement décrites (p. 54 à 56).

Flottilles

Les données des navires des flottilles réunionnaise, taiwanaise et espagnole ont été agrégées. Comme précédemment, des fichiers mensuels et annuels ont été générés. Les différents champs présentés dans le tableau 16 peuvent être utilisés. Ces fichiers sont classés pour les années 1993, 1994 et 1995 dans le répertoire « flottilles ».

Les informations ont ensuite été agrégées par mois sur toute la période ; les douze fichiers figurent dans le répertoire « mois-cumulés ».

Fonds de cartes

La carte de l'océan Indien est disponible dans le répertoire « fonds de cartes » (monde.shp). Le fichier isobath.shp fait apparaître le tracé de la bathymétrie sur une zone centrée sur La Réunion. Ces données sont issues de la base de données ETOPO5 5x5 minutes de la Marine américaine.

Procédure d'installation d'Arcexplorer

Pour installer ArcExplorer 2.0, consultez le fichier « lisez-moi.doc » contenu sur le cédérom et conçu pour faciliter cette opération. ArcExplorer 2.0 fonctionne sous environnement Microsoft Windows 95, 98[®] ou Microsoft Windows NT[®]. Une fois l'installation réussie, une icône du programme ArcExplorer est générée sur le bureau. Pour démarrer l'application, cliquer deux fois sur cette icône.

Tableau 16 - Noms et définitions des 19 champs extraits de la base de données.

Nom du champ	Définition sur le carré statistique considéré
MOIS et/ou AN	Strate temporelle
HAMECON	Nombre total d'hameçons
NB__ESPADO	Nombre total d'espadons
R__ESPADON	Rendement en espadon calculé (nombre d'individus/1 000 hameçons)
NB__GERMON	Nombre total de germons
R__GERMON	Rendement en germon calculé (nombre d'individus/1 000 hameçons)
NB__ALBACOR	Nombre total d'albacores
R__ALBACORE	Rendement en albacore calculé (nombre d'individus/1 000 hameçons)
NB__PATUDO	Nombre total de patudos
R__PATUDO	Rendement en patudo calculé (nombre d'individus/1 000 hameçons)
NB__MARLIN	Nombre total de marlins
R__MARLIN	Rendement en marlins calculé (nombre d'individus/1 000 hameçons)
NB__LANCIER	Nombre total de lanciers
R__LANCIER	Rendement en lancier calculé (nombre d'individus/1 000 hameçons)
NB__VOILIER	Nombre total de voiliers
R__VOILIER	Rendement en voilier calculé (nombre d'individus/1 000 hameçons)
NB__DORADE	Nombre total de dorades
R__DORADE	Rendement en dorade calculé (nombre d'individus/1 000 hameçons)
NB__REQUIN	Nombre total de requins (toutes espèces confondues)
R__REQUIN	Rendement en requins calculé (nombre d'individus/1 000 hameçons)

De la même façon, il convient de copier sur votre disque dur le répertoire « Acrobat Reader v4. » pour avoir accès au manuel d'utilisation (ArcExplorer.pdf) qu'il est conseillé de consulter pour aller plus loin dans l'utilisation de ce produit.

Apprentissage

Cette section présente le contenu du cédérom, elle explique comment faire apparaître les différents fichiers et créer des cartes thématiques. La fonction des boutons des différents menus y est aussi explicitée.

• Lancer ArcExplorer

Pour lancer ArcExplorer, cliquer deux fois sur l'icône créée par le programme du set-up sur le bureau.

• Ouvrir les fichiers de base et créer un projet

Se placer dans le menu déroulant « Theme » et ouvrir le fichier choisi par « Add theme » dans le répertoire :

X:\atlas2001\ fonds de cartes\, ouvrir les fichiers « monde » et « isobath » dans le répertoire en double-cliquant sur les noms de fichiers.

De la même façon, il est possible de charger un ou plusieurs fichiers annuels de 1994 à 2000. Si vous choisissez l'année 1995 dans le répertoire X:\atlas2001\ flottille Réunion\ année\, la fenêtre suivante apparaît (fig. 56).

Pour conserver cette session en tant que « projet » (fichier de type ArcExplorer Project File .aep) dans le menu « File » choisir « save project as » sous le nom « 1995 ». L'ensemble des carrés renseignés pour cette strate apparaît. L'étape suivante consiste à choisir la représentation d'un champ particulier de ce fichier.

Pour activer le thème choisi, il suffit de cocher la case correspondante : dans le cas présent, en cliquant deux fois sur le libellé « année 1995 », un nouveau formulaire apparaît permettant de créer des cartes thématiques spécifiques à partir du jeu de données choisi (fig. 57).

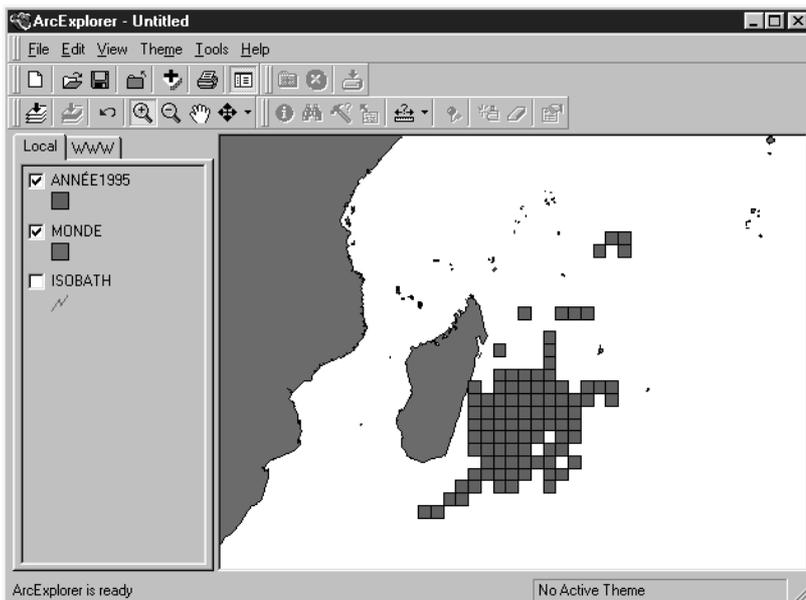


Figure 56 - Ouverture du thème « année 1995 ».

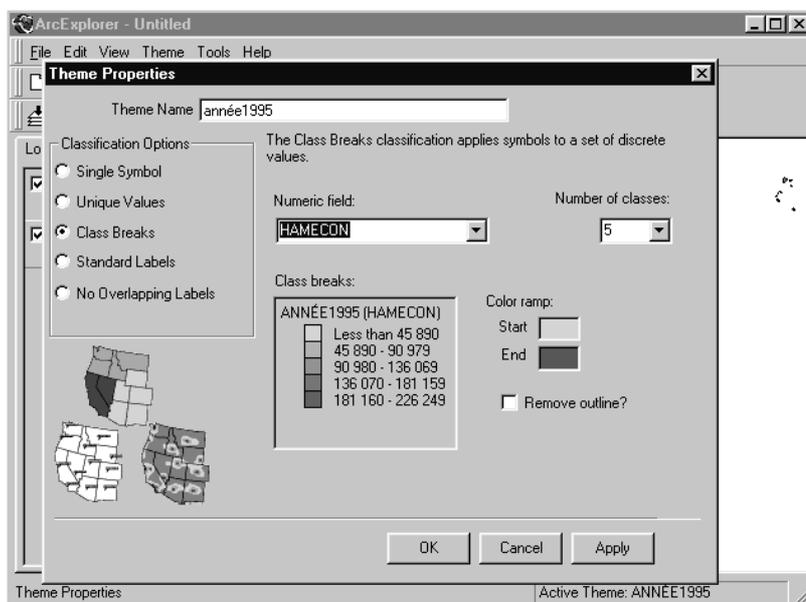


Figure 57 - Formulaire de création de carte thématique : effort en nombre d'hameçons pour le mois de janvier 1995.

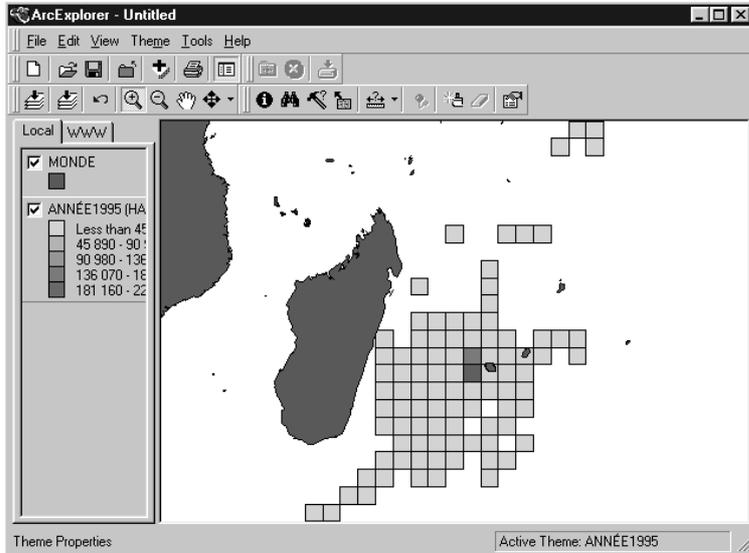


Figure 58 - Carte « effort de pêche » du mois de janvier 1995.

Field	Value
R_LANCIER	0
R_ALBACORE	0
R_ESPADON	8.18182
COUNTRY	FR
R_GERMON	0
NB_DORADE	0
INSTUMENTA	false
YESSAI	-13.5
NB_REQUIN	0
PR_DATION_	false
EN_PECHE	true
XESSAI	53.5
R_DORADE	0
NB_VOILIER	0
NB_PATUDO	2
FeatureId	42
R_REQUIN	0
R_PATUDO	1.81818
REND_ESP	0
NB_LANCIER	0

Figure 59 - Informations relatives à un carré statistique.

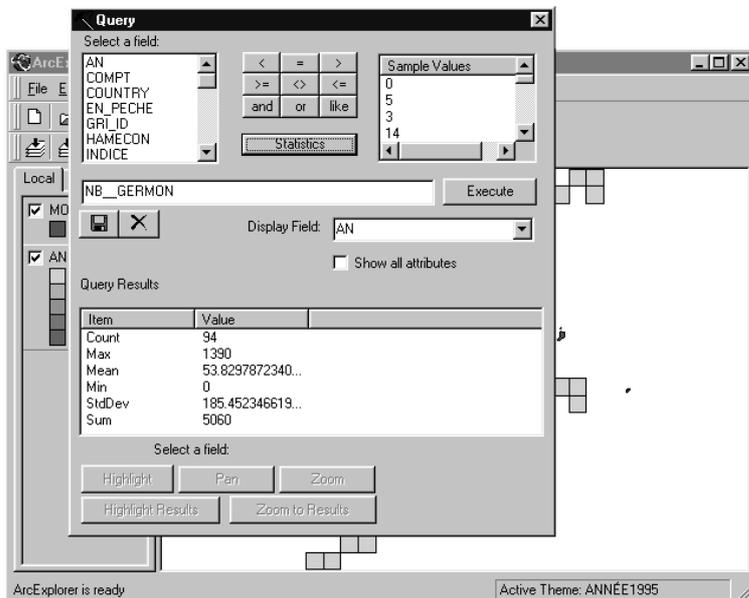


Figure 60 - Tableau de statistiques sur le champ NB_GERMON.

Pour créer, par exemple, la carte d'effort (en nombre d'hameçons) pour le mois de janvier 1995, dans le cadre « Classification Options », cocher « Class Breaks », puis, dans le menu déroulant « Numeric field », choisir « Hameçon ». La création de classes s'effectue en spécifiant le nombre de classes désiré dans la liste déroulante « Number of classes ». Après avoir validé le traitement par « Apply » puis « OK », la nouvelle carte apparaît (fig. 58).

Il est possible de faire apparaître la totalité des informations disponibles pour un carré statistique (fig. 59) en cliquant dans la zone identifiée après avoir choisi « Identify » dans le menu « Tools ».

• Statistiques, requêtes et autres fonctions

ArcExplorer offre la possibilité d'obtenir des statistiques et d'effectuer des requêtes simples sur les différents fichiers de base (« Query builder » dans « Tools »). D'après les données annuelles agrégées par carré statistique de 1 degré, il est possible de définir pour chacun des champs en cliquant sur le bouton « Statistics » : le nombre de données, les valeurs minimales et maximales, la moyenne, la somme ainsi que la déviation standard. La figure 60 présente les données statistiques calculées sur le champ NB_GERMON (nombre de germons).

Il est possible de rechercher les carrés statistiques pour lesquels les conditions imposées sont valides. Dans l'exemple suivant, la condition requise est relative au rendement en germon (R_GERMON) qui doit être supérieur strictement à 10 (individus/1 000 hameçons). Les carrés statistiques pour lesquels la condition est remplie apparaissent en jaune. Pour ce faire, il convient de cliquer préalablement sur les boutons « Execute » et « Highlight Results ».

D'une manière générale, dès lors que *le fichier est activé*, toutes les fonctions comprises dans le menu « Tools » (ou icônes correspondantes) sont accessibles (fig. 61) : zooms avant et arrière (« Zoom In » et « Out »), « Pan » (déplacement de la carte), « Identify » (appel des données pour le carré statistique choisi), « Measure » (mesures de distances), « Find » et « Query Builder » (recherche et requêtes sur les données représentées). Il est conseillé d'utiliser la fonction « Use overview map » du menu « Theme » afin de pouvoir se localiser dans l'espace de la carte générale. La carte globale apparaît dans une nouvelle fenêtre en bas à gauche.

Ce travail est plus qu'une simple mise à jour du travail de synthèse réalisé dans le cadre du PTRII « Répartition spatio-temporelle des principales espèces des pêcheries palangrières présentes dans la zone sud-ouest de l'océan Indien » (Poisson & Macé, 1997) car il est différent dans son concept et ses potentialités. En effet, l'utilisation d'ArcExplorer permet une exploitation maximale des informations collectées depuis 1994.

Conclusion

L'objectif initial de cette action était de concevoir, de développer et de mettre en place une base de données permettant de décrire l'activité de la pêcherie palangrière réunionnaise. Ainsi, depuis la fin 1993, les 9 505 opérations de pêche documentées constituent une série historique qui permet de suivre les indicateurs caractéristiques de la pêcherie. Nous avons pu mettre en évidence trois phases dans l'évolution de la flottille constituée majoritairement de bateaux conçus spécifiquement pour cette pêche.

Le dispositif de suivi mis en place permet d'assurer la fiabilité des données et leur diffusion suivant des normes adoptées par la communauté scientifique en respectant la confidentialité due aux acteurs de la filière (lois sur l'information statistique). Des outils conviviaux ont donc été créés pour retransmettre l'information aux professionnels à différentes échelles. Selon un niveau d'agrégation plus large, ces mêmes données sont transmises chaque année à la CTOI. Par l'apport de ces données, La Réunion peut contribuer aux avancées des groupes de tra-

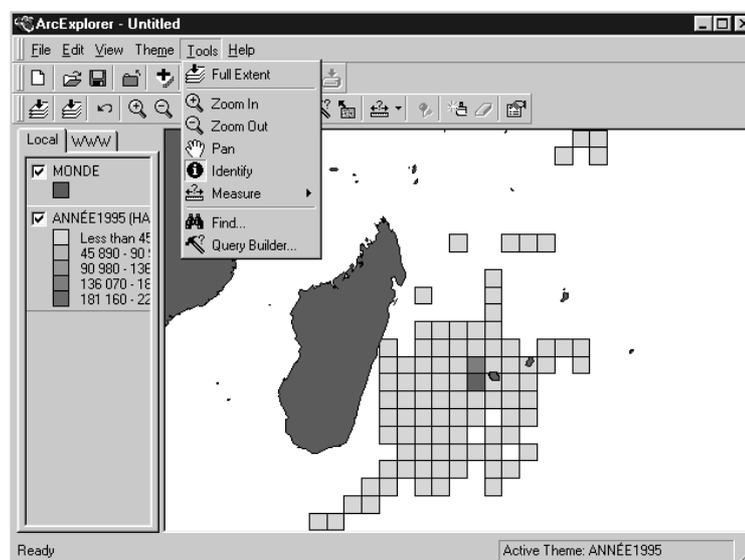


Figure 61 - Appel des différentes fonctions par le menu « Tools ».

vail thématiques organisés par la CTOI. Ces travaux doivent, en outre, permettre d'évaluer l'état des stocks de grands poissons pélagiques dans la zone 51. Il convient en effet d'interpréter toutes les variations des indicateurs en tenant compte de l'activité des autres pays pêcheurs. Les tendances des CPUE standardisées des pêcheries les plus importantes sont disponibles pour des séries temporelles beaucoup plus étendues. Elles permettent donc une analyse plus pertinente de l'évolution des stocks à large échelle.

Conformément aux recommandations du groupe d'experts thoniers de l'océan Indien (Anonyme, 1999a), le laboratoire a entrepris des travaux pour améliorer les connaissances biologiques sur l'espadon. Le second but de cette action était de permettre l'intégration des données sur la biométrie, la reproduction et la croissance de l'espadon dans une base interactive. De la même façon, les résultats des campagnes de pêche expérimentale, menées à bord des navires professionnels, sont introduits dans cette base de données géoréférencées. C'est donc à partir de cette base qu'ont été extraites toutes les données qui ont servi aux traitements présentés dans les différents chapitres du présent ouvrage.

Entre 1994 et 1996, on assiste à une décroissance rapide des CPUE d'espadon. Cette diminution des rendements était plus ou moins prévisible car ce phénomène

est « classique » dans le cas d'une pêcherie « jeune ». Les observations présentées ici semblent en conformité avec les conclusions du groupe d'experts de la CTOI. Bien que la première consultation n'ait pas eu l'opportunité de procéder à l'examen critique du stock d'espadon, faute de données suffisantes, elle avait noté que ce stock avait déjà subi une augmentation très forte de la pression de pêche. La nécessité de porter une attention particulière à la trop forte croissance des flottes palangrières avait été exprimée. Devant les nouvelles mesures de gestion prises en Atlantique pour la conservation du patudo, une partie des palangriers asiatiques de l'Atlantique s'est redéployée dans l'océan Indien (Anonyme, 1999b). Enfin, des demandes de licences dans l'océan Indien, de la part de palangriers européens délocalisés (portugais, espagnols et italiens), traduisent un intérêt croissant pour cette région (ouest de l'océan Indien) et une pression future plus importante sur le stock d'espadon. À court terme, les États riverains et pêcheurs devront mettre en œuvre des mesures de gestion efficaces garantissant l'exploitation durable de ces ressources en grands poissons pélagiques. Face à l'évolution de certains indicateurs d'abondance comme la CPUE, notamment sur l'espadon, il apparaît indispensable de promouvoir des actions de recherche qui permettent d'évaluer rapidement les limites de l'exploitation durable. Le manque de connaissance sur la structure des stocks d'espadon de l'océan Indien est un handicap majeur pour la production de diagnostics fiables. Des collaborations plus actives et plus directes entre les scientifiques des différents pays de l'océan Indien permettraient d'accélérer la production des connaissances nécessaires. En particulier, la comparaison des fréquences de taille mensuelles et saisonnières entre des zones d'exploitation éloignées (Seychelles, Réunion, Afrique du Sud, Australie) permettrait d'identifier des schémas migratoires de l'espèce.

Les saisonnalités marquées pour le germon et pour la dorade coryphène nous amènent à suggérer une recherche d'activités de pêche complémentaires pour la flottille réunionnaise. En effet, il est possible qu'une partie de ces ressources puisse être plus facilement accessible par une adaptation des techniques de pêche ou par l'utili-

sation de stratégies différentes. La pérennité des armements locaux passe par le maintien impératif de la rentabilité de la pêche. Ainsi, des campagnes de prospection de pêche à la palangre dérivante profonde, « deep longline », pourraient être envisagées pour confirmer la possibilité de capture de germes hors des saisons déterminées. Concernant la dorade coryphène, une étude de faisabilité d'une exploitation complémentaire, à l'aide de DCP dérivants, est d'ores et déjà lancée par le laboratoire Ifremer dans le cadre du contrat de plan État-Région (2000-2006).

Références bibliographiques

- Anonyme, 1999a. Rapport de la 7^e consultation d'experts sur les thonidés de l'océan Indien. CTOI, Victoria, Seychelles. IOTC/SP/99/01, 60 p.
- Anonyme, 1999b. Rapport de la session ICCAT/SCRS d'évaluation des stocks d'espadon. Espadon, rapport détaillé 1999.
- Areso Goiricelaya J., 1994. Informe de la campaña de prospeccion pesquera del buque « *Depredador* » en aguas del oceano Indico Occidental. Institut Español de Oceanografía, La Coruña, 22 p. + annexes.
- Arevalo Sanchez A.M.F., 1994. Septiembre 1993-abril 1994: Informe de la campaña de pesca en el oceano Indico Occidental. Institut Español de Oceanografía, La Coruña, 17 p. + annexes.
- Costas B.G., 1994. Informe de la campaña de pesca experimental del B/P « *Baleviro segundo* » en aguas del oceano Indico : entre octubre de 1993 y junio de 1994. Institut Español de Oceanografía, La Coruña, 18 p. + annexes.
- Garcia Merlo J.A.G., 1994. Informe de la campaña de prospeccion pesquera del buque « *Mar Diez* » en aguas del oceano Indico Occidental. Primer periodo: del 16 de noviembre de 1993 al 13 de febrero de 1994. Institut Español de Oceanografía, La Coruña, 25 p. + annexes.

- Gonzalez Blazquez F., 1994. Informe de la campaña de prospeccion pesquera del buque «*Radoche Primero*» en aguas del oceano Indico Occidental: del 11 de enero al 6 de agosto de 1994. Institut Español de Oceanografía, La Coruña, 12 p. + annexes.
- Jamet J., 1981. Manuel des pêches maritimes tropicales. Tome II. Engins et méthodes de pêches maritimes.
- Miyake M., 1990. Manuel d'opérations pour statistiques et l'échantillonnage des thonidés et espèces voisines dans l'océan Atlantique.
- Morice J., 1964. La palangre dérivante. Rapport de la SATEC. ICCAT, 190 p.
- Poisson F., Macé N., 1997. Répartition spatio-temporelle des principales espèces des pêcheries palangrières présentes dans la zone sud-ouest de l'océan Indien. Série des documents scientifiques de l'association thonière, 33, Ifremer, délégation de La Réunion, Le Port, 69 p.
- Poisson F, Guyomard D., René F., 1998. Collection of statistical and biological information on Reunion Island swordfish fishery. Rapport de la 7^e consultation d'experts sur les thonidés de l'océan Indien. Victoria, Seychelles, 9-14 November 1998.
- Poisson F., René F., 1999. The development of the longline fishery targeting swordfish in Reunion island waters - Processing and marketing. DiNardo G.T. (ed.) Proceedings of the second international Pacific swordfish symposium, 3-6 March 1997, Hawaii, USA. NOAA, NOAA technical memorandum NMFS, Honolulu, Hawaii, 240 p.
- Stéquert B., Marsac F.L., 1986. Pêche de surface des thonidés tropicaux dans l'océan Indien. FAO, Doc. tech. pêche, 282, 213 p.
- Tessier E., Poisson F., 1997. Bilan sur la mise en place d'un système de récolte de données sur la pêche artisanale sur DCP, Rapp. Intern. Ifremer Réunion, 15 p.
- Tessier E., Poisson F., 2000. DCP et pêche palangrière à La Réunion, antagonisme ou complémentarité? *In*: Pêche thonière et dispositifs de concentration de poissons. Le Gall J.Y., Cayré P., Taquet M. (éds). Éd. Ifremer, Actes Colloq., 28, 605-620.

Chapitre II

Description et analyse des stratégies de pêche et du comportement des espèces cibles

Description de la technique et des stratégies de pêche de la flottille palangrière réunionnaise

François Poisson⁽¹⁾, David Guyomard⁽²⁾

(1) Ifremer, laboratoire Ressources halieutiques, rue Jean Bertho, BP 60, 97822 Le Port Cedex, La Réunion, France

(2) IRD, station SEAS de La Réunion, BP 172, 97432 Sainte-Clotilde Cedex, La Réunion, France

Introduction

Le laboratoire Ressources halieutiques de l'Ifremer assure un suivi de l'activité de la pêcherie palangrière réunionnaise par le biais de carnets de pêche distribués aux patrons pêcheurs. L'objectif de cette étude est de présenter la technique de pêche employée par les palangriers locaux et de procéder à une analyse descriptive des stratégies de pêche. À partir des informations recueillies, de nouveaux indices d'effort nominal sont proposés pour décrire l'évolution de la pêcherie. Ces indices seront pris en compte dans les analyses statistiques ultérieures.

Présentation et sélection des données

Les termes techniques relatifs à la pêche palangrière sont définis. Les données issues de la base Activité palangrière de l'Ifremer qui sont utilisées dans les traitements sont aussi exposées.

La palangre dérivante de surface

La technique utilisée est une adaptation des techniques américaines décrites par Berkeley *et al.* (1983). La totalité des bateaux réunionnais sont équipés de palangres dérivantes semi-automatiques comprenant un treuil enrouleur. L'éjecteur de ligne livré d'origine, peu utilisé par les équipages, a progressivement été éliminé des navires. La ligne mère est un monofilament de 3,5 ou 4 mm de diamètre, d'une longueur variant de 20 à environ 100 kilomètres. La ligne mère peut être pourvue de lests pour stabiliser l'engin en cas de forts courants. Les possibilités de gréer la ligne sont multiples et le choix de gréement reste à l'appréciation de chaque patron. Les avançons sur lesquels sont montés les hameçons de 8/0 ou 9/0 ont généralement une longueur voisine de 10 brasses et un diamètre de 2 millimètres. Ils sont fixés à la ligne mère avec des attaches rapides (appelées communément « snap »). La flottabilité de l'engin est assurée par une série de flotteurs intermédiaires de 20 cm de

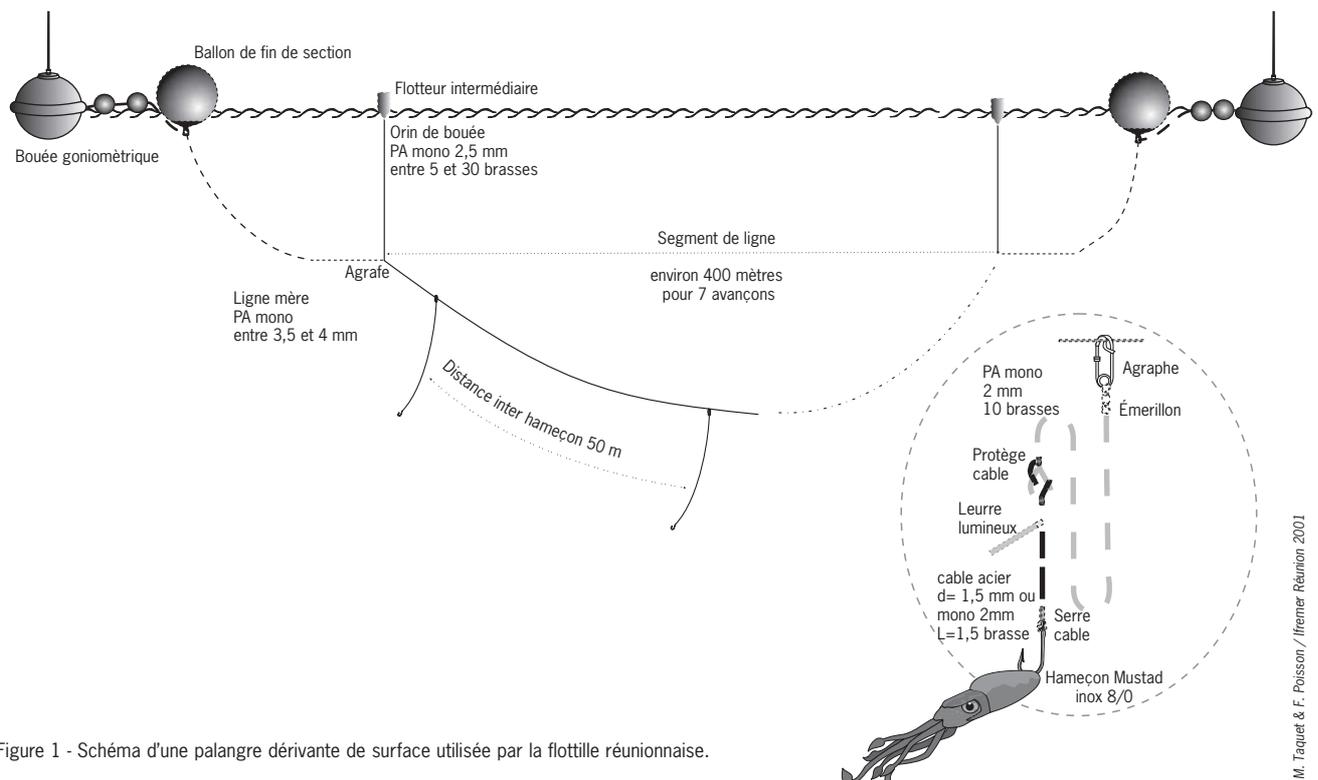


Figure 1 - Schéma d'une palangre dérivante de surface utilisée par la flottille réunionnaise.

diamètre montés sur des orins de bouées d'une longueur pouvant varier de 3 à 50 brasses. La portion de ligne comprise entre deux bouées intermédiaires est appelée « segment ». Le nombre d'hameçons par segment est variable (entre 6 et 10 en fonction des navires). La flottabilité de l'ensemble est renforcée par des bouées d'un plus gros diamètre ou « ballons ». La longueur de ligne comprise entre deux de ces ballons est appelée demi-section ou section. Suivant la taille du navire, entre 400 et 2000 hameçons sont « mouillés » à chaque filage¹. La figure 1 présente l'aspect de l'engin de pêche en position de pêche.

L'espèce cible étant principalement l'espadon, le mouillage de la palangre à bord des bateaux réunionnais a toujours lieu en début de nuit. Kume & Joseph (1969) ont montré que les palangres capturaient plus d'espadons sur les filages de nuit ; de même, les observations de Carey & Robinson (1981) et Carey (1990) ont confirmé que l'espadon se nourrissait préférentiellement la nuit. L'encornet est systématiquement utilisé comme appât et un leurre lumineux ou « cyalume » est placé 1 mètre avant l'hameçon, à raison d'un cyalume tous les 3 à 6 avançons.

La ligne est relevée après le lever du jour. La durée de cette phase, appelée virage² de la ligne, varie en fonction des captures et de l'état de la mer. Les conditions météorologiques, la taille du bateau, le type et les capacités de stockage déterminent la durée de la marée.

Les capitaines et équipages venant de France métropolitaine ou de la pêche côtière locale se sont très rapidement adaptés à cette technique de pêche et à des zones de pêche « nouvelles ». Ils ont aussi très vite utilisé les cartes satellitaires de température de surface, établies par la station IRD/SEAS de La Réunion, qui leur permettent de localiser les zones de fronts thermiques le long desquelles ils positionnent leurs lignes. La recherche d'anomalies bathymétriques (monts sous-marins, canyons...) ou encore la détection de bancs de poissons à l'aide d'échosondeur sont autant de facteurs qui déterminent le positionnement de l'engin de pêche. Les navires peuvent aussi se regrouper sur une zone productive après communication de l'information par un élément de la flottille.

Les données : sélection et description des variables

Les carnets de pêche collectés de manière régulière auprès des patrons pêcheurs permettent d'abonder la base de données palangrière de l'Ifremer de La Réunion. Pour cette étude, ne sont conservées que les données concernant les actions de la flottille réunionnaise exclusivement pendant les années 1998, 1999 et 2000. Les données issues de campagnes expérimentales spécifiques menées à bord des palangriers ne sont pas prises en compte.

Au sein de la flottille réunionnaise, deux segments de navires ont été distingués en fonction de leur taille et de leur rayon d'action : le segment 1 regroupe les navires de longueur totale inférieure ou égale à 16 mètres, le segment 2 concerne les navires de plus de 16 mètres. Les premiers exploitent majoritairement la zone proche de La Réunion (dans un rayon de l'ordre de 200 milles) tandis que les grandes unités peuvent opérer jusqu'aux Seychelles, dans le canal du Mozambique ou au sud de Madagascar.

Certains champs de la base de données ne sont pas systématiquement renseignés (données manquantes), les patrons n'ayant pas toujours le temps de compléter l'ensemble des rubriques du formulaire des carnets. C'est souvent le cas des heures de pêche et des positions de virage, particulièrement fastidieuses à reporter en cours d'opération (tab. 1).

La base de données palangrière de l'Ifremer a été développée sous Access[®]. La description des tables et de la structure de cette base de données relationnelle est présentée précédemment (voir p. 9-19).

Les champs sélectionnés dans la base

Les variables champs extraites de la base documentent les facteurs suivants :

- identificateurs des filages, marées et segments de bateaux ;
- dates et heures de pêche (heures de filage et virage ; la date est attribuée au jour du début de filage) ;
- facteurs opérationnels de pêche ;
- positions de lignes reportées (filage et virage) ;
- captures en nombre d'individus par espèce.

Le tableau 1 décrit l'ensemble des 39 champs extraits de la base.

1. Filage : mise à l'eau de l'engin de pêche.

2. Virage : récupération de l'engin de pêche.

Tableau I - Description des champs de la base de données palangrière sélectionnés pour cette étude.

Nom du champ	Description	% de filages renseignés	Format de saisie
cpt.marée	Numéro du compteur de marée	100	Entier
cpt.peche	Numéro du compteur de pêche (chaque filage est identifié)	100	Entier
categ	Catégorie de navire : 1 : nav 16 m ; 2 : > 16 m	100	Entier (1 ou 2)
date	Date de mise à l'eau de la ligne (filage)	100	Date
jour	Jour de mise à l'eau de la ligne (filage)	100	Entier (de 1 à 31)
mois	Mois de mise à l'eau de la ligne (filage)	100	Entier (de 1 à 12)
an	Année de mise à l'eau de la ligne (filage)	100	Entier (1998, 1999 ou 2000)
trim	Trimestre de mise à l'eau de la ligne (filage)	100	Entier (de 1 à 4)
saison	Saison de mise à l'eau de la ligne (filage) 1 = hiver austral (avril-août); 2 = été (septembre-mars)		Entier (1 ou 2)
jourlun	Jour lunaire (de 1 à 30) : Le jour 1 correspond à la nouvelle lune (lune noire), la pleine lune tombant le 15 ^e ou le 16 ^e jour lunaire	100	Entier (de 1 à 30)
hem	Hémisphère : N ou S	100	Caractère
latdebfil	Latitude de début de filage en degrés	100	Décimal
londebfil	Longitude de début de filage en degrés	100	Décimal
latfinfil	Latitude de fin de filage en degrés	98,7	Décimal
lonfinfil	Longitude de fin de filage en degrés	98,7	Décimal
latdebvir	Latitude de début de virage en degrés	91,1	Décimal
londebvir	Longitude de début de virage en degrés	91	Décimal
hdebfil	Heure de début de filage	95,7	Date
hfinfil	Heure de fin de filage	90,6	Date
hdebvir	Heure de début de virage	83,6	Date
hfinvir	Heure de fin de virage	75,01	Date
nbham	Nombre d'hameçons mouillés	100	Entier
lstick	Fréquence de leurres lumineux par nombre d'hameçons (ex : 2 : 1 cyalume tout les 2 hameçons)	85,5	Entier
longlead	Longueur des orins de bouées (moyenne si plusieurs longueurs utilisées)	65,6	Entier
nesp	Nombre d'espadons	100	Entier
nger	Nombre de germons	100	Entier
nalb	Nombre d'albacores	100	Entier
npat	Nombre de patudos	100	Entier
nmar	Nombre de marlins (marlin bleu et marlin noir confondus)	100	Entier
nlan	Nombre de lanciers	100	Entier
nvoil	Nombre de voiliers	100	Entier
ndor	Nombre de dorades coryphènes	100	Entier
nreq	Nombre de requins (carcharidés et lamnidés confondus)	100	Entier
nother	Nombre d'individus d'autres espèces	100	Entier
ncaptot	Nombre total de poissons	100	Entier
ntortue	Nombre de tortues prises à la ligne	100	Entier
instrumentation	Ligne instrumentée à des fins d'expérimentation (hook-timers, sondes...) : 0 = non, 1 = oui	100	Booléen
prédation	Déprédation par les mammifères marins : 0 = non, 1 = oui	100	Booléen
carre	Carré de 1°x1° dans lequel se trouve le barycentre de chaque filage ou la position de début de filage si la fin de filage manque (le code est composé de la partie entière positive de la latitude et de la longitude) Ex : barycentre en -21.56,53.42, carre = 2153	100	Entier

Extraction préliminaire des données de la base

Une sélection spatio-temporelle des données a été réalisée afin de restreindre la portée de l'étude à la période couverte par le programme Palangre Réunion (1998-2000) et de ne conserver que les filages effectués aux alentours de La Réunion et à l'est de la côte malgache. Dans cette zone (18° S-47° E, 25° S-59° E) est répertorié près de 40 % du nombre total de filages de la base depuis 1992 (tab. 2). Les autres zones de pêche (canal du Mozambique et Seychelles) sont très différentes du point de vue hydrologique (Longhurst, 1998) et ne sont exploitées que par les plus grosses unités de la flottille. Elles n'ont pas été intégrées dans cette étude.

L'effectif de notre population est de 3 602 filages à l'issue de cette sélection préliminaire (79 % du nombre total de filages enregistrés dans la base pour la période considérée). Les effectifs sont répartis de manière égale entre les opérations de pêche des navires du segment 1 (1 802) et du segment 2 (1 800). Les 963 filages écartés ne rentrent pas dans le cadre de notre analyse.

Définition d'indices intermédiaires

Les traitements sur ces données extraites ont été réalisés avec le logiciel S+®. Des indices intermédiaires ont été définis pour décrire plus précisément les actions de pêche.

Durées de pêche

Les heures de pêche reportées dans les carnets ont permis d'estimer les durées de chaque étape de l'opération : durée de filage (heure de fin de filage - heure de début de filage), durée de dérive (heure de début de virage - heure de fin de filage) et

durée de virage (heure de fin de virage - heure de début de virage), et durée totale de l'opération (somme des trois précédentes). Les histogrammes de ces durées sont présentés à la figure 2.

Les durées de filage, de dérive et de virage ont une distribution relativement homogène mais laissent apparaître des valeurs extrêmes en faibles effectifs (fig. 2 a, b, c). Ces cas correspondent à des situations particulières, décrites ci-après :

- filage restreint pour rejoindre un lieu de pêche ou en fin de marée pour rentrer au port (contraintes de temps liées à des impératifs commerciaux pour l'exportation) ou à cause de mauvaises conditions météorologiques : durée de l'opération plus courte (filage de moins de 3 h, dérive de moins de 5 h, virage de moins de 4 h);

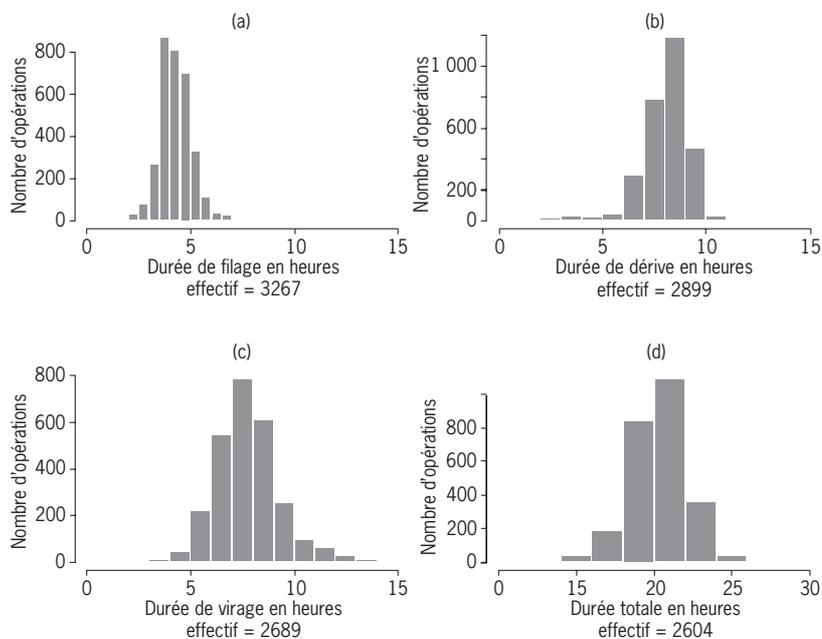


Figure 2 - Distributions des durées des opérations de pêche, par étape et totales.

Tableau 2 - Sélection des données selon les critères spatio-temporels.

Champs	Critères de sélection	Commentaires	Nombre de filages*
Date	Entre le 1 ^{er} janvier 1998 et le 31 décembre 2000 (inclus)	Période couverte par le PPR	4 565
Latdebfil	Entre 18° S et 25° S	La zone délimitée est la zone de pêche « habituelle » de la pêcherie réunionnaise, délimitée à l'ouest par la côte est malgache, au sud à la latitude de Fort-Dauphin. Le rayon d'action maximal ainsi défini est d'environ 500 milles depuis La Réunion.	4 050 (88,7 % du précédent)
Londebfil	Entre 47° E et 59° E		
Instrumentation	= 0	On ne conserve que les filages non instrumentés (campagnes scientifiques embarquées sur les navires professionnels, les facteurs opérationnels étant adaptés au protocole d'expérimentation).	3 731 (92 % du précédent)
Prédation	= 0	On ne conserve que les lignes de pêche n'ayant pas été attaquées par des mammifères marins.	3 602 (96,5 % du précédent)

* Conservés à l'issue de la sélection.

- « doubles filages » effectués un même jour par un seul bateau, nécessitant de s'éloigner de la première ligne pour le filage de la seconde; la durée de filage totale est anormalement élevée du fait de ce trajet supplémentaire (les heures de filages reportées correspondent au début du premier filage et à la fin du deuxième) : durée de filage plus longue (supérieure à 6 h);

- recherche due au dysfonctionnement de la bouée émettrice ou forte dérive (de la ligne ou du navire) pendant la nuit : durée de dérive plus longue (jusqu'à 15 h) (fig. 2);

- ligne emmêlée ou cassée, nécessitant une recherche des bouées émettrices, mauvaises conditions météorologiques, captures abondantes (surtout en thons, lorsqu'un banc de germons, par exemple, est capturé) : virage plus long (jusqu'à 15 heures). Ces situations sont considérées comme des cas atypiques qu'il est difficile de comparer au cas général et sont susceptibles de perturber l'analyse des résultats de pêche. La définition de critères de sélection prendra en compte ces filages particuliers afin de conserver un jeu de données homogènes.

Les durées de filage et de virage sont *a priori* proportionnelles au nombre d'hameçons et à la longueur de ligne filée. Leur distribution a une allure normale, montrant une relative homogénéité des actions de pêche pour toute la pêcherie. En distinguant les segments de navires, cette distribution est décalée, comme le montrent les fig. 3 et 4.

Les distributions des durées de filage par segment montrent un décalage d'une heure dans les modes (fig. 3a, 4a). La majeure partie des filages des navires du segment 1 dure un peu moins de 4 h, jusqu'à 6 h en limite supérieure, tandis que les navires du segment 2 présentent majoritairement des durées de filage de près de 5 h, jusqu'à 7 h en limite supérieure. Par contre, il n'y a pas de différence notable entre les deux segments pour les filages courts.

Les durées de dérive pour les navires du segment 1 se situent majoritairement entre 6 et 10 h (mode vers 8,5 h). Par contre, pour le segment 2, si la limite maximale est équivalente (10 h), bon nombre d'opérations ont une durée de dérive anormalement faible (<6 h), ce qui correspond aux doubles filages précédemment décrits, pour lesquels la première ligne filée est virée rapidement après la fin du deuxième filage. Cette stratégie ne peut être appliquée que par les gros navires, disposant de deux équipes de marins.

Pour les durées de virages, les distributions sont globalement similaires (entre 5 et 10 h). Par contre, comme on peut s'y attendre pour des navires qui mettent à l'eau un nombre généralement plus important d'hameçons, les opérations de virages longues (> 10 h) sont plus nombreuses dans le segment 2.

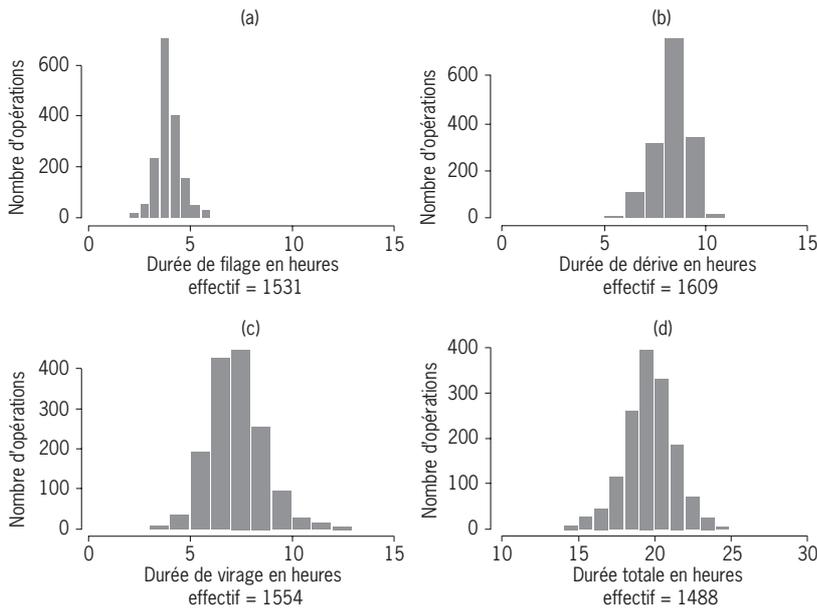


Figure 3 - Distributions des durées des opérations de pêche, par étapes et totales, pour les navires de segment 1.

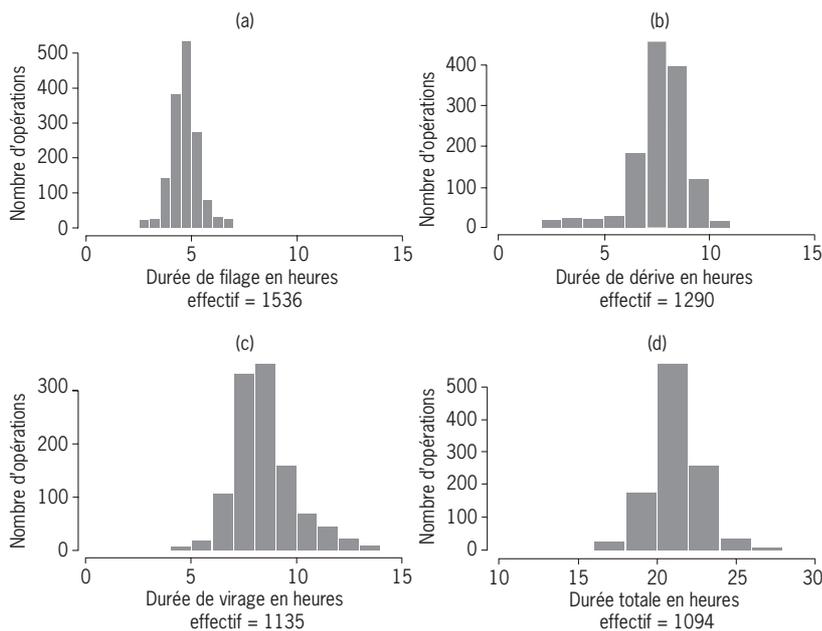


Figure 4 - Distributions des durées des opérations de pêche, par étapes et totales, pour les navires de segment 2.

Les relations entre les durées des étapes de pêche sont présentées à la figure 5. Elles laissent apparaître une nette influence de la durée de virage sur la durée totale. Le virage étant l'étape la plus longue de l'action de pêche, cette relation est la plus évidente. Les relations entre la durée de filage et la durée de virage d'une part, et la durée de filage et la durée totale d'autre part, s'expliquent aussi par l'influence de la longueur de ligne filée sur la durée des opérations. Par contre, la relation inverse entre la durée de filage et celle de dérive montre un effet de la stratégie générale des pêcheurs : la durée de dérive n'est pas modifiée même en cas de filage long.

L'opération de pêche est quasi systématiquement ajustée aux heures de lever du jour. Cette stratégie permet de cibler l'espadon, espèce active en surface de nuit (Carey, 1990). Cette stratégie garantit l'état de fraîcheur du poisson qui séjourne moins longtemps dans l'eau et facilite le travail des pêcheurs. Le travail de jour est en effet moins pénible pour l'équipage, laisse plus de temps en fin de virage pour réparer le matériel et autorise des changements de zone avant le filage le soir suivant.

Longueurs des filages et dérives

Première approche

Afin de calculer les distances entre les points de pêche, les positions géoréférencées en longitude-latitude ont été transformées en coordonnées Mercator vraies (en milles), qui tiennent compte de la rotondité de la Terre. Le calcul de ces coordonnées dépend de la latitude des positions, la moyenne des latitudes des points a été utilisée. La moyenne de l'étendue méridionale des données se situe ici autour de 21,5°S. Les longueurs de filages ont été calculées selon deux procédures. La première tient compte des positions reportées dans les carnets (position de début de filage, position de fin de filage). Ces distances ne correspondent pas forcément aux longueurs réelles mises à l'eau (la distance géographique « pêchante ») pour deux raisons. La courbure des segments due aux bouées de flottaison (« sagging rate » faible; Saito, 1975) diminue cette distance, quoique de façon négligeable pour les palangres de surface. Mais, surtout, la ligne n'est pas toujours filée de façon rectiligne. Pour les filages en lacets, en « V » ou en « U »

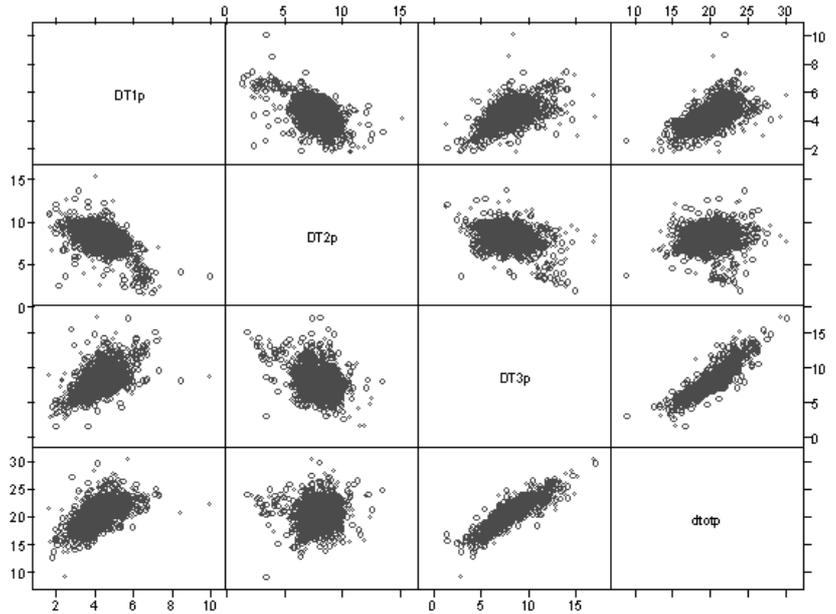


Figure 5 - Relations entre durées (DT1p : durée de filage, DT2p = durée de dérive, DT3p = durée de virage, dtotp = durée totale), tous segments confondus.

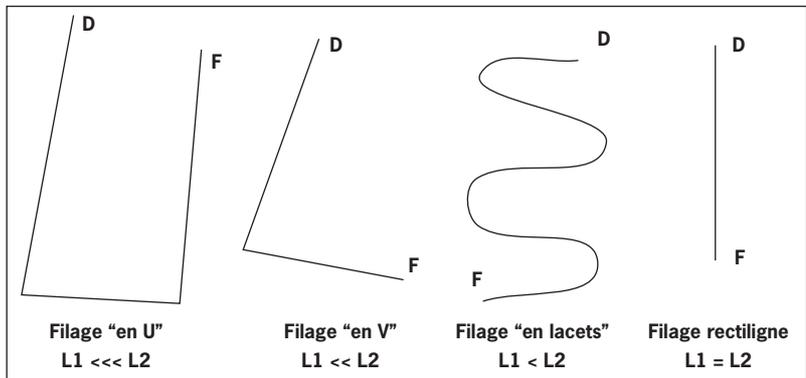


Figure 6 - Schémas des formes de lignes filées observées pour la pêche; D : position de début de filage, F : position de fin de filage; L1 : distance D-F, L2 : longueur de ligne effectivement mise à l'eau.

(fig. 6), la distance entre les positions de filage est significativement plus courte que la longueur réellement mise à l'eau.

Première procédure

Longueur de ligne L1 =
Norme du vecteur (position de début de filage, position de fin de filage)

Une deuxième procédure a été appliquée, tenant compte des durées de filage d'une part et des vitesses moyennes de filage des navires par segment d'autre part. Les vitesses de 7,5 et 9 nœuds ont été respectivement retenues pour les segments 1 et 2 de la flottille. La figure 7 présente la distribution des longueurs calculées selon les deux procédures.

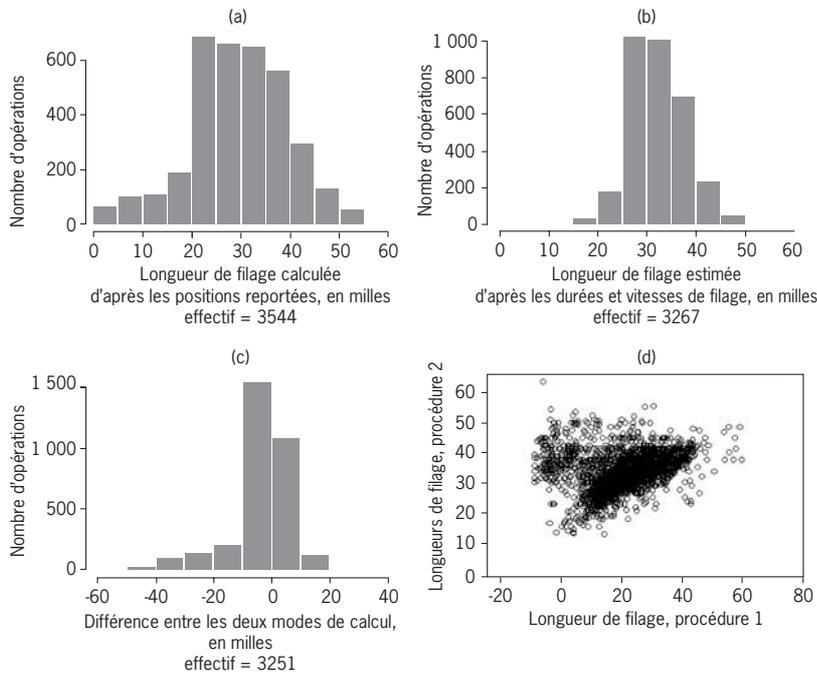


Figure 7 - Distribution des longueurs de filage calculées à partir des positions reportées (a). Distribution des longueurs estimées à partir de la durée de filage et de la vitesse du navire (b). Distribution des différences entre les longueurs de filage calculées suivant les deux procédures (c). Représentation de la longueur calculée selon la première procédure et représentée en fonction de celle calculée selon la deuxième procédure (d).

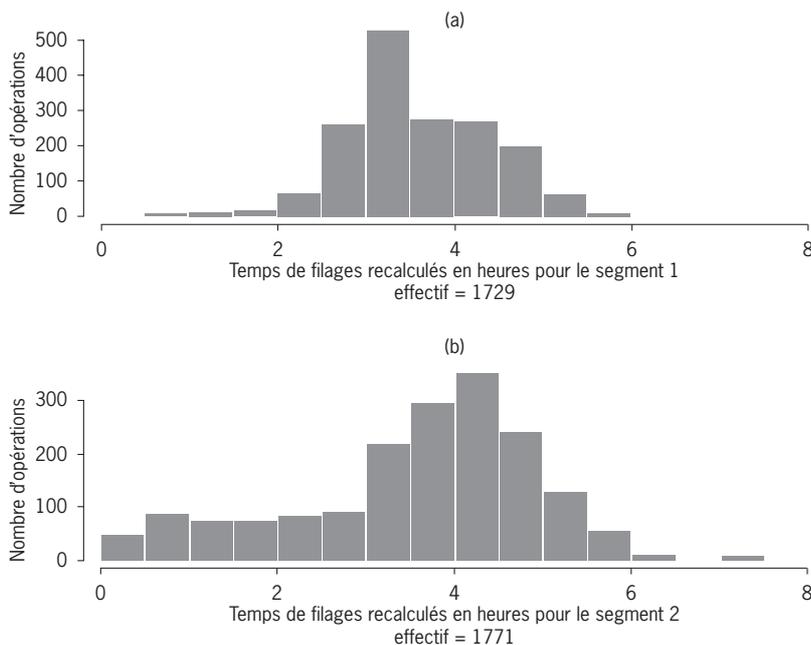


Figure 8 - Distributions des temps de filage recalculés d'après les longueurs de filage obtenues d'après les positions, pour chaque segment de navire (7.5 nœuds pour le segment 1 1.9 nœuds pour le segment 2).

Deuxième procédure

$$\text{Longueur de ligne L2} = \frac{\text{Durée de filage} * \text{Vitesse de filage}}{\text{Vitesse de filage}}$$

Les distributions des longueurs selon les deux procédures sont unimodales, malgré le décalage observé dans les durées de filage par segment (fig. 3a, 4a). Les vitesses de filage appliquées permettent ainsi de « rapprocher » les deux distributions. Parmi les longueurs inférieures à 20 milles calculées d'après les positions (fig. 7a), on retrouve les filages non rectilignes, particulièrement ceux en « U », pour lesquels cette longueur est très faible au regard de la longueur réellement filée. Le report de ces longueurs vers les classes supérieures de cette distribution permettrait vraisemblablement de la recentrer, ce qui la ferait ressembler d'autant plus à celle des longueurs établies d'après la deuxième procédure.

Pour confirmer cette hypothèse, on établit les distributions des longueurs de filage d'après les positions reportées divisées par les vitesses de référence, pour chaque segment de navire (fig. 8). Ces distributions s'apparentent fortement à celles des durées de filage par segment (fig. 3a, 4a), ce qui valide le choix des vitesses. Les différences observées ne sont alors plus le fait que des filages non rectilignes.

Cette analyse permet de distinguer les filages « en ligne », pour lesquels la configuration spatiale réelle de la ligne est donc connue à partir des positions reportées, des filages de formes atypiques, dont la configuration spatiale réelle de la ligne n'est pas identifiable à partir des positions reportées. Les distributions de ces longueurs de lignes pour les segments 1 et 2 sont présentées plus loin dans le texte pour la définition de l'effort nominal.

Deuxième approche

Cette approche se base plus systématiquement sur l'observation de la distribution des données disponibles et sur l'expertise qui a pu être réalisée à bord des navires palangriers dans le cadre du programme ECOTAP (Bach *et al.*, 1999).

Les vitesses de filage théoriques sont d'abord calculées à partir des distances entre positions de filage et des durées de pêche reportées dans la base de l'Ifremer :

$$\text{Vitesse de filage théorique} = \frac{\text{Norme du vecteur (position de début de filage, position de fin de filage)}}{\text{Durée de filage en heures (I)}}$$

La figure 9 représente la distribution des vitesses théoriques. Les filages réalisés avec une vitesse supérieure à 10 nœuds sont peu nombreux : de telles vitesses semblent peu réalistes dans les conditions de mer de l'océan Indien et pour les navires de la pêche réunionnaise (Bach, comm. pers.). Ces filages sont écartés et le critère de filtrage « **vitesse de filage théorique < 10** » retenu. Les vitesses de filages inférieures à 5 nœuds peuvent éventuellement concerner les petits bateaux mais cela peut aussi être le fait des filages non rectilignes, pour lesquels le calcul de la longueur filée estimée d'après les positions reportées sous-évalue la longueur vraie. Il s'agit ensuite de définir des critères de sélection de ces filages à faible vitesse théorique.

Pour ce faire, deux indices sont proposés :

- le nombre d'hameçons moyen par intervalle de 100 m de ligne filée (équation 2);
- l'intervalle de temps moyen (en secondes) entre 2 hameçons successifs (équation 3).

$$\text{NbHameçons}/100 \text{ m} = \frac{\text{NbHameçons}/\text{Norme du vecteur}(\text{position de début de filage}, \text{position de fin de filage})}{18,52} \quad (2)$$

La grande majorité des filages montre un nombre d'hameçons moyen pour 100 m inférieur ou égal à 4 (fig. 10). Les valeurs supérieures témoignent des filages pour lesquels la longueur filée estimée d'après les positions reportées n'est pas vraisemblable. Le critère de filtrage « **NbHameçons/100 ≤ 4** » est retenu. La distribution des valeurs inférieures ou égales à 4 montre que les filages pour lesquels l'intervalle interhameçons est compris entre 33 et 25 m (valeurs comprises entre 3 et 4) sont peu nombreux (fig. 11).

$$\text{IntervalleSec} = (\text{Durée de filage en heure}) * 3600 / \text{NbHameçons} \quad (3)$$

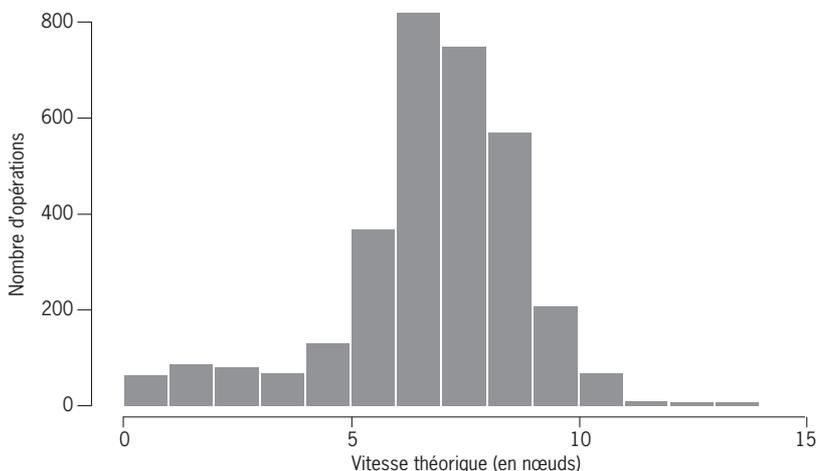


Figure 9 - Distribution des vitesses théoriques (en nœuds) calculées d'après les longueurs de filage calculées d'après les positions reportées (en milles) et la durée du filage (en heures).

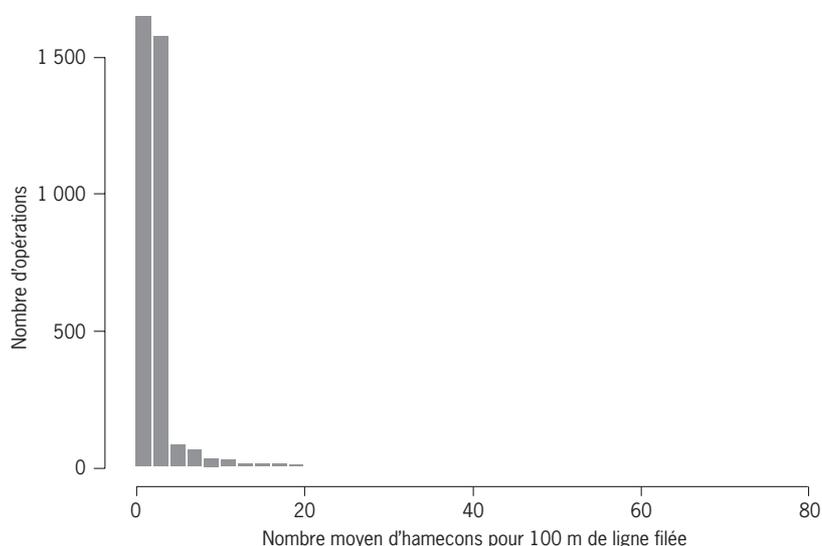


Figure 10 - Distribution du nombre moyen d'hameçons pour 100 mètres de ligne filée (d'après la longueur du filage calculée d'après les positions reportées en milles).

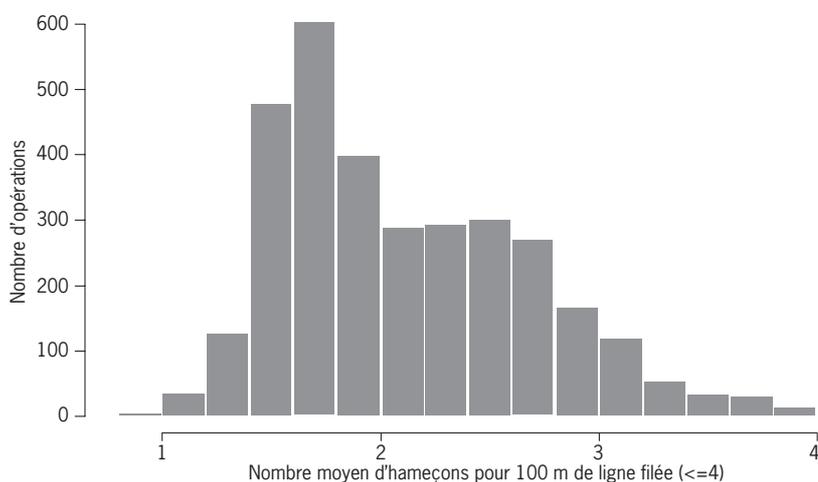


Figure 11 - Distribution du nombre moyen d'hameçons pour 100 m de ligne filée pour les valeurs inférieures ou égales à 4 (d'après la longueur du filage calculée d'après les positions reportées en milles).

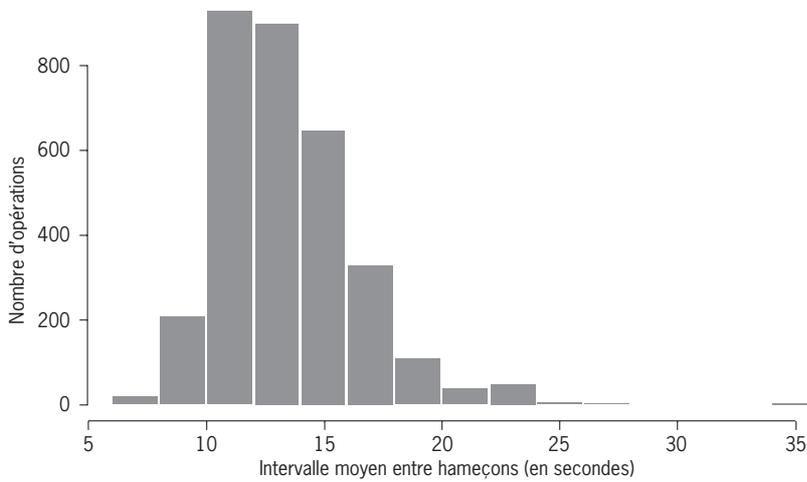


Figure 12 - Distribution des intervalles moyens entre hameçons (en secondes, d'après la durée du filage et le nombre d'hameçons reportés).

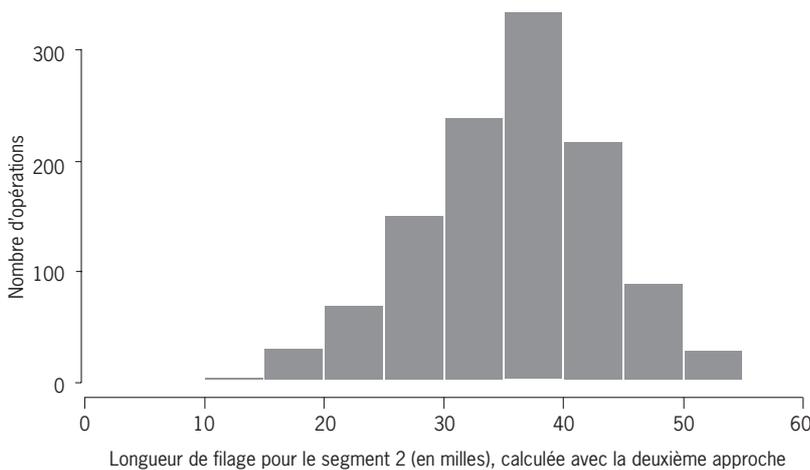
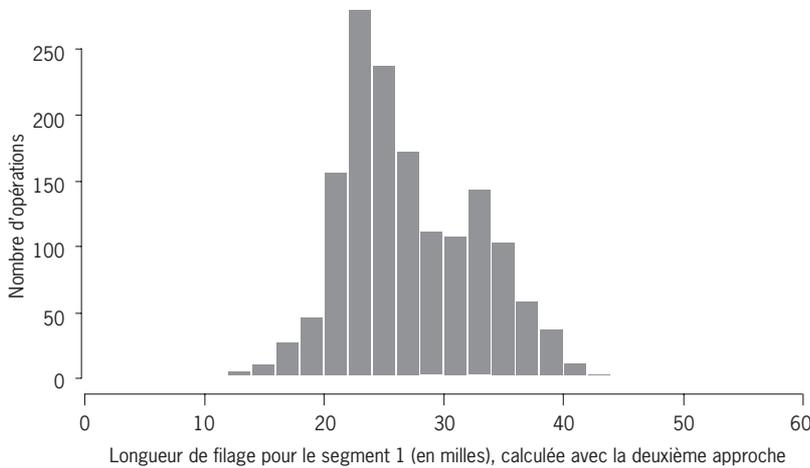


Figure 13 - Distributions des longueurs de filage pour les deux segments de la flottille réunionnaise calculées d'après les positions reportées (les trois critères retenus ont été appliqués aux données).

La figure 12 montre que les valeurs d'intervalles entre hameçons se distribuent essentiellement entre les valeurs 8 secondes et 20 secondes. Les valeurs supérieures ou inférieures sont très peu vraisemblables et seront écartées. Le critère « $8 \leq \text{Intervalle-Sec} \leq 20$ » est retenu.

Les distributions de longueurs de filage calculées d'après les positions reportées et tenant compte des 3 critères précédemment retenus sont présentées à la figure 13. La deuxième approche permet de distinguer deux modes dans la distribution des longueurs de filage estimées pour le segment 1. Apparaissent ainsi deux cas de figure : les navires qui filent autour de 25 milles de ligne et ceux qui filent plus de 34 milles. Ces derniers pourraient correspondre aux nouveaux petits navires arrivés dans la pêcherie, qui disposent d'une bobine de stockage de ligne plus grosse. Dans le segment 2, le mode de la distribution des longueurs de ligne se situe autour de 35-40 milles.

L'application des critères de filtrage des filages avec cette approche exclut 864 filages.

Cette deuxième approche permet de proposer des abaques théoriques qui mettent en relation le nombre d'hameçons avec la longueur de ligne filée, en fonction des choix et contraintes techniques de filage des navires. Les figures 14 et 15 représentent ces abaques selon des classes d'intervalle de temps entre hameçons et des classes de vitesses de filage.

À partir de ces abaques, un pêcheur qui file 1 500 hameçons peut estimer la longueur de ligne filée en fonction de l'intervalle de temps entre hameçons et de sa vitesse de filage dans les cas de filages rectilignes. Ainsi, par exemple, pour un intervalle compris entre 10 et 12 secondes, à une vitesse de 4,5 nœuds, la ligne aura une longueur d'environ 20 milles. Pour le même intervalle de temps, une ligne filée à 9,5 nœuds atteindra près de 40 milles. Ces abaques sont établies à partir des observations recueillies auprès des navires réunionnais et rendent compte des conditions réelles d'exploitation.

Dans la suite des traitements, la première approche seule sera conservée pour déterminer la longueur des lignes filées.

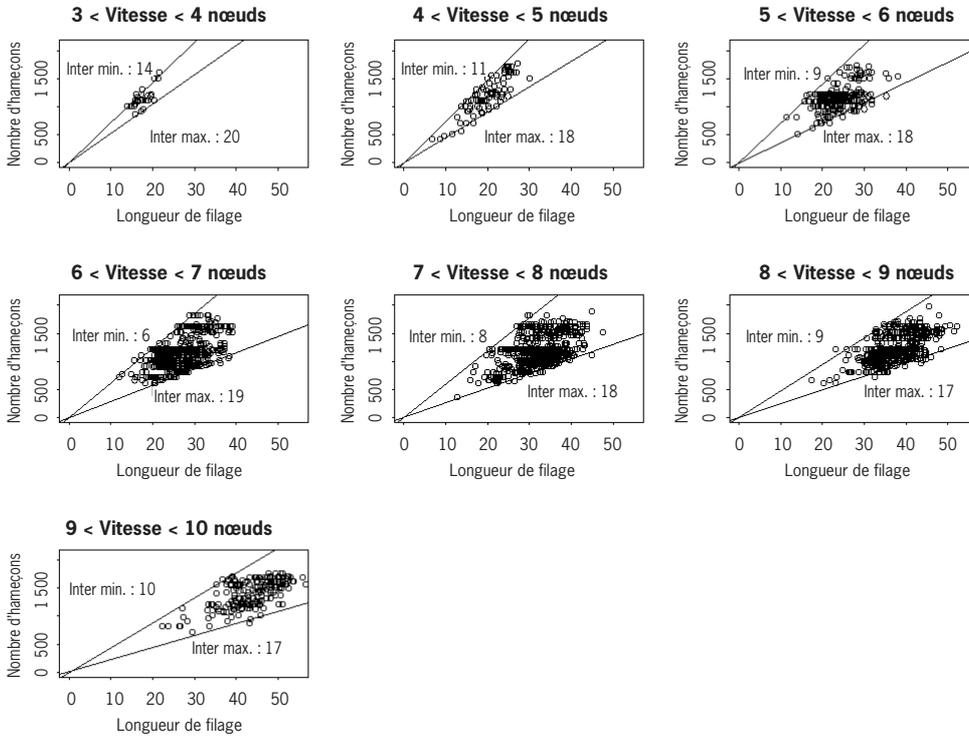


Figure 14 - Abaques théoriques des nombres d'hameçons et longueurs de filage selon différentes classes de vitesses de filage (en nœuds); les intervalles de temps théoriques entre hameçons maximaux et minimaux (en secondes) correspondants sont aussi représentés.

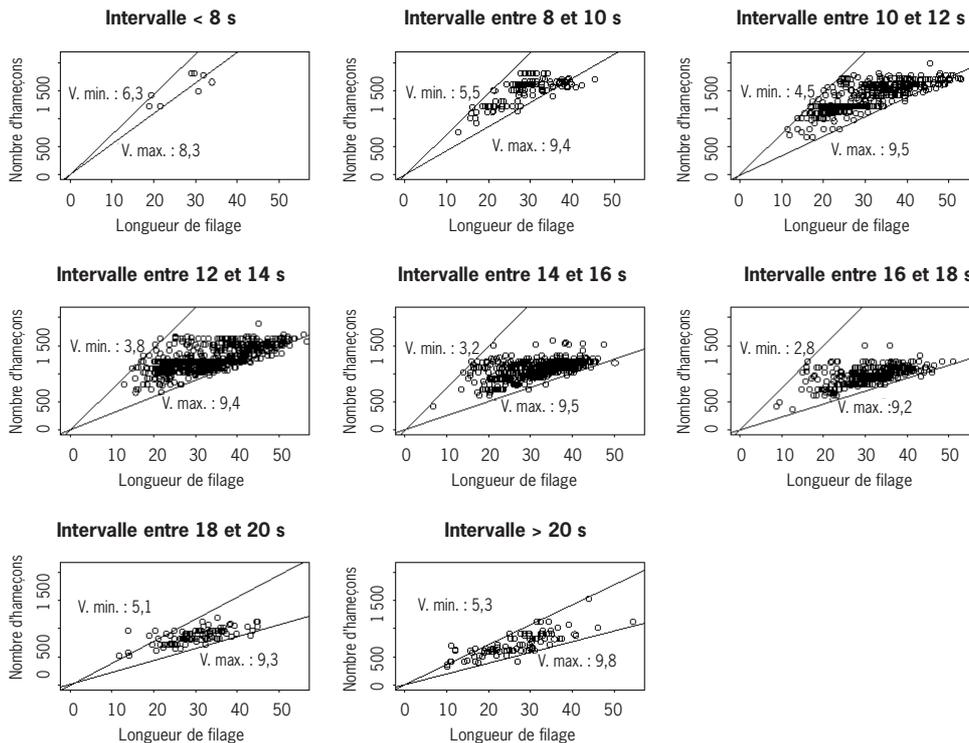


Figure 15 - Abaques théoriques des nombres d'hameçons et longueurs de filage selon différentes classes d'intervalle de temps entre hameçons (en secondes); les vitesses théoriques maximales et minimales (en nœuds) correspondantes sont aussi représentées.

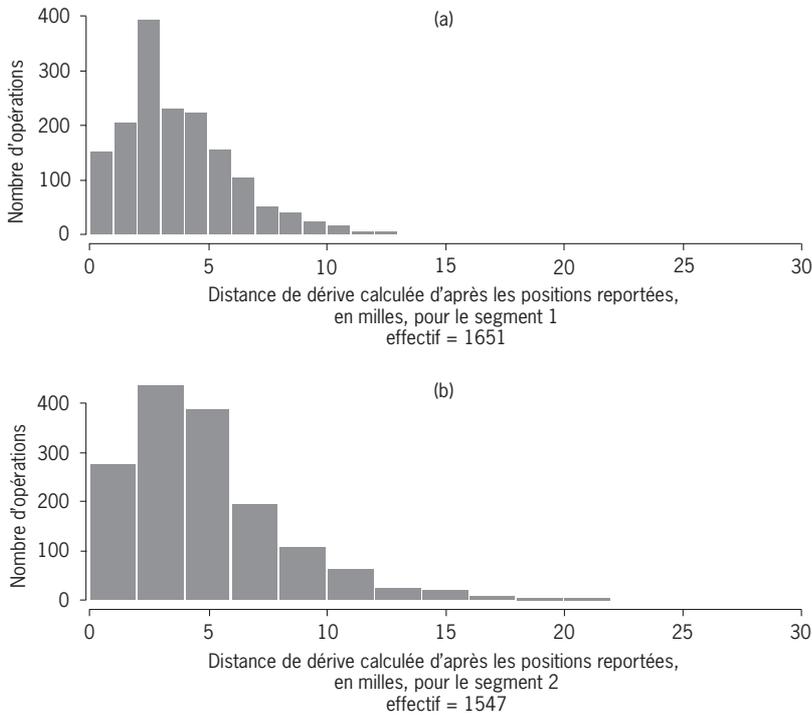


Figure 16 - Distribution des distances de dérive selon le segment de navires.

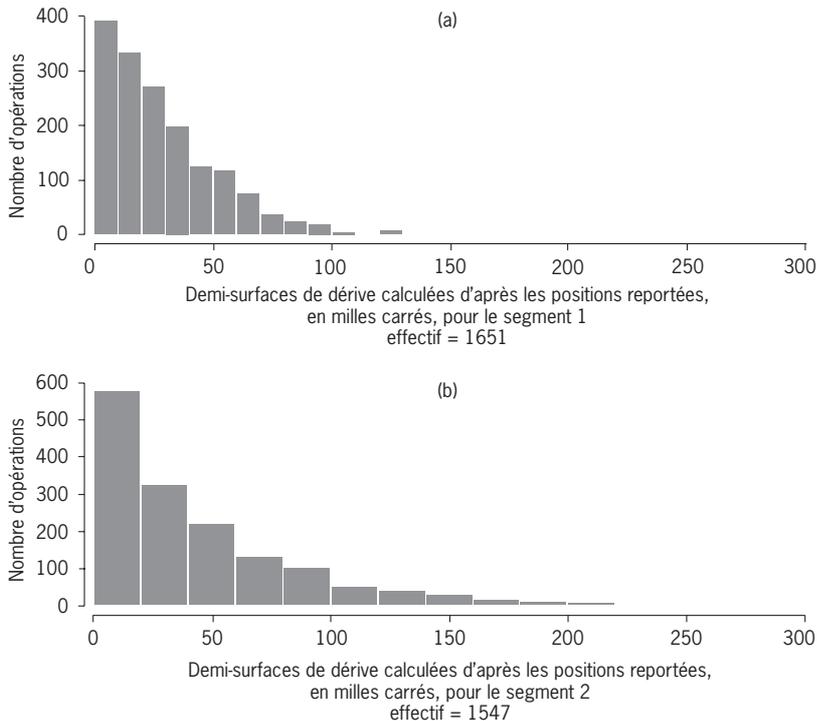


Figure 17 - Distribution des demi-surfaces de dérive par segment de navires.

Distances de dérive

La distance entre les positions de fin de filage et de début de virage définit *a priori* une longueur de dérive, qui caractérise la distance parcourue à cette extrémité par la ligne sous l'influence des courants. C'est le cas général, où le navire dérive à proximité de la position de fin de filage pendant la nuit et reprend cette même extrémité au début de virage (temps de recherche et de route minimisés). Néanmoins, certains virages sont effectués en retournant sur la position de début de filage. Cette option est justifiée par la direction du vent car il est plus « confortable » de virer bout au vent. Dans ce cas, le calcul de la longueur de dérive est alors établi d'après les positions de début de virage et de début de filage.

Les distances de dérive restent faibles au regard des longueurs de lignes filées (fig. 16 et 7). Les distances de dérive maximale (cas de forts courants) semblent proportionnelles à la longueur de ligne filée, qui est plus grande pour le segment 2. Les cas de faible dérive ne semblent pas discriminer les deux segments.

Demi-surfaces de dérive

Les positions de filage et de début de virage autorisent le calcul d'un indice surfacique de dérive : il correspond à la demi-surface théorique balayée par la ligne durant l'opération de pêche (fig. 17). Ne prenant pas en compte la fin du virage (étape particulièrement longue de l'opération de pêche), elle représente un bon indice de l'influence des courants sur la dérive de la palangre de surface pendant la phase « pêchante ». Les remarques formulées précédemment sur la pertinence des positions de filage reportées sur la configuration spatiale réelle de la ligne (paragraphe précédent) sont aussi valables ici.

La distribution de ces surfaces semble proportionnelle à celle des longueurs de lignes par segment, une longue ligne offrant une surface de dérive supérieure à une ligne courte. Par ailleurs, cette différence entre segments pourrait être le fait des conditions hydrologiques des zones exploitées par les grosses unités de la flottille. On remarque que les distributions des distances de dérives (fig. 16) sont proches de celles des demi-surfaces (fig. 17), ce qui est un résultat attendu.

Intervalles interhameçons

La distance moyenne entre deux hameçons successifs a été calculée en divisant la longueur théorique de ligne mise à l'eau (estimée en fonction du temps et la vitesse de filage du bateau, deuxième procédure) par le nombre total d'hameçons utilisés. La figure 18 donne la distribution de ce paramètre pour les deux segments de la flottille. Les distributions sont très proches pour les deux segments (mode centré sur 50 mètres). Quelques filages montrent toutefois des hameçons plus écartés les uns des autres en moyenne (plus de 80 mètres). Ces valeurs étant estimées à partir de longueurs calculées (longueur L2 d'après la deuxième procédure), elles doivent être considérées avec précaution.

Directions de filage et de dérive

Les directions de filage et de dérive (angle trigonométrique entre l'axe ouest-est et le vecteur défini respectivement par les positions de filage et de dérive présentées précédemment) sont exprimées en degrés (secteur nord positif, secteur sud négatif) et par azimut (8 classes définies par la rose des vents). Les vecteurs de filage et de dérive sont représentés à la figure 19.

Les distributions des directions de filage et de dérive par secteur sont représentées à la figure 20.

Les filages sont en très grande majorité effectués vers l'ouest. Les vents dominants dans la zone étant orientés à l'est, la stratégie de filage est établie pour pouvoir virer au plus près du lit du vent (bout au vent). Cette stratégie est une des caractéristiques de la flottille puisqu'observée pour les deux segments. Le segment 2 présente toutefois une plus grande variété de directions de filage, du fait de l'exploitation de zones éloignées de La Réunion, où les vents peuvent être orientés dans d'autres directions (fig. 20b).

À l'inverse des vents dominants et des courants généraux (courant sud-équatorial notamment décrits dans Longhurst, 1998), Padfield & Coward (2000) montrent que les courants de surface locaux à l'ouest de La Réunion (« sous le vent » de l'île) portent à l'est. Les directions de dérive semblent confirmer cette tendance. Le segment 1, qui exploite particulièrement la zone ouest proche de La Réunion, y est particulièrement sensible (direction est très privilégiée, fig. 20c). Les navires du segment 2

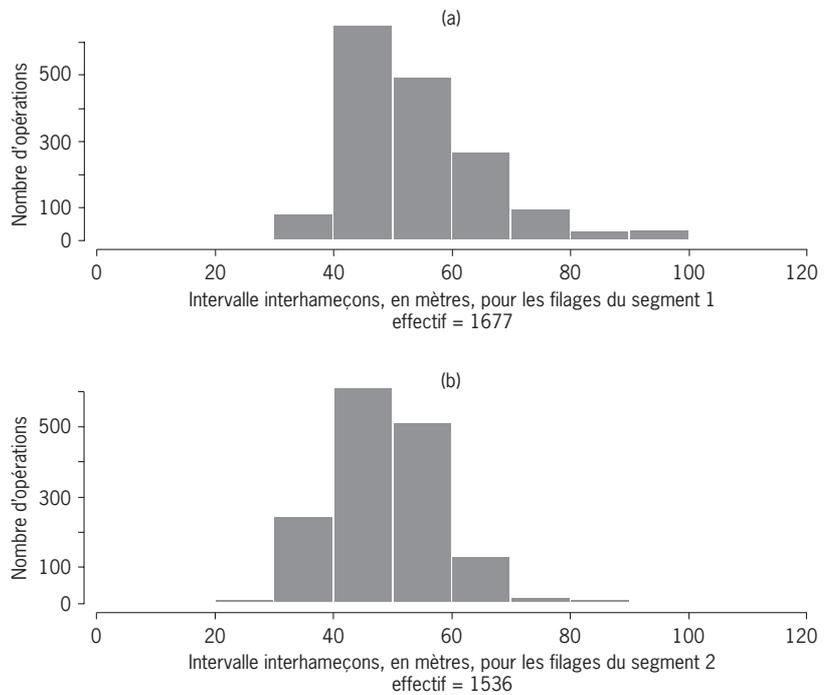


Figure 18 - Distribution des intervalles interhameçons moyens estimés d'après les longueurs de ligne filée (temps de filage) et le nombre d'hameçons mis à l'eau par filage, pour chaque segment.

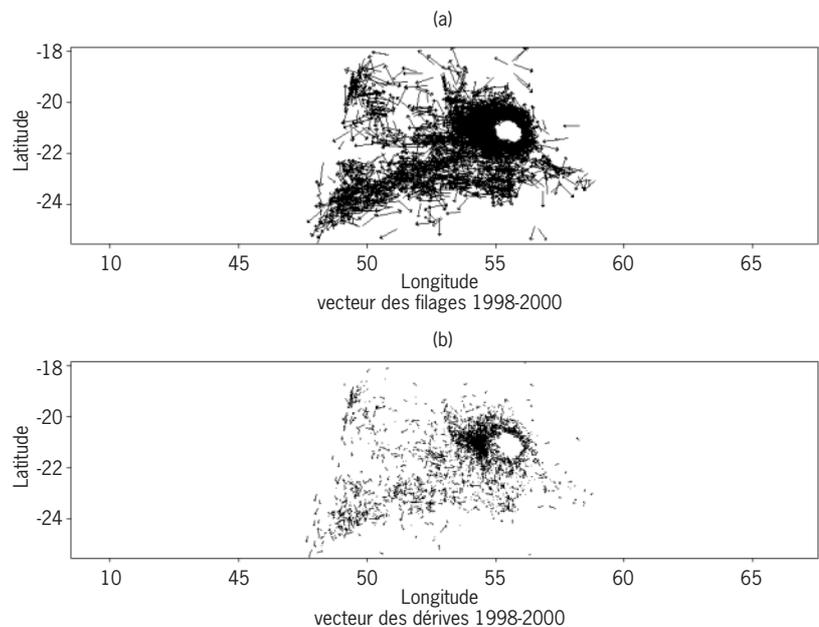


Figure 19 - Représentation des vecteurs des filages (a) et des dérives (b) de toutes les opérations de pêche recensées.

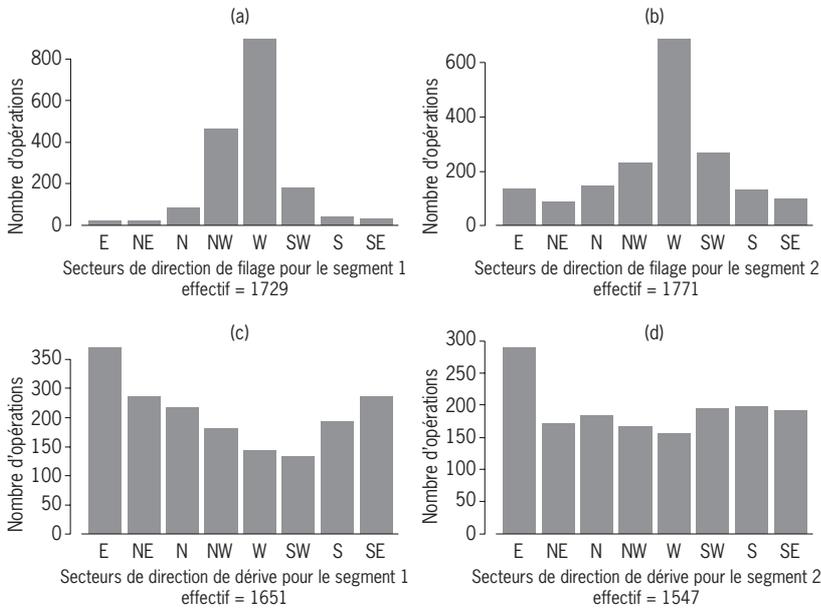


Figure 20 - Distributions des directions de filage et de dérive par secteur géographique pour les opérations de pêche recensées, par segment de navire.

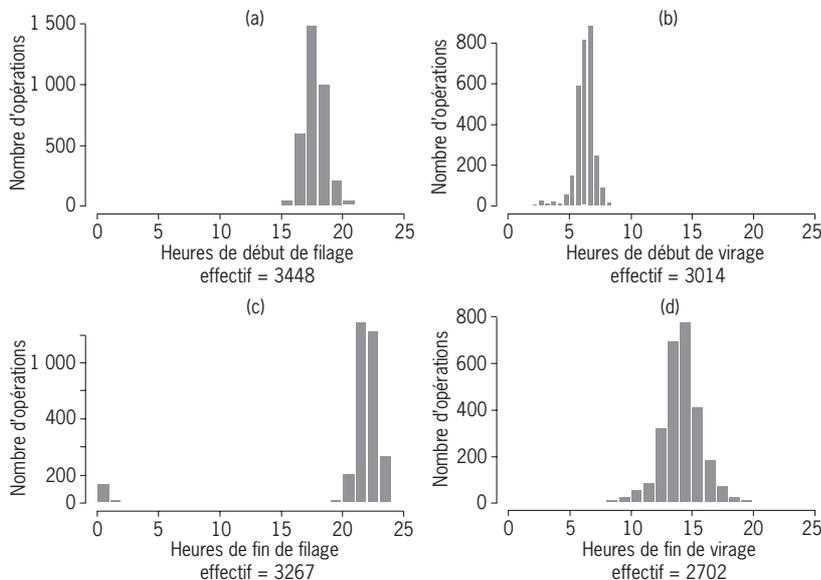


Figure 21 - Distribution des heures des différentes étapes de pêche.

exploitent aussi cette zone et la direction est de dérive est fortement représentée, mais les lignes dérivent aussi dans les autres directions avec une tendance à l'est moins systématique (fig. 20d).

Critères de sélection des données pour les traitements

Les distributions des différents paramètres (paramètres de base et indices intermédiaires) permettent d'identifier les valeurs

aberrantes (« outliers »). Des critères de sélection des données à conserver dans les traitements ultérieurs sont établis. Le choix de ces critères est justifié par des observations de terrain. Cette sélection complémentaire a pour but de disposer de données homogènes et comparables sur la stratégie de pêche (heures et positions de pêche).

Les distributions des heures des étapes de pêche (filage et virage) décrivent généralement bien une technique standard adaptée au ciblage de l'espadon. La ligne doit dériver de nuit, elle commence à être filée en fin de journée dès l'arrivée sur la zone choisie par le patron pêcheur (fig. 21a), jusqu'à pose complète de tous les hameçons (fig. 21c; mode vers 22h00). Le virage est effectué généralement au lever du jour; sont considérés comme atypiques les virages commençant après 10h00 du matin, qui traduisent des incidents particuliers. Cette dernière étape du virage se termine en général en début d'après-midi (fig. 21d; mode vers 14h00).

Conformément à la description des durées des étapes de pêche, les opérations de pêche caractérisées par des durées de dérive inférieures à 6 h (cas des « doubles filages », figure 4b) sont susceptibles d'altérer les comparaisons et seront écartées. De même, les filages pour lesquels la durée de pose de la ligne excède 6 h pour les navires du segment 1 et 7 h pour ceux du segment 2 (fig. 3a, 4a) sont écartés.

Afin de ne conserver que les filages rectilignes dont on connaît le positionnement précis, la sélection décrite précédemment (fig. 7) est appliquée, en utilisant l'approche 1 qui exclue 335 filages (l'approche 2 présentée p. 67-69 exclut plus de cas). Pour ces opérations de pêche, la différence absolue entre les longueurs de filage estimées d'après les deux procédures est limitée à 10 milles (fig. 7c). Ces filages « en ligne » représentent 77 % des filages sélectionnés initialement.

Les distributions des distances de dérive montrent des valeurs extrêmes *a priori* aberrantes : jusqu'à 80 milles. Les données pour lesquelles celles-ci excèdent une valeur limite fixée arbitrairement à 20 milles sont écartées. Cette sélection interfèrera directement sur la distribution des demi-surfaces de dérive, qui sera *de facto* recentrée.

Les facteurs sur lesquels le tri est appliqué, ainsi que les critères correspondants, sont synthétisés dans le tableau 3.

Tableau 3 - Récapitulatif des critères de sélection retenus pour les différents champs et indices intermédiaires.

Indices ou paramètres	Indices ou paramètres liés	Commentaires	Critères de sélection	Nombre d'actions de pêche conservé et pourcentage des données initiales
Heures de pêche	Début filage		Aucun	
	Fin filage		Aucun	
	Début virage		< 10h00 (critère1)	3 593 (99,9 %)
	Fin virage		Aucun	
Durées de pêche				
Durée de filage	Heure de début de filage - Heure de fin de filage		< 6 heures pour le segment 1, <7 heures pour le segment 2 (critère2)	3 507 (97,4 %)
Durée de dérive	Heure de fin de filage - Heure de début de virage	Pour éliminer les « doubles filages »	> 6 heures (critère3)	3 484 (96,7 %)
Durée de virage	Heure de début de virage - Heure de fin de virage		Aucun	
Longueurs				
Filage	Positions et durées de filage		Différence entre les deux calculs des longueurs de filage < 10 milles (critère4)	2 995 (83 %)
Dérive	Positions de filage et de virage		< 20 milles (critère5)	3 587 (99,6 %)
Surfaces	Dérive		Aucun	
Total				2 891 (80 %)

Différentes définitions de l'effort nominal

L'unité d'effort nominal généralement utilisée pour la palangre est le nombre d'hameçons. D'autres indices d'effort sont proposés ci-après.

Nombre d'hameçons

La distribution des efforts nominaux décrits par le nombre d'hameçons pour chaque segment est représentée (fig. 22).

Le nombre moyen d'hameçons mouillés par filage a subi des variations depuis le début de la pêcherie (voir p. 20). Depuis 1998, il s'est stabilisé et les distributions présentées ci-contre reflètent la situation actuelle.

Ces distributions sont très étendues et les différents pics traduisent l'existence de sous-groupes au sein de chaque segment. La distribution pour le segment 1 s'étend de 400 à 1 400 hameçons, avec un pic très net autour de 1 200 hameçons. Les plus petites unités (7 à 9 m) mettent à l'eau moins de

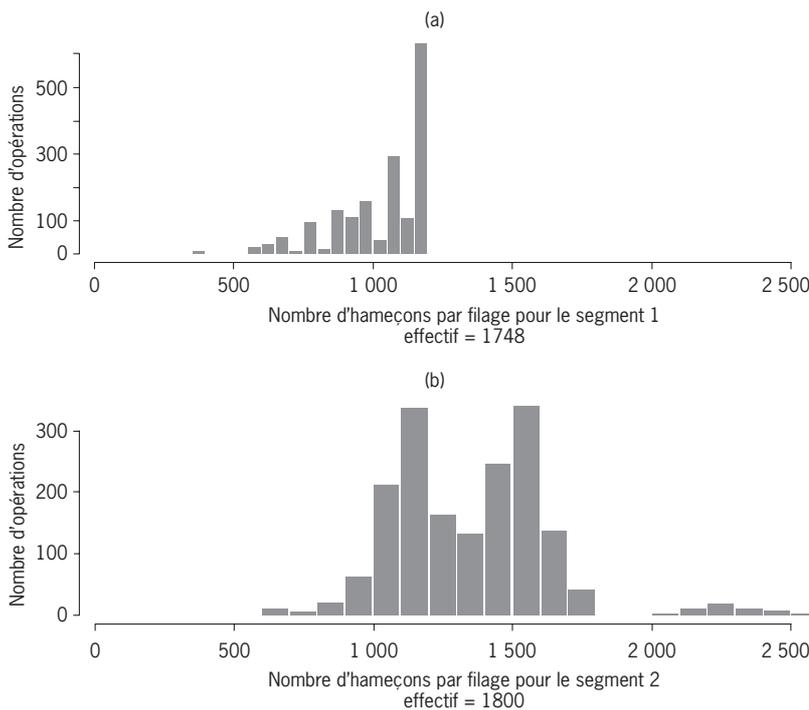


Figure 22 - Distribution des nombres d'hameçons par filage pour chaque segment de navire.

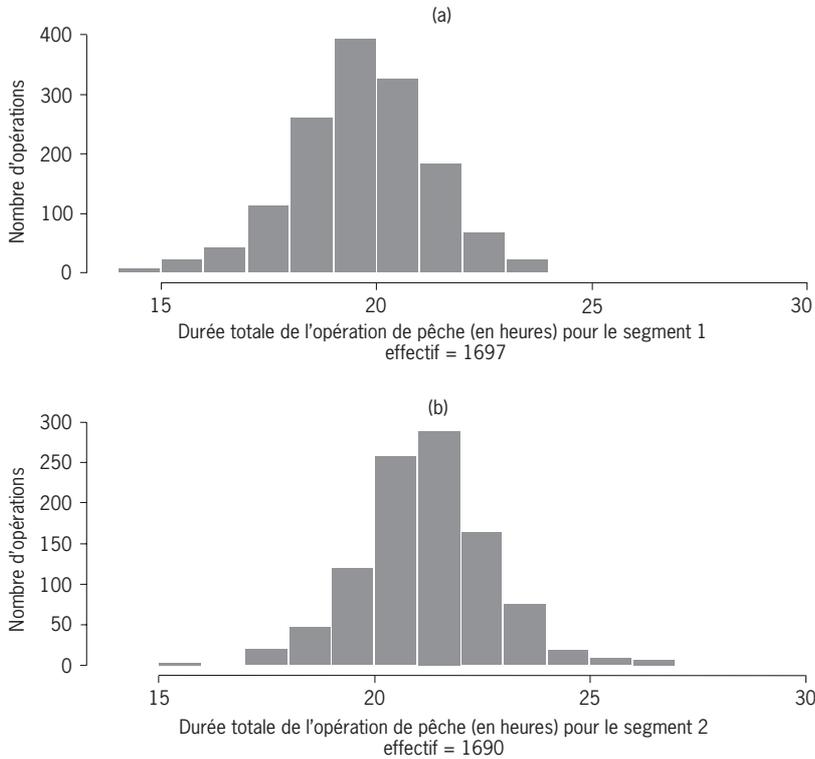


Figure 23 - Distribution des durées de pêche, en heure, après sélection des données (application des critères 1, 2 et 3).

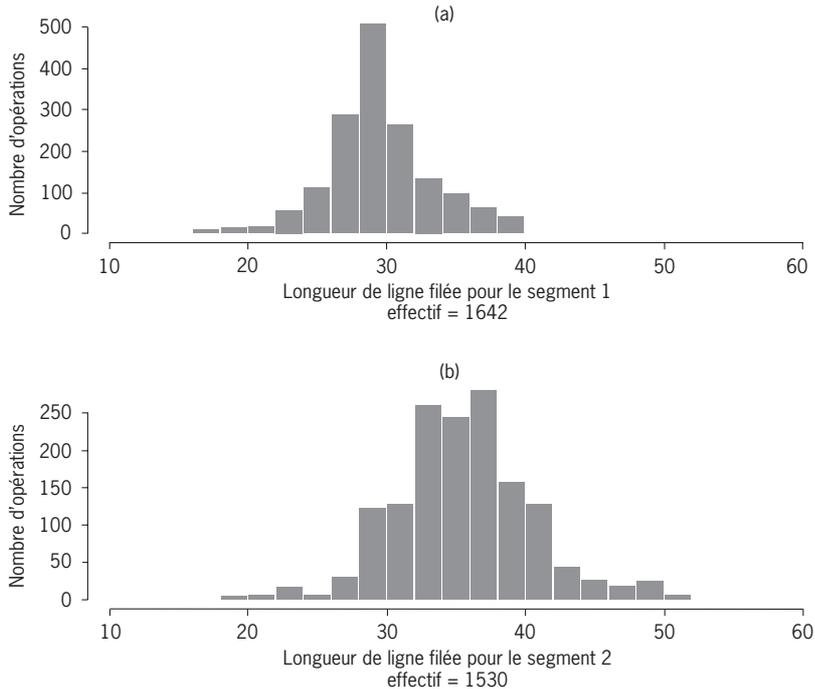


Figure 24 - Distribution des longueurs de ligne filée, en mille, après sélection des données (application du critère 2).

500 hameçons, les unités intermédiaires (entre 9 et 14 m) présentent les pics de 700 à 1 100 hameçons. Arrivées tardivement dans l'exploitation, ces unités ne sont que partiellement représentées dans les données, du fait de leur faible participation à l'échantillonnage des carnets de pêche. Le mode principal de 1 200 hameçons correspond aux unités de 14 à 16 m dont les patrons sont plus expérimentés et ont standardisé le montage de leurs lignes. Parmi les opérations présentant moins de 800 hameçons, se situent aussi les cas particuliers de filage volontairement réduits.

Le segment 2 présente au moins 3 modes nets, autour de 1 200, 1 600 et 2 300 hameçons. Ce dernier groupe, nettement séparé des autres, peut être attribué aux seules unités de plus de 25 mètres. Les filages autour de 1 200 hameçons correspondent aux navires de 16 à 22 m, les autres unités (22 à 25 m) filant généralement autour de 1 400 hameçons. Les filages présentant moins de 1 000 hameçons correspondent aussi ici aux cas particuliers définis précédemment.

Durée de pêche

Les distributions des durées de pêche sont présentées à la figure 23.

La distribution des durées a une apparence normale dans les deux segments, sur une étendue relativement identique (de 15 à 30 h de pêche). Le mode est toutefois logiquement supérieur pour les navires du segment 2 (21 h contre 19 pour le segment 1).

Longueur de ligne filée

La longueur de ligne filée calculée d'après la procédure 2, par les navires du segment 1 s'étend d'environ 12 à 45 milles, avec un mode très net autour de 28 milles (fig. 24). Les navires du segment 2 filent entre 18 et 52 milles de ligne. Deux modes apparaissent cependant, autour de 32 et 36 milles, qui correspondent vraisemblablement aux sous-groupes identifiés grâce aux nombres d'hameçons. Le sous-groupe peu représenté des filages de plus de 2000 hameçons est ici apparemment observable par un léger pic à 48 milles.

Demi-surfaces de dérive

Les distributions des demi-surfaces de dérives sont fortement dissymétriques dans les deux segments (fig. 25). Cela s'explique par le fait que les cas de très faible dérive sont les plus nombreux. Les deux distributions se ressemblent assez fortement, mise à part la plus forte représentation des très petites surfaces de dérive chez les navires du segment 2 (fig. 16).

Afin de normaliser ces distributions, une transformation logarithmique est appliquée sur ces surfaces (fig. 26).

La distribution transformée des surfaces du segment 1 montre deux modes, autour de 2,6 et 3,4, soit des surfaces de dérive de 13 et 30 milles nautiques carrés. Celle des surfaces du segment 2 est unimodale, centrée sur 3,4, soit 30 milles nautiques carrés.

Intervalle interhameçons

La distance interhameçons semble être assez homogène entre les navires des segments 1 et 2 (fig. 27). L'étendue entre 20 et 120 mètres et le mode autour de 45 mètres sont identiques. Toutefois, la distribution de cet indice est plus dissymétrique pour les navires du segment 1, les faibles valeurs étant moins représentées. Ceci s'explique par le fait que le calcul de cet intervalle est surestimé pour les filages avec un faible nombre d'hameçons au dénominateur, la longueur de ligne filée au numérateur étant plus homogène du fait de la procédure de calcul (vitesse de filage fixée à 7,5 nœuds).

Discussion

La base de données Activité palangrière de l'Ifremer contient de nombreuses informations sur les techniques et stratégies employées par les pêcheurs réunionnais. Certains champs non renseignés rendent toutefois inexploitable certaines de ces informations pour l'établissement d'indices fiables.

L'analyse des distributions des paramètres et indices calculés à partir de ces informations nous permet de proposer des critères de sélection sur ces paramètres afin de ne conserver que les données les plus pertinentes. Des améliorations ou compléments d'information peuvent ainsi être proposés concernant les carnets de pêche afin de tenir compte de ces critères dès le report d'informations par les pêcheurs.

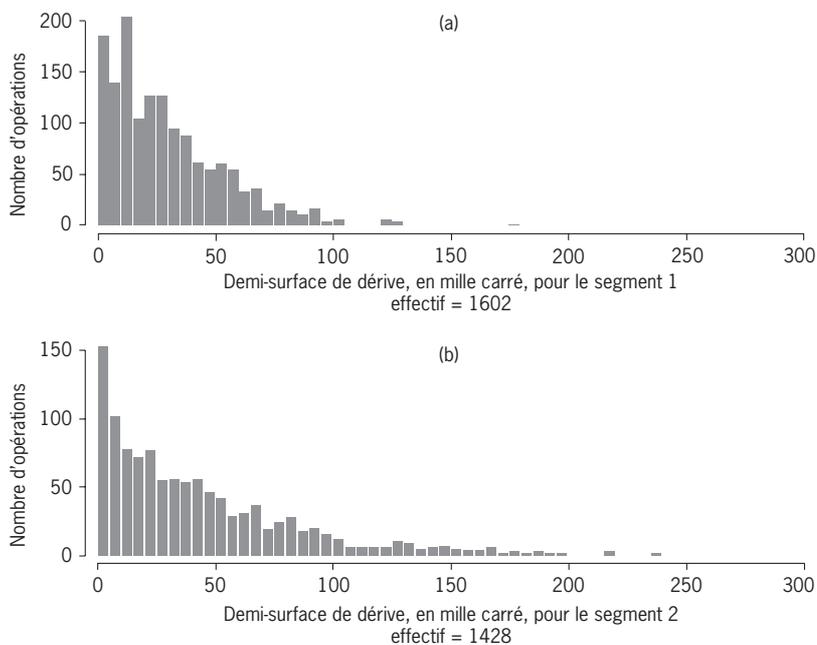


Figure 25 - Distribution des demi-surfaces de dérive après sélection des données (application des critères 1,2,3 et 5).

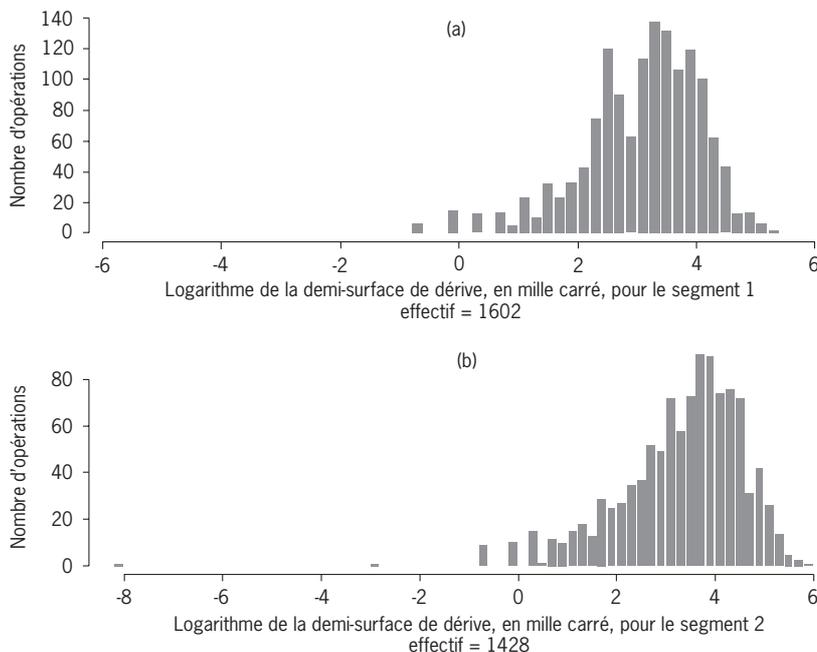


Figure 26 - Distribution des logarithmes des demi-surfaces de dérive après sélection des données (application des critères 1,2,3 et 5).

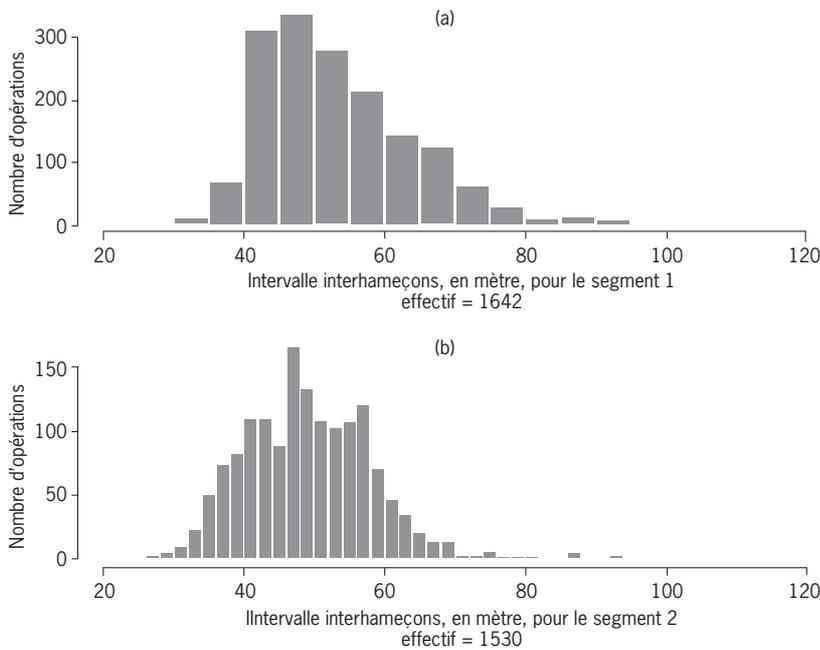


Figure 27 - Distribution des intervalles inter-hameçons après sélection des données (application du critère 2).

Ainsi, il serait intéressant que les pêcheurs reportent dans ces carnets les informations suivantes :

1. Forme du filage (en « U », en « V », en lacets, en ligne) et positions intermédiaires ;
2. Intervalle de temps entre hameçons ;
3. Vitesse de filage du bateau et longueur effective de ligne filée ;
4. Incidents ou événements particuliers influant sur les durées des opérations de pêche ;
5. Informations plus précises sur la dérive et les courants observés.

Plusieurs contraintes influent sur le choix de l'indice d'effort nominal à retenir :

- Facilité de collecte de l'information (il faut que l'information servant à calculer l'effort puisse être directement reportée par le pêcheur) ;
- Disponibilité exhaustive de cette information (tous les filages doivent être renseignés par cette valeur d'effort nominal) ;
- Normalité de la distribution des valeurs d'effort nominal.

Pour ces raisons, la demi-surface de dérive ne semble pas convenir comme variable d'effort opérationnelle. En effet, la transformation logarithmique améliore la distribution des valeurs mais présente le désavantage d'être un indice difficile à manipuler et à interpréter.

Les deux indices les plus pertinents semblent donc être le nombre d'hameçons et la longueur de ligne filée.

Le nombre d'hameçons est une valeur particulièrement explicite et facilement reportée par les pêcheurs. Toutefois, sa distribution est souvent centrée sur quelques valeurs typiques correspondant aux habitudes des professionnels. La distribution est ainsi souvent plurimodale et assez éloignée d'une distribution normale. Une segmentation différente de la flottille pourrait être envisagée.

La longueur de ligne filée pourrait être un indice à retenir, puisqu'elle tient compte intrinsèquement du nombre d'hameçons mais que sa distribution est plus proche d'une distribution normale. La longueur filée a ici été mesurée à partir de l'estimation des vitesses et des durées de filage. Le report de l'information réelle de cette distance ou l'utilisation de la deuxième approche peuvent être envisagés.

L'intervalle interhameçons moyen est calculé à partir de ces deux indices. Il pourrait être utilisé comme indice d'effort mais nécessiterait des analyses complémentaires à partir de valeurs obtenues lors de campagnes expérimentales.

L'ensemble de ces résultats sera pris en compte dans les analyses des interactions entre les captures et les caractéristiques techniques de la pêcherie palangrière réunionnaise (ref. Gaertner *et al.*, p.107-128).

Références bibliographiques

- Bach P., Wendling B., Misselis C., Abbas R., 1999. Forme et comportement de la palangre dérivante monofilament. *In*: ECOTAP. Étude du comportement des thonidés par l'acoustique et la pêche en Polynésie. Rapport final, Convention Territoire/Evaam/Ifremer/Orstom n° 95, chap VI, 289-360.
- Berkeley S.A., Irby E.W., Jolley J.W. Jr., 1983. Florida's commercial swordfish fishery: Longline gear and methods. Univ. of Miami Sea Grant programme, Marine advisory Bulletin. MAP 14, 23 p.

- Carey F.G., Robinson H.B., 1981. Daily patterns in the activities of swordfish, *Xiphias gladius*, observed by acoustic telemetry, Fish. Bull., 79. 277-292.
- Carey F.G., 1990. Further acoustic telemetry observations of swordfish. *In*: Proceedings of the 2nd International Billfish Symposium, Planning the future of billfishes, Research and management in the 90s and beyond, 1-5 Aug. 1988, Kalia-Kona, Hawaii, USA. Stroud R.H. (ed.), National coalition for marine conservation, Inc., Marine Recreational Fisheries, Savannah, Georgia, USA, 103-122.
- Kume S., Joseph J., 1969. Size composition and sexual maturity of billfish caught by the Japanese longline fishery in the Pacific Ocean east of 130°W. Bull. Far. Seas, Fish. Res. Lab. (Shimizu), 2, 115-162.
- Longhurst A., 1998. Ecological geography of the sea. Academic Press, San Diego, USA, 398 p.
- Padfield J., Coward A., 2000. The Mascarene Plateau as described by the OCCAM global ocean model. Southampton Oceanography Centre, Shoals of Capricorne programme, Southampton, England, 62 p.
- Saito S., 1975. On the depth of capture of bigeye tuna by further improved vertical longline in the tropical Pacific. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish, 41, 831-841.

Étude du comportement des principales espèces pélagiques capturées par la pêcherie réunionnaise

François Poisson, Jean-François Reynaud

Ifremer, laboratoire Ressources halieutiques, rue Jean Bertho, BP 60, 97822 Le Port Cedex, La Réunion, France

Introduction

La palangre dérivante horizontale de surface aurait été inventée par les Japonais dès le début du XVIII^e siècle (Jamet, 1981). Cette technique a pris une dimension industrielle¹ dans l'océan Indien dans les années cinquante (Ardill, 1995) en étant pratiquée essentiellement par les Asiatiques. Cet engin permet de quadriller de vastes zones et ainsi d'augmenter les chances de capture des grands pélagiques. Cette technique, qui requiert une main-d'œuvre importante (Jamet, 1981), peut toutefois être adaptée en fonction de la taille du navire et des espèces recherchées. Actuellement, on peut discerner la palangre de surface ou « regular » et la palangre profonde « deep » apparue dès les années soixante-dix (Suzuki & Kume, 1982). Le nombre d'hameçons mis en place entre deux flotteurs ainsi que la longueur des orins de bouée différencient ces deux catégories. De nombreux travaux ont été engagés afin de prédire la profondeur atteinte par les hameçons d'une palangre profonde, Saito (1975) et Hanamoto (1976 *in* Boggs, 1992) démontrant que ce paramètre influait sur les rendements en thons obèses. Les premiers modèles théoriques proposés pour décrire la forme de la palangre et la profondeur des hameçons reposent sur l'hypothèse que la palangre prend dans l'eau une forme géométrique de type caténaire (Yoshihara, 1951, 1954 *in* Bach *et al.*, 1999). Boggs (1992) et Bach *et al.* (1999) ont mis en évidence les limites de ce modèle ne tenant pas compte des facteurs externes, comme le courant qui fait varier ces profondeurs. Bach *et al.* (1999) ont mis au point une méthode simple d'estimation de la profondeur maximale de pêche à partir des coordonnées géogra-

phiques des extrémités de la palangre lors du filage et du virage, de la longueur de ligne filée entre deux bouées et de l'estimation du taux de courbure de la ligne.

La pêcherie palangrière réunionnaise est apparue au début des années quatre-vingt-dix. La totalité des navires a adopté la technique utilisée par la flottille palangrière hawaïenne depuis la fin des années soixante-dix. Cette technique est en fait une modernisation de la technique originale. L'amélioration est due à l'utilisation d'une ligne mère en nylon monofilament mise à l'eau et relevée mécaniquement par un treuil hydraulique. Par ailleurs, pour cibler l'espadon, la ligne est calée en début de nuit, en surface. Le calamar est systématiquement utilisé comme appât et un leurre lumineux est placé à fréquence régulière sur les avançons.

L'objectif de notre étude était d'étudier le comportement des poissons vis-à-vis de l'engin de pêche et d'identifier les corrélations possibles entre les captures et les caractéristiques de l'engin de pêche d'une part, entre les prises et certains facteurs environnementaux, d'autre part.

Ce travail s'appuie sur les résultats d'expérimentations menées à bord des palangriers professionnels réunionnais et du navire de recherche de la Seychelles Fishing Authority (SFA), « *L'Amitié* ». Les mouvements de la palangre et les caractéristiques de « mordage² » des espèces capturées sont enregistrés en instrumentant une fraction de la palangre avec des capteurs (température, pression) et des horloges d'hameçon. Des indices susceptibles d'influer sur la variabilité qualitative et quantitative des captures sont proposés, ils seront pris en compte dans les analyses statistiques ultérieures.

1. Le terme industriel est employé dès lors que les opérations nécessitent l'utilisation d'engin mécanique pour le relevage de la ligne ainsi qu'un système de réfrigération du poisson à bord.

2. Mordage : action d'attaque d'un poisson sur un hameçon.

Instrumentation de la palangre et protocole de l'expérimentation

Les horloges d'hameçon

La palangre a été instrumentée avec des horloges d'hameçons « prototypes » construites par la société Micrel (<http://www.micrel.fr>). Depuis le début de cette étude, ce produit a été amélioré. Ainsi, quatre générations d'horloges ont pu être testées. Néanmoins, le principe de fonctionnement reste le même. Les caractéristiques de chacun de ces quatre produits seront exposées ultérieurement (p. 101).

Description et mise en place de l'instrument

Ces horloges sont constituées d'un bloc de résine époxy dans lequel sont inclus une montre et un contacteur magnétique. Sur la partie supérieure est fixé un bouchon amovible muni d'un aimant. En position de veille, ces deux parties sont solidaires. L'aimant active le contacteur magnétique, jouant le rôle d'interrupteur. La mise en marche de l'horloge intervient lorsque, sous l'effet d'une tension (supérieure à 4 kg), le bouchon est ôté (fig. 1). L'horloge mesure le temps séparant le moment où le poisson mord à l'hameçon et l'instant où celui-ci est monté à bord. L'initialisation de l'horloge a lieu lorsque le bouchon est remis en place.

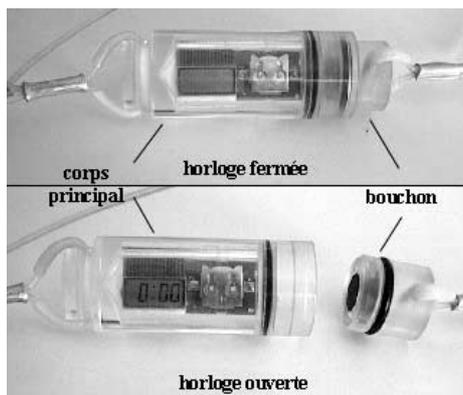


Figure 1 - Horloge d'hameçon en position de veille et en état de marche.

Une agrafe (A) ou « snap » est montée sur la partie fixe de l'horloge. L'avançon est de la même façon agrafé dans la boucle située à l'autre extrémité, côté bouchon (C) (fig. 2). Ce montage permet d'accrocher le dispositif directement sur la ligne mère en amont de l'avançon et aux opérateurs de s'insérer dans l'opération de mise à l'eau des hameçons sans gêner le travail des marins.

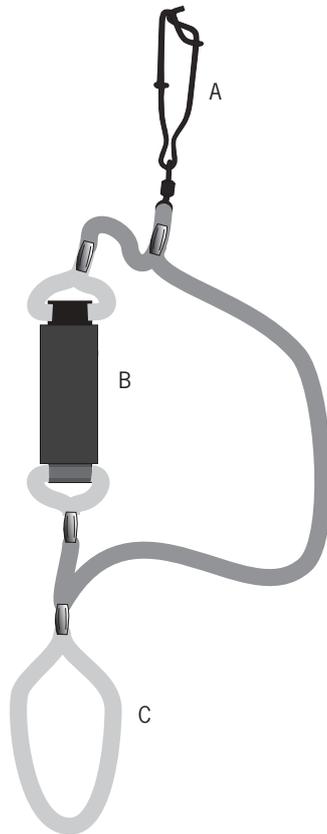


Figure 2 - Schéma de montage d'une horloge d'hameçon ; A : agrafe, B : corps de l'horloge, C : boucle. (Dessin : M. Taquet).

Protocole de mise à l'eau et de récupération des horloges

Lors du filage de la partie instrumentée, le rang (ou numéro) de chaque avançon équipé d'une horloge ainsi que l'heure de sa mise à l'eau (HF) sont relevés. Pendant la phase de virage, l'heure de récupération (HR) de chaque horloge déclenchée, l'heure enregistrée par l'instrument (HT) de même que son rang sont notés.

On considère, pour les horloges d'hameçon déclenchées sans capture associée, qu'un poisson est réellement venu attaquer l'hameçon si le déclenchement a eu lieu :

- lors de la phase finale de virage, plus d'une minute avant la récupération ;
- dans la phase initiale de filage ; plus de deux minutes après le filage.

Le poisson est considéré comme capturé uniquement s'il est ramené à bord ou si l'espèce est clairement identifiée dans le cas où l'animal s'échappe en surface. Dans le cas contraire, on qualifiera l'espèce de poisson à l'origine du mordage d'« inconnue³».

3. Inconnue : déclenchement de l'horloge, heure de capture enregistrée sans prise.

La figure 3 représente de manière schématique la chronologie des différentes opérations liées à l'expérimentation et les différentes informations obtenues.

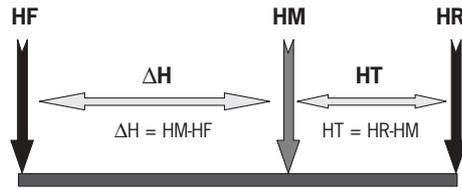


Figure 3 - les différentes heures liées aux opérations de pêche et d'instrumentation.

Avec :

- **HF** = heure de filage ou de mise à l'eau de l'horloge d'hameçons
- **HM** = heure de mordage de l'animal
- **HR** = heure de récupération de l'instrument
- **ΔH** = intervalle de temps séparant la mise à l'eau de l'instrument et la capture d'un poisson
- **HT** = heure enregistrée par le « hook-timer » au moment du virage. Équivaut à l'intervalle de temps séparant l'instant de la capture et le moment de la récupération

Les capteurs pression-température Détermination de la profondeur atteinte par la ligne

Les capteurs PT de type TX de marque Vemco minilog-T permettent de mesurer simultanément la température et la profondeur. L'heure de début des enregistrements et la fréquence des mesures sont programmées à l'avance. Les opérations d'initialisation ainsi que la lecture des enregistrements s'effectuent par l'intermédiaire d'un



Figure 4 - Initialisation et transfert des données issues des capteurs pression-température.

micro-ordinateur, d'une interface de marque Vemco et d'un logiciel adapté provenant du même constructeur (fig. 4). La première version de l'application Vemco Software et l'interface fonctionnaient sur PC en mode MS-Dos®. Une nouvelle version du logiciel (Minilog v3.04) fonctionne désormais sous Windows 98® et permet la création instantanée de graphes après importation des données par l'interface de même que l'extraction de fichiers numériques (format ASCII).

Sur les segments instrumentés de la palangre, tous les avançons sont équipés d'horloges. Les capteurs ont été placés généralement en milieu de segment pour connaître la profondeur maximale atteinte par la ligne. La figure 5 indique les autres emplacements choisis sur l'engin de pêche :

- sur la ligne mère, à la base de l'orin de bouée,
- sur la ligne mère près du point d'attache des avançons,
- directement sur l'avançon, à 2 m environ de l'hameçon.

Lors du filage, le numéro de la sonde et sa position sur la ligne sont consignés.

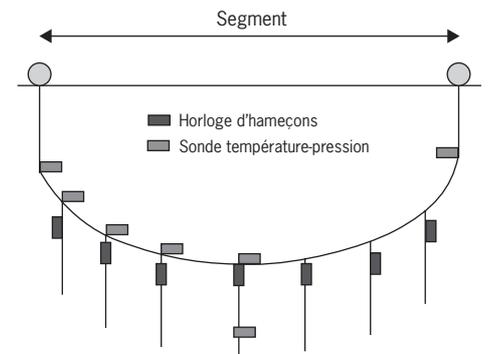


Figure 5 - Différents positionnements des horloges et capteurs sur les segments instrumentés.

Pour chacun des filages instrumentés réalisés, la position de l'instrument est parfaitement définie par rapport au reste de la ligne. L'ensemble des informations est reporté sur un formulaire spécifique. Sur cette fiche, figurent la référence de chacune des sondes, le nombre d'hameçons par segment, la longueur des orins de bouées utilisés, les heures de mouillage et de récupération du matériel. Chaque capture est aussi signalée sur ce tableau.

Leurre lumineux et appâts

Considéré comme une évolution majeure pour la pêche à l'espadon, le leurre lumineux ou Cyalume™⁴ a été expérimenté pour la première fois en 1976 en Floride (Berkeley *et al.*, 1983). Le leurre lumineux aurait un pouvoir attractif sur l'espadon ainsi que sur ses proies, notamment les calmars. Le leurre lumineux de marque Easy-Light® utilisé à La Réunion est un petit tube cylindrique d'une quinzaine de centimètres de hauteur et d'environ 1 cm de diamètre. Il est fixé directement sur l'avançon, à un mètre de l'hameçon. L'activation est réalisée par mise en contact de deux produits chimiques contenus dans le corps en plastique et séparés par une cloison brisée au moment de la mise en place de celui-ci. La réaction est immédiate, le mélange obtenu est luminescent (fluorescence). La durée de cette réaction est d'une douzaine d'heures environ.

Dans le cadre de cette étude, les avançons instrumentés ont tous été équipés d'un leurre lumineux, la portion non instrumentée étant toujours équipée d'un leurre tous les trois hameçons. Le calamar a systématiquement été utilisé comme appât au cours de ces tests et sur toute la longueur de la ligne.

Gréement de la ligne

Les expérimentations ayant lieu sur des navires professionnels, le gréement de la ligne instrumentée se fait en adéquation avec le reste de l'engin de pêche pour ne pas entraver le travail de l'équipage. Néanmoins, tous les hameçons employés sont demeurés identiques (« J hook », forme en J). La longueur des avançons était de 10 brasses. Au cours d'une même opération de pêche, l'ensemble des hameçons instrumentés ont été gréés sur des portions avec des longueurs d'orin homogènes. Dans quelques cas, ce critère n'a pu être respecté.

Zone d'étude

La zone d'étude se situe essentiellement aux abords de La Réunion et sur la côte est de Madagascar, soit globalement entre 48° et 58° de longitude est et entre 19° et 25° de latitude sud. La majorité des expérimentations

(151) ont été effectuées lors d'embarquements à bord de palangriers professionnels réunionnais entre le 1^{er} mai 1998 et le 24 novembre 2000. Dans le cadre de la coopération avec la Seychelles Fishing Authority, 2 campagnes ont été effectuées dans les eaux seychelloises (entre 57 et 58,2° de longitude est et entre 3 et 4,2° de latitude sud). Les positions de l'ensemble des stations d'expérimentations, notées à la position de départ de la ligne de pêche lors du filage, sont présentées sur la carte suivante (fig. 6).

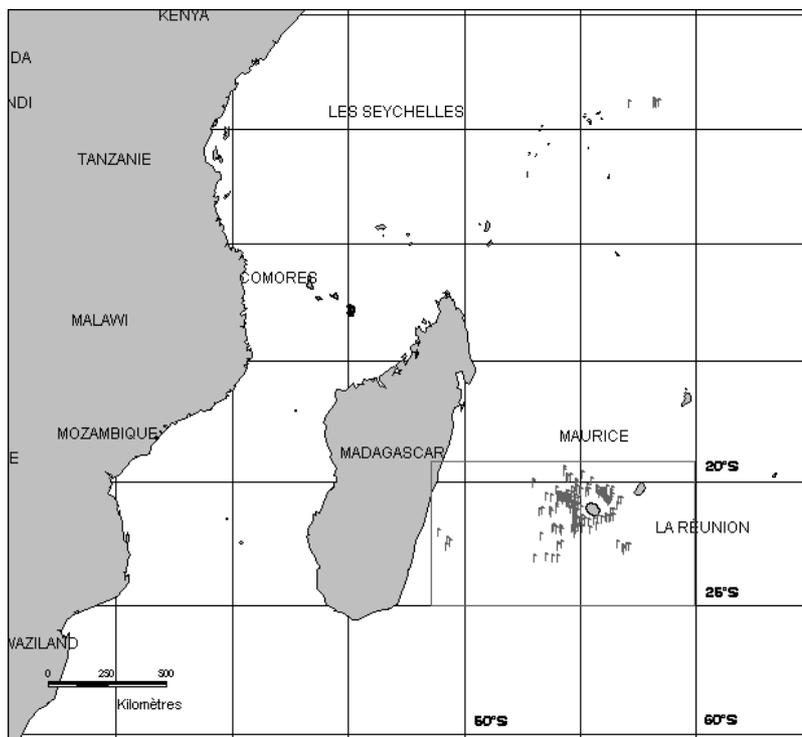


Figure 6 - Positions géographiques des palangriers instrumentés (chaque symbole identifie une opération de pêche).

Campagnes expérimentales

Au total, 28974 horloges d'hameçons ont été placées au cours des 160 filages de palangriers instrumentés. Le tableau 1 récapitule, pour chacune des campagnes de pêche, le code du navire, les dates de départ et d'arrivée au port, le nombre de jours de mer et le nombre de filages suivis correspondants ainsi que le nombre d'horloges disposées.

4. Marque déposée de American Cyanamid Compagny.

Tableau 1 - Bilan des marées expérimentales entre mai 1998 et novembre 2000.

Code bateau	Marée	Date début	Date fin	Nb jours de mer	Nombre filages	Nombre d'horloges
18	967	30-mai-98	6-juin-98	8	8	1172
18	960	9-juin-98	16-juin-98	8	8	1057
19	961	26-juin-98	1 ^{er} -juil-98	6	5	665
18	995	29-juil-98	10-août-98	13	9	1205
44	1156	13-jan-99	17-jan-99	5	4	552
44	1181	4-mars-99	7-mars-99	4	4	488
33	1219	27-mars-99	6-avr-99	11	10	1206
44	1256	20-avr-99	25-avr-99	6	5	450
44	1261	14-juin-99	21-juin-99	8	6	1800
44	1267	1 ^{er} -sep-99	5-sep-99	5	4	1176
53	1411	12-nov-99	13-nov-99	2	1	61
3	1438	17-nov-99	21-nov-99	5	3	198
33	1453	25-nov-99	1 ^{er} -déc-99	7	4	888
33	1454	9-déc-99	19-déc-99	11	7	1370
31	1455	14-déc-99	20-déc-99	7	5	1063
33	1517	12-jan-00	18-jan-00	7	3	1222
13	1522	1 ^{er} -fév-00	3-fév-00	3	2	480
3	1524	21-fév-00	24-fév-00	4	3	516
1	1555	11-mars-00	16-mars-00	6	4	855
55	1541	30-mars-00	31-mars-00	2	1	124
56	1557	5-avr-00	11-avr-00	7	6	1335
41	1592	15-avr-00	19-avr-00	5	5	1307
41	1598	18-mai-00	24-mai-00	7	6	1379
41	1666	7-juin-00	10-juin-00	4	3	616
41	1695	2-août-00	6-août-00	5	3	660
41	1692	11-août-00	14-août-00	4	3	692
41	1707	18-sep-00	23-sep-00	6	5	1134
41	1708	26-sep-00	2-oct-00	7	6	707
58	1725	12-oct-00	19-oct-00	8	6	1719
41	1710	13-oct-00	19-oct-00	7	6	685
41	1716	21-oct-00	27-oct-00	7	6	672
58	1750	23-oct-00	27-oct-00	5	3	860
41	1751	24-nov-00	2-déc-00	9	6	660
				209	160	28974

Données de pêche et données expérimentales collectées en mer

Depuis 1993, l'Ifremer distribue à l'ensemble des patrons pêcheurs des carnets de pêche confidentiels (voir p. 11) dans lesquels il leur est demandé de consigner les renseignements relatifs à leur activité (positions géographiques de la palangre au filage et au virage, informations sur le gréement de la ligne, effort, prises...). Ces informations sont régulièrement saisies dans la base de données relationnelle gérée sous Access®. Outre ces informations,

l'opérateur embarqué enregistre sur un formulaire les données spécifiques à l'expérimentation : horaires de mise à l'eau et de récupération des instruments, position des sondes, mensurations et sexe des individus pêchés, état de l'animal lors de la remontée à bord (vivant ou mort). Lors de la capture d'un espadon, des observations spécifiques à l'étude de la reproduction et de la croissance sont reportées dans le formulaire Données biologiques (voir p. 12). L'ensemble de ces données est également saisi dans la base de données gérée sous Access® (chapitre I).

Définition de l'indice de marée PM

Afin de situer le moment de la capture par rapport au cycle de la marée, un indice est établi. Ainsi, pour chaque position de pêche, les heures de pleine mer (PM) et de basse mer (BM) ont été fournies par le Shom⁵.

Exemple du mercredi 17 janvier 2001 :

Janvier 2001 système horaire : UT + 0.0

21 26 S 54 30 E mer 17 I=023

PM 3 h 17 0,50 m

BM 10 h 12 0,35 m

PM 16 h 16 0,44 m

BM 22 h 12 0,35 m

Pour situer le mordage par rapport à la marée, l'écart (E) entre deux pleines mers pour une journée a été établi par défaut à 12 heures ; 12 classes d'heures séparent alors les deux pleines mers. L'heure de mordage est positionnée entre ces deux bornes (de PM à PM + 12), en considérant le temps (heure) écoulé entre l'instant du mordage et l'heure de pleine mer la plus proche. Cet indice est noté **pmX** (**pm** pour pleine mer et **X** pour la classe d'heure suivant cet instant).

Le calcul de l'écart (E) entre le mordage et la pleine mer se fait par simple différence entre les deux horaires. La valeur E est arrondie à sa borne inférieure pour le calcul de la variable **pm**. Selon la position du mordage par rapport à la pleine mer la plus proche, le calcul s'inverse afin de ne pas avoir de valeur négative :

- si $HM > H_{pm} \Rightarrow E = HM - H_{pm}$

- si $HM < H_{pm} \Rightarrow E = H_{pm} - HM$

(avec HM = Heure de mordage

et H_{pm} = Heure de pleine mer).

5. Shom : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

Suivant la position de HM, la méthode pour obtenir l'indice pm est différente :

- si $HM > H_{pm} \Rightarrow E = HM - H_{pm}$
 $\Rightarrow P_m = 1 +$ heure entière de l'écart E
- si $HM < H_{pm} \Rightarrow E = H_{pm} - HM$
 $\Rightarrow P_m = 12 -$ heure entière de l'écart E

Cette méthode permet de situer directement le mordage par rapport à une heure de pleine mer et de déterminer rapidement si la capture a eu lieu en phase de marée montante, descendante ou en phase d'étales selon la valeur de la classe d'heure qui suit la pleine mer (pmX).

Les données fournies par le Shom ont été transmises en format texte (.txt) puis ressaisies sous Excel® afin de pouvoir leur appliquer des fonctions. De la sorte, les calculs établis pour obtenir l'écart E puis l'indice pm ont pu être automatisés pour toutes les positions de capture disponibles. Une fois la saisie des données effectuée et vérifiée, l'ensemble du fichier Excel® est importé sous Access® dans une nouvelle table.

Méthode de pondération de l'effort

Les valeurs d'effort horaire sur les différents cycles proposés sont calculées.

Effort par cycle journalier

Pour les heures correspondant à la phase de dérive de l'engin, le nombre d'hameçons est considéré constant et égal au nombre total d'hameçons déployés pendant l'opération de pêche (N). Nous avons estimé que le nombre d'hameçons pendant les phases de filage et de virage était de N/2. La distribution de fréquence de l'effort de pêche, par tranche horaire, sur un cycle journalier, est représentée pour l'ensemble des campagnes (fig. 7). L'effort s'étale sur toute la journée mais est, compte tenu de la technique adoptée, prédominant durant la phase nocturne. Ainsi, 64 % de l'effort est concentré entre 19 h et 6 h du matin.

Effort en fonction des heures de pleine mer

Le nombre d'hameçons a été réparti par heure de marée en suivant la même logique que celle exposée dans le paragraphe précédent. La figure 8 montrant la répartition du nombre d'hameçons par tranche horaire met en évidence une homogénéité de l'effort sur tout le cycle.

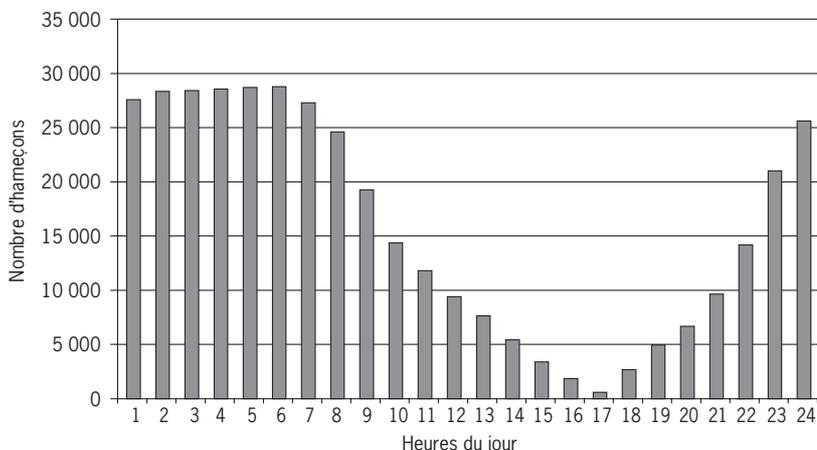


Figure 7 - Répartition de l'effort de pêche total par tranche horaire (hameçon-heure) sur un cycle journalier pour les 160 opérations de pêche.

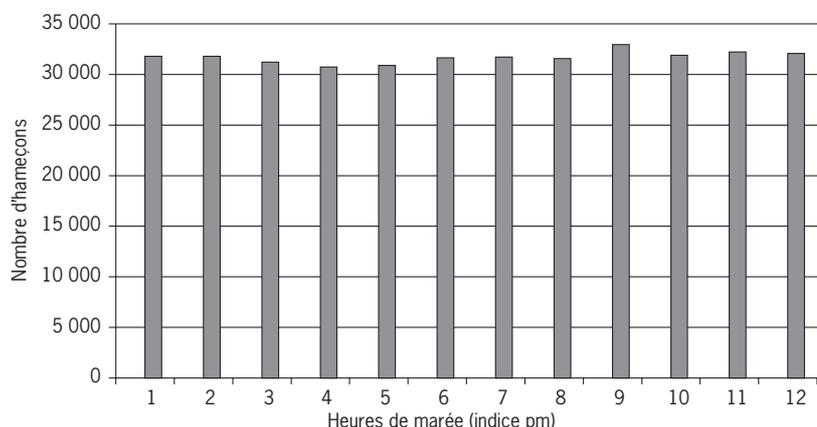


Figure 8 - Répartition de l'effort en fonction du cycle des marées.

Résultats

Efforts

Jours de mer

La figure 9 ci-contre représente le nombre de jours de mer effectués par les observateurs depuis le début du PPR. Les périodes sans instrumentation sont essentiellement dues à la mise en œuvre des modifications apportées aux instruments encore à l'état de prototype (cf. p. 101, Efficacité du matériel) ou à l'impossibilité pour les agents d'embarquer (périodes de forts alizés, dépressions tropicales...). Répartie sur la période d'acquisition de données (mai 1998 à décembre 2000), la moyenne des nombres de jours embarqués par mois est de 8,6.

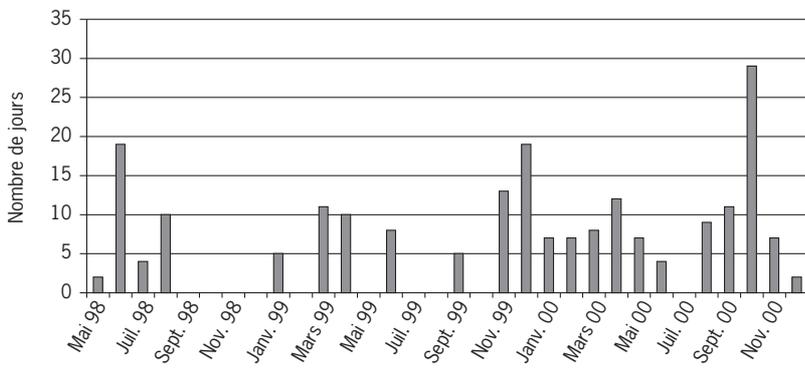


Figure 9 - Distribution des jours de mer effectués entre mai 1998 et décembre 2000.

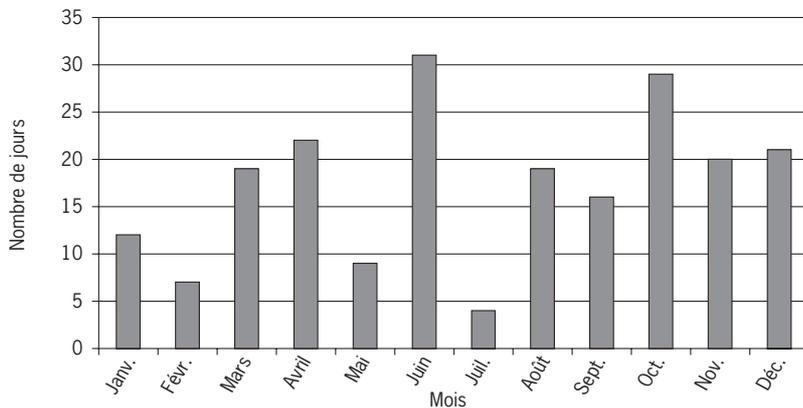


Figure 10 - Distribution en mois cumulés du nombre de jours de mer effectués.

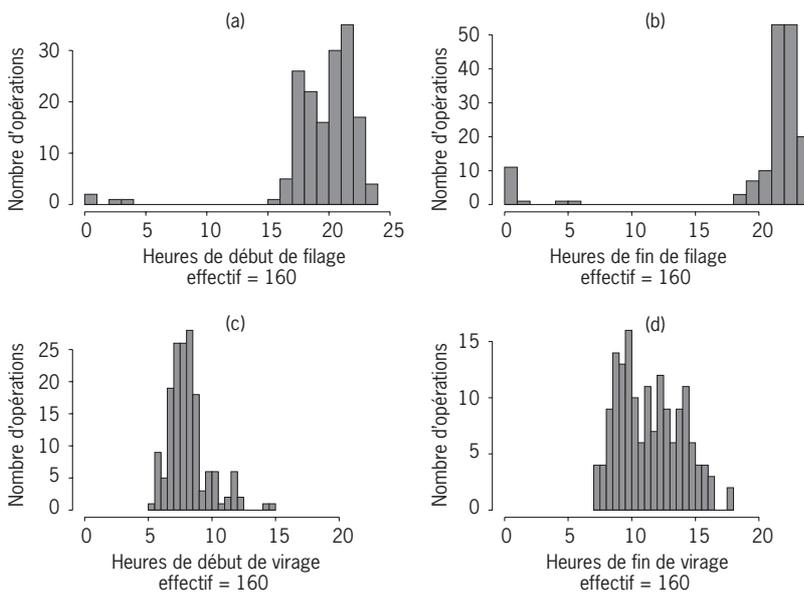


Figure 11 - Distribution des heures des différentes étapes de l'opération de pêche pour l'ensemble des filages expérimentaux (heures de début et fin de filage, heures de début et fin de virage).

En cumulant par mois les données obtenues entre mai 1998 et décembre 2000 (fig. 10), il apparaît que tous les mois de l'année ont été échantillonnés, avec cependant un nombre de jours plus faible lors des périodes où les conditions de mer sont moins favorables aux expérimentations en mer (dépressions tropicales en été, fronts froids en hiver). Le nombre moyen de jours de mer par mois cumulé est de 17,4 jours.

Répartition de l'effort

Les informations reportées dans les carnets de pêche ont permis de décrire les différentes étapes de l'opération de pêche pour l'ensemble de la ligne : phase de mise à l'eau, phases de dérive et de récupération de la palangre.

L'opération de mise à l'eau des horloges a lieu en fin de journée, deux pics permettent de dissocier les filages effectués soit juste avant la tombée du jour (aux alentours de 18 h), soit en début de nuit, vers 22 h (fig. 11a). Les heures de fin de filage se répartissent majoritairement entre 19 h et une heure du matin (fig. 11b). Pour les filages tardifs, cette opération se termine à l'aube (marées effectuées aux Seychelles). La récupération des horloges a eu lieu généralement en début de matinée entre 7 et 9 h (fig. 11c).

La distribution des heures de fin de virage s'étend de 6 à 18 h (fig. 11d). La valeur à 18 h correspond à des situations particulières lors de cette phase (rupture de la ligne mère, emmêlement des lignes, mauvaises conditions météorologiques...).

Nombre d'hameçons et d'horloges mouillés

Le nombre d'horloges mises à l'eau par filage est variable selon les campagnes. Le tableau 2 permet de comparer les efforts respectifs des parties instrumentées et non instrumentées.

En moyenne, 181 horloges ont été placées par filage, l'effort pour la partie instrumentée correspond à 16,4 % de l'effort total pour l'ensemble des campagnes. Les pourcentages les plus importants correspondent aux deux marées expérimentales (marées 1725 et 1750) menées sur le navire de la SFA.

Tableau 2 - Bilan de l'effort de pêche par marée, en nombre d'hameçons, sur les parties instrumentées et non instrumentées : nombre total d'horloges (HT) déployées pendant la marée, nombre moyen d'horloges par filage, nombre total et moyen d'hameçons.

Marée	Date début	Effort total avec HT	Effort/filage avec HT	Effort total sans HT	Effort/filage sans HT	% horloge	Effort total	Effort total par filage
967	30/05/98	1172	147	11100	1388	9,6	12272	1534
960	9/06/98	1057	132	10750	1344	9,0	11807	1476
961	26/06/98	665	133	9000	1800	6,9	9665	1933
995	29/07/98	1205	134	12260	1362	8,9	13465	1496
1156	13/01/99	552	138	3240	810	14,6	3792	948
1181	4/03/99	488	122	3872	968	11,2	4360	1090
1219	27/03/99	1206	121	13050	1305	8,5	14256	1426
1256	20/04/99	450	90	5050	1010	8,2	5500	1100
1261	14/06/99	1800	300	6480	1080	21,7	8280	1380
1267	1/09/99	1176	294	3144	786	27,2	4320	1080
1411	12/11/99	61	61	169	169	26,5	230	230
1438	17/11/99	198	66	2682	894	6,9	2880	960
1453	25/11/99	888	222	4372	1093	16,9	5260	1315
1454	9/12/99	1370	196	7800	1114	14,9	9170	1310
1455	14/12/99	1063	213	4637	927	18,6	5700	1140
1517	12/01/00	1222	407	1380	460	47,0	2602	867
1522	1/02/00	480	240	1720	860	21,8	2200	1100
1524	21/02/00	516	172	984	328	34,4	1500	500
1555	11/03/00	855	214	2915	729	22,7	3770	943
1541	30/03/00	124	124	176	176	41,3	300	300
1557	5/04/00	1335	223	4135	689	24,4	5470	912
1592	15/04/00	1307	261	3397	679	27,8	4704	941
1598	18/05/00	1379	230	4321	720	24,2	5700	950
1666	7/06/00	616	205	2048	683	23,1	2664	888
1695	2/08/00	660	220	2040	680	24,4	2700	900
1692	11/08/00	692	231	1935	645	26,3	2627	876
1707	18/09/00	1134	227	3392	678	25,1	4526	905
1708	26/09/00	707	118	4932	822	12,5	5639	940
1725	12/10/00	1719	287	295	49	85,4	2014	336
1710	13/10/00	685	114	4946	824	12,2	5631	939
1716	21/10/00	672	112	5812	969	10,4	6484	1081
1750	23/10/00	860	287	290	97	74,8	1150	383
1751	24/11/00	660	110	4755	793	12,2	5415	903
		28974	181,1	147079	26931	16,4	176053	33079

La figure 12 présente les efforts respectifs cumulés par mois pour chaque portion de ligne. Le nombre d'hameçons total mis à l'eau lors d'une campagne variant beaucoup selon la catégorie du navire et les filages, il est intéressant de comparer le pourcentage d'horloges immergées par rapport au nombre total d'hameçons mis à l'eau, soit l'effort total mis en œuvre lors des opérations de pêche expérimentale.

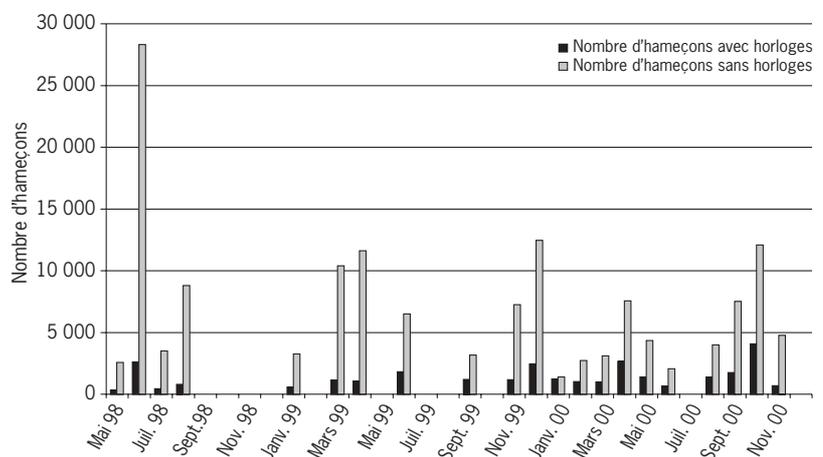


Figure 12 - Distribution comparée du nombre d'hameçons avec et sans horloges.

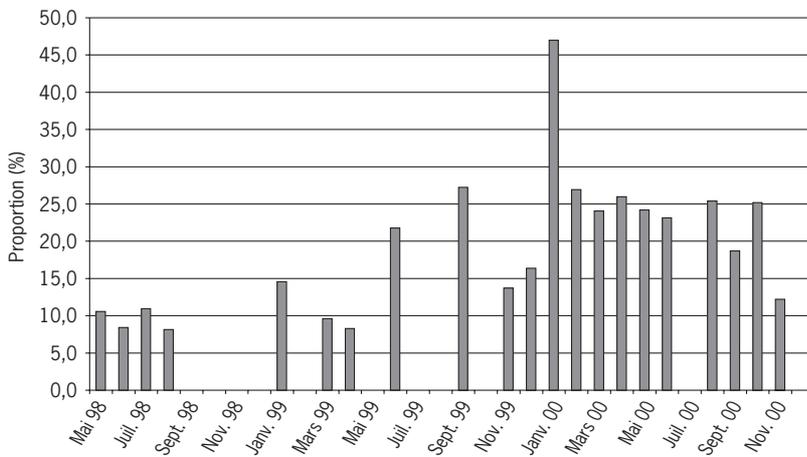


Figure 13 - Distribution de la proportion entre le nombre d'horloges et l'effort total en mois/année.

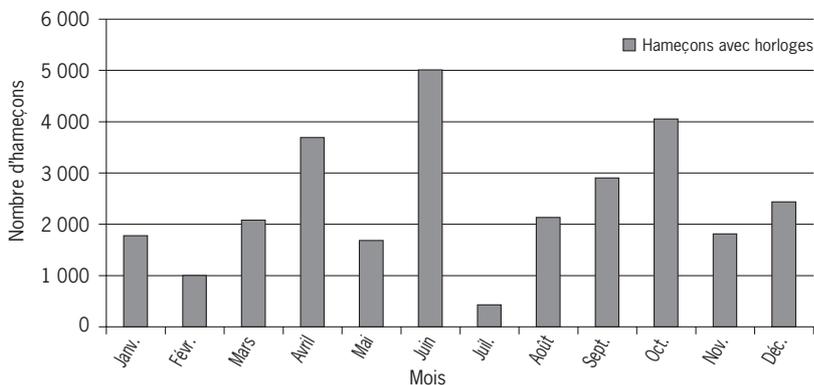


Figure 14 - Effort mensuel.

La distribution du pourcentage d'instrumentation sur toute la période d'expérimentation illustre l'intensification de l'effort d'échantillonnage à partir de novembre 1999 et la régularité des sorties pendant la dernière phase de la période de collecte des données (fig. 13). Seuls les mois de juillet et décembre 2000 n'ont pas été échantillonnés. En moyenne, 905 horloges ont été mouillées par mois.

Le nombre d'horloges mises à l'eau a ensuite été cumulé par mois (fig. 14).

L'effort d'échantillonnage n'est pas constant, les mois de février et juillet ont été sous-échantillonnés. Ces deux mois sont caractérisés par des conditions météorologiques particulièrement difficiles (dépressions tropicales ou forts alizés).

Prises

Bilan des prises

Depuis le début de cette étude, 837 spécimens ont été capturés sur des avançons instrumentés. Le tableau 3 présente le nombre d'individus et le taux de représentation pour chacune des espèces. Seuls les cas pour lesquels l'information sur l'heure de mordage a pu être validée ont été retenus.

Tableau 3 - Tableau récapitulatif des espèces capturées en nombre et en pourcentage.

Nom	Genre	Espèce	Nombre d'individus	Pourcentage
Espadon	<i>Xipbias</i>	<i>gladius</i>	389	46,5
Peau bleue	<i>Prionace</i>	<i>glauca</i>	92	11
Patudo	<i>Thunnus</i>	<i>obesus</i>	86	10,3
Germon	<i>Thunnus</i>	<i>alalunga</i>	79	9,4
Albacore	<i>Thunnus</i>	<i>albacares</i>	66	7,9
Dorade	<i>Coryphaena</i>	<i>bippurus</i>	48	5,7
Requin océanique	<i>Carcharinus</i>	<i>longimanus</i>	17	2
Autres espèces	-	-	14	1,7
Raie	<i>Dasyatis</i>	<i>violacea</i>	12	1,4
Autres requins			9	1,1
Voilier	<i>Istiophorus</i>	<i>platypterus</i>	7	0,8
Requin marteau	<i>Sphyrna</i>	spp.	4	0,5
Marlin noir	<i>Makaira</i>	<i>indica</i>	3	0,4
Escolier noir	<i>Lepidocybium</i>	<i>flavobrunneum</i>	3	0,4
Marlin bleu	<i>Makaira</i>	<i>mazara</i>	2	0,2
Thon banane	<i>Acanthocybium</i>	<i>solandri</i>	2	0,2
Requin mako	<i>Isurus</i>	<i>oxyrinchus</i>	2	0,2
Barracuda	<i>Sphyrna</i>	<i>barracuda</i>	1	0,1
Tortue	-	-	1	0,1
Total des captures			837	100
Espèces inconnues			1301	60,9
Total des mordages			2138	

L'espadon est la première espèce pêchée avec 389 individus soit 46,5 %, suivi de loin par le requin peau bleue et le patudo avec des pourcentages respectifs de 11 et 10,3 %. Le germon et l'albacore interviennent ensuite pour 9,4 et 7,9 %. Le nombre de déclenchements sans capture est prédominant et représente près de 61 % des cas. Dans ce document, nous présenterons les résultats obtenus pour les espèces dominantes (espadon, peau bleue, patudo, germon, albacore, dorade coryphène) mais aussi, dans certains cas, pour la catégorie notée « inconnue ».

Prises en fonction du temps de mise à l'eau de l'hameçon

Pour exprimer les résultats obtenus, deux types de représentations ont été choisis. Les figures suivantes présentent, pour les différentes espèces, la répartition des captures à partir de l'heure de mouillage de l'hameçon et le pourcentage cumulé des prises en fonction de cette durée. Ces analyses permettent de traduire dans une certaine mesure la réaction des individus de chaque espèce vis-à-vis de l'appât.

Espadon

La représentation de la répartition des captures à partir de l'heure de mouillage de l'hameçon indique que 60 % des espadons mordent dans les quatre premières heures qui suivent la mise à l'eau, dont 17 % dès la première heure (fig. 15). Les effectifs diminuent puis se stabilisent ensuite au cours du temps.

Peau bleue

Aucune tendance nette n'est observée dans le cas du requin peau bleue (fig. 16).

Patudo

La tendance de la courbe pour le patudo se rapproche de celle de l'espadon. Ainsi, près de 21 % des individus sont pris dans l'heure qui suit la mise à l'eau, plus de la moitié des prises s'effectue dans les quatre premières heures (fig. 17).

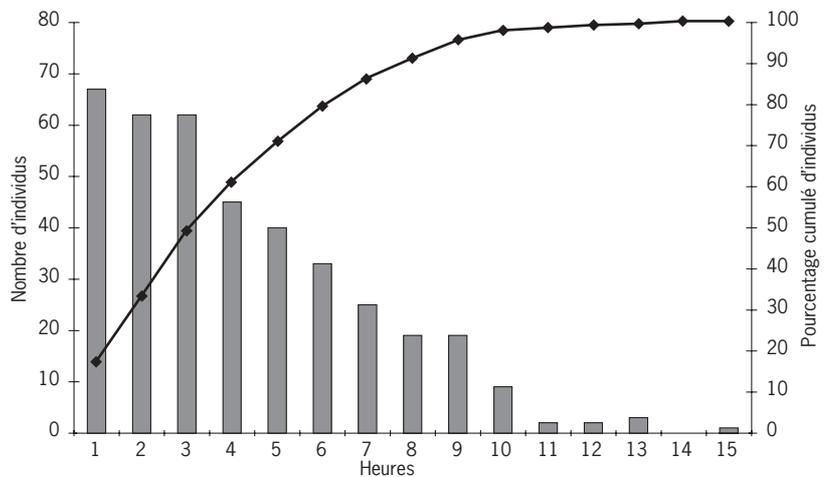


Figure 15 - Pourcentage cumulé des prises d'espadon en fonction du temps de mise à l'eau.

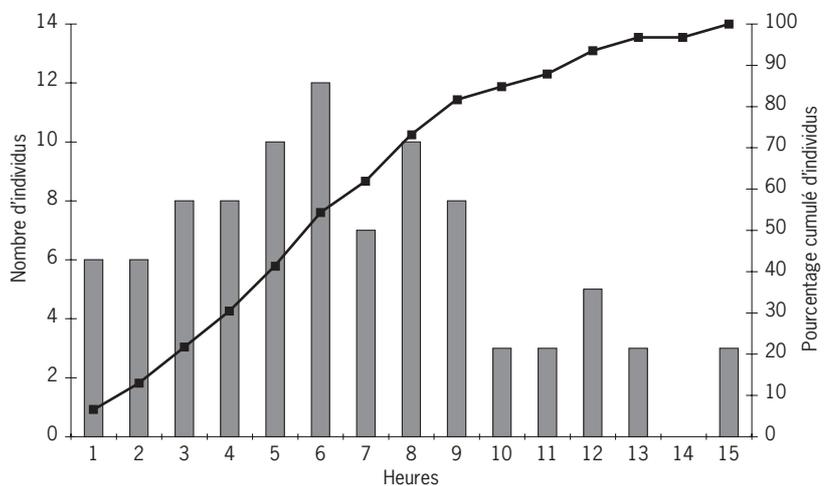


Figure 16 - Pourcentage cumulé des prises de requin peau bleue en fonction du temps de mise à l'eau.

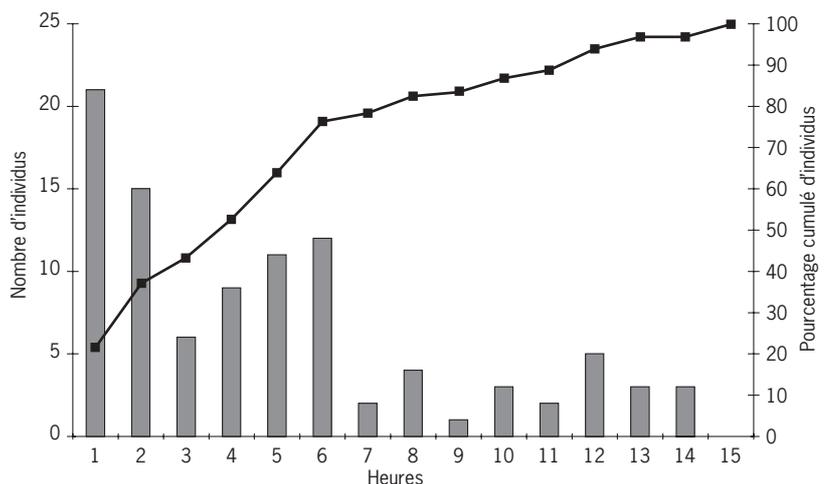


Figure 17 - Pourcentage cumulé des prises de patudo en fonction du temps de mise à l'eau.

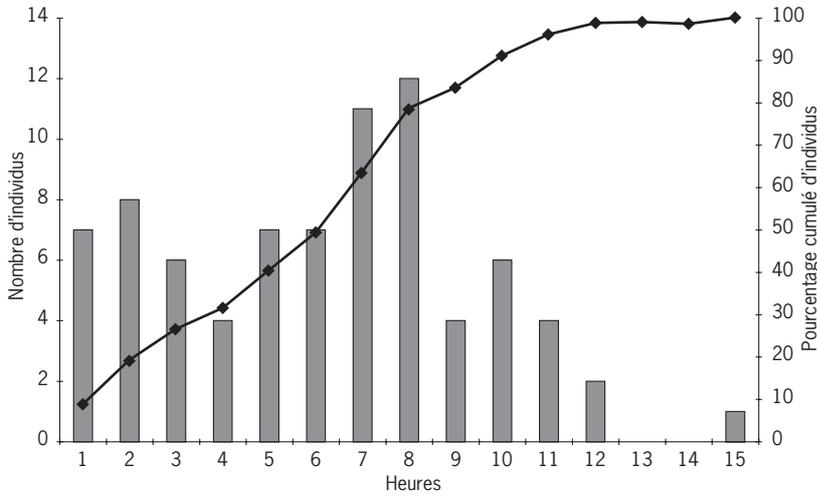


Figure 18 - Pourcentage cumulé des prises de germon en fonction du temps de mise à l'eau.

Germon

Aucune tendance nette n'est observée dans le cas du germon (fig. 18).

Dorade

Les résultats obtenus pour la dorade diffèrent réellement de ce qui peut être observé sur les autres espèces, la majorité des prises est observée après huit heures de mise à l'eau (fig. 19).

Inconnue

La moitié des mordages enregistrés sans capture de poissons ont lieu dans les quatre premières heures (fig. 20).

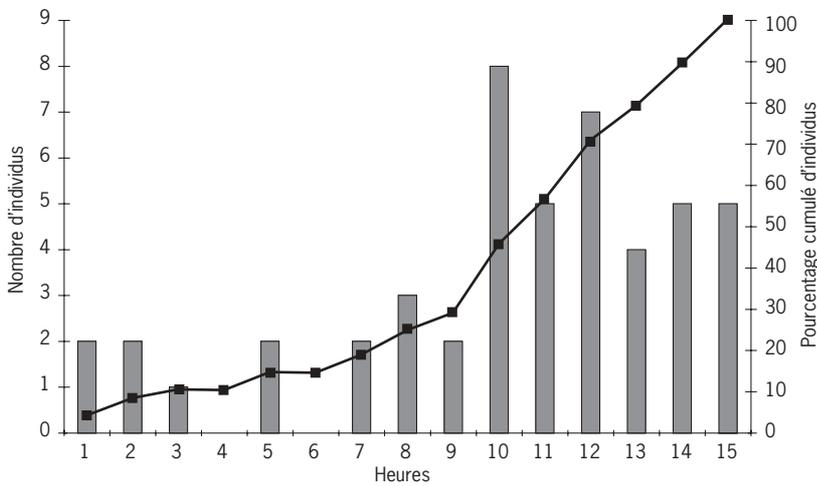


Figure 19 - Pourcentage cumulé des prises de dorade en fonction du temps de mise à l'eau.

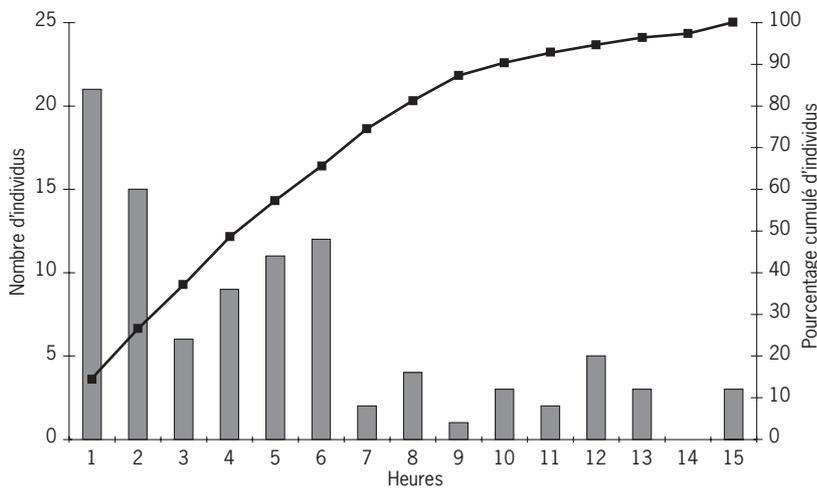


Figure 20 - Pourcentage cumulé des prises d'espèces inconnues en fonction du temps de mise à l'eau.

Rendements

Rendements en fonction du cycle des marées

Les figures suivantes présentent les rendements moyens par heure de la marée. Ils correspondent à la somme des captures spécifiques pour chaque heure de la marée

(cycle de 12 h), divisée par l'effort total en nombre d'hameçons pour chaque heure de la marée et multipliée par 1 000.

Les rendements en espadons et en patudos semblent augmenter à partir de la septième heure, soit en phase montante de la marée.

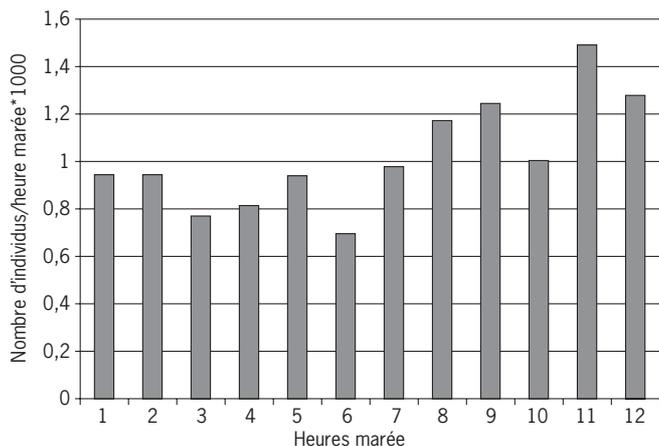


Figure 21 - Rendements en espadon par heure de la marée.

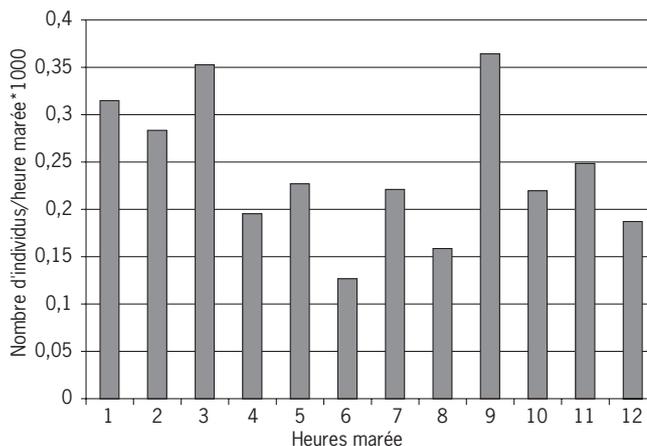


Figure 22 - Rendements en peau bleue par heure de la marée.

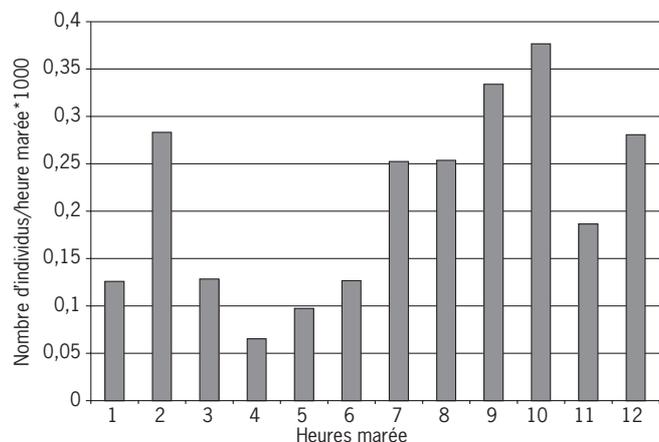


Figure 23 - Rendements en patudo par heure de la marée.

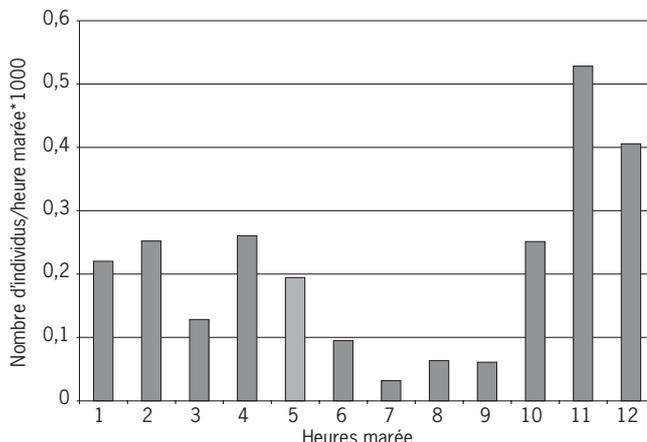


Figure 24 - Rendements en germon par heure de la marée.

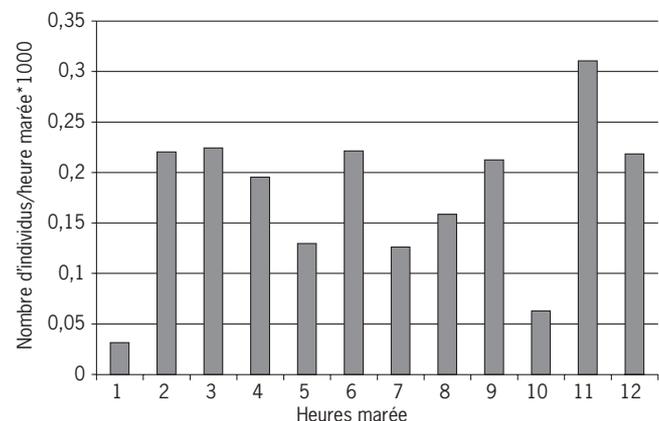


Figure 25 - Rendements en albacore par heure de la marée.

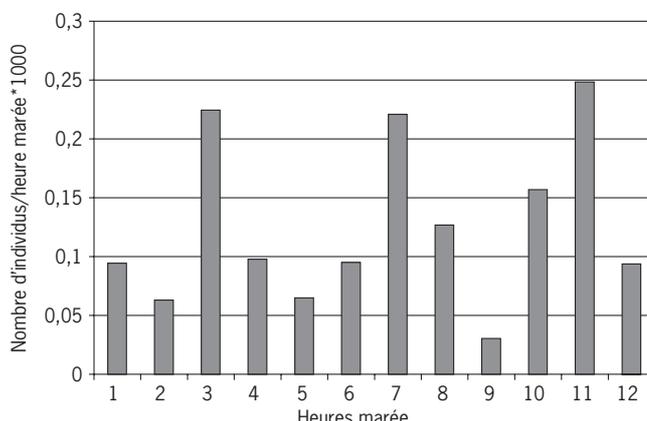


Figure 26 - Rendements en dorade par heure de la marée.

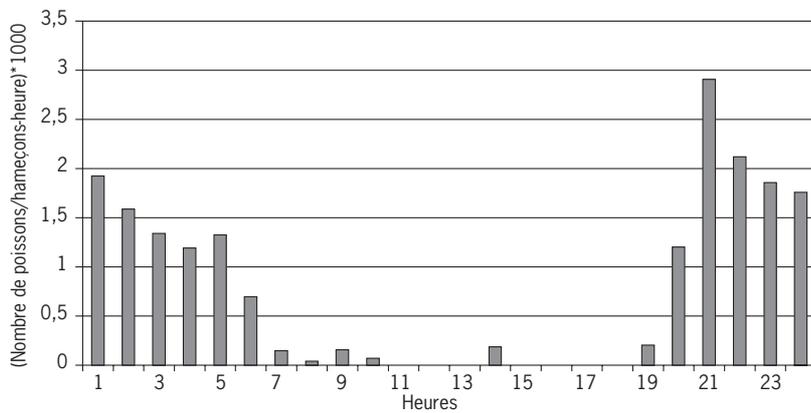


Figure 27 - Rendements en espadon par hameçon-heure en fonction de l'heure du jour.

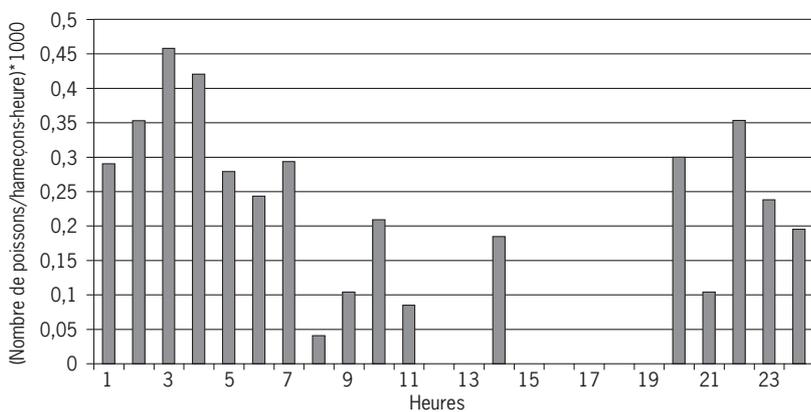


Figure 28 - Rendements en peau bleue par hameçon-heure en fonction de l'heure du jour.

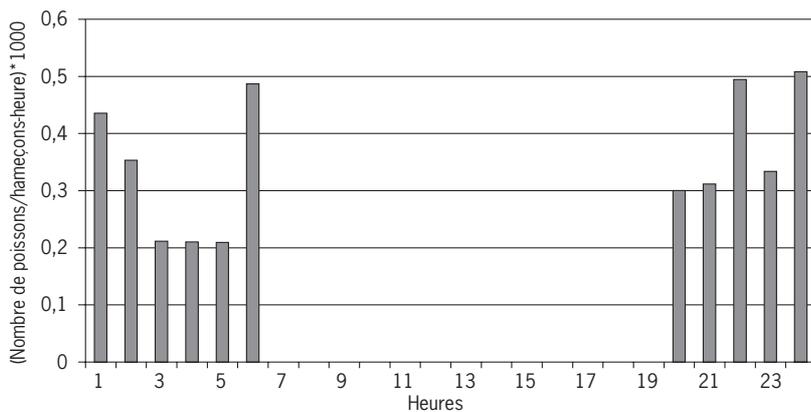


Figure 29 - Rendements en patudo par hameçon-heure en fonction de l'heure du jour.

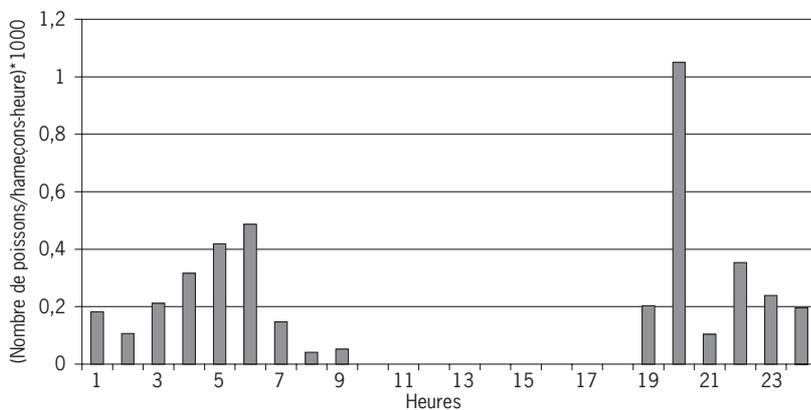


Figure 30 - Rendements en germon par hameçon-heure en fonction de l'heure du jour.

De fortes valeurs sont observées pour le germon les trois dernières heures du cycle, soit aux alentours de la pleine mer. Il ne semble pas y avoir de tendance nette pour les autres espèces représentées.

Rendements en fonction du cycle journalier

Pour chaque espèce, un rendement a été calculé en divisant le nombre total d'individus capturés par tranche horaire par le nombre d'hameçon-heure durant la même période. Le rendement pondéré obtenu a ensuite été multiplié par un facteur 1 000.

Espadon

Les rendements en espadon augmentent très nettement après 19 h pour atteindre un maximum à 21 h, ils baissent lentement après 1 heure du matin. Pendant la journée, les rendements sont quasiment nuls (fig. 27).

Peau bleue

Les rendements en peau bleue sont mieux répartis sur le cycle journalier, les valeurs les plus importantes sont observées en seconde partie de nuit, entre 2 et 5 heures (fig. 28).

Patudo

Les rendements en patudo sont nuls entre 7 et 19 h, soit pendant la phase diurne. Ils augmentent dès 20 h pour atteindre une valeur maximale à 24 h, un second pic est observé à 6 h, soit au lever du jour (fig. 29).

Germon

Les rendements en germon varient globalement de 0,1 à 0,45 entre 21 h et 7 h, puis sont quasiment nuls jusqu'à 18 heures. Un pic est observé à 20 heures (fig. 30).

Albacore

Les rendements en albacore sont peu variables entre 24 h et 10 h du matin et plus importants en première partie de nuit avec un pic très net, comme pour le germon, à 20 heures (fig. 31).

Dorade

La tendance pour les rendements en dorade est complètement différente, ceux-ci prenant des valeurs maximales entre 8 h et 13 heures (fig. 32).

Comportement de la palangre

Courbe profondeur-température

Les 289 enregistrements issus des capteurs pression-température ont été analysés pour les besoins de cette étude. Ceux-ci ont été fixés sur la ligne mère en milieu de segment. Les profondeurs décrites dans les paragraphes suivants sont donc celles de la ligne mère et non celles des hameçons. Pour avoir une idée de la profondeur atteinte par l'hameçon, il convient d'ajouter environ 10 brasses (soit 18 à 20 m) aux profondeurs relevées en prenant pour hypothèse que l'avançon adopte une position bien verticale dans le milieu.

Après une première analyse des enregistrements effectués, deux types de courbes ont été observés (fig. 33) :

- dans le premier cas, la courbe adopte une forme en « U » séparant bien les différentes phases liées à l'opération de pêche. Ces différentes phases sont (1) les phases descendantes (10 mn) et ascendantes rapides (4 mn) associées respectivement au filage et au virage de la ligne et (2) la période de stabilité de l'engin correspondant à la phase « pêchante », dite aussi de « dérive ». Ce type de courbe correspond à un comportement de la ligne considéré comme « optimal ». Il n'est que rarement observé ;
- le second type de courbe observé est appelée forme en « V » ou « variable ». Il ne présente pas de plateau stable pour la phase « pêchante » de l'engin. La ligne est donc continuellement en mouvement. Les profils en « V » représentent la majorité des comportements observés dans notre étude.

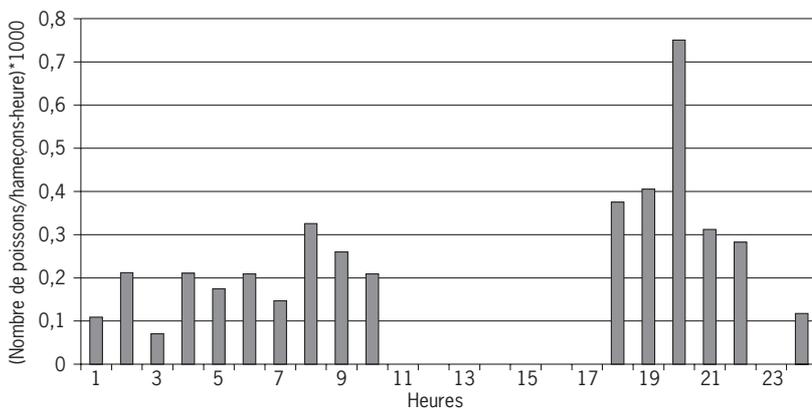


Figure 31 - Rendements en albacore par hameçon-heure en fonction de l'heure du jour.

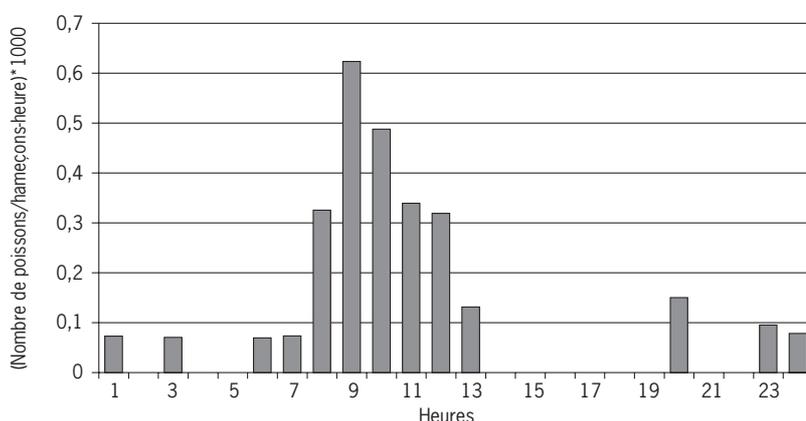


Figure 32 - Rendements en dorade par hameçon-heure en fonction de l'heure du jour.

L'enregistrement 4109-2 illustre un comportement non prévisible de l'engin de pêche. Ces instabilités sont fonctions de nombreux paramètres environnementaux tels que le vent, les courants et les marées. Ces comportements ont largement été décrits par Bach *et al.* (1999) dans le cadre de leur étude sur le comportement de la palangre profonde.

Les facteurs responsables d'un comportement particulier de la ligne semblent, dans bon nombre de cas, influencer l'ensemble de la ligne. En effet, les profils obtenus lors d'une opération de pêche sont souvent "répliqués" sur l'ensemble des capteurs fixés successivement tout au long de la portion de la ligne instrumentée à environ 1 500 mètres d'intervalle (fig. 34).

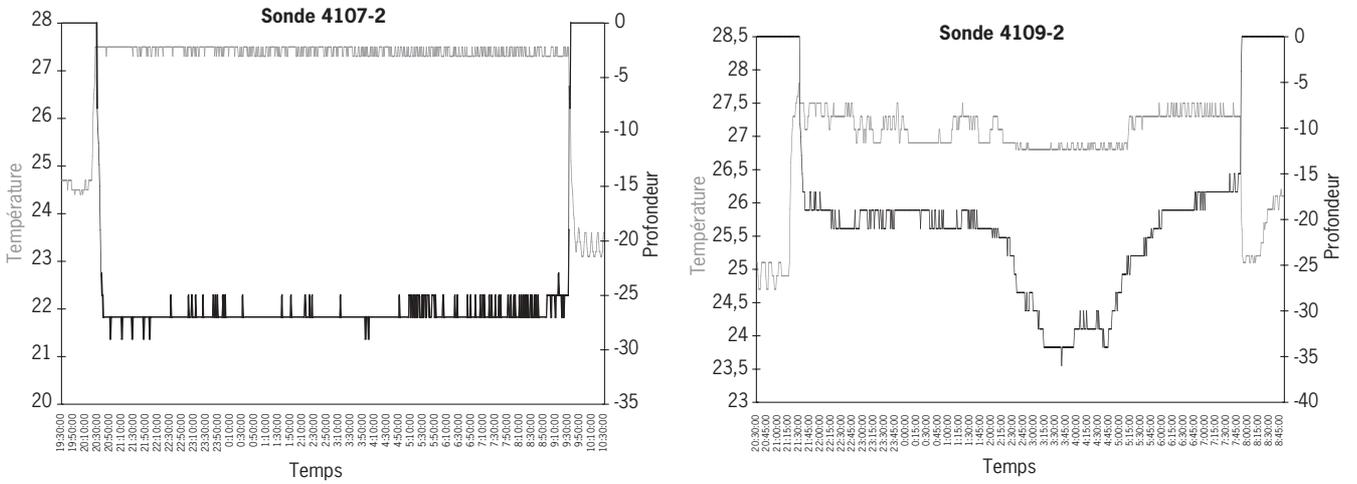


Figure 33 - Formes caractéristiques des courbes profondeur-température traduisant les mouvements de la ligne : en « U » et « variable ».

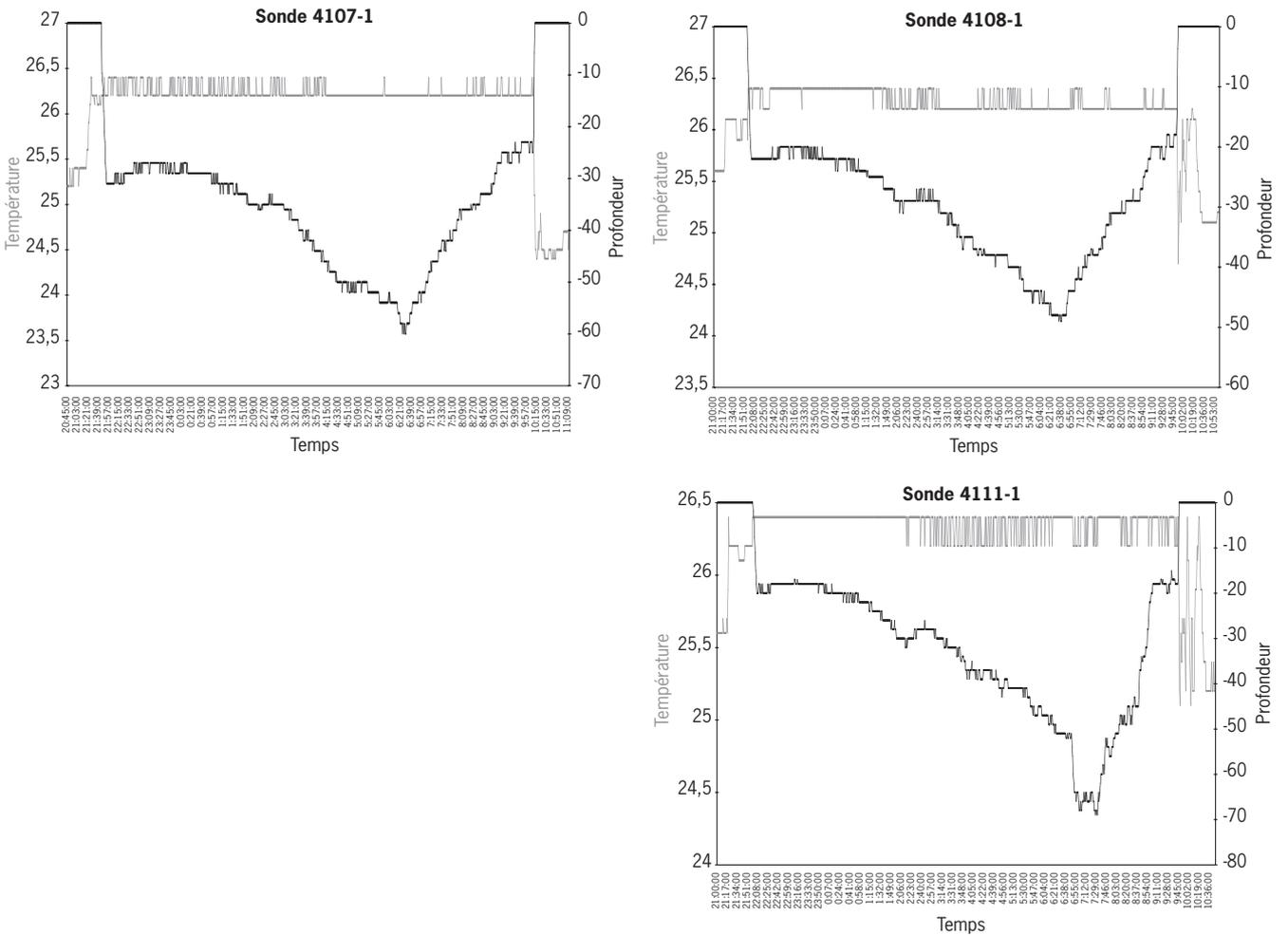


Figure 34 - Comparaison de profils issus d'un même filage.

Influence de la longueur des orins de bouées de bouées

Les profondeurs maximales atteintes par la ligne ont été reportées en fonction de la longueur des orins de bouées (fig. 35). Aucune corrélation ne semble exister entre ces deux valeurs. La gamme de profondeurs atteintes pour une longueur d'orin donnée est très large (de 25 à 190 m pour une longueur de 15 brasses). Cette différence peut s'expliquer par le taux de courbure ou « shortening rate » (Saito, 1975) pris par la ligne, qui est fonction de la distance horizontale et de la longueur de ligne filée entre deux bouées successives. Dans le contexte de nos expérimentations menées à bord de bateaux professionnels, il ne nous a pas été possible de procéder aux mesures nécessaires pour évaluer ces paramètres.

Le comportement de l'engin de pêche est dû à de nombreux paramètres annexes pouvant influencer les profondeurs atteintes : comportement des captures, courant, vent. L'analyse des courbes obtenues dans cette étude permet également d'estimer la hauteur moyenne de la tranche d'eau dans laquelle se trouvent la plupart des hameçons. Ainsi, pour chaque enregistrement, la profondeur maximale atteinte par l'engin est relevée (mesure généralement effectuée au niveau de la ligne mère). Le graphique figure 36 montre la distribution de cette profondeur maximale relevée sur 284 enregistrements. Dans la majorité des cas observés, la profondeur atteinte par la ligne mère se situe entre 30 et 70 mètres.

Influence des captures sur la profondeur de la ligne

Les figures 37 et 38 représentent la superposition de deux enregistrements effectués sur la même ligne, respectivement à 1 500 et 3 000 m d'intervalle. Pour chaque profil représenté, l'un des capteurs enregistre de manière bien nette le mordage d'un espadon (courbe 4107-4 et 3923-1).

Ces deux graphes montrent parfaitement l'absence d'influence de la capture sur le comportement de la ligne, hormis lors de la prise proprement dite. La profondeur maximale atteinte n'est pas associée à la capture mais à d'autres facteurs environnementaux.

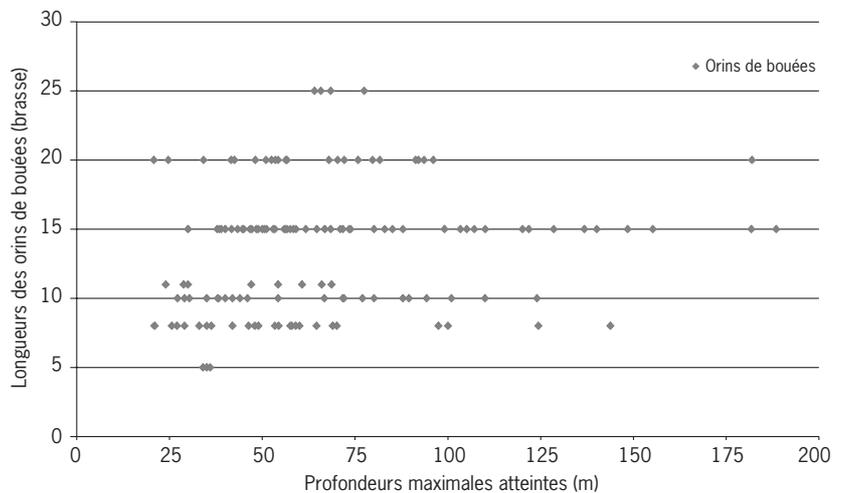


Figure 35 - Corrélation longueur orins de bouées-profondeur maximale.

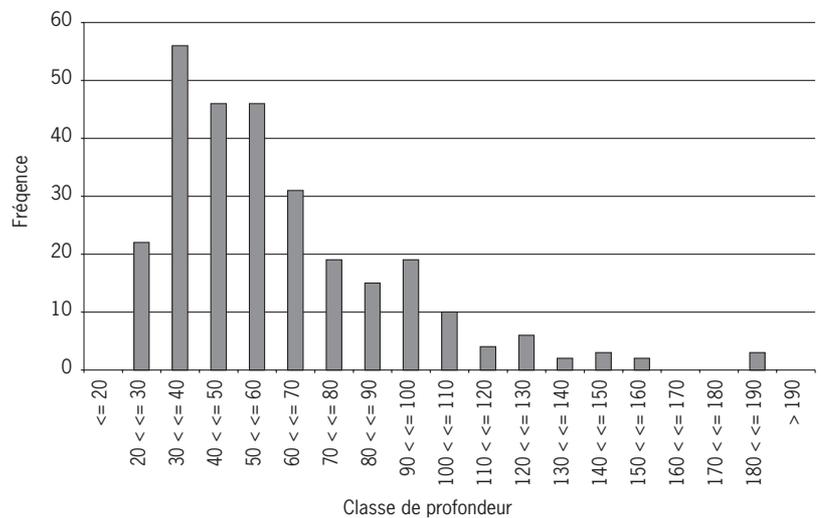


Figure 36 - Distribution des profondeurs maximales atteintes par l'engin (284 relevés).

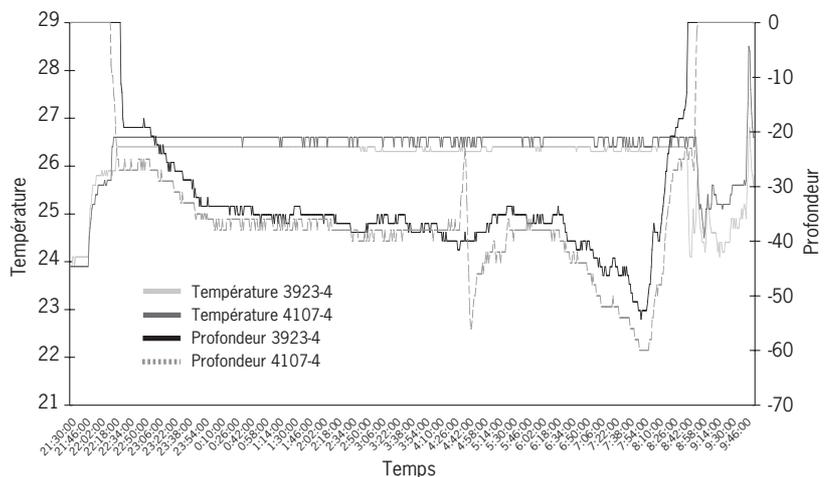


Figure 37 - Superposition de deux enregistrements effectués sur la même ligne à 1 500 m d'intervalle. La courbe 4107-4 met en évidence la capture d'un espadon au voisinage de la sonde.

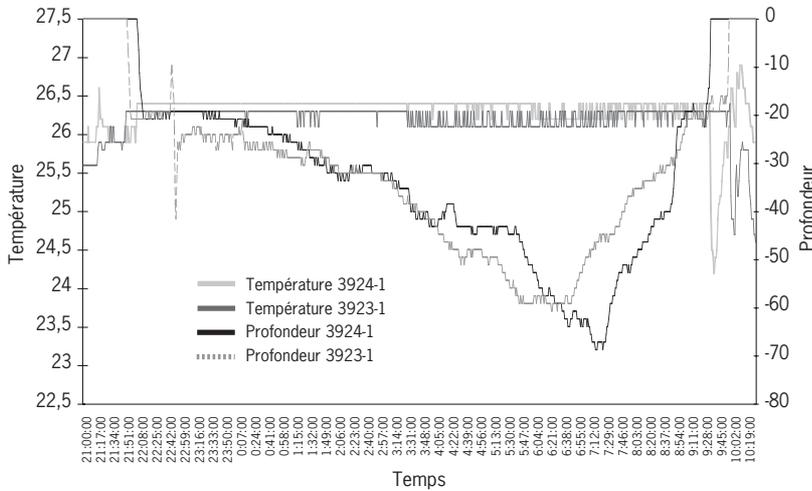


Figure 38 - Superposition de deux enregistrements effectués sur la même ligne à 3000 m d'intervalle. La courbe 3923-1 met en évidence la capture d'un espadon au voisinage de la sonde.

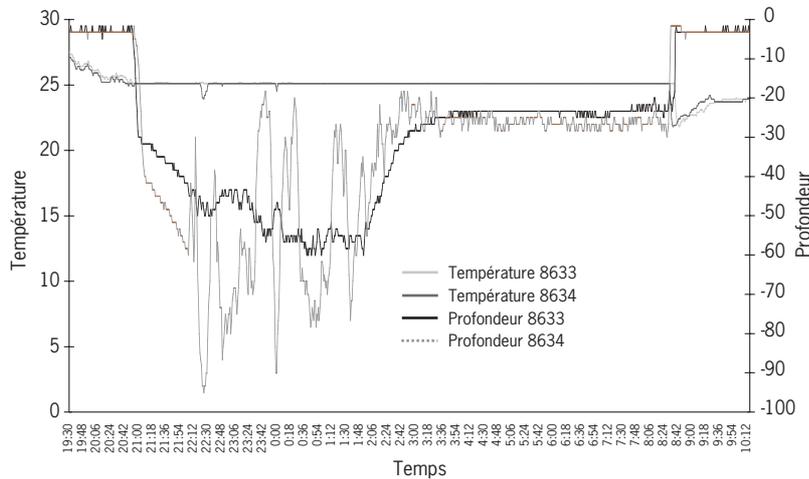


Figure 39 - Influence de la capture sur les profils de courbes.

À l'inverse, le graphe 39 montre parfaitement l'influence de la capture sur le comportement de la ligne. Les deux sondes sont espacées d'environ 500 mètres. Dans cet exemple, la profondeur maximale enregistrée est due à la capture d'un espadon. Elle est de 95 m tandis que la sonde n'ayant pas enregistré de mordage est descendue à 60 mètres.

Comportement des prises

L'espadon

Au cours des différentes campagnes, 47 poissons dont 12 espadons ont été capturés à proximité d'un capteur de température. La profondeur de capture, le comportement de l'individu vis-à-vis de l'engin de pêche ainsi que sa réaction de fuite ont pu être analysés. Ces informations permettent de voir que certaines captures peuvent engendrer des mouvements importants de l'engin et des hameçons voisins. Ces modifications peuvent, dans une mesure difficilement quantifiable, agir sur l'efficacité globale de la palangre.

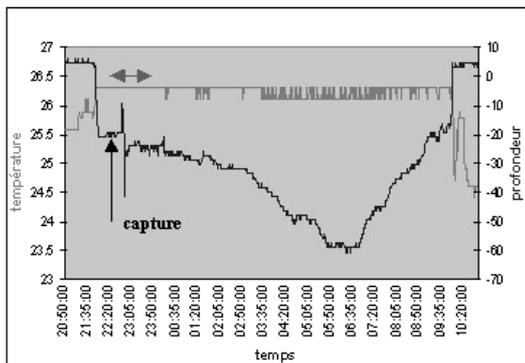
Le tableau 4 ci-dessous regroupe les informations sur les cas les plus intéressants observés (taille, profondeurs maximales de la ligne avant capture, variations de profondeurs enregistrées avant et après capture et le temps de survie de l'animal).

Tableau 4 - Récapitulatif des mordages d'espadons les plus remarquables.

Espèce et taille	Profondeur maximale avant capture	Variation de profondeur liée à la capture	Profondeur maximale après capture	Temps de variation liée à la capture	Référence sondes
Espadon lmf=115	20 m	10-42 mètres	61 m	9 min	A /ASC3923-1.xls
Espadon lmf=117	38 m	23-56 mètres	60 m	57 min	B /ASC4107-4.xls
Espadon lmf=145	58 m	18-95 mètres	95 m	6 heures	C /Sonde 8634-2.xls
Espadon lmf=148	38 m	38-59 mètres	59 m	30 min	D /Sonde 4108-1.xls
Espadon lmf=169	54 m	41-83 mètres	83 m	4 h 05 min	E /Sonde 4108-5.xls
Espadon lmf=188	83 m	80-105 mètres	120 m	5 h 25 min	F /sondes 8633.xls
Espadon lmf=196	67 m	29-96 mètres	96 m	3 h 30 min	G /Sondes B2907bis.xls
Espadon lmf=?	33 m	25-63 mètres	63 m	3 h 25 min	H /Sondes 8634-5.xls

Les graphes suivants traduisent le comportement des animaux dans un plan, la période durant laquelle l'animal est demeuré actif est délimitée par une flèche (fig. 40). Ces individus ont été capturés dans une couche d'eau comprise entre 20 et 83 mètres. L'observation de ces graphes montre qu'il n'est pas possible de définir une réaction de fuite type pour l'espadon.

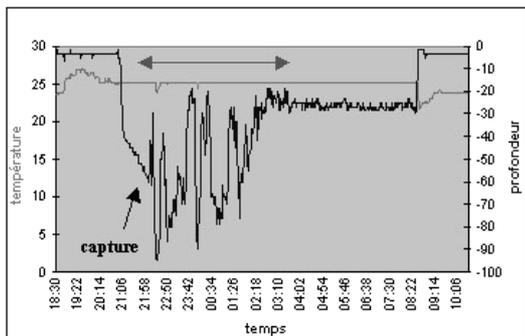
L'animal cherche toujours à fuir par des mouvements verticaux entraînant une oscillation de la ligne mère. La taille de l'animal n'est pas un facteur qui détermine de manière évidente l'amplitude de la réaction et le temps de survie de l'individu. L'espadon de 145 cm de lmf s'est débattu presque deux fois plus longtemps que le spécimen d'une taille de 169 centimètres.



Étretat 20 avril 1999
Marée 1256

Espadon : lmf = 115 cm
État : mort à la remontée

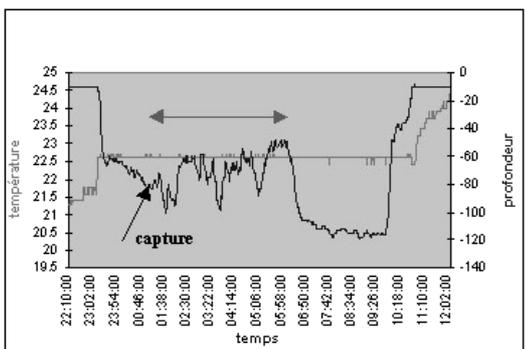
Mordage à 22 h 45
Profondeur de mordage = 19,2 m
Profondeur maximale atteinte = 60,7 m
Longueur de l'orin de bouée : 11 brasses



Étretat 15 juin 1999
Marée 1261

Espadon : lmf = 145 cm
État : mort à la remontée

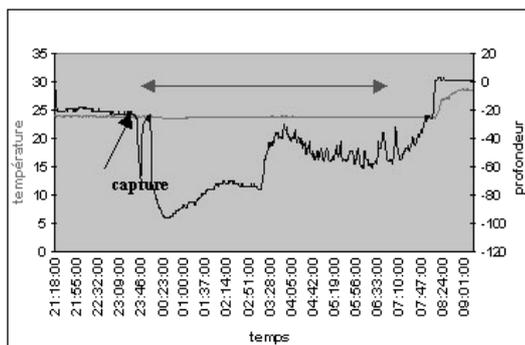
Mordage à 22 h 02
Profondeur de mordage = 58,4 m
Profondeur maximale atteinte = 95,1 m
Longueur de l'orin de bouée : 11 brasses



Étretat 19 septembre 2000
Marée 1707

Espadon : lmf = 188 cm
État : mort à la remontée

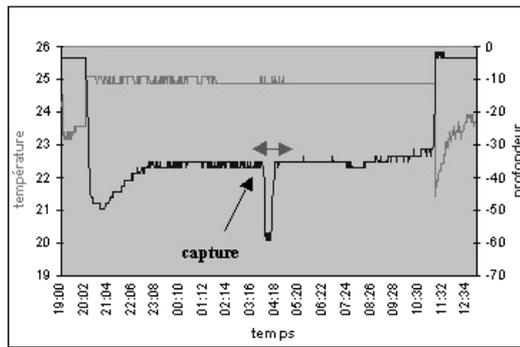
Mordage à 01 h 20
Profondeur de mordage = 78,4 m
Profondeur maximale atteinte = 120 m
Longueur de l'orin de bouée : 11 brasses



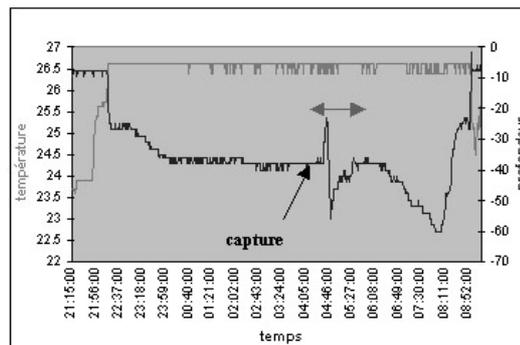
Swordfish 29 juillet 1998
Marée 995

Espadon : lmf = 196 cm
État : vivant à la remontée

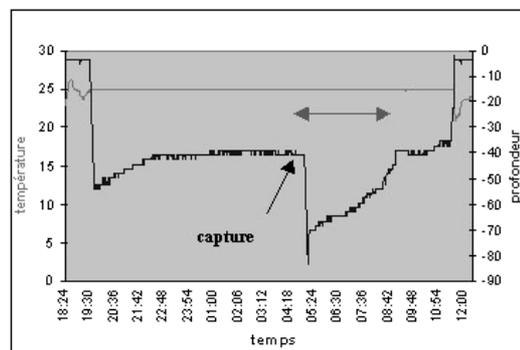
Mordage à 23 h 52
Profondeur de mordage = 28,8 m
Profondeur maximale atteinte = 95,9 m
Longueur de l'orin de bouée : 11 brasses



Étretat 14 juin 1999
Marée 1261
Espadon : lmf = 148 cm
État : mort à la remontée
Mordage à 03 h 45
Profondeur de mordage = 37 m
Profondeur maximale atteinte = 59,2 m
Longueur de l'orin de bouée : 11 brasses



Étretat 23 avril 1999
Marée 1256
Espadon : lmf = 117 cm
État : mort à la remontée
Mordage à 04 h 35
Profondeur de mordage = 38 m
Profondeur maximale atteinte = 60 m
Longueur de l'orin de bouée : 8 brasses



Étretat 18 juin 1999
Marée 1261
Espadon : lmf = 169 cm
État : vivant à la remontée
Mordage à 04 h 53
Profondeur de mordage = 40,7 m
Profondeur maximale atteinte = 83,2 m
Longueur de l'orin de bouée : 11 brasses

Figure 40 - Exemples de profils avec captures d'espadons.

Par ailleurs, il est à noter que, régulièrement, les horloges d'hameçon proches d'un espadon capturé ont été déclenchées quelques minutes avant la capture de celui-ci. Ce fait confirme les connaissances que l'on peut avoir sur le comportement de chasse de cet animal qui, dans un premier temps, assomme ses proies avec son rostre puis s'éloigne avant de revenir pour les avaler. Il arrive de ce fait que certains espadons s'accrochent au passage à l'hameçon, soit sur le flanc soit à la nageoire dorsale.

Les requins

La figure suivante traduit le comportement d'un requin peau bleue, pris 2 h après le mouillage de l'hameçon, celui-ci semble offrir plus de résistance que les espadons observés jusqu'à présent (fig. 41).

Les thonidés

Peu de « mordages » de thons ont pu être associés aux enregistrements d'une sonde pression-température. Les courbes présentées à la figure 42 font apparaître des signaux très faibles.

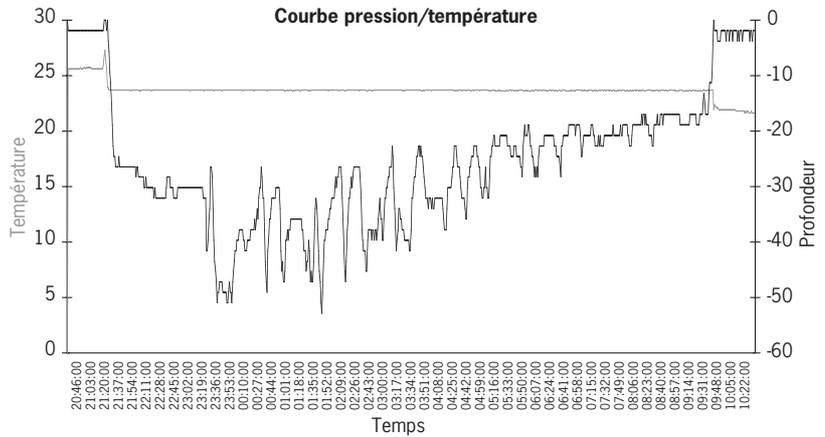
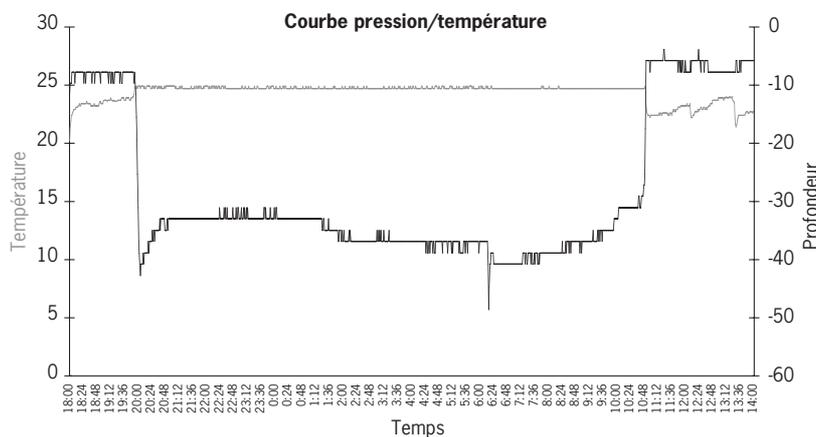


Figure 41 - Enregistrement d'un mordage de requin peau bleue.

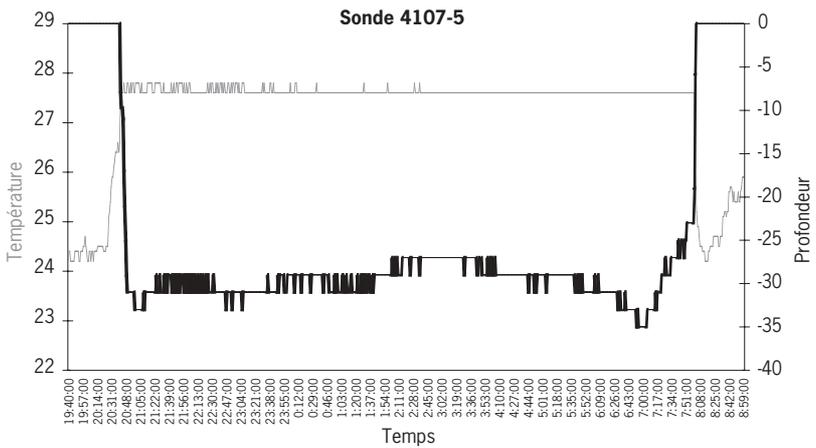


Germon

lf = 110 cm
État : mort à la remontée

Mordage à 6 h 11

Profondeur de mordage = 36,9 m
Profondeur maximale atteinte = 48,6 m
Longueur de l'orin de bouée : 11 brasses

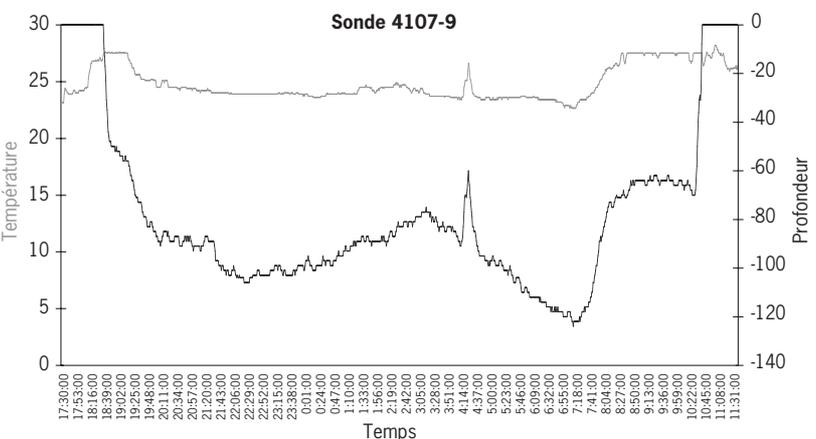


Patudo

État : mort à la remontée

Heure de mordage inconnue

Profondeur de mordage = ?
Profondeur maximale atteinte = 35 m
Longueur de l'orin de bouée : 5 brasses



Albacore

État : mort à la remontée

Mordage à 04 h 20

Profondeur de mordage = 71 m
Profondeur maximale atteinte = 124 m
Longueur de l'orin de bouée : 10 brasses

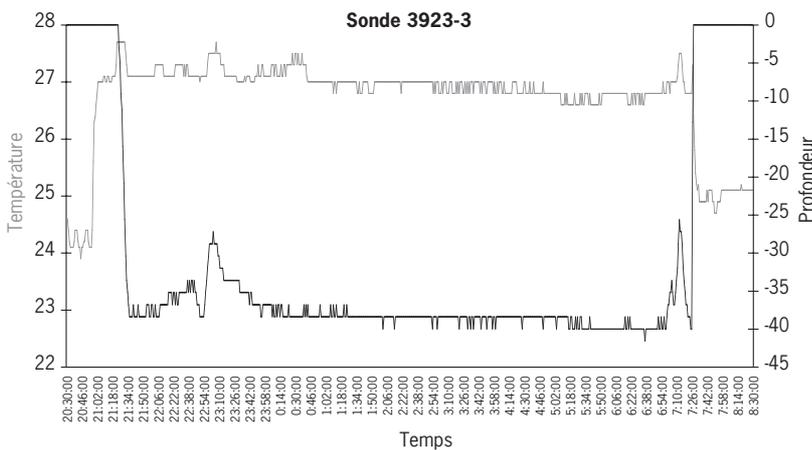
Figure 42 - Exemples de profils avec captures de thonidés.

Ces quelques résultats sur le comportement des thons suite à leur capture ne sont pas très évocateurs et il semblerait que les thonidés soient « passifs » vis-à-vis de leur capture. Les profondeurs maximales atteintes après capture s'échelonnent entre 35 et 124 mètres. L'animal ne semble donc pas sonder de manière significative comme on le constate souvent lors de pêches à la traîne. Cependant, le faible nombre de captures réalisées sur les sondes ne permet pas

de généraliser le comportement de ces poissons sur la palangre.

Espèces « inconnues »

Certaines sondes ont enregistré des mordages sans qu'aucun animal ne soit remonté à bord. L'heure à laquelle la ligne semble avoir cédé a été estimée, la rupture de la ligne interviendrait lorsque l'animal sonde brusquement (fig. 43).



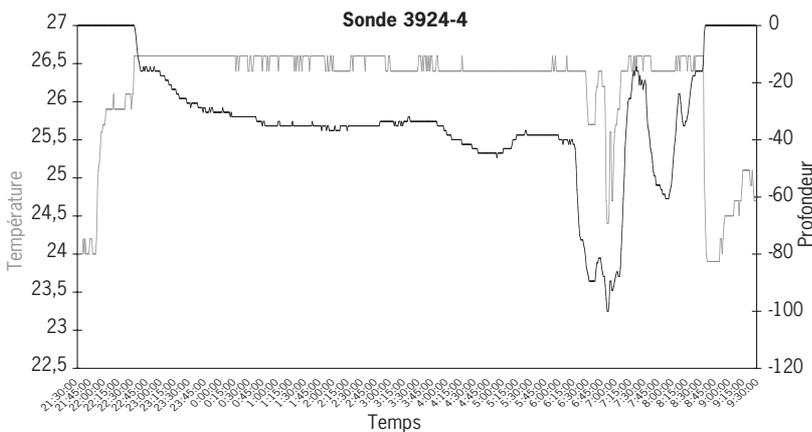
Espèce inconnue

Mordage à 22 h 40

Profondeur de mordage : 35,2 m

Profondeur maximale atteinte : 41,6 m

Heure probable de la rupture : 7 h 30



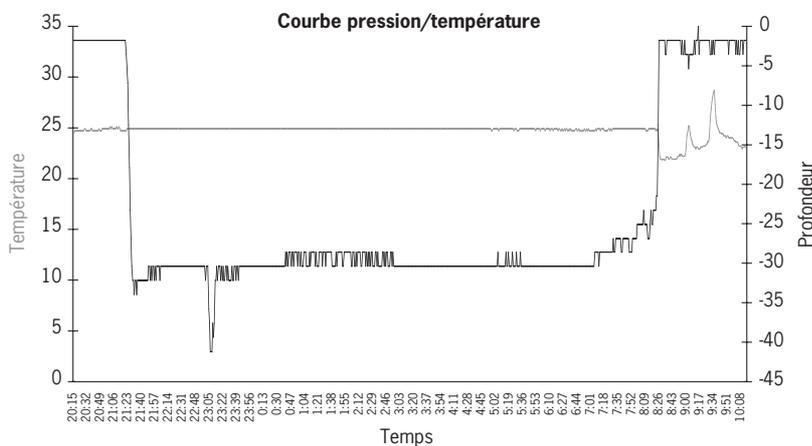
Espèce inconnue

Mordage à 06 h 18

Profondeur de mordage : 43,1 m

Profondeur maximale atteinte : 100 m

Probabilité : Thon



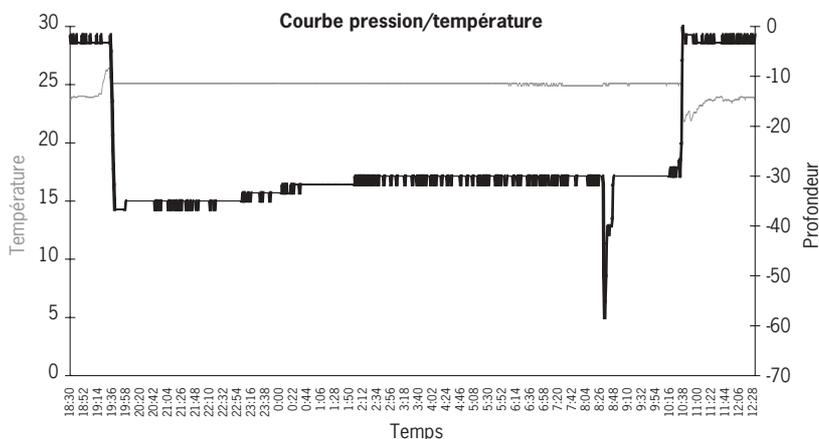
Espèce inconnue

Mordage à 23 h 02

Profondeur de mordage : 30,4 m

Profondeur maximale atteinte : 41,2 m

Probabilité : Espadon



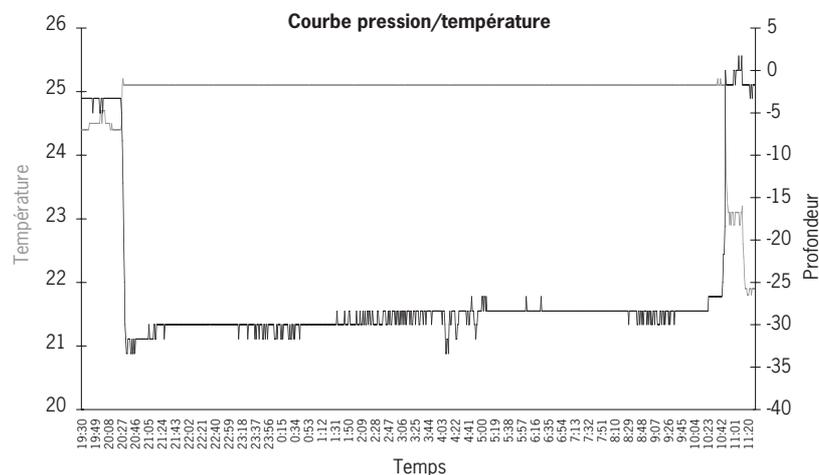
Espèce inconnue

Mordage à 8 h 29

Profondeur de mordage : 30 m

Profondeur maximale atteinte : 58,4 m

Probabilité : Espadon



Espèce inconnue

Mordage à 4 h 05

Profondeur de mordage : 28,4 m

Profondeur maximale atteinte : 33,4 m

Probabilité : Requin ; rupture de l'orin après débattement pendant 20 minutes

Figure 43 - Exemples de mordages d'espèces inconnues.

Survie observée pour les différentes espèces

Le tableau 5 fait le bilan du nombre et du pourcentage d'individus remontés vivants à bord pour les espèces principales (cas où l'information a été reportée).

Les figures suivantes présentent, pour chacune des espèces, les temps de survie des individus après capture.

Le taux de survie du germon est très faible, seul un individu a survécu 8 h sur la ligne.

La valeur maximale de 14 h pour toutes les autres espèces est liée à la technique, c'est-à-dire à la durée totale de l'opération de pêche. Le taux de survie, de l'ordre 20 % pour l'espadon, est faible au regard de celui des autres espèces étudiées. D'après la tendance des graphes, on peut penser que les patudos et les requins peau bleue sont les plus « résistants ». Par contre, dans le cas de la dorade, le fort taux de survie s'explique par le fait que la majorité des représentants de cette espèce est capturée très peu de temps avant la remontée des hameçons, pendant la phase de virage de l'engin.

Tableau 5 - Bilan du nombre et du pourcentage d'individus remontés vivants à bord pour les espèces principales (cas où l'information a été reportée).

Espèces	Nombre d'individus observés	Nombre d'individus vivants	% de survie
Espadon	389	76	19,5
Germon	79	3	3,8
Albacore	66	23	34,8
Patudo	86	42	48,8
Peau bleue	92	45	48,9
Dorade	48	32	66,7

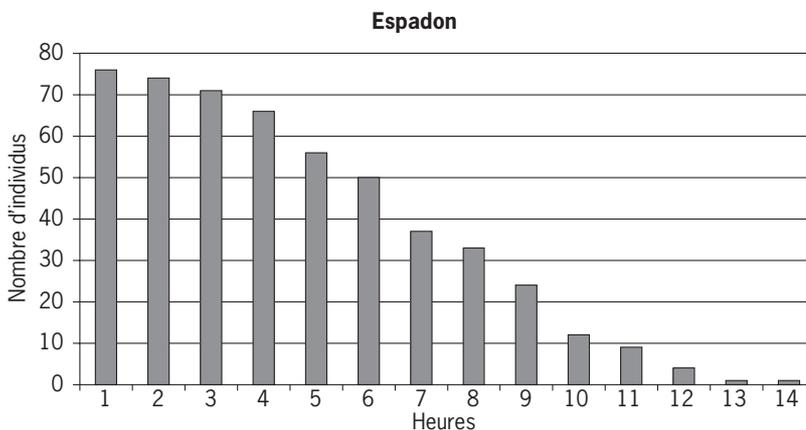


Figure 44 - Temps de survie des espadons capturés vivants lors des expérimentations.

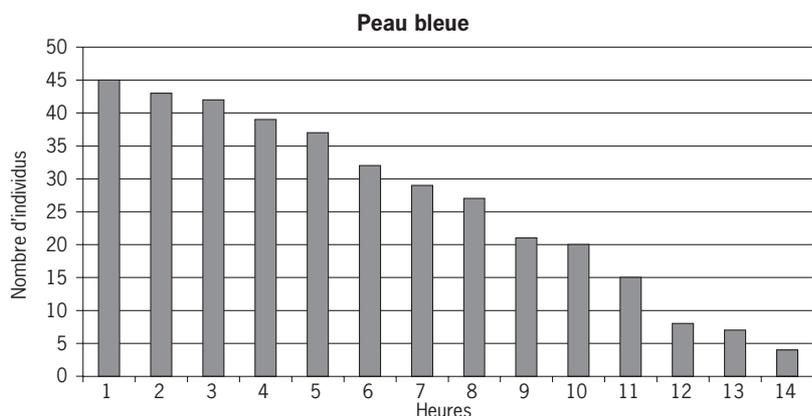


Figure 45 - Temps de survie des requins peau bleue capturés vivants lors des expérimentations.

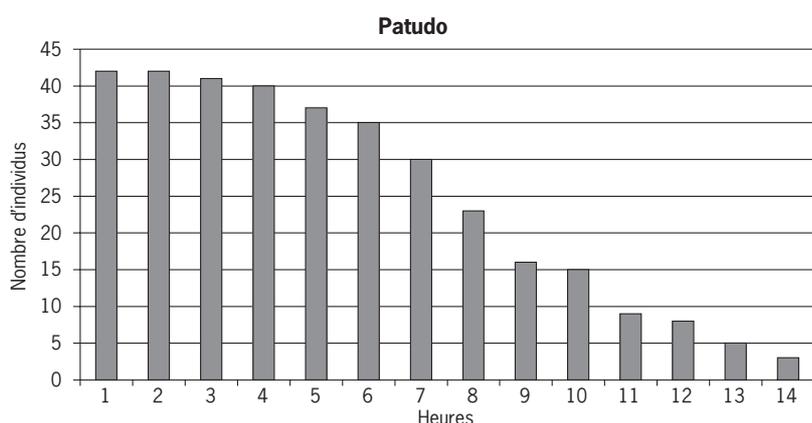


Figure 46 - Temps de survie des patudos capturés vivants lors des expérimentations.

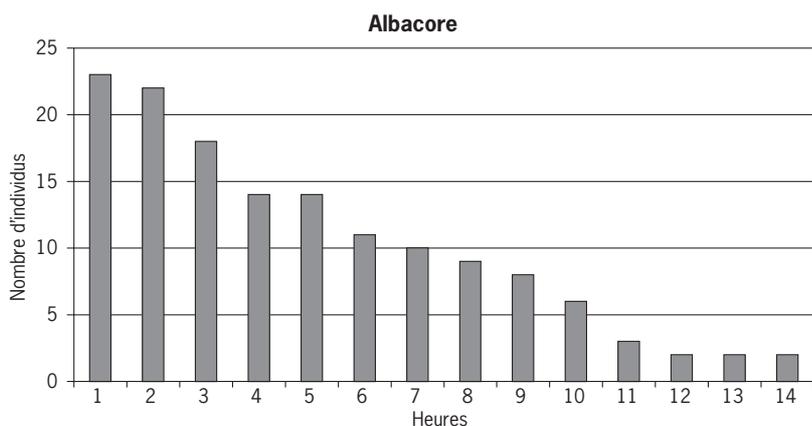


Figure 47 - Temps de survie des albacores capturés vivants lors des expérimentations.

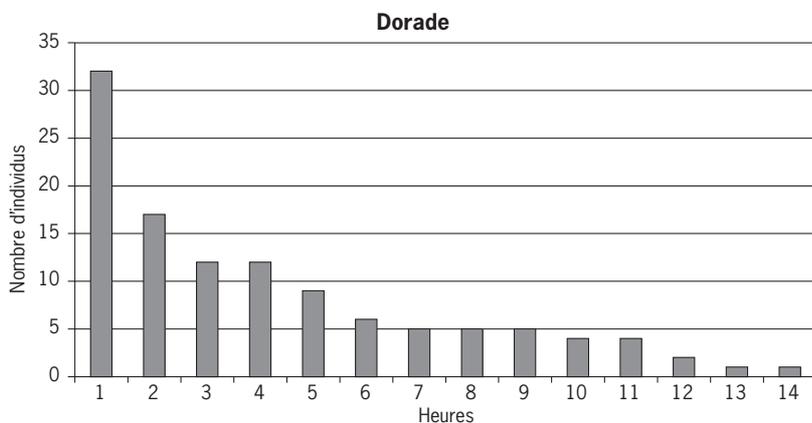


Figure 48 - Temps de survie des dorades capturées vivantes lors des expérimentations.

Discussion et conclusions

Efficacité du matériel employé

Les différentes générations d'horloges d'hameçons

Quatre générations d'horloges ont été utilisées au cours de ce programme. Les contacts permanents avec le constructeur ont permis d'améliorer l'outil. Des horloges d'hameçons de première et seconde générations ont donc été utilisées lors des différentes campagnes effectuées jusqu'en janvier 1999. À partir de cette date, des prototypes de troisième génération, beaucoup plus perfectionnés, ont été testés au cours des trois marées suivantes (janvier et mars 1999). À l'usage, les horloges d'hameçons testées ont présenté un certain nombre de dysfonctionnements impliquant une perte d'informations non négligeable lors de nos expérimentations.

Les deux premières générations d'horloges sont pratiquement identiques et correspondent plutôt à deux séries de fabrications, la deuxième série ayant subi quelques modifications légères, notamment au niveau du bouchon. Les défauts présents sur la première génération se retrouvent donc également sur la deuxième.

La troisième génération d'instruments inaugurerait une nouvelle série de prototypes. La résine a été remplacée par un corps en plexiglas usiné apportant beaucoup d'avantages, notamment au niveau du système de fixation désormais intégré dans le corps principal et dans le bouchon. Le circuit est logé dans le cylindre et, de ce fait, l'électronique n'est plus noyée dans la résine comme dans les précédentes générations. L'horloge peut être réparée au besoin par ouverture du cylindre. Les chocs répétés avaient un impact sur la longévité des soudures et sur la stabilité de l'afficheur, principaux défauts constatés sur ces modèles.

La quatrième génération d'horloge est basée sur la troisième série testée. Les seules différences notables entre ces deux produits sont l'ajout d'une plaquette de polystyrène entre le circuit électrique et l'écran à cristaux liquides ainsi qu'une meilleure tenue du circuit dans le cylindre en plexiglas. Ces modifications mineures apportées sur ce dernier prototype ont considérablement amélioré la fiabilité du système au niveau de l'électronique.

Problèmes rencontrés sur les différents modèles

Malgré une amélioration constante du produit au cours des 2 premières années du programme, des problèmes ont été constatés. Afin d'estimer la perte d'information, mettre en évidence la fiabilité des différents produits utilisés et éviter les biais dans les résultats, l'analyse de ces dysfonctionnements a été effectuée. La proportion d'échecs par rapport au nombre total de déclenchements a été calculée par année (fig. 49). Seuls les dysfonctionnements liés au circuit électronique ont été retenus dans les analyses suivantes. Ces cas correspondent à un déclenchement de l'horloge sans information exploitable : absence d'affichage de l'heure ou blocage de l'horloge (00:00).

Le nombre total d'échecs s'élève à 60 pour 2 266 déclenchements répertoriés. Plus de 50 % des échecs (34 cas) sont répartis sur la deuxième année du programme, année charnière entre les générations d'horloges 2 et 3. Cette phase de test se caractérise par 5,1 % de défaillances enregistrées dans la base de données pour 1999. Le taux d'échec pour 2000 est supérieur à celui de 1998 (1,9 % contre 1,3 %) en raison du problème lié à la perte de l'aimant sur les horloges de nouvelle conception, problème non résolu sur la génération 4 et qui n'existait pas sur les deux premières générations. L'histogramme présenté sur la figure 50 précise l'information apportée par la figure 49. Les marées de janvier et mars 1999 représentent à elles seules 56 % des échecs survenus sur les horloges d'hameçons.

Ce fort taux d'échec est dû à l'utilisation du lot d'horloges de génération 3 (instabilité du circuit électronique). Suite aux incertitudes concernant les heures enregistrées, seules les horloges de génération 2 ont été utilisées lors de la marée du 20 avril 1999, expliquant la chute soudaine du pourcentage d'erreurs à partir de cette date.

Les horloges de génération 4 ont été utilisées dès juin 1999 et jusqu'à la fin des campagnes en mer. Beaucoup plus fiables à la suite des modifications apportées, le pourcentage d'échecs reste inférieur à 5 % sur l'ensemble des marées réalisées entre juin 1999 et décembre 2000.

La figure 51 traduit la perte d'information par espèce et l'incidence de ces dysfonctionnements sur les résultats obtenus.

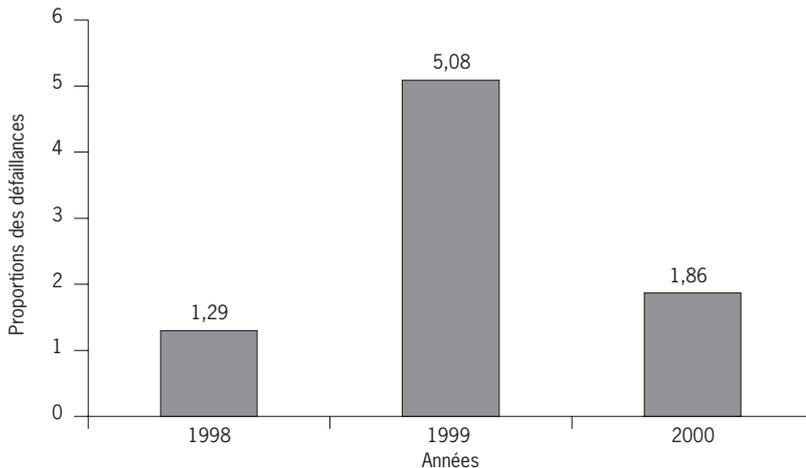


Figure 49 - Proportion (%) du nombre d'échecs par rapport au nombre total de déclenchements.

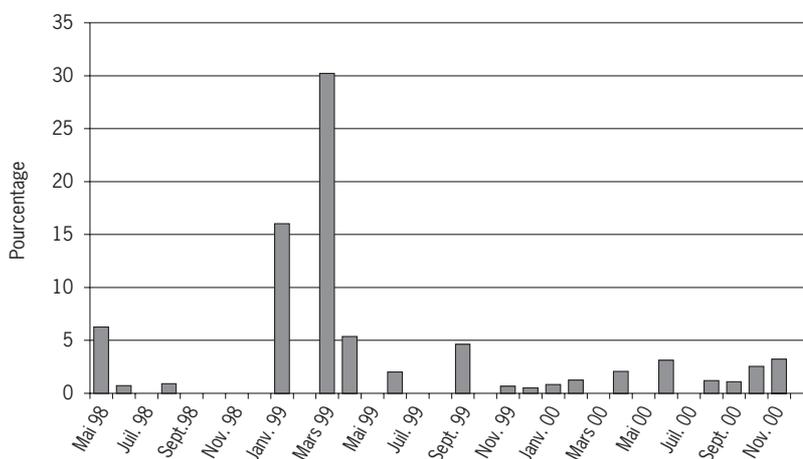


Figure 50 - Pourcentage du nombre d'échecs survenus par mois.

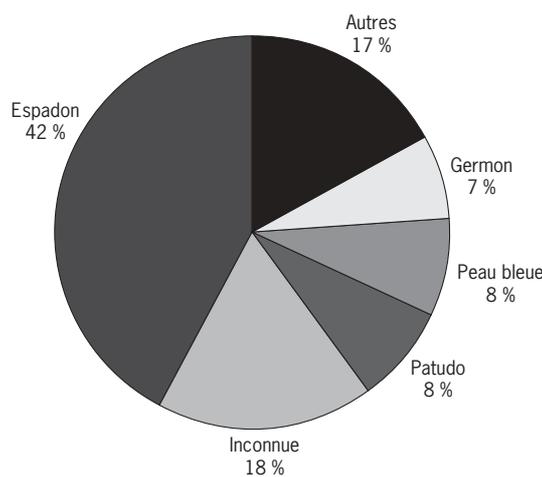


Figure 51 - Répartition des échecs en pourcentage par espèce.

Ainsi, dans 42 % des cas, l'information a été perdue lors de captures d'espadons.

Au cours de toutes les campagnes, 25 espadons ont été pêchés sur des horloges sans que l'information sur son heure de mordage puisse être obtenue. Le rendement moyen en espadons au cours de cette période d'expérimentation a été de 14,6 individus pour 1 000 hameçons avec un nombre moyen d'horloges utilisées par filage de 181. Par ailleurs, le rapport entre le nombre de jours passés en mer et le nombre de filages suivis est estimé à 1,3. Cette perte d'information peut se traduire par 9,4 filages et 12 jours de mer perdus.

L'engin de pêche

La mise en œuvre de cette expérimentation aura permis de démontrer que, si la technique est réellement appropriée à l'espèce cible, l'efficacité de l'engin de pêche pourrait être améliorée. Ainsi, dans 61 % des cas, aucune prise n'est associée à un déclenchement d'horloge. En conséquence, des opérations complémentaires avec différents types d'hameçons et divers montages doivent être envisagées.

La profondeur maximale atteinte par la ligne n'est pas directement liée à la longueur d'orin de bouée utilisée. La description de certains comportements de la ligne montre que, sous l'effet de courants ou de comportements actifs de certains poissons capturés, la palangre peut adopter des configurations tout à fait imprévisibles. L'analyse du comportement vertical de l'engin montre que, dans 63 % des cas, la profondeur atteinte est comprise entre 30 et 70 mètres.

Il serait par ailleurs intéressant de tester les abaques mis au point par Bach *et al.* (1999). Ils sont destinés à prédire la profondeur d'une palangre profonde. Néanmoins, compte tenu des différences entre la

palangre de surface et la palangre profonde, il est fort probable qu'une adaptation des abaques soit nécessaire. En effet, compte tenu du nombre d'hameçons montés entre deux flotteurs (jusqu'à 25), la stabilité (due au poids) de ces deux engins n'a sûrement rien de comparable.

Taux de survie

Dans le tableau suivant (tab. 6), sont synthétisés les résultats sur les taux de survie observés dans le cadre de ce programme, mais aussi ceux obtenus par Boggs (1992) et Bach *et al.* (1999) avec une palangre utilisée de jour.

La comparaison des différents résultats présentés tend à montrer que les chances de capturer vivants les thonidés, les requins peau bleue et les dorades sont supérieures dès lors que la technique de la palangre profonde est utilisée de jour. Dans le cas de l'espadon, malgré des résultats équivalents, la comparaison est plus difficile dans la mesure où le nombre d'individus capturés dans le cadre du programme ECOTAP est limité à 25 individus.

L'analyse des réactions d'un germon capturé et l'estimation du taux de survie très faible (de l'ordre de 4 %) semblent montrer que les représentants de cette espèce sont très sensibles à la capture. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Bach *et al.* (1999) dans le cadre de leur étude sur la palangre profonde.

Synthèse sur le comportement des espèces majeures

Les meilleurs rendements en espadon sont obtenus principalement entre 19 h et 6 h du matin avec un léger pic à 21 h, ces résultats s'expliquent par le choix de la stratégie de pêche, technique mise au point sur la base de résultats des travaux de Kume & Joseph (1969) et Berkeley *et al.* (1983). Les résultats de Boggs *et al.* (1992) et Bach *et al.* (1999), obtenus dans le cadre d'essais de palangres profondes posées de jour, vont aussi dans le même sens puisqu'ils démontrent que, dans ces conditions, les prises d'espadons restent anecdotiques.

Ces différences de comportement jour/nuit ont été mises en évidence dès 1981 par Carey & Robinson qui ont pu suivre, sur un cycle de plusieurs jours, les déplacements dans les deux dimensions de plusieurs individus à l'aide de marques ultrasoniques placées sur

Tableau 6 - Taux de survie des espèces les plus représentées dans les captures et résultats obtenus par Boggs (1992) et Bach *et al.* (1999) et au cours du PPR.

Sources	PPR		Bach <i>et al.</i> (1999)		Boggs (1992)
Espèces	Effectif	% de survie	Effectif	% de survie	% de survie
Espadon	389	19,5	25	20	
Germon	79	3,8	453	33	
Albacore	66	34,8	176	55	63
Patudo	86	48,8	236	64	83
Peau bleue	92	48,9	60	93	100
Dorade	48	66,7	35	80	88

l'animal. Ces observations montrent que les espadons se trouvent plus près des côtes et à des profondeurs dépassant les 100 m durant le jour, malgré quelques incursions en surface. Avant la tombée du jour, ils rejoignent le large et évoluent dans une strate d'eau comprise entre la surface et les 60 premiers mètres. Il faut rappeler que ces expérimentations ont été menées en Basse-Californie, près d'un plateau continental.

Plus récemment, Takahashi *et al.* (in press) mettent en évidence que l'espadon peut demeurer à des profondeurs voisines de 900 m pendant le jour, malgré quelques incursions furtives en surface. Ils ont obtenu ces informations grâce à des enregistrements de température réalisés par une marque archive placée sur un individu capturé au sud des côtes japonaises.

Les espadons sont capturés dès que l'engin de pêche est mis en place, peut-être en raison d'une plus grande fraîcheur de l'appât. Les résultats obtenus pour le patudo se rapprochent de ceux obtenus pour l'espadon, aucune capture n'a été enregistrée entre 7 h et 19 h, soit pendant le jour. Boggs (1992) montre que les rendements pour cette espèce sont plus importants pour des profondeurs supérieures à 200 mètres. Bach *et al.* (1999) précisent que les rendements pour cette espèce sont constants entre 5 h et 15 h, puis augmentent entre 15 h et 18 h avant de devenir nuls après 19 h. Ces résultats obtenus avec la palangre profonde sont totalement opposés, les rendements dans notre cas étant nuls entre 7 h et 19 h. Le patudo n'évoluerait pas de jour dans une tranche d'eau inférieure à 200 mètres. Les résultats de marquage indiquent qu'il évolue dans la couche homogène durant la nuit et rejoint des strates profondes pendant le jour.

Les capacités visuelles de l'espadon et du patudo leur confèrent une aptitude spéciale à la capture de proies en eau sombre (Fristshes & Warrant, 2001). Comme pour l'espadon, la qualité de l'appât pourrait être aussi un facteur déterminant dans la capture du patudo.

Parmi les espèces mineures, la dorade a le taux de survie le plus important mais néanmoins plus faible que ceux enregistrés par Boggs (1992) et par Bach *et al.* (1999). Ce poisson chasse préférentiellement de jour et en surface, Boggs (1992) enregistre les meilleurs rendements entre 40 et 100 m, soit dans la couche de mélange où les températures sont comprises entre 24° et 25 °C.

La représentation du cumul des prises en fonction du temps de mouillage pour la catégorie « inconnue » est intéressante. Il est impossible d'estimer la part de chaque espèce dans cette configuration. Mais, compte tenu de la prédominance des espadons dans les captures, des similitudes avec le même type de graphique effectué pour cette espèce et de son comportement de chasse (coups de rostre pour décrocher l'appât), il y a de fortes chances que ces déclenchements soient provoqués principalement par des espadons.

L'objectif de ce travail n'était pas de reproduire, pour la palangre de surface, les études menées par Bach *et al.* (1999) sur la palangre profonde. Ce type d'étude ne peut se concevoir qu'à bord d'un navire de recherche où la totalité des conditions opérationnelles peuvent être choisies et mesurées. Nos expérimentations ayant été effectuées à bord des palangriers professionnels, cette analyse technique n'est pas concevable.

Les travaux de Holland *et al.* (1990), Marsac *et al.* (1996) et Dagorn *et al.* (1999) ont mis en évidence que les mouvements verticaux des thonidés sont fortement associés aux conditions océanographiques de la zone prospectée (température, oxygène dissous). Par ailleurs, les marquages permettent d'évaluer les temps passés à différentes profondeurs et donc de définir les profondeurs optimales à exploiter pour chacune des espèces. L'utilisation de capteurs et la mise en œuvre d'horloges d'hameçon apportent donc des informations comportementales très intéressantes pour valider les hypothèses de répartition des espèces concernées. La détermination des taux de survie après capture pour les espèces majeures, comme l'espadon, constitue une information primordiale avant la réalisation d'opérations de marquage.

Deux indices particuliers ont été identifiés dans le cadre de cette étude : le temps écoulé entre la mise à l'eau des hameçons et le déclenchement de l'horloge ainsi que l'heure de marée au moment du « mordage ». L'analyse de la variabilité des captures en fonction de ces deux variables est effectuée dans le document suivant (voir p. 9).

Références bibliographiques

- Ardill J. D., 1995. Atlas of industrial tuna fisheries in the Indian Ocean. IPTP/95/AT/3, 144 p.
- Bach P., Wendling B., Misselis C., Abbes R., 1999. Forme et comportement de la palangre dérivante monofilament. *In*: ECOTAP. Étude du comportement des thonidés par l'acoustique et la pêche en Polynésie. Rapport final, Convention Territoire/Evaam/Ifremer/Orstom n° 95, chap. VI, 289-360.
- Berkeley S.A., Irby E.W., Jolley J.W. Jr., 1983. Florida's commercial swordfish fishery: Longline gear and methods. Univ. of Miami Sea Grant programme, Marine Advisory Bulletin, MAP 14, 23 p.
- Boggs C.H., 1992. Depth, capture time, and hooked longevity of longline-caught pelagic fish: Timing bites of fish with chips. *Fish. Bull.*, 90, 642-658.
- Carey F.G., 1990. Further acoustic telemetry observations of swordfish. *In*: Proceedings of the 2nd international billfish symposium, Planning the Future of Billfishes, Research and management in the 90s and beyond, 1-5 Aug. 1988, Kalia-Kona, Hawaii, USA. Stroud R.H. (ed.), National coalition for marine conservation, Inc., Marine Recreational Fisheries, Savannah, Georgia, USA, 103-122.
- Carey F.G., Robinson H.B., 1981. Daily patterns in the activities of swordfish, *Xipbias gladius*, observed by acoustic telemetry. *Fish. Bull.*, 79, 277-292.
- Dagorn L., Bach P., Josse E., 1999. Le comportement des thons en milieu hauturier en Polynésie française. *In*: ECOTAP. Étude du comportement des thonidés par l'acoustique et la pêche en Polynésie. Rapport final. Convention Territoire/Evaam/Ifremer/Orstom n° 95, Chap. IX, 436-458.
- Fristshes K., Warrant E., 2001. New discoveries in visual performance of pelagic fishes. Joint Institute for Marine and Atmospheric Research, Pelagic fisheries research programme, 6(3).
- Hanamoto E., 1976. The swimming layer of bigeye tuna. *Bull. Jap. Soc. Fish. Oceanogr.*, 29, 41-44.
- Holland K.N., Brill R.W., Chang R.K.C., 1990. Horizontal and vertical movements of yellowfin and bigeye tuna associated with fish aggregating devices. *Fish. Bull.*, 88, 493-507.
- Jamet J., 1981. Manuel des pêches maritimes tropicales. II-Engins et méthodes des pêches maritimes. Société centrale pour l'équipement du Territoire international.
- Kume S., Joseph J., 1969. Size composition and sexual maturity of billfish caught by the Japanese longline fishery in the Pacific Ocean east of 130°W. *Bull. Far. Seas. Fish. Res. Lab. (Shimizu)*, 2, 115-162.
- Marsac F., Cayré P., Conand F., 1996. Analysis of small scale movements of yellowfin tuna around fish aggregating devices (FADs) using sonic tagging. 6 th Expert consultation on Indian Ocean Tunas. Colombo, Sri Lanka, 25-29 Sept. 1995. IPTP Coll. Vol. Work. Doc., 9, 151-159.
- Saito S., 1975. On the depth of capture of bigeye tuna by further improved vertical longline in the tropical Pacific. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 41, 831-841.
- Susuki Z., Kume S., 1982. Fishing efficiency of deep longline for bigeye tuna in the Atlantic as inferred from the operations in the Pacific and Indian Oceans. *ICCAT, Rec. Doc. Sci.*, 17(2).
- Takahashi M., Okazaki M., Okamura H., Yokama K., (in press). Preliminary analysis of swimming behaviour of a swordfish using an archival tag. Third international billfish symposium. 19-23 August 2001, Cairns, Australia.
- Yoshihara T., 1951. Distribution of fishes caught by the longline. II-Vertical distribution. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 16(8), 370-374.
- Yoshihara T., 1954. Distribution of catch of tuna longline. IV-On the relation between k and f with a table and diagram. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 19(10), 1012-1014.

Analyse des interactions entre les captures de grands pélagiques de la flottille palangrière réunionnaise et les conditions de pêche (caractéristiques techniques, environnement)

Jean-Claude Gaertner⁽¹⁾, François Poisson⁽²⁾, Marc Taquet⁽²⁾

(1) Centre d'océanologie de Marseille, rue de la batterie des lions, 13008 Marseille Cedex, France

(2) Ifremer, laboratoire Ressources halieutiques, rue Jean Bertho, BP 60, 97822 Le Port Cedex, La Réunion, France

Introduction

L'exploitation des grands thonidés tropicaux de la zone du sud-ouest de l'océan Indien a démarré vers 1950. Cette activité, essentiellement menée par des flottilles de palangriers asiatiques, s'est diversifiée à partir 1984 par l'arrivée de senneurs européens. En ce qui concerne l'île de La Réunion, l'implantation en 1988 par l'Ifremer des premiers dispositifs de concentration de poissons (DCP) a profondément modifié la structure et l'organisation de la pêche artisanale de cette région et a constitué le point de départ du développement de la pêche thonière (Tessier & Poisson, 2000). Par la suite, le succès des palangriers asiatiques débarquant à La Réunion, et la mise en place de mesures d'incitation à l'investissement ont contribué à l'émergence d'une flottille ciblant l'espadon. Cette flottille palangrière locale a connu en quelques années d'importantes modifications, qui se sont répercutées sur le volume des captures (de 53 t d'espadon en 1992 à 2000 t en 1999). L'essor rapide de cette pêche, qui lui confère un rôle croissant dans l'économie locale, nécessite désormais une analyse détaillée de son organisation afin de mieux comprendre ses principales caractéristiques dans la perspective de sa gestion.

Traditionnellement, les pêcheries de grands pélagiques, et notamment celles ciblant l'espadon, sont étudiées à partir de la mise en œuvre d'approches monospécifiques (Draganik & Cholyst, 1986; Podesta *et al.*, 1993). Or, bien qu'elle focalise essentiellement son effort sur l'espadon, la flottille palangrière de La Réunion capture aussi d'autres espèces d'intérêt commercial (germon, albacore, patudo, marlin, dorade coryphène, voilier) ou non (sélaciens, tortues). En conséquence, les approches monospécifiques, souvent fondées sur l'utilisation

de GLM (Generalized linear model) ou de GAM (General additive model), restent pertinentes mais ne permettent cependant pas de considérer les effets de la pêche sur l'ensemble des populations exploitées. Or, dans le contexte du code de conduite pour une pêche responsable, (FAO, 1995), la réduction des prises accessoires constitue désormais une préoccupation majeure dans la mise en place des approches de gestion des ressources. De plus, dans le cas de l'analyse du déterminisme des captures de l'espadon, les travaux fondés sur les approches monospécifiques fournissent parfois des résultats peu nets, voire même contradictoires (Bigelow *et al.*, 1999; Olson & Polovina, 1999; Podesta *et al.*, 1993).

Dans ce contexte, compte tenu de la diversité et de la complexité des processus intervenant dans le résultat des débarquements de la flottille, il est apparu nécessaire d'analyser la pêche palangrière de La Réunion à la fois par des approches classiques de type monospécifique mais aussi, de manière plus originale, en considérant son aspect multispécifique. D'un point de vue méthodologique, outre l'utilisation de techniques de modélisation linéaires, un tel projet nécessitait la mise en œuvre complémentaire d'analyses multivariées. Longtemps limitées à l'analyse d'un seul tableau de données, ces méthodes ont récemment étendu leur champ d'application à l'analyse du couplage (i) d'un tableau et d'une partition (Dolédec & Chessel, 1989), (ii) de deux tableaux (Ter Braak, 1986; Sabatier *et al.*, 1989), et enfin (iii) de K tableaux de données (Chessel & Hanafi, 1996; Escoffier & Pagès, 1994; Lavit *et al.*, 1994). Le transfert de ces nouvelles techniques au domaine de l'halieutique a été jusqu'ici principalement orienté vers l'analyse des pêcheries démersales (Pech & Laloë, 1997; Gaertner *et al.*, 1998a; Gaertner *et al.*, 1999). Toutefois, une première mise en œuvre de ces

méthodes dans le cadre d'une pêcherie de grands poissons pélagiques (Gaertner *et al.*, 1998b), caractérisée par une plurispécificité plus faible que celle traditionnellement rencontrée dans les pêcheries démersales, a permis de mieux comprendre les interactions entre les stratégies de pêche de la flottille concernée (senneurs vénézuéliens) et les caractéristiques environnementales de la zone (mer Caraïbe).

Inscrit dans ce cadre général, la présente étude a pour but d'analyser la structuration des captures des espèces de poissons pélagiques exploitées par la flottille palangrière de l'île de La Réunion. L'objectif de ce travail vise (1) à identifier les principales sources de variabilité temporelle des débarquements de cette flottille et (2) à quantifier l'influence des principales caractéristiques techniques et environnementales sur la capture des espèces pélagiques concernées.

Matériel et méthodes

La pêche à la palangre ciblant l'espadon est une pêche de nuit. Au cours des opérations de pêche, l'encornet est systématiquement utilisé comme appât et des leurres lumineux (« cyalumes ») sont répartis entre les hameçons. Le caractère nocturne de cette pêche est cohérent avec les résultats de plusieurs travaux scientifiques qui ont montré que les palangres capturaient plus d'espadons sur les filages de nuit (Kume & Joseph, 1969), dans la mesure où cette espèce recherche préférentiellement sa nourriture durant cette période (Carey & Robinson, 1981).

La flottille palangrière de l'île de La Réunion répartit son activité sur trois régions distinctes. Une première région s'étend approximativement de l'équateur jusqu'à une limite proche de 15 degrés de latitude sud, la deuxième région correspond à une zone située entre 15 et 25 degrés sud, alors que la troisième région s'étend entre 25 et 30 degrés sud (fig. 1). Toutefois, la répartition de l'effort de pêche entre ces trois régions est très hétérogène. En effet, sur la période totale de l'étude (entre 1994 et 1999), 93 % des opérations de pêche ont été réalisées dans la zone comprise entre 15 et 25 degrés sud. Ce fort déséquilibre de l'échantillonnage ne permet pas une analyse comparative rigoureuse de ces trois régions de pêche. En conséquence, nous n'avons pas pu analyser

l'hétérogénéité interrégionale de la composition des captures et seules les données récoltées dans la zone principale d'activité ont été conservées dans les analyses.

Sources de données utilisées

Les données utilisées dans cette étude proviennent de plusieurs bases de données.

Données halieutiques (base 1)

Le laboratoire Ressources halieutiques de l'Ifremer à La Réunion a mis des carnets de pêche à la disposition de toutes les unités palangrières réunionnaises. L'ensemble des marées n'est pas totalement couvert par ces carnets, dans la mesure où cette démarche est volontaire de la part des patrons. Un taux de couverture mensuel a pu, toutefois, être établi d'après les déclarations officielles obtenues auprès de l'administration des Affaires maritimes. Ces carnets sont collectés à fréquence régulière auprès des armements et patrons de pêche (Poisson *et al.*, 1998 ; Poisson & René, 1999). Ils alimentent la base des données sur laquelle repose l'essentiel des traitements visant à analyser l'influence des caractéristiques techniques des opérations de pêche sur les captures.

Excepté pour l'analyse menée à l'échelle interannuelle entre 1994 et 1999, les autres analyses se sont focalisées sur les données pour lesquelles l'effort d'échantillonnage a été maximal. Cela concerne les actions de la flottille réunionnaise réalisées entre 1998 et 2000 sur une zone comprise entre 20 et 22° S et 53 et 57° E. La base de données halieutiques ainsi traitée (*base 1*) croise 2009 opérations de pêche, pour lesquelles nous disposons des coordonnées géographiques et de la durée des différentes étapes de l'opération de pêche (filage, dérive et virage), des nombres d'hameçons mouillés et de leurres lumineux employés ainsi que des effectifs des captures ventilés par espèce.

Données expérimentales (bases 2 et 3)

Un des objectifs de notre action visait à tester l'influence de la répartition du nombre de leurres lumineux (cyalumes) sur le résultat de la pêche. Or, l'essentiel de la flottille adoptant le même type de répartition des leurres lumineux (i.e. un leurre tous les trois hameçons), il n'était pas possible de tester cet effet sur la base des résultats des livres de bord (*base 1*). L'analyse de l'effet

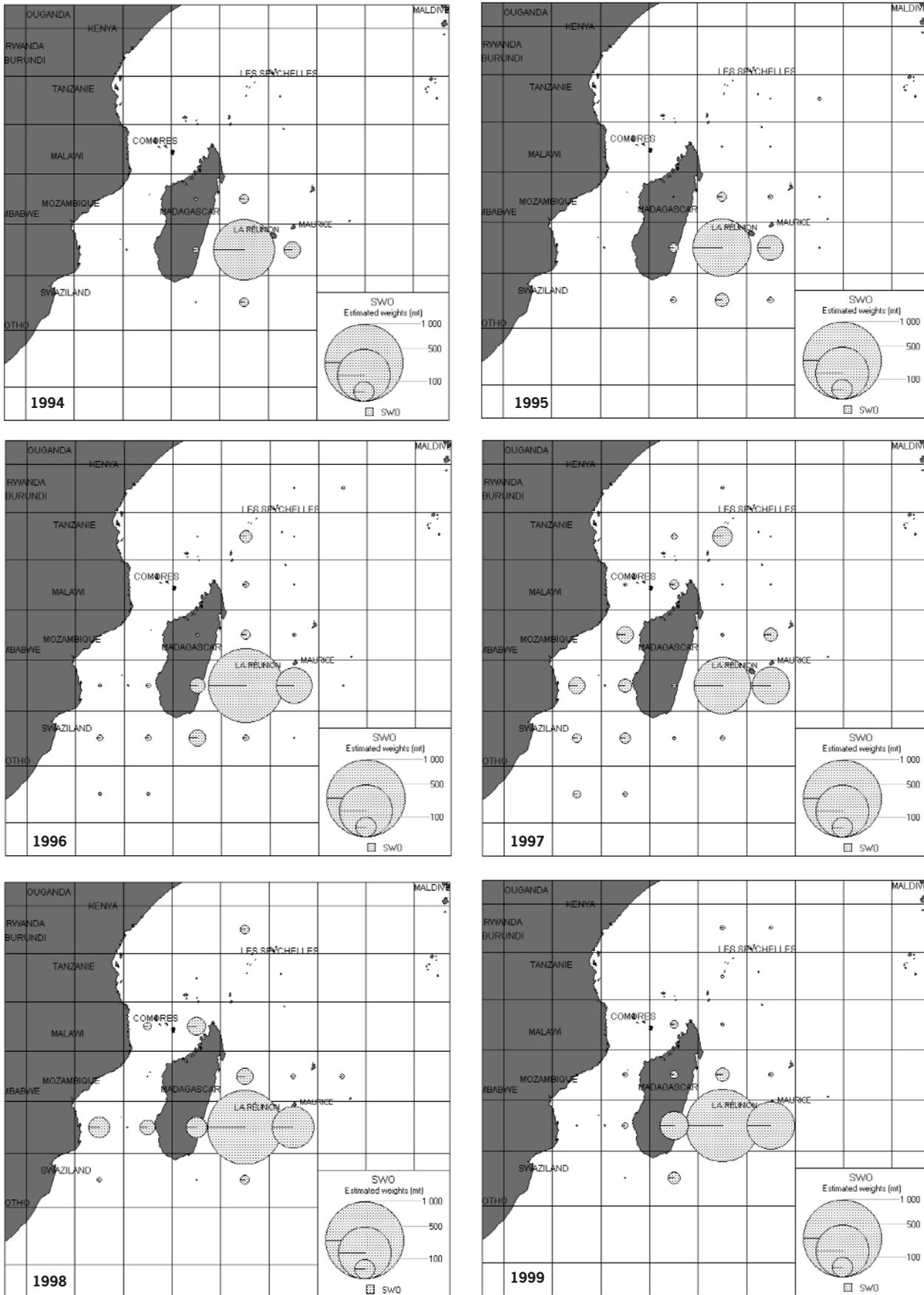


Figure 1 - Zones d'activité de la pêche palangrière et volume annuel des captures d'espadon par carré statistique de 5° de côté entre 1994 et 1999.

de la répartition des leurres lumineux a donc nécessité une expérimentation scientifique spécifique afin de créer une base de données adaptée (*base 2*). Cette expérimentation a consisté à utiliser les services de professionnels en segmentant la palangre de manière à conserver une partie à la pêche professionnelle traditionnelle et à dédier une autre partie pour évaluer l'influence de la fréquence des leurres lumineux. Le seul élément variable entre les parties de chaque palangre considérée concerne donc la répartition des leurres lumineux en fonction du nombre d'hameçons. La partie consacrée à la pêche commerciale traditionnelle est généralement armée d'un leurre tous les trois hameçons, ce qui correspond à une caractéristique quasi générale au sein de la flottille, alors que la partie gérée par les scientifiques présente une organisation d'un leurre lumineux à chaque hameçon.

Par ailleurs, un autre type d'expérimentation scientifique a été conduit à bord de plusieurs navires professionnels afin de connaître, de manière plus complète, le comportement des espèces cibles à une échelle journalière. Menées dans le cadre de l'action 3 du PPR (Programme Palangre Réunionnais), ces expérimentations ont généré une autre base de données expérimentales (*base 3*). Pour cette expérience, une portion de la ligne de pêche a été instrumentée avec des horloges d'hameçons pour définir les heures de « mordage » des différentes espèces. Par ailleurs, les heures de marées et de lever de lune ainsi que l'intensité d'éclairement de la lune ont été associées à chacune des prises. Durant les 33 marées ainsi échantillonnées, qui représentent 160 filages instrumentés, 836 poissons appartenant à 17 espèces différentes ont été capturés, mesurés et sexés.

Données environnementales (bases 4 et 5)

Deux bases de données environnementales de nature et de qualité différentes ont été utilisées dans ce travail. La première de ces bases contient des données sur l'épaisseur de la couche homogène (*mixed layer*), ainsi que la température aux profondeurs 50 et 75 mètres (*base 4*). Ces informations ont pu être obtenues à partir des archives de la NODC (National oceanographic data center; Levitus & Gelfeld, 1992). Ces données, qui sont directement accessibles sur internet (<http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.LE>

VITUS94), correspondent à des valeurs moyennées et extrapolées pour tous les mois de l'année, à partir de différentes campagnes océanographiques effectuées dans la zone, entre 1900 et 1992. Disponibles sous forme de grilles de 1 degré de côté, ces données ont préalablement subies une opération de « krigeage » (Universal linear method) afin d'attribuer une valeur à chaque point de la zone de pêche. Dans l'état actuel des choses, la précision de ces données environnementales est donc limitée. Néanmoins, en première analyse, il a été décidé de les intégrer dans certains traitements statistiques afin de rechercher l'existence de tendances générales.

La seconde base environnementale contient, pour chaque poisson capturé au cours des opérations de pêche expérimentale, l'angle d'élévation de la lune (sur un cycle de 24 h) à l'heure de mordage (*base 5*). Ces informations ont été extraites à partir du logiciel Lunar-Phase v2.40 (<http://indigo.ie/~gnuigent/Lunar-Phase/>) ainsi que de l'horaire de marée (Shom) qui calcule l'heure aux coordonnées géographiques correspondantes.

Deux indices ont été créés à partir de ces informations afin d'étudier l'influence de ce phénomène sur les rendements observés. La base de données ainsi générée a été associée à la base expérimentale 3 pour analyser l'influence des caractéristiques environnementales sur le résultat de la pêche.

Analyses statistiques

La réalisation du présent travail a nécessité la mise en œuvre d'une batterie d'analyses statistiques, faisant appel à la fois aux méthodes de régression (modèles linéaires généralisés, régression non paramétrique de type Loess) et aux techniques d'analyses multivariées (analyses inter- et intra-classes, analyse des correspondances multiples, analyses sous contraintes). Compte tenu de l'utilisation encore peu fréquente des techniques multivariées dans le contexte des pêcheries pélagiques, un effort plus important a été consenti à la présentation de cette famille de méthodes.

Méthodes de régression

Centrées sur des approches monospécifiques, plusieurs types de techniques de régression ont été mis en œuvre afin de caractériser, de manière séparée, la réponse des deux principales espèces capturées par

la pêcherie (espadon et germon) à plusieurs caractéristiques techniques caractérisant les opérations de pêche ainsi qu'à plusieurs descripteurs environnementaux.

La régression non paramétrique de type loess

La régression Loess (Locally weighted regression smoothing) peut être considérée comme une généralisation non paramétrique de la régression polynomiale multivariée. En d'autres termes, cela revient à une généralisation de la technique dite des « moyennes mobiles » qui permet d'obtenir une valeur prédite de la variable dépendante en fonction d'une régression linéaire locale pondérée dans laquelle les poids des points utilisés diminuent en fonction de l'augmentation de leur distance au point d'intérêt. Dans le présent travail, la régression Loess a été mise en œuvre afin de rechercher l'existence d'une structuration cyclique des rendements en espadon et en germon à l'échelle du mois lunaire.

Les modèles linéaires généralisés

Les modèles linéaires généralisés (GLM; Nelder & Wedderburn, 1972; Mc Cullagh & Nelder, 1989) constituent une généralisation des modèles linéaires classiques. Les GLM permettent, en effet, de moduler deux hypothèses très contraignantes des modèles linéaires (lien linéaire entre la variable réponse et les variables explicatives et loi de probabilité des erreurs gaussienne) en considérant une loi de probabilité autre que la loi de Gauss et un lien autre que l'identité. L'estimation des paramètres du GLM est réalisée par l'utilisation du Maximum de vraisemblance. Dans le présent travail, une série de modèles linéaires généralisés a été mise en œuvre afin de formaliser de manière analytique les interactions entre la variabilité de l'espadon et celle des facteurs écologiques et techniques les plus marquants. Compte tenu de la nature des données (dénombrement d'espadons), les GLM mis en œuvre dans cette étude s'inscrivent dans le cadre de la famille de distribution de Poisson et utilisent une fonction de lien logarithmique.

L'ensemble des techniques statistiques de régression (GLM et régression Loess) présenté dans le présent travail a été mis en œuvre à partir des logiciels SAS et S-Plus.

Méthodes factorielles

Centrées sur des approches plurispécifiques, plusieurs types de techniques multivariées ont été mis en œuvre afin de caractériser la pêcherie dans sa globalité. Dans le cadre du présent travail, la mise en œuvre complémentaire de techniques d'analyses factorielles des correspondances (AFC) et d'analyses en composantes principales (ACP) a permis de caractériser les principales sources de variabilité de la pêcherie palangrière de La Réunion. Par ailleurs, l'utilisation de plusieurs séries de techniques d'analyses multivariées inter-classes et d'analyses sous contraintes (ACPVI) a permis de tester l'influence d'un certain nombre de paramètres techniques (effet du nombre de leurres lumineux, etc.) et environnementaux (effet du cycle lunaire, etc.) sur le volume et la composition des captures multispécifiques débarquées par la flottille. Cette phase a notamment autorisé l'étude de l'influence de la lune à l'échelle du mois lunaire. Elle a été complétée par la mise en œuvre d'une analyse des correspondances multiples (ACM) afin d'analyser l'influence lunaire à une échelle plus fine (cycle nyctéméral).

Analyses factorielles à un tableau

Parmi les méthodes factorielles simples (i.e. mettant en œuvre un seul tableau de données), l'analyse en composantes principales (Hotelling, 1933), et l'analyse factorielle des correspondances (Benzecri, 1973), ou Reciprocal averaging (Hill, 1973), constituent les techniques les plus couramment utilisées pour le traitement des données. Ces méthodes ont pour objectif de mettre en évidence les principales tendances de variabilité d'un jeu de données multidimensionnel en le réduisant en un nombre plus limité de dimensions linéairement indépendantes. L'interprétation des caractéristiques écologiques sous-jacentes étant réalisée *a posteriori*, c'est l'appellation d'analyse indirecte de gradient (Indirect gradient analysis), qui s'est le plus largement répandue pour qualifier ces techniques dans le champ de l'écologie des communautés et de l'halieutique.

L'AFC, qui préserve la distance du khi-deux, ordonne les variables (ici les taxons) et les individus statistiques (ici les opérations de pêche) en fonction de leur profil (i.e. effectifs divisés par les sommes marginales). L'utilisation de la distance du khi-deux a pour conséquence de revaloriser le rôle des

individus statistiques et des variables de faible densité dans la constitution des axes factoriels. Dans le cadre du présent travail, l'AFC appréhende la composition spécifique des rendements observés. Elle associe donc les espèces dont les profils de variation sont similaires, et cela indépendamment de leur niveau d'abondance.

Par contre, l'ACP centrée (ACPC), qui préserve la distance euclidienne, ordonne les taxons en fonction de leur niveau de variabilité. Cette analyse associe les espèces sur la base de leur covariance. Ainsi, contrairement au cas de l'AFC, les espèces qui présentent les plus fortes variabilités (qui correspondent généralement aux espèces les plus abondantes) jouent un rôle majeur dans la formation des composantes principales. L'ACP centrée et l'AFC présentent donc une forte complémentarité. En conséquence, certains aspects de notre travail ont été traités par l'analyse comparative des résultats obtenus par la mise en œuvre de techniques fondées sur la logique de chacune de ces deux méthodes.

Essentiellement utilisée en socio-économie dans le traitement de fichiers d'enquêtes, l'analyse des correspondances multiples (ACM) a été conçue à l'origine comme une généralisation de l'AFC à plus de deux variables qualitatives. L'ACM est donc utilisée pour analyser les associations entre les modalités de différentes variables qualitatives. Son principe est très proche de celui de l'AFC. Ainsi, réaliser une ACM sur un tableau qualitatif condensé équivaut à mettre en œuvre une AFC sur le même tableau après l'avoir présenté sous forme disjonctive complète. Dans notre cas, la mise en œuvre d'une ACM visait à étudier l'influence de plusieurs descripteurs environnementaux sur les rendements de la pêcherie palangrière à l'échelle journalière.

Analyses factorielles couplant un tableau de données et une partition

Cette famille de méthodes regroupe les analyses discriminantes et antidiscriminantes d'une part, et les analyses inter- et intra-classes d'autre part. Dans le présent travail, la nécessité de caractériser la flottille palangrière en identifiant ses principales sources de variabilité nous a conduit à mettre en œuvre plusieurs analyses inter-classes (Dolédec & Chessel, 1989). Cette analyse réalise le couplage entre un tableau de données et une partition. La partition

est une variable qualitative dont les modalités (ou classes) correspondent aux différents états du facteur que l'on souhaite tester. L'analyse inter-classe se focalise ainsi sur l'analyse d'un effet particulier (effet site, effet mois, etc.) qui traduit les différences entre classes.

Le principe de l'analyse inter-classe consiste à diagonaliser le tableau des effectifs totaux par classe et par variable. Un test de permutation (Romesburg, 1985 ; Manly, 1991) est ensuite mis en œuvre afin d'évaluer la significativité des variations observées entre les classes. L'analyse inter-classe fonctionne sur une logique voisine de celle sous-jacente à l'analyse discriminante, plus connue des écologues. Les deux méthodes diffèrent essentiellement par la métrique utilisée (euclidienne dans le cas de l'inter-classe et Mahalanobis dans celui de l'analyse discriminante). Bien qu'elles soient encore peu utilisées, des exemples d'application des analyses inter-classes sont désormais disponibles dans plusieurs domaines de l'écologie (Dolédec & Chessel, 1989 ; Franquet & Chessel, 1994 ; Gaertner, 1997).

Analyses factorielles couplant deux tableaux de données

Des analyses dissymétriques de couplage de deux tableaux de données ont été mises en œuvre afin de quantifier l'influence de plusieurs caractéristiques techniques et de plusieurs paramètres environnementaux sur le résultat des captures de la flottille. Contrairement aux analyses indirectes de gradient (cf. analyses à un tableau décrites ci-dessus) qui recherchent des corrélations *a posteriori* entre les axes factoriels et les variables explicatives, dans le cas des analyses directes (dont il est question ici), les axes factoriels sont contraints à être des combinaisons linéaires de l'ensemble des variables explicatives. Ces méthodes, qui rentrent dans le cadre des analyses sous contraintes (Constrained ordination analysis, ; Ter Braak, 1987), mettent en œuvre l'analyse du couple de tableaux en considérant les variables d'un des deux tableaux comme « prédictives » des variations observées dans le second.

Dans le cas du présent travail, nous avons opté pour l'utilisation de l'analyse des redondances (Redundancy analysis), plus connue de la communauté scientifique francophone sous la terminologie d'analyse

en composantes principales sur variables instrumentales (ACPVI ; Sabatier *et al.*, 1989). La significativité globale de la relation linéaire établie entre les deux tableaux de données est, là encore, estimée par un test de permutation. L'adaptation et l'utilisation de cette technique dans le domaine marin sont récentes (cf. Pech & Laloë, 1997 ; Mazouni *et al.*, 1998).

L'ensemble des techniques statistiques multivariées présentées dans ce travail a été mis en œuvre à partir de logiciel ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1996), en libre diffusion sur internet (<http://pbil.univ-lyon1.fr/ADE-4.html>).

Résultats

Influence des caractéristiques techniques des opérations de pêche sur la variabilité des captures de la pêcherie palangrière

Influence des paramètres techniques sur le nombre d'espadons capturés

Une première série d'analyses a été focalisée sur l'espadon qui constitue l'espèce cible de la pêcherie étudiée. Cette action a consisté en la mise en œuvre d'une batterie de GLM analysant le lien entre le nombre d'espadons capturés et chacune des caractéristiques techniques prises isolément. La comparaison des résultats obtenus pour chacun de ces GLM permet de hiérarchiser l'influence des caractéristiques techniques sur le nombre d'espadons capturés (tabl. 1).

Tableau 1 - Résultat d'une série de GLM entre le nombre d'espadons capturés et chacune des caractéristiques techniques considérées isolément.

	Df	SSq	RSS
<none>		7228,974	
dt1c	1	1028,396	6200,577
dt2c	1	212,363	7016,611
dt3c	1	840,194	6388,779
dtotc	1	885,759	6343,215
Categ	1	1404,398	5824,576
d-interham	1	0,275	7228,698
long-ligne	1	821,528	6407,446
surface	1	105,935	7123,038
n-hameçons	1	1027,888	6201,086

(fonction de lien : log ; distribution : Poisson). Df = nombre de degrés de liberté, SSq = somme des carrés des écarts à la moyenne, RSS = somme des carrés des résidus, dt1 = durée du filage, dt2 = temps de dérive, dt3 = temps de virage, Categ = catégorie du bateau, d-interham = distance inter-hameçons, long-ligne = longueur de ligne utilisée, surface = surface « visitée », n-hameçons = nb d'hameçons.

Les tests F associés à chacun des GLM montrent que chacune des caractéristiques techniques considérées isolément présente une influence significative sur la variabilité des captures d'espadons ($P < 0,05$). L'examen de la somme des carrés des écarts à la moyenne (SSq) et des résidus (RSS) indique respectivement les parts expliquée et résiduelle dans chacun des modèles, la capacité de chaque caractéristique technique à prédire le nombre d'espadons capturés étant proportionnelle à SSq et inversement proportionnelle à RSS. Ainsi, il apparaît que, parmi les caractéristiques techniques étudiées, c'est la catégorie du bateau (liée à sa taille) qui influence le plus la valeur du nombre d'espadons capturés. Le nombre d'hameçons et la durée de filage interviennent ensuite avec une influence comparable, alors qu'à l'opposé la distance inter-hameçons et la surface « visitée » ont une action plus limitée.

Ces résultats sont importants dans la perspective d'utiliser une unité d'effort de pêche basée sur une caractéristique technique unique. En effet, ils permettent de guider le choix de l'expérimentateur en hiérarchisant l'influence de chacune des caractéristiques considérées sur les captures d'espadons. L'expérimentateur pourra alors définir son choix sur la base d'un compromis entre les résultats des modèles d'une part (choix parmi les meilleurs prédicteurs) et les contraintes logistiques d'autre part (choix parmi les descripteurs les plus facilement et les plus durablement accessibles auprès des pêcheurs). Dans le cas présent, il apparaît que les deux caractéristiques les plus influentes (catégorie des bateaux et nombre d'hameçons mis à l'eau) sont en partie liées (fig. 2). Ainsi, l'utilisation d'une seule de ces deux caractéristiques comme unité d'effort intégrera partiellement l'influence de l'autre.

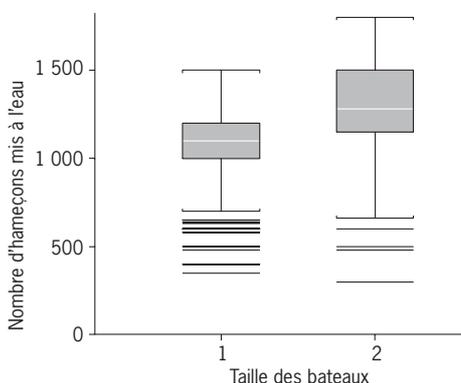


Figure 2 - Distribution du nombre d'hameçons mis à l'eau en fonction de la taille des bateaux (segment 1 : taille inférieure à 16 m ; segment 2 : taille supérieure à 16 m).

Dans ce contexte, le nombre d'hameçons mis à l'eau, par sa capacité à être recueilli « en routine » par les scientifiques du laboratoire RH de l'Ifremer, semble être un excellent compromis pour être utilisé comme unité d'effort dans la perspective où on se limite à une unité simple (i.e. faisant intervenir une seule caractéristique technique). Afin de rechercher une formalisation plus complète de l'influence des caractéristiques techniques sur les captures d'espadon, une autre série de GLM a été réalisée. Celle-ci se base sur une démarche de type « stepwise » visant à rechercher la combinaison des caractéristiques techniques étudiées susceptible de prédire de la manière la plus complète et la plus efficace les captures d'espadons déclarées par la flottille palangrière de La Réunion. Cette démarche consiste à introduire successivement, de manière décroissante, les variables les plus explicatives afin de construire « pas à pas » le modèle final. Dans le présent travail, le meilleur modèle obtenu conserve cinq caractéristiques techniques ($P < 0,05$) (tab. 2).

Tableau 2 - GLM entre les captures d'espadon et les principales caractéristiques techniques (fonction de lien : log ; distribution : Poisson).

Parameter	DF	Estimate	Standard Error	Wald 95 % Confidence Limits		Khi-Square	Pr > KhiSq
Intercept	1	0,3633	0,1607	-0,0484	0,6782	5,11	0,2380
Categ	1	0,2948	0,0204	0,2548	0,3348	208,59	<0,0001
n-hameçons	1	0,0006	0,0001	0,0005	0,0007	86,70	<0,0001
dt3	1	2,3129	0,1256	2,0667	2,5591	338,96	<0,0001
dt2	1	-0,8859	0,2319	-1,3405	-0,4313	14,59	0,0001
d-interham	1	0,0049	0,0012	0,0024	0,0073	15,25	<0,0001
Scale	0	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000		

DF = nombre de degrés de liberté, Estimate = coefficient de régression, Standard error = écart-type du coefficient de régression, Wald = intervalle de confiance de Wald, Khi-square = valeur du Khi-2, Pr > ChiSq = niveau de significativité, Categ = catégorie du bateau, n-hameçons = nb d'hameçons, dt3 = temps de virage, dt2 = temps de dérive, d-interham = distance inter-hameçons.

Plusieurs caractéristiques techniques, telles que la durée de filage (dt1), la surface parcourue par une opération de pêche (surface) ou encore la longueur de la ligne utilisée (long-line), ne figurent pas dans le modèle final. En effet, alors qu'elles présentaient un effet significatif sur la capture des espadons lorsqu'on les considéraient isolément (cf. tab. 1), leur introduction dans le modèle final s'est traduite par l'absence d'un effet significatif ($P > 0,05$). Les différences de résultats ainsi observées entre modèles n'ont rien de paradoxal. Elles sont liées à des redondances entre variables

explicatives qui se manifestent lorsque d'autres variables partiellement corrélées sont déjà introduites dans le modèle. L'introduction de variables supplémentaires dans le modèle n'apportant plus d'informations nouvelles, leur effet sur la prédiction des captures d'espadons est alors jugé « non significatif ». Il en résulte que, à partir de l'ensemble des caractéristiques techniques à notre disposition, la prédiction la plus complète du nombre d'espadons capturés peut être formalisée de la manière suivante :

$$\text{Log (nEspadon)} = 2,3129 \text{ dt3} + 0,2948 \text{ Categ} + 0,0006 \text{ n-hameçons} + 0,0049 \text{ d-interham} - 0,8859 \text{ dt2} + \epsilon$$

D'un point de vue pratique, cela permet d'orienter les priorités en matière de suivi de la flottille en consentant un effort ciblé sur le recueil des cinq caractéristiques techniques contribuant au modèle. Dans la mesure où ces données sont collectées, le recueil des autres caractéristiques telles que la longueur de la ligne, la surface parcourue et le temps de filage apparaît alors moins prioritaire. L'examen des valeurs du khi-2 associées à chaque caractéristique technique permet de juger du degré de significativité de l'effet exercé par chacune d'entre elles sur l'effectif d'espadons capturés (tab. 2). En parallèle, l'examen des coefficients de régression permet de juger de l'importance et du sens de l'action de chaque variable technique sur le nombre d'espadons capturés. Ainsi, contrairement aux modèles simples (cf. tab. 1), la variable la plus influente dans le modèle final est le temps de virage (dt3). Par ailleurs, excepté pour le temps de dérive (dt2), on note que l'augmentation de la valeur de chacune des autres variables retenues induit une augmentation du nombre d'espadons capturés. Ainsi, on peut dire par exemple que, toutes choses égales par ailleurs, les captures d'un navire de la catégorie 2 (taille > 16 m) seront supérieures, en moyenne, d'un facteur égal à $e^{(0,2948)}$ (i.e. 1,3428) à celles enregistrées par un navire de catégorie 1 (taille < 16 m).

Ceci traduit la possibilité des navires de plus grande taille à choisir des zones éloignées de La Réunion pendant la période hivernale. Ils évitent par ailleurs les interactions avec les navires plus petits se concentrant principalement dans l'ouest de l'île.

De même, 100 hameçons supplémentaires vont augmenter, en moyenne, le nombre d'espadons d'un facteur égal à $e^{(100 \times 0,0006)}$, soit 1,06. Ainsi, à titre d'exemple, le passage pour un navire de 1000 à 1100 hameçons peut laisser espérer une pêche égale, en moyenne, à 1,06 fois les captures enregistrées pour 1 000 hameçons.

La valeur négative du coefficient de régression pour le temps de dérive (dt_2) est surprenante. En effet, cela traduirait une tendance générale à capturer moins d'espadons lorsque le temps de dérive s'allonge. Or, il ne s'agit pas là d'un artefact lié à la méthodologie employée car cette observation se retrouve aussi dans la représentation des données brutes (fig. 3).

Une première hypothèse pour expliquer ce résultat repose sur la capacité des espadons à se « décrocher » des hameçons au bout de plusieurs heures de lutte. Plusieurs éléments soutiennent cette hypothèse. D'une part, les observations réalisées lors des embarquements montrent que les espadons capturés sont capables de survivre plusieurs heures accrochés à un hameçon. D'autre part, lors de la campagne d'expérimentations (base expérimentale 3), 61 % des déclenchements d'horloge ne sont associés à aucune prise, ce qui supporte l'idée qu'une proportion importante des espadons est susceptible de s'être libérée des hameçons.

Une preuve visuelle de la capacité d'un espadon à se décrocher après plusieurs heures de lutte nous a été fournie à l'occasion du tournage du film Ifremer (« L'espadon, de la recherche à l'exploitation durable »). Une séquence montre le décrochage du poisson alors qu'il est pratiquement mort à l'issue d'un combat pour se libérer.

Une seconde hypothèse se réfère à l'augmentation de la pression de prédation que pourraient exercer certaines espèces (requins, cétacés) sur les espadons capturés à partir soit d'un certain laps de temps après la capture (attraction liée à l'odeur dégagée par les individus capturés), soit après une certaine heure (dans le cas où certains prédateurs présentent une activité accrue en seconde partie de nuit). Dans le contexte de la pêche palangrière de La Réunion où 60 % et 80 % des espadons capturés mordent respectivement au cours des 4 et 6 premières heures de dérive, une telle pression de prédation serait susceptible d'expliquer

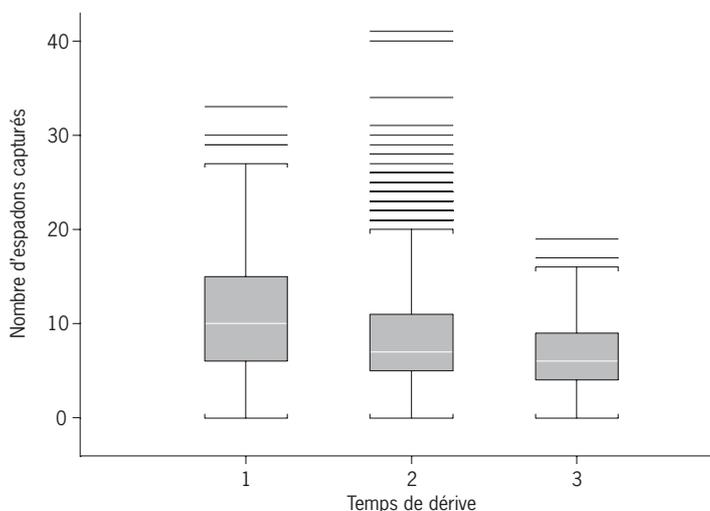


Figure 3 - Distribution du nombre d'espadons capturés en fonction du temps de dérive (1 : < 7,5 h ; 2 : entre 7,5 h et 9,5 h ; 3 : > 9,5 h).

la relation négative observée entre le nombre d'espadons capturés et le temps de dérive. Des enquêtes ont mis en évidence que seuls les cétacés sont susceptibles de réaliser une prédation totale des individus accrochés aux hameçons. La nature de ce type de prédation ne permet donc pas de la quantifier de manière précise et peut augmenter artificiellement le nombre d'hameçons inefficaces. L'action des cétacés pourrait donc expliquer en partie la diminution observée des captures avec l'augmentation du temps de dérive. Par contre, l'action des requins, qui se traduit par une prédation partielle, est répertoriée par les professionnels sur leurs livres de bord. Ces données n'ont pas été prises en compte dans la présente analyse, ce qui implique que la prédation exercée par les requins ne contribue pas au phénomène observé.

Une troisième hypothèse consiste à rejeter l'idée d'une relation directe de cause à effet entre le volume des captures et le temps de dérive. Dans ce cas, les résultats observés reposeraient sur le fait que les opérations de pêche dont la durée de dérive est faible et celles dont la durée de dérive est longue sont effectuées par des navires différents, ou dans des zones différentes, ou encore au cours de saisons différentes. Inscrite dans ce cadre, l'hypothèse selon laquelle les pêcheurs augmenteraient le temps de dérive lors de périodes réputées peu poissonneuses afin de limiter l'effet d'une mauvaise pêche semble peu probable. Par contre, un certain nombre de pêcheurs présentent une stratégie de type exploratoire qui se traduit par la

recherche de nouvelles solutions pour améliorer leurs rendements. Une telle stratégie s'accompagne d'un risque accru de mauvaise pêche, même en cas de longue dérive. Toutefois, là encore, l'importance de ce phénomène est trop limitée pour expliquer à lui seul l'essentiel de la relation négative observée entre le nombre d'espadons capturés et le temps de dérive.

Ainsi, à ce stade de l'analyse, il apparaît que la relation négative observée entre les captures d'espadons et l'augmentation du temps de dérive a probablement plusieurs origines dont la plus importante est sans doute une capacité des espadons à se décrocher naturellement des hameçons. L'ensemble de cette argumentation (essentiel des captures effectuées lors des premières heures de dérive, capacité des individus à se décrocher, risque de prédation) amène à s'interroger sur la rentabilité des opérations de pêche les plus longues. Il conduit, au contraire, à suggérer la mise en œuvre d'opérations de plus courte durée (voisine de 6 à 8 h de dérive).

En résumé, il apparaît que chacune des adaptations techniques considérées présente un rôle réel dans l'amélioration des rendements en espadon mais que, compte tenu de la redondance de certaines d'entre elles, les effets ne sont pas additifs. De plus, on note qu'une part importante de la variabilité des captures d'espadons n'est pas expliquée, même par le modèle le plus complet que l'on a pu établir. Le recueil d'informations sur d'autres caractéristiques techniques d'une part et l'utilisation d'autres familles de modèles d'autre part sont susceptibles, sans doute, d'améliorer notre capacité à prédire le nombre d'espadons capturés. Toutefois, l'importance de la part de variabilité des captures non expliquée par le modèle traduit aussi en grande partie la complexité du déterminisme de la distribution spatio-temporelle de l'espadon. Ainsi, il apparaît, à ce stade, que de nombreuses autres sources de variabilité d'ordres biologique et environnemental agissent probablement sur le comportement des individus de cette espèce. En d'autres termes, il semble que, si des adaptations d'ordre technique sont encore susceptibles d'améliorer les rendements, la variabilité de l'abondance de cette population est essentiellement conduite par d'autres types de facteurs.

Influence des caractéristiques techniques sur la densité et la composition des captures multispécifiques

Une seconde série d'analyses visait à étudier séparément l'influence de diverses caractéristiques techniques de l'opération de pêche, non plus uniquement sur le nombre d'espadons capturés, mais sur le volume et la composition des captures effectuées par la pêcherie palangrière de l'île de La Réunion. Sur la base des résultats précédents, le nombre d'hameçons mis à l'eau a été utilisé pour standardiser les effectifs capturés. Cette section repose donc sur l'analyse, pour chaque espèce, des rendements (ou PUE) en nombre d'individus capturés par hameçon mis à l'eau dans chaque opération de pêche. D'un point de vue méthodologique, cette action a été rendue possible par la mise en œuvre d'une série d'analyses inter-classes qui a permis d'évaluer l'effet isolé de chaque caractéristique technique sur le volume et la composition des captures. Elle a été ensuite complétée par une ACPVI afin de hiérarchiser le niveau de réponse de chaque espèce à l'ensemble des principales caractéristiques techniques lorsqu'on les considère simultanément.

Une première action a consisté à analyser la structuration de la flottille en référence à la distribution des captures pour la période comprise entre janvier 1994 et décembre 1999. Cette analyse, fondée sur la mise en œuvre d'une analyse inter-bateau, a montré que seulement 5 % de la variabilité des captures était affectée par des différences d'efficacité des bateaux. Le test de permutation mis en œuvre sur les résultats de cette analyse a mis en évidence la non-significativité d'un « effet bateau » sur le résultat de la pêche. Il en résulte que, en dehors de quelques bateaux (*Sainte-Marie*, *Gramoune*, *Pen ar bed*) qui présentent ponctuellement des rendements très importants en espadon, en germon, voire même en dorade coryphène (*Sainte Cécile*), aucune structuration n'apparaît au sein de la flottille (fig. 4).

Il semble que l'absence d'effet bateau traduise que, si il y a eu des modifications techniques, elles ont été simultanées et générales. Par contre, le fait que cette technique de pêche est réellement adaptée à l'espadon n'apparaît pas dans cette analyse.

Une autre série d'analyses inter-classes a été mise en œuvre afin de tester successivement les effets de la catégorie des bateaux (en référence à leur taille), de la distance inter-hameçon, de la longueur de la ligne utilisée, de la durée totale de l'opération de pêche (regroupant les phases de filage, dérive et virage), de l'orientation lors du filage et enfin de l'orientation lors de la dérive.

Alors que les GLM focalisés sur la prédiction des effectifs d'espadons capturés (cf. section précédente) ont mis en évidence l'effet de chaque caractéristique technique prise isolément, on note ici que l'inertie inter-classe (qui porte sur des rendements et intègre l'aspect plurispécifique de la pêche) représente seulement entre 1 % et 4 % de l'inertie totale selon l'effet testé (tab. 3).

Ce résultat suggère que la standardisation des captures par le nombre d'hameçons (réalisée en préalable aux analyses inter-classes) limite fortement l'influence des autres caractéristiques techniques étudiées sur la variabilité de la pêche. La prise en compte des rendements en nombre d'individus capturés par le nombre d'hameçons mis à l'eau constitue donc une base adaptée dans la perspective de l'analyse des relations entre les captures et l'environnement.

Tableau 3 - Pourcentage de l'inertie inter-classe exprimée par chacun des effets testés par rapport à l'inertie totale du jeu de données.

Effet	Part de l'inertie inter-classe dans l'inertie totale (%)	
	ACPC inter-classe	AFC inter-classe
Catégorie du bateau	4	3
Distance inter-hameçon	2	1
Longueur de ligne	2	1
Durée totale de l'opération	4	1
Orientation de la dérive	1	1
Orientation du filage	2	1

Une dernière analyse a été focalisée sur l'étude de l'influence de la répartition du nombre de leurres lumineux (cyalumes) sur la variabilité des niveaux d'abondance (ACPC inter-cyalume) et la composition spécifique (AFC inter-cyalume) des captures de la flottille palangrière. L'analyse de l'effet cyalume repose sur la campagne d'expérimentation scientifique réalisée à bord de navires professionnels (base de données 3).

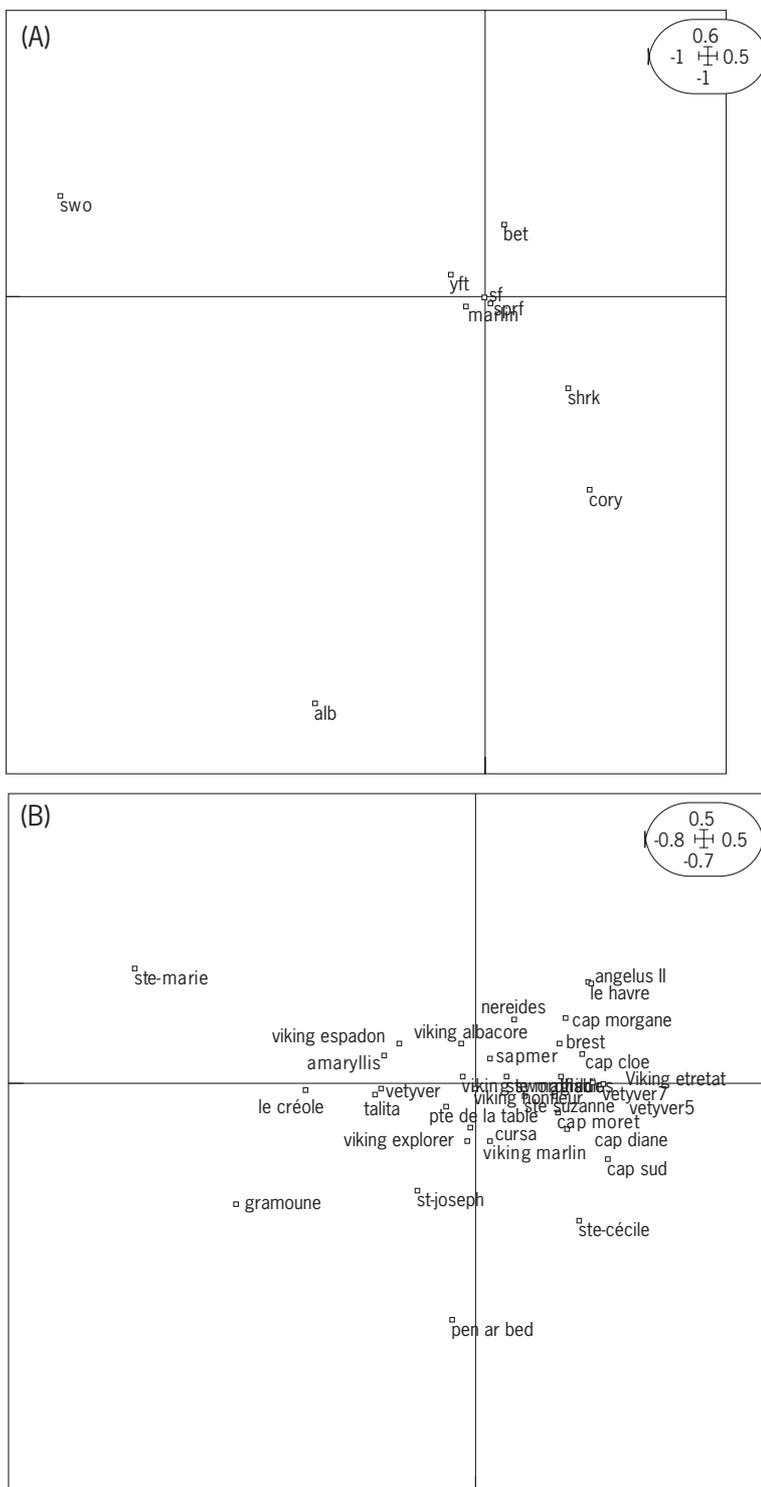


Figure 4 - Analyse inter-bateau. Projection des espèces (A) et des bateaux (B) sur le premier plan factoriel de l'ACPC inter-classe (axe 1 horizontal; axe 2 vertical) entre 1994 et 1999. Espadon (swo), germon (alb), patudo (bet), albacore (yft), marlin (marlin), lancier (sprf), voilier (sf), coryphène (cory), requins (shrck).

Le tableau 4 met en évidence un déséquilibre assez net dans l'effort d'échantillonnage consacré à chaque catégorie lors de cette expérimentation, ce qui limite l'éventail des techniques statistiques utilisables. Néanmoins, par son principe de fonctionnement, l'analyse inter-classe est peu affectée par ce type de déséquilibre (cf. description de la méthode, p. 107), et peut donc être mise en œuvre pour répondre à la question posée.

Tableau 4 - Occurrence et fréquence de la répartition des leurres lumineux (un leurre tous les x hameçons).

x	Nombre d'opérations	Fréquence
1	137	0,43
2	55	0,17
3	117	0,37
4	9	0,03

Les résultats des ACPC et AFC inter-cyalumes mettent en évidence que la très grande majorité de la variabilité observée dans les captures est indépendante de la répartition des leurres lumineux entre les hameçons (93,7 % pour l'ACPC et 91,3 % pour l'AFC ; tab. 5). Toutefois, la part de variabilité liée à la variation du nombre de leurres lumineux est significative dans les deux cas (test de permutation, $P < 0,05$). Il en résulte que la répartition du nombre de cyalumes présente une incidence à la fois sur l'importance des PUE et sur la composition spécifique de ces PUE, mais que cette incidence est faible.

Les analyses précédentes ont été focalisées sur l'étude de l'influence isolée de chaque caractéristique technique sur les rendements multispécifiques. L'ensemble des résultats obtenus montre que l'effet isolé de chaque caractéristique technique est soit non significatif, soit faible. Nous avons complété ce travail par une autre analyse afin de rechercher l'existence éventuelle d'un effet, non plus isolé, mais combiné de l'ensemble de ces caractéristiques. Dans ce

but, une ACPVI a été mise en œuvre entre les rendements multispécifiques et l'ensemble des caractéristiques techniques considérées conjointement, afin de hiérarchiser les espèces les plus réactives à l'effet combiné des principales caractéristiques techniques (tab. 6).

Tableau 6 - Résultats de l'ACPVI entre les rendements multispécifiques et les caractéristiques techniques.

	Part expliquée (%)	Part résiduelle (%)
Espadon	17,5	82,5
Germon	8,0	92,0
Albacore	3,0	97,0
Patudo	12,6	87,4
Coryphène	3,9	96,1
Peau bleue	1,7	98,3
Total	7,8	92,2

Le résultat général montre, là encore, que seule une faible part de la variabilité des rendements est liée aux caractéristiques techniques considérées. Toutefois, le test de permutation associé à la part de variabilité moyenne (7,8 %) est très fortement significatif ($P < 0,01$, cf. fig. 5). Il en résulte que les espèces dont la part de variabilité expliquée par le modèle est supérieure à 7,8 % (i.e. essentiellement l'espadon et le patudo) peuvent être considérées comme significativement influencées par l'effet combiné des caractéristiques techniques. On note que l'effet est maximum pour l'espadon, ce qui traduit bien l'effort ciblé de la flottille sur cette espèce. Toutefois, même si cet effet est

Tableau 5 - Décomposition de l'inertie totale selon l'effet cyalume (répartition des leurres lumineux).

	ACPC inter-cyalumes	AFC inter-cyalumes
Inertie totale	$3,234e^2$	1,597
Inertie inter-classe	$2,046e^1$ (6,32 %)	$1,391e^{-1}$ (8,7 %)
Inertie intra-classe	$3,030e^2$ (93,68 %)	1,458 (91,3 %)
Test de permutation	Effet significatif	Effet significatif

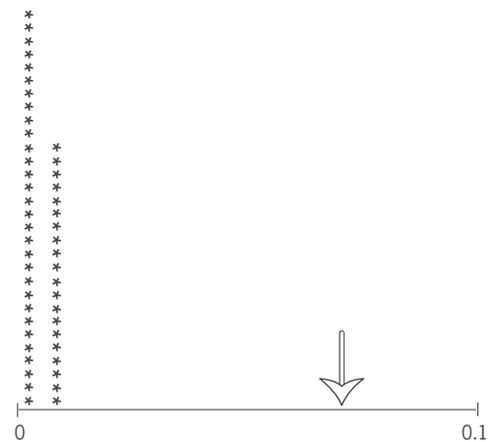


Figure 5 - Test de permutation associé à l'ACPVI entre les rendements multispécifiques et les caractéristiques techniques. Distribution des valeurs du lien entre les deux tableaux établis pour chacune des 1000 permutations (schématisées par des étoiles) et du lien observé (flèche).

significatif, il reste faible. En d'autres termes, cela confirme (1) une efficacité réelle, mais limitée, dans l'adaptation technique de la flottille et (2) l'intervention de nombreux autres processus dans la dynamique temporelle des espèces concernées. En résumé, on observe que l'ensemble des caractéristiques techniques considérées isolément présentent toutes un effet significatif sur le nombre d'espadons capturés, alors que cet effet est non significatif ou très faible sur le niveau et la composition des rendements multispécifiques. Nos résultats imposent plusieurs remarques. Premièrement, ils suggèrent que le nombre d'hameçons constitue une unité d'effort adaptée pour standardiser les données. Deuxièmement, ils montrent que les adaptations techniques consenties par la flottille pour la capture de l'espadon n'ont que très peu de conséquences sur la variabilité des captures des espèces accessoires. De manière plus détaillée, nos résultats ont mis en évidence que les adaptations techniques de la flottille présentent un impact réel mais limité pour augmenter les rendements en espadon, patudo et germon. L'impact des caractéristiques techniques considérées dans notre étude reste donc très marginal en comparaison d'autres facteurs non maîtrisés (environnement, comportement individuel, etc.) qui agissent de manière prépondérante sur ces rendements.

Caractérisation des principales sources de variabilité temporelles des rendements de la pêche palangrière

Caractérisation de la pêche à l'échelle annuelle

La mise en œuvre d'une AFC interannuelle sur les résultats des rendements de la flottille entre 1994 et 1999 a mis en évidence l'absence d'un effet annuel significatif. Ainsi, en dépit de l'augmentation importante du volume global des captures (Poisson & Taquet, 2000), la composition spécifique des rendements n'a pas évolué de manière significative à l'échelle interannuelle. En conséquence, seule la période comprise entre janvier 1998 et décembre 1999 a été retenue pour les analyses suivantes dans la mesure où elle comporte les résultats les plus complets et les plus précis de l'ensemble de la série des données. Sur cette base, nous avons poursuivi la caractérisation de la pêche à la fois en termes de

composition spécifique (mise en œuvre d'une AFC) et de variabilité des rendements spécifiques (mise en œuvre d'une ACPC).

Tableau 7 - Pourcentages d'inertie exprimés par les 4 premiers axes des analyses (ACPC et AFC) mises en œuvre sur les données de la période 1988-1999.

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
ACPC	0,4267	0,2758	0,1653	0,0535
AFC	0,2248	0,1907	0,1534	0,1029

La distribution des inerties exprimée par chacun des axes factoriels de l'ACPC et de l'AFC nous a conduit à conserver les deux premiers axes de chacune de ces analyses (tab. 7). La projection des espèces sur le premier plan de l'ACPC nous permet de représenter l'importance de la variabilité des rendements spécifiques (fig. 6a). Celle-ci fait très clairement ressortir l'espadon (swo) sur le premier axe alors que le germon (alb) et la dorade coryphène (cory) expliquent la formation du deuxième axe. Les positions de l'espadon sur le premier axe est un résultat attendu, qui confirme la stratégie de pêche de cette flottille, fortement focalisée sur la capture de cette espèce. Les positions du germon et à un degré moindre de la dorade coryphène sur l'axe 2 traduisent par contre un phénomène différent. Elles montrent, en effet, qu'une partie de l'activité de cette flottille peut être orientée dans certaines circonstances vers ces deux autres espèces. De plus, lorsqu'il existe, l'effort consenti pour la capture du germon et de la dorade coryphène semble indépendant de celui qui est traditionnellement réalisé vers l'espadon.

La projection des espèces sur le premier plan de l'AFC permet de mieux comprendre la composition des débarquements (fig. 6b). Les deux premiers axes exprimant des inerties voisines, ils traduisent donc des phénomènes d'importances similaires. On retrouve l'association entre le germon et la dorade coryphène qui confirme que les rendements de ces deux espèces présentent un profil de distribution similaire mais, par contre, différent de celui de l'espadon. Seul le patudo (bet) présente des rendements maximaux dans des conditions relativement proches de celles où l'on observe les valeurs les plus fortes pour l'espadon. On peut aussi noter, sur l'axe 2, l'association des différentes espèces de requins qui semblent donc être toutes capturées dans des conditions similaires.

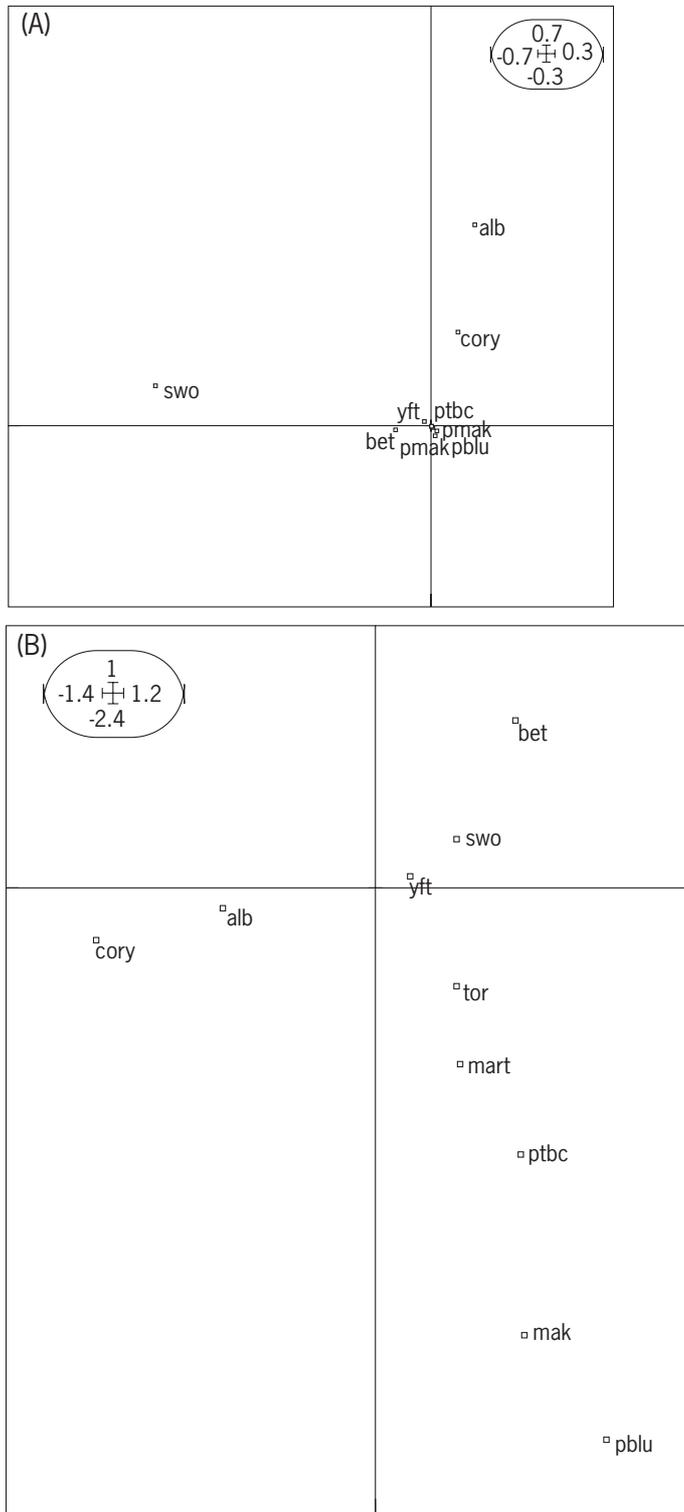


Figure 6 - Projection des espèces sur le premier plan factoriel de l'analyse en composantes principales centrée (A) et de l'analyse factorielle des correspondances (B), mises en œuvre sur les rendements obtenus en 1998 et 1999. (Axe 1 horizontal, axe 2 vertical). Espadon (swo), germon (alb), patudo (bet), albacore (yft), marlin (marlin), lancier (sprf), voilier (sf), tortues (tor), requin marteau (mart), peau bleue (pblu), coryphène (cory), requin pointe blanche (ptbc), requin mako (mak).

À ce stade de l'analyse, il est difficile de caractériser précisément les conditions qui sont responsables des associations et des oppositions mises en évidence dans les captures. Toutefois, les résultats des analyses précédentes ont permis d'éliminer un certain nombre d'hypothèses (faiblesse de l'influence des caractéristiques techniques étudiées, absence d'effet interannuel). La suite de notre action s'est donc focalisée sur les autres aspects que le jeu de données disponible nous permettait de traiter.

Analyse de l'évolution saisonnière des rendements de la pêche

La poursuite de la caractérisation de la flottille palangrière de l'île de La Réunion nous a conduit à focaliser notre analyse sur la recherche d'une hétérogénéité mensuelle. Dans ce cadre, et suivant la logique méthodologique présentée dans la partie Méthode du présent document, nous avons mis en œuvre une analyse intermensuelle.

Les résultats de cette analyse montrent que 19,3 % de la variabilité des captures sont liés aux variations mensuelles. La mise en œuvre d'un test de permutation a mis en évidence que cet effet est très significatif ($P < 0,01$). Les deux premiers axes de l'ACPC intermensuelle expriment respectivement 86 et 8 % de la variabilité intermensuelle. En conséquence, la quasi-totalité de l'information relative aux différences mensuelles des rendements est contenue dans le premier axe de l'ACPC inter-classe. Toutefois, pour simplifier l'interprétation des résultats, nous présentons la projection des espèces et des mois sur les deux premiers axes de l'ACPC intermensuelle (fig. 7). Ces représentations montrent clairement que l'effet mensuel concerne presque exclusivement le germon (alb) dont les rendements présentent un maximum très net en novembre et en décembre. La projection de la dorade coryphène (cory) suggère que cette dernière suit un schéma saisonnier voisin, mais d'une intensité et d'une régularité beaucoup moins prononcées que celles du germon. La projection de l'espadon (swo), qui explique la formation du deuxième axe, n'est pas interprétable compte tenu du faible pourcentage d'inertie intermensuelle exprimé par cet axe. Ainsi, en dehors du cas du germon (et à un degré moindre de la dorade coryphène), aucune forte saisonnalité n'apparaît dans les rendements de la flottille.

Influence des paramètres environnementaux sur la variabilité des rendements de la pêche de la palangrière

L'analyse de l'influence de paramètres environnementaux sur la variabilité des rendements a été mise en œuvre à partir de plusieurs bases de données différentes (cf. Matériel et méthodes). Compte tenu des caractéristiques de la pêche, un effort particulier a été orienté vers l'analyse de l'influence de la lune. Dans ce contexte, l'analyse d'un effet de la lune a été recherchée à deux échelles temporelles différentes (cycles mensuel et journalier). L'analyse à une échelle mensuelle a pu être mise en œuvre à partir de la base halieutique 1. L'analyse à l'échelle journalière s'appuie, par contre, sur un jeu de données associant les bases expérimentale 3 et environnementale 5. Enfin, une dernière analyse, s'appuyant sur la base environnementale 4, visait à quantifier l'influence de plusieurs paramètres physiques du milieu sur la variabilité des rendements des différentes espèces de la pêche.

Analyse de l'évolution des rendements à l'échelle du cycle lunaire mensuel

Afin de tester l'influence du cycle lunaire sur les rendements de la pêche, on a mis en œuvre une analyse inter-classe basée sur la recherche d'un effet jour lunaire (ACPC inter-jour lunaire) sur l'ensemble des espèces capturées entre 1998 et 1999. La variabilité inter-jour lunaire représente 13,3 % de la variabilité totale. Le test de permutation montre que cet effet est très significatif ($P < 0,01$). La projection des espèces et des jours lunaires permet de caractériser cet effet. Les deux premiers axes de cette analyse expriment respectivement 71 et 17 % de la variabilité inter-classe. Comme pour l'analyse mensuelle, la variabilité inter-jour lunaire concerne principalement le germon (alb). Les rendements de cette espèce atteignent ainsi un maximum très net au cours de la pleine lune (maximum entre les jours 13 et 19) et des valeurs minimales au cours de la nouvelle lune (minimum entre les jours 25 et 6; fig. 8). L'espadon (swo), qui participe

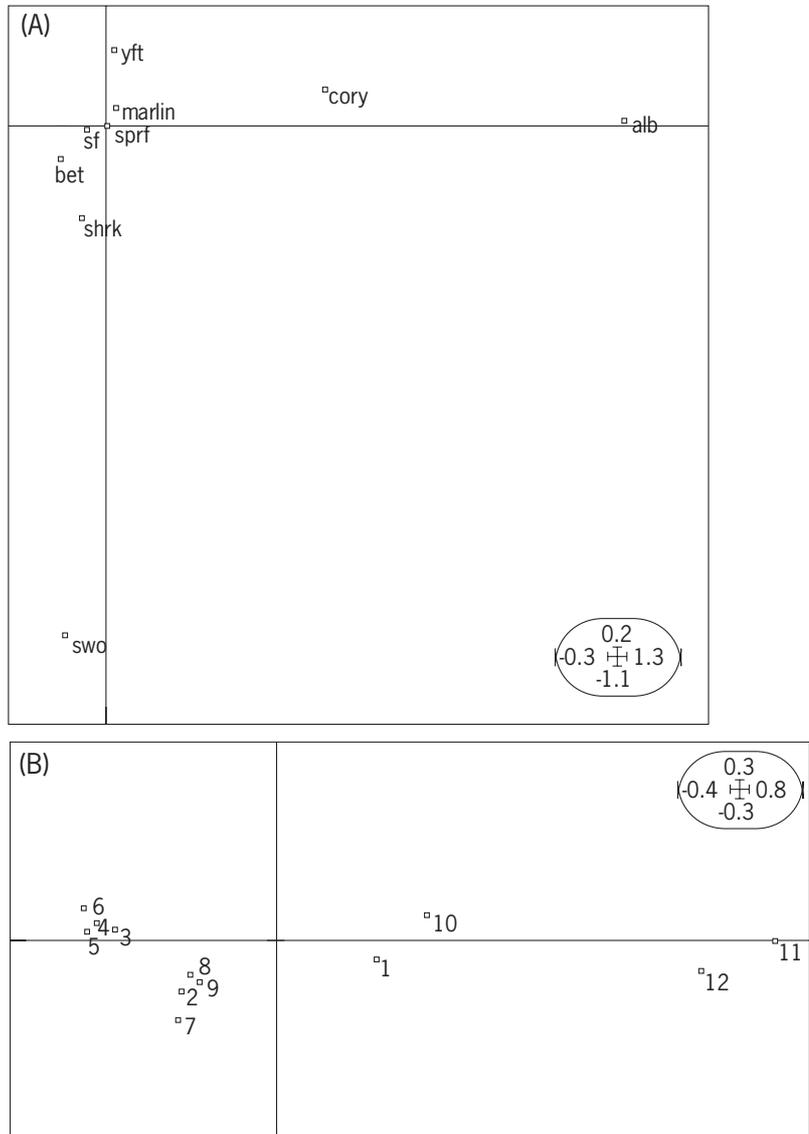


Figure 7 - Analyse intermensuelle. Projection des espèces (A) et des mois (B) sur le premier plan factoriel de l'ACPC inter-classe mise en œuvre sur les rendements obtenus en 1998 et 1999 (axe 1 horizontal; axe 2 vertical). Le code des espèces est donné dans la figure 4. Les mois sont codés de 1 à 12 par ordre chronologique.

seulement de manière réduite au gradient exprimé par ce premier axe, est par contre essentiellement responsable du second axe. La projection des jours lunaires sur l'axe 2 de l'analyse suggère que l'espadon présente des rendements maximaux pour les jours 7 et 9. Par ailleurs, sur le premier plan de l'analyse, aucune autre espèce ne semble présenter une variabilité importante en liaison avec le cycle lunaire.

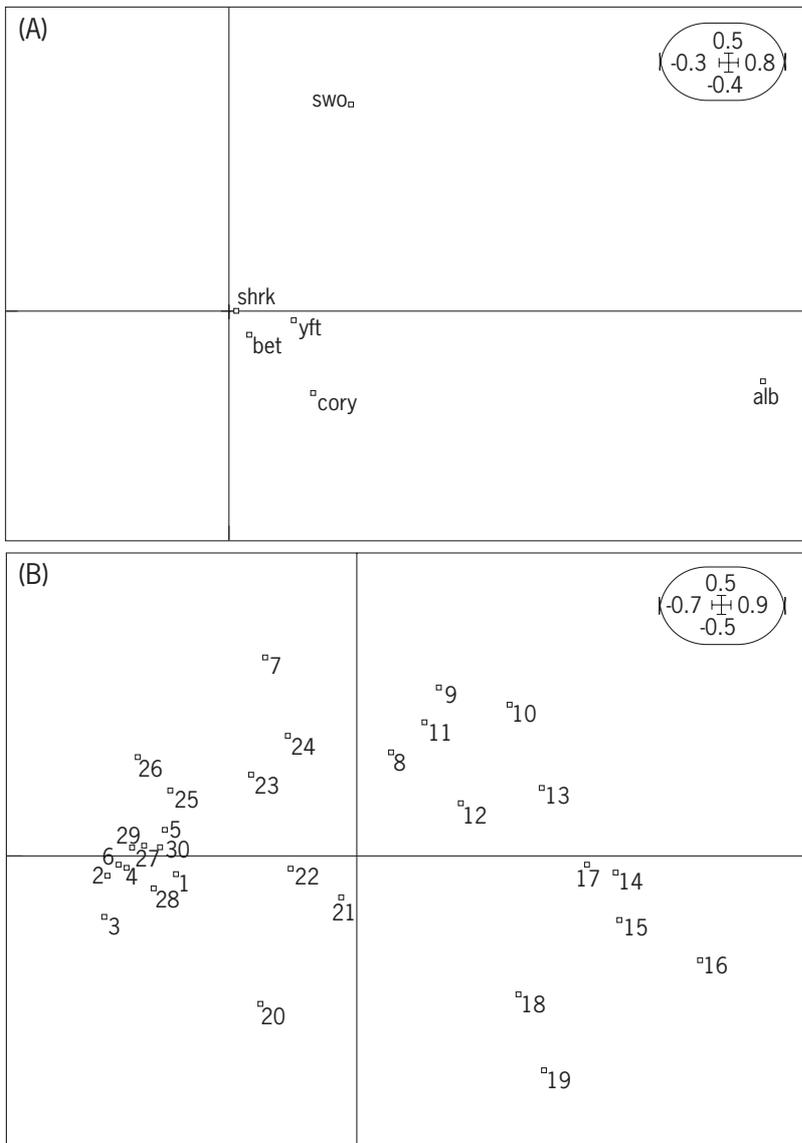


Figure 8 - Analyse inter-jour lunaire. Projection des espèces (A) et des jours lunaires (B) sur le premier plan de l'ACPC inter-classe mise en œuvre sur les rendements obtenus en 1998 et 1999 (axe 1 horizontal; axe 2 vertical). Le code des espèces est donné dans la figure 4. Les jours lunaires sont codés par ordre chronologique.

Sur la base de ces résultats, une technique de régression locale non paramétrique de type Loess a été mise en œuvre afin de cibler l'analyse de l'influence du cycle lunaire respectivement sur le germon et sur l'espadon (fig. 9). Ainsi, sur la figure 9, la courbe centrale représente la variation des rendements moyens d'espadon (ou de germon) en fonction du jour lunaire. Les deux courbes externes délimitent une région de confiance autour de la valeur moyenne estimée. Cette région de confiance possède 95 % de chances de contenir la véritable valeur des rendements dans la population statistique pour chacun des jours lunaires.

Cette représentation confirme et précise la forte structuration des rendements de ces deux espèces en fonction de la période du cycle lunaire mensuel. Elle met clairement en évidence que l'évolution des rendements en germon est associée de manière étroite et positive à la variation du niveau d'illumination lunaire. La superposition d'une région de confiance autour des rendements estimés pour chacun des jours lunaires exprime une très faible variabilité. Le maximum de rendements en germon, recensé pendant la période de la pleine lune, est en moyenne supérieur d'un facteur 3 aux rendements minimaux observés pendant la nouvelle lune. Enfin, on note que l'action de la lune sur les rendements en germon ne semble pas se manifester à travers les variations journalières de l'amplitude du marnage.

En ce qui concerne l'espadon, l'évolution des rendements en espadon au cours du cycle lunaire mensuel est à la fois moins prononcée, plus complexe et en partie opposée à celle décrite pour le germon. Les rendements en espadon présentent un niveau minimal autour des jours 14 à 17 (pendant la pleine lune), période caractérisée à la fois par une illumination maximale et une amplitude importante de la variation des hauteurs d'eau au cours du cycle tidal. Les rendements atteignent deux maxima, respectivement autour des jours 7 à 9 (premier quartier lunaire) et 22 à 24 (dernier quartier), caractérisés par les plus faibles amplitudes de marnage. Ainsi, sur la période couverte par ces trois quartiers lunaires, les rendements en espadon suivent une évolution inversement proportionnelle à la fois à l'intensité lumineuse et, à un degré moindre, à l'amplitude du marnage. La superposition graphique de l'intervalle de confiance confirme la forte reproductibilité de ce schéma de variabilité au cours de ces trois périodes du cycle lunaire mensuel. Par contre, la relation observée entre les rendements en espadon et l'intensité lumineuse lunaire n'est pas respectée pour une période centrée sur la nouvelle lune (et qui s'étend sur les derniers jours du dernier quartier et sur les premiers jours du premier quartier). En effet, les rendements en espadon subissent une certaine diminution au cours de cette période, pourtant marquée par le minimum d'intensité lumineuse. De plus, la diminution des rendements reste

modérée alors que l'amplitude des variations de hauteur d'eau au cours des cycles tidaux est maximale. Par ailleurs, la diminution des rendements observée à cette période s'accompagne d'une augmentation de l'incertitude (élargissement de la zone de confiance). Ce phénomène peut s'expliquer en partie par un artéfact technique lié au nombre plus faible de points utilisés pour la régression locale dans cette période (effet de bordure). Toutefois, l'importance et l'extension dans le cycle lunaire de cette augmentation de la variabilité suggèrent qu'une part non négligeable de ce phénomène est liée à une plus grande variabilité des opérations de pêche au cours de la nouvelle lune.

En résumé, à l'échelle du cycle lunaire, les rendements en espadon présentent une évolution qui peut être décomposée en deux grandes périodes. Une première période correspond à la partie du cycle lunaire la plus éclairée par la lune. Durant cette période, qui s'étend entre le premier et le dernier quartiers lunaires, nos résultats suggèrent que la lune influence les captures d'espadons par l'action conjointe de la variation d'illumination lunaire et de l'amplitude du marnage. Par contre, durant la seconde période (partie du cycle lunaire la plus sombre), seule la relation avec le marnage semble subsister. On assiste toujours à une tendance à la diminution des rendements liée à l'augmentation de l'amplitude du marnage. Toutefois, à cette période, les rendements en espadon sont essentiellement caractérisés par une forte variabilité, ce qui suggère qu'en l'absence d'action de la luminosité l'influence de la lune (par sa seule attraction) est très faible.

Analyse de l'influence du cycle lunaire à l'échelle journalière

L'analyse de la variabilité des captures à l'échelle journalière s'appuie sur les résultats d'une expérimentation spécifique présentée dans ce volume (voir p. 79). L'utilisation des résultats de cette expérimentation nous a conduit à analyser les captures des cinq espèces les plus abondantes en référence à trois variables environnementales :

- le temps écoulé entre la mise à l'eau des hameçons (fin du filage) et le déclenchement de l'horloge associée à chaque hameçon (moment où l'individu mord à l'hameçon). Cette variable, appelée « Heure filage » dans la suite du texte, a été décomposée en quatre modalités (de 0 à 4 h, 4-7 h, 7-10 h, plus de 10 h);

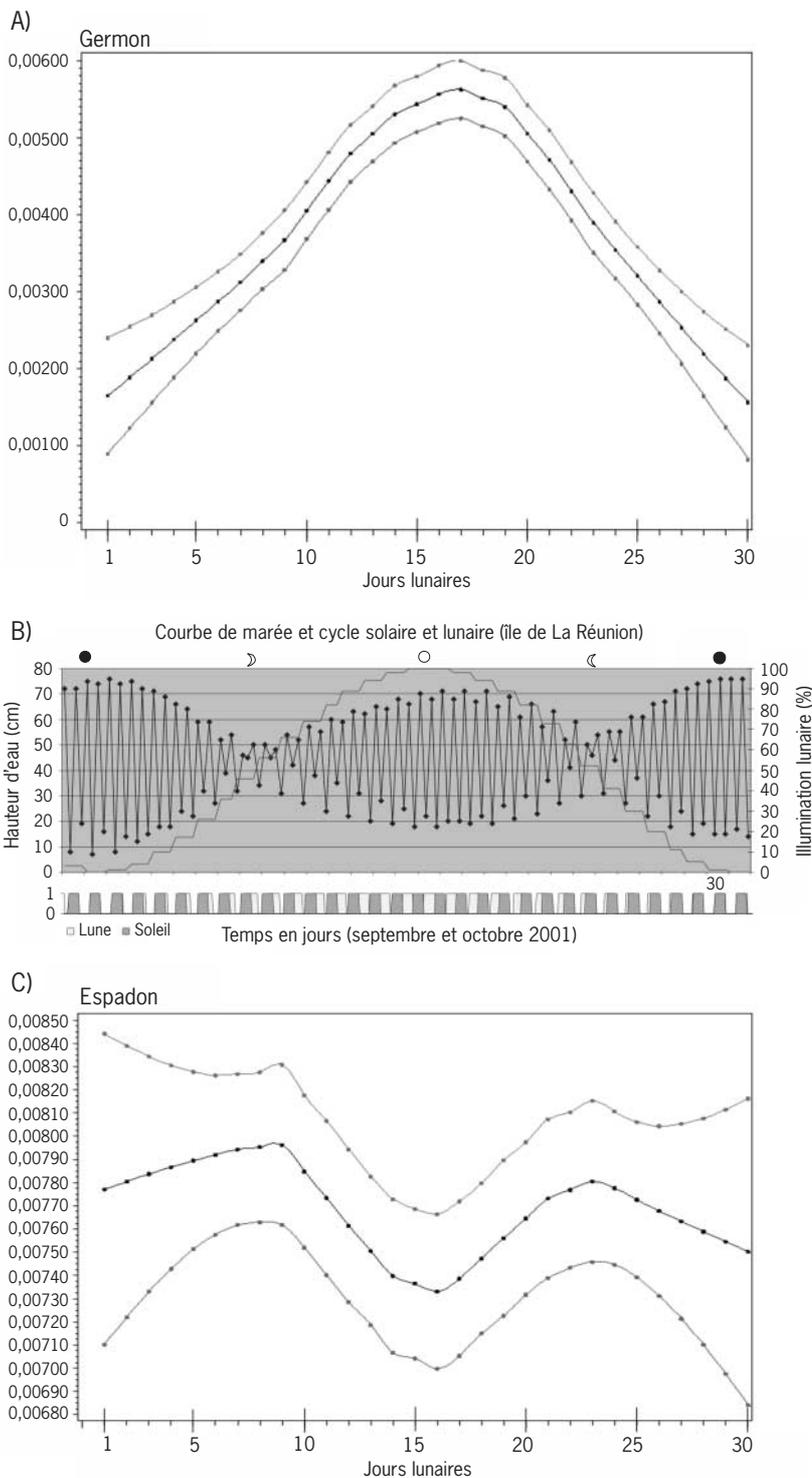


Figure 9 - Régression locale non paramétrique de type Loess sur les rendements de la flottille en 1998 et 1999. Courbe de variation des rendements moyens en germon (A) et en espadon (C) à l'échelle du cycle lunaire mensuel. Évolution du niveau d'illumination lunaire et de la hauteur d'eau (B).

- l'évolution des marées, décomposée en quatre modalités (marée descendante, étale de basse mer, marée montante, étale de pleine mer);
 - l'intensité de pénétration des rayons lumineux d'origine lunaire. Cette variable a été décomposée en trois modalités en fonction de l'angle fait par l'astre avec la surface de la mer:
 0: angle négatif, pas de lune visible,
 1: angle <45°, faible luminosité,
 2: angle entre 45 et 90°, forte luminosité.
 Le tableau 8 présente le nombre d'individus capturés pour les cinq espèces les plus abondantes. On retrouve fort logiquement la prépondérance des espadons dans les captures.

Tableau 8 - Effectif et fréquence des espèces considérées.

Espèce	Nombre d'individus capturés	Fréquence (%)
Espadon	343	57,5
Germon	68	11,4
Albacore	37	6,2
Patudo	75	12,6
Peau bleue	74	12,4
Total	597	100

La mise en œuvre d'une ACM sur le tableau résultant vise à identifier les conditions favorables à la capture des individus des cinq espèces principales en référence aux trois variables environnementales considérées. L'examen de l'inertie exprimée par les axes de l'ACM nous a conduit à travailler sur le premier plan factoriel qui représente 35 % de l'inertie totale. La relative faiblesse de l'inertie exprimée par les premiers axes de l'ACM est inhérente à son principe général de fonctionnement qui consiste, notamment, à décomposer l'inertie totale en autant d'axes factoriels qu'il y a de modalités.

La projection des modalités de chaque variable sur le premier plan factoriel (fig. 10a) ou séparée pour chacun des deux axes (fig. 10b), ainsi que la projection des individus séparés par espèce (fig. 10c) offrent une représentation synthétique de l'organisation des captures à l'échelle étudiée. En effet, la figure 10a permet de caractériser chaque région factorielle en référence aux trois variables environnementales étudiées. Présentée dans le même but, la figure 10b peut être utilisée dans le cas où des variables sont faiblement corrélées avec l'un ou l'autre des deux axes factoriels retenus. Dans ce cas, il est, en effet, préférable d'interpréter l'organisation des modalités de chaque variable essentiellement sur les axes avec lesquels celle-ci est le plus fortement corrélée. La figure 10b focalise ainsi l'ordination des différentes modalités de chaque variable sur chaque axe pris séparément¹. Enfin, la figure 10c permet d'identifier dans quelle région factorielle chaque espèce est (ou n'est pas) capturée.

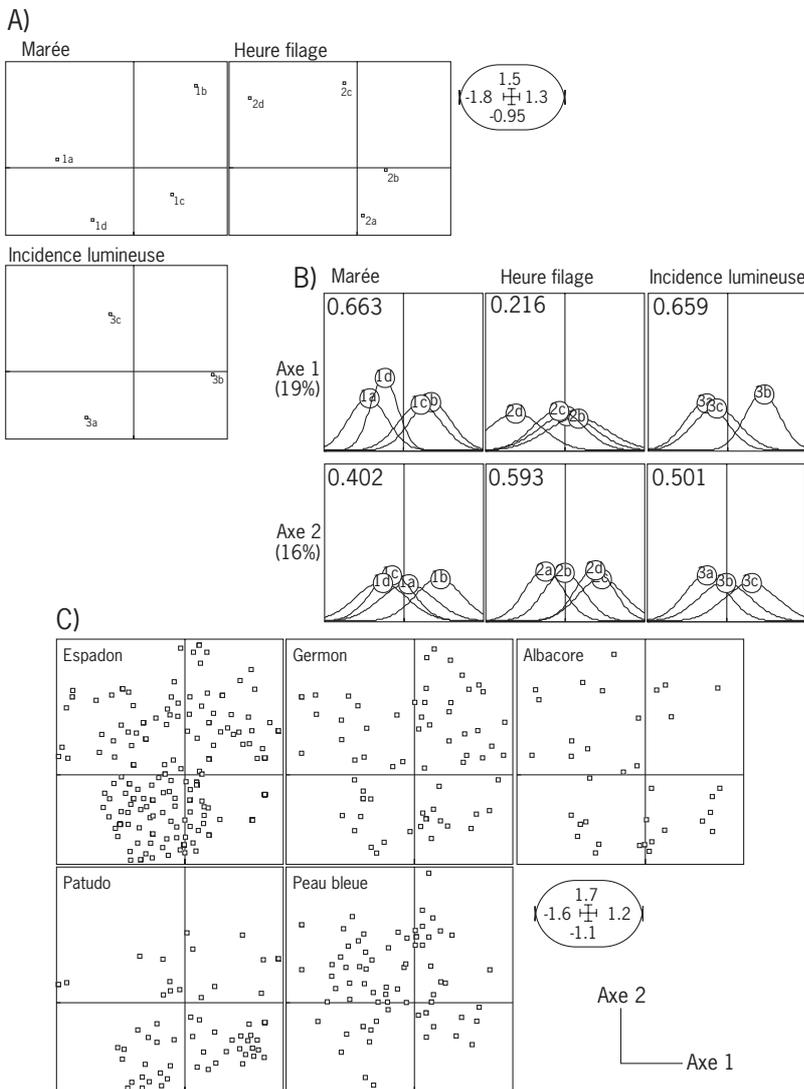


Figure 10 - Projection des modalités de chaque variable (A) sur le premier plan factoriel de l'ACM, (B) séparée pour chacun des deux premiers axes de l'ACM. (C) Projection des individus séparés par espèce sur le premier plan de l'ACM. Description des modalités : Marée (1a : descendante; 1b : pleine mer; 1c : montante; 1d : basse mer) - Heure filage (2a : 0-4 h; 2b : 4-7 h; 2c : 7-10 h; 2d : >10 h) - Intensité lumineuse (3a : faible; 3b : forte; 3c : nulle).

1. La modalité de chaque variable est située au centre de gravité des individus qui la possède. Une courbe de densité de probabilité, centrée sur le centre de gravité de chaque modalité, rend compte du degré de variabilité des individus concernés.

Dans le cas présent, l'examen des corrélations entre les différentes variables et chacun des axes indique que la structuration des individus en fonction (i) de la marée sera essentiellement analysée sur l'axe 1 (0,663) et à un degré moindre sur l'axe 2 (0,402), (ii) de l'heure de filage sera uniquement analysée sur l'axe 2 (0,593) et (iii) de l'intensité lumineuse lunaire sera analysée sur les axes 1 (0,659) et 2 (0,501).

La projection des individus de chaque espèce s'organise dans les différentes régions factorielles, ce qui indique qu'aucune des conditions environnementales décrites par nos trois variables n'est suffisamment hostile pour annuler la possibilité de capturer une des cinq espèces étudiées. Toutefois, pour certaines espèces, la projection des individus sur le plan factoriel présente une forte hétérogénéité. Cette observation traduit le fait que les trois descripteurs pris en compte dans notre étude permettent d'identifier l'existence de conditions favorables (et défavorables) à la capture des espèces en question.

Ainsi, pour l'espadon, la présence du maximum d'individus dans la partie négative de l'axe 1 suggère que les captures de cette espèce sont plus importantes lors de la marée descendante et en basse mer. De manière encore plus nette, il apparaît que le maximum de densité des espadons est observé dans une région factorielle encore plus restreinte (partie négative des axes 1 et 2). Cette région factorielle se caractérise à la fois par des captures rapides (temps réduit entre la mise à l'eau des hameçons et la capture des individus) et par une faible intensité de pénétration des rayons lumineux d'origine lunaire. En résumé, il semble donc que les espadons chassent très activement en début de pêche, peut-être en raison d'une plus grande fraîcheur de l'appât. De plus, il apparaît que la conjonction des marées en phase descendante ou de basse mer avec un faible éclairage des rayons lunaires est favorable à la capture des espadons. Ce résultat suggère l'existence d'une influence de la lune sur la capture des espadons à l'échelle journalière. Cette influence, qui semble se manifester à la fois par l'intermédiaire de l'évolution des marées mais aussi par celui de la variation de l'intensité lumineuse, est en totale cohérence avec les conclusions émises à l'échelle mensuelle. Toutefois, là encore, il s'agit d'un effet subtil, trop altéré par la variabilité inhérente aux opérations de pêche pour être facilement « prédictible ».

L'hypothèse d'un stimulus lié à l'intensité lumineuse avait déjà été évoquée par Carey & Robinson (1981) et Carey (1990) à partir des résultats d'opérations de marquage acoustique.

Cette espèce évolue dans les eaux profondes durant la journée en se maintenant à un seuil préférentiel de luminosité (isolume) pour remonter vers les eaux de surface pendant la nuit.

En ce qui concerne le germon, la projection des individus est relativement homogène, ce qui ne permet pas de déceler de conditions favorables de captures à l'échelle journalière. Ainsi, la forte influence de l'intensité lumineuse observée à l'échelle mensuelle n'apparaît pas dans les résultats de notre expérimentation focalisée sur l'échelle journalière. La projection sur l'albacore ne permet pas non plus de fournir des conclusions. Le nombre limité d'albacores capturés dans cette expérimentation n'est pas favorable à l'analyse de son déterminisme.

Le patudo et le requin peau bleue présentent une distribution relativement opposée sur l'axe 2 de l'ACM. Les patudos présentent des conditions favorables visiblement proches de celles observées pour l'espadon en ce qui concerne l'heure de filage (capturés rapidement après la mise à l'eau des hameçons). De même, ils semblent très faiblement capturés en l'absence de rayons lumineux d'origine lunaire.

Les capacités visuelles similaires de l'espadon et du thon obèse confèrent à ces espèces une aptitude spéciale à la capture de proies en eau sombre (Fristshes & Warrant, 2001). Ceci pourrait expliquer leur association dans les différents traitements.

Les requins peau bleue, par contre, seraient capturés plus tardivement, et cela plus particulièrement en l'absence de lune. Ce phénomène pourrait s'expliquer par une attraction liée à l'odeur des poissons préalablement capturés par la palangre. Toutefois, l'ensemble de nos résultats repose ici sur une expérimentation limitée dans le temps. Or, en dehors des espadons, le nombre réduit d'individus capturés ne permet pas de tirer des conclusions robustes sur la base de cette seule expérimentation. Ainsi, les suggestions émises sur le déterminisme des espèces accessoires à l'échelle nyctémérale permettent uniquement de dégager, en première analyse, quelques tendances générales qu'il faudra impérativement confirmer par d'autres expérimentations.

Analyse des interactions entre les rendements de la pêcherie et des paramètres physiques du milieu

Les données disponibles pour avancer dans la quantification des interactions entre les rendements observés de la pêcherie et l'environnement physique du milieu étaient très peu nombreuses au moment de l'étude (base 4). De plus, aucune donnée ne provenait de mesures réalisées durant la période des opérations de pêche. Néanmoins, il a été possible, à titre exploratoire, de superposer les rendements de la flottille palangrière avec trois variables environnementales (épaisseur de la couche homogène, températures à 50 et à 75 m de profondeur).

Une analyse en composantes principales sur variables environnementales (ACPVI) a été mise en œuvre afin de quantifier les relations entre la variabilité des paramètres environnementaux considérés et celle des niveaux des rendements de chaque espèce. Les résultats montrent que 10 % seulement de la variabilité des captures sont liés aux trois variables environnementales. Toutefois, le test de permutation mis en œuvre sur ce résultat montre que cet effet est significatif ($P < 0,05$). En d'autres termes, il apparaît que les variables environnementales prises en compte présentent un effet, certes faible, mais néanmoins significatif, sur la variabilité des niveaux d'abondances spécifiques enregistrés dans les PUE.

Tableau 9 - ACPVI. Décomposition par espèce de l'inertie expliquée par les variables environnementales retenues.

	Inertie expliquée (%)
Espadon (swo)	2,6
Germon (alb)	14,1
Albacore (yft)	12,3
Bigeye (bet)	10,1
Marlin (marlin)	4
Lancier (sprf)	1,6
Voilier (sf)	1
Coryphène (cory)	1
Requins (shrk)	8,3

La décomposition de l'inertie expliquée pour chacune des espèces montre que ce sont respectivement le germon (14 %), l'albacore (12 %) et le patudo (10 %) qui sont les plus influencés par ces variables (tab. 9). Toutefois, bien que significative (i.e. non liée à des phénomènes aléatoires), l'influence des variables environnementales

sur la capture de chacune de ces espèces est faible. Ainsi, à l'échelle de l'étude (et des niveaux de précision et d'agrégation des données environnementales disponibles), une part prépondérante des niveaux des rendements de ces espèces n'est pas liée à ces trois descripteurs environnementaux. En ce qui concerne l'espadon (2,6 %), il apparaît clairement que la variabilité des rendements observés n'est pas expliquée par les trois variables environnementales retenues. Toutefois, compte tenu des réserves émises sur la qualité des données environnementales utilisées dans cette analyse, il n'est pas envisageable de tirer des conclusions définitives. D'autres données, récoltées selon une échelle spatio-temporelle mieux adaptée à celle des opérations de pêche, seront nécessaires pour réellement avancer sur le rôle potentiel des descripteurs physiques du milieu dans la capture des espèces concernées.

Conclusion

L'analyse du déterminisme des captures de la pêcherie palangrière de La Réunion a été mise en œuvre sur la base d'un lourd travail d'échantillonnage (enquêtes et expérimentations) réalisé par l'Ifremer en collaboration étroite avec les professionnels.

Des techniques statistiques originales et complémentaires ont permis d'identifier et de hiérarchiser les principales caractéristiques techniques et environnementales qui influencent les rendements de la flottille.

Ces résultats peuvent trouver des applications en terme d'aménagements de la technique de pêche. Ils apportent des éléments de réflexion pour optimiser la rentabilité d'un navire en adaptant les coûts sur certains postes, comme le nombre de leurres lumineux et le nombre d'hameçons à mettre à l'eau. La stratégie de pêche peut être améliorée en tirant profit des résultats obtenus concernant l'influence des temps de dérive sur le niveau des captures spécifiques. Ce facteur intervient à la fois sur l'efficacité directe de l'engin et sur le taux de prédation. Parmi les autres variables étudiées, la connaissance de l'influence de la lune et des heures de marées devrait permettre d'ajuster la mise à l'eau de l'engin afin d'améliorer la rentabilité de la technique et de limiter la part des captures accessoires.

Enfin, ce travail a montré la complexité du déterminisme de l'espadon et des autres espèces capturées. Une grande partie de la variabilité demeure inexplicée, ce qui implique donc la poursuite des expérimentations et des analyses en vue de quantifier de manière plus précise les facteurs qui agissent sur les captures accessoires dans la perspective d'un soutien plus pertinent à la gestion des ressources concernées.

Références bibliographiques

- Benzecri J.P., 1973. L'analyse des données. II. L'analyse des correspondances. Vol. 620, Bordas, Paris.
- Bigelow K.A., Boggs C.H., He X., 1999. Influence of environmental factors on swordfish and blue shark catch rates in the US North Pacific longline fishery. *In*: Proceedings of the second international Pacific swordfish symposium. DiNardo G.T. (ed), vol. 240, NOAA technical memorandum NMFS, Hawaii, USA.
- Carey F.G., Robinson H.B., 1981. Daily patterns in the activities of swordfish, *Xiphias gladius*, observed by acoustic telemetry. *Fish. Bull.*, 79, 277-292.
- Carey F.G., 1990. Further acoustic telemetry observations of swordfish. *In*: Proceedings of the 2nd International billfish symposium, Planning the future of billfishes, Research and management in the 90s and beyond, 1-5 Aug. 1988, Kalia-Kona, Hawaii, USA. Stroud R.H. (ed.). National coalition for marine conservation, Inc., Marine Recreational Fisheries, Savannah, Georgia, USA, 103-122.
- Chessel D., Hanafi H., 1996. Analyses de la co-inertie de K nuages de points. *Rev. Stat. Appl.*, 44, 35-60.
- Dolédéc S., Chessel D., 1989. Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique. II. Prise en compte et élimination d'effets dans un tableau faunistique. *Acta Oecologica, Oecol. Gener.*, 10, 207-232.
- Draganik B., Cholyst J., 1986. Temperature and moonlight as stimulators for feeding activity by swordfish. *Reports of the Sea Fisheries Institute*, 22, 73-84.
- Escoffier B., Pagès J., 1994. Multiple factor analysis (AFMULT package). *Computational statistics and data analysis*, 18, 121-140.
- FAO, 1995. Code de conduite pour une pêche responsable. Rome, Italie, 46 p.
- Franquet E., Chessel D., 1994. Approche statistique des composantes spatiales et temporelles de la relation faune-milieu. *CRAS, Sciences de la vie*, 317, 202-206.
- Fristshes K., Warrant E., 2001. New discoveries in visual performance of pelagic fishes. *Pelagic Fisheries Research Program*, 6(3).
- Gaertner J.C., 1997. Organisation des assemblages démersaux dans le golfe du Lion : structures spatiales et stabilité temporelle. Thèse doctorat, université Aix-Marseille II, 149 p.
- Gaertner J.C., Chessel D., Bertrand J., 1998a. Stability of spatial structures of demersal assemblages: a new approach. *Aquatic Living Resources*, 11, 75-85.
- Gaertner D., Gaertner J.C., Marcano J., Pagavino M., 1998b. Multivariate analysis of tuna catches and fishing strategies relationships. Application to the Venezuelan purse seiners in the Caribbean sea. *ICCAT, 25th anniversary volume*, 148-161.
- Gaertner J.C., Mazouni N., Sabatier R., Millet B., 1999. Spatial structure and habitat associations of demersal assemblages in the Gulf of Lions: a multi-compartment approach. *Marine Biology*, 135, 199-208.
- Hill M.O., 1973. Reciprocal averaging: an eigenvector method of ordination. *J. Ecol.*, 61, 237-249.
- Hotelling H., 1933. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *J. Educational Psychology*, 24, 417-441.
- Kume S., Joseph J., 1969. Size composition and sexual maturity of billfish caught by the Japanese longline fishery in the Pacific Ocean east of 130°W. *Bull. Far. Seas. Fish. Res. Lab. (Shimizu)*, 2, 115-162.
- Lavit C., Escoufier Y., Sabatier R., Traissac P., 1994. The ACT (Statistical method). *Computational statistics and*

- data analysis, 18, 97-119.
- Levitus S., Gelfeld R., 1992. NODC Inventory of physical oceanographic profiles. Key to oceanographic records documentation, 18, NODC, Washington, DC.
- Manly B.F.J., 1991. Randomization and Monte Carlo methods in biology. Chapman and Hall, London, 281 p.
- Mazouni N., Gaertner J.C., Deslous-Paoli J.M., 1998. Influence of oyster culture on water column characteristics in a coastal lagoon (Thau, France). *Hydrobiologia*, 373/374, 149-156.
- Mc Cullagh P., Nelder J.A., 1989. Generalized Linear Models. Second edition, Chapman and Hall, London.
- Nelder J.A., Wedderburn R.W.M., 1972. Generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A*, 135, 370-384.
- Olson D., Polovina J.J., 1999. Local-scale swordfish fisheries oceanography. *In: Proceedings of the second international Pacific swordfish symposium*. DiNardo G.T. (ed.), NOAA technical memorandum NMFS, Hawaii, USA. 240, 173-178.
- Pech N., Laloë F., 1997. Use of principal component analysis with instrumental variables (PCAIV) to analyse fisheries catch data. *ICES J. Mar. Sci.*, 54, 32-47.
- Podesta G.P., Browder J.A., Hoey J.J., 1993. Exploring the association between swordfish catch rates and thermal fronts on US longline grounds in the western North Atlantic. *Continental Shelf Research*, 13, 253-277.
- Poisson F., Tessier E., Roos D., René F., Conand F., 1998. Recent development of swordfish, *Xiphias gladius*, longline fisheries near Reunion Island, South-western Indian Ocean. Biology and fisheries of swordfish, *Xiphias gladius*. Papers from the international symposium on Pacific swordfish, Ensenada, Mexico, 11-14 December 1994. US Dep. Commer., NOAA Tech. Rep. NMFS, 142, 276 p.
- Poisson F., René F., 1999. The development of the longline fishery targeting swordfish in Reunion Island waters: Processing and marketing. Proceedings of the second international Pacific swordfish Symposium, 3-6 Mar. 1997, Hawaii, USA. DiNardo G.T. (ed.). NOAA, NOAA technical memorandum NMFS, Honolulu, Hawaii, 240 p.
- Poisson F., Taquet M., 2000. French swordfish longline fishery in South West Indian Ocean: Preliminary results from the PPR programme. Working party on billfish, Mahé, Seychelles, 30 septembre-4 octobre 2000.
- Romesburg H.C., 1985. Exploring, confirming and randomization tests. *Comp. Geog.*, 11, 19-37.
- Sabatier R., Lebreton J.D., Chessel D., 1989. Principal component analysis with instrumental variables as a tool for modelling composition data. *In: Multiway data analysis*. R.B. Coppi, S. (eds). Elsevier Science Publishers, North-Holland, 341-352.
- Ter Braak C.J.F., 1986. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecol.*, 67, 1167-1179.
- Ter Braak C.J.F., 1987. The analysis of vegetation-environment relationships by canonical correspondence analysis. *Vegetatio*, 69, 69-77.
- Tessier E., Poisson F., 2000. DCP et pêche palangrière à La Réunion, antagonisme ou complémentarité? *In: Pêche thonière et dispositifs de concentration de poissons*. Le Gall J.Y., Cayré P., Taquet M. (éds). Éd. Ifremer, Actes Colloq., 28, 605-620
- Thioulouse J., Chessel D., Dolédec S., Olivier J.M., 1996. ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. *Statistic and Computing*, 7, 75-83.

Premiers essais de marquages d'espadon (*Xiphias gladius*) à l'aide de marques intelligentes archives de type « pop up »

François Poisson⁽¹⁾, Rose-Marie Bargain⁽²⁾, Marc Taquet⁽¹⁾

(1) Ifremer, laboratoire Ressources halieutiques, rue Jean Bertho, BP 60, 97822 Le Port Cédex, La Réunion, France

(2) Seychelles Fishing Authority, P.O. Box 449, Victoria, Mahé, République des Seychelles

Introduction

Au-delà des difficultés rencontrées pour réunir un volume de données halieutiques fiables, suffisant pour réaliser des évaluations, les problèmes posés par la structure des stocks concernés, leurs étendues géographiques, le niveau et l'importance des zones de brassages restent des facteurs déterminants pour la mise en œuvre d'un projet d'évaluation. En parallèle avec d'autres techniques comme les marqueurs génétiques, parasitaires ou microchimiques (sur les otolithes), le marquage peut contribuer à une meilleure connaissance des migrations de l'espadon dans l'océan Indien et à identifier d'éventuels flux migratoires vers l'Atlantique (Afrique du Sud) ou le Pacifique (Australie).

Au sein d'un même stock, la connaissance du comportement individuel sur des échelles géographiques plus restreintes peut aider à modéliser des répartitions différenciées suivant la taille et/ou suivant le sexe qui pourraient s'avérer indispensables pour la mise en œuvre d'analyses spécifiques du sexe (VPA notamment).

Une meilleure connaissance du comportement individuel s'avère également nécessaire pour mieux cerner les aspects de reproduction. Les différences marquées de sex-ratio suivant les zones exploitées peuvent être reliées soit à des tolérances différentes des deux sexes aux conditions environnementales (accessibilité), soit à des comportements différents face à l'engin (vulnérabilité). Notons également que l'accessibilité peut être fortement dépendante de l'âge, le comportement doit donc être abordé pour les différents stades de la vie du poisson.

Si la connaissance du comportement d'un poisson pélagique comme l'espadon conditionne largement la fiabilité des évaluations de stocks, elle est également indispensable pour rendre opérationnelles certaines

mesures de gestion. En effet, aider la flottille à pêcher sur des zones géographiques ou dans des strates bathymétriques favorables à la présence de gros individus constitue probablement une mesure plus efficace que d'interdire le débarquement de petits poissons (hors taille) dans un contexte où le contrôle est difficile à mettre en œuvre.

Il y a quelques années, les opérations de marquage se limitaient à placer une pièce de plastique numérotée sur un grand nombre d'animaux remis ensuite dans leur milieu, en espérant que ceux-ci soient capturés une nouvelle fois et surtout signalés à l'organisme en charge du programme mis en place. Ces études ont permis de recueillir, pour bon nombre d'espèces, les premières informations sur la migration, la longévité, la croissance, la mortalité et quantifier les stocks (dernier programme CPS).

Les innovations technologiques ont permis la construction de capteurs et d'émetteurs miniaturisés de plus en plus performants, fiables, avec des capacités de mémoire augmentées et, de ce fait, élargi les champs d'investigation des chercheurs. Elles offrent la possibilité non seulement de connaître la biologie et les comportements à des échelles temporelles et spatiales différentes mais aussi d'utiliser l'animal comme plate-forme d'enregistrements de données d'environnement. Les marques « intelligentes » ouvrent la voie à une connaissance nouvelle du milieu et de l'abondance du poisson, déconnectée des artefacts liés à la recapture par la pêcherie.

Ce document dresse le bilan des premiers marquages d'espadon effectués à La Réunion à bord des palangriers professionnels et aux Seychelles à bord du navire de recherche de la Seychelles Fishing Authority (SFA), « *Amitié* », dans le cadre du PPR¹ et d'un programme de collaboration² entre l'Ifremer et SFA.

1. PPR : Programme Palangre Réunion financé par le département, la région, l'État et l'Union européenne (FEDER).

2. Programme d'actions pour la pêcherie palangrière seychelloise en collaboration avec la France/Réunion (financé par la mission de coopération française aux Seychelles).

L'objectif était, après la mise au point d'une méthodologie de marquage adaptée à cette espèce, d'étudier le comportement de quelques individus vis-à-vis de leur environnement. Jusqu'à présent, les déplacements de l'espadon étaient connus à travers les résultats obtenus par Carey (1990) et Carey & Robinson (1981) sur la base de marquages, utilisant des balises ultrasoniques, effectués sur le plateau californien. Les tout récents résultats obtenus par une équipe japonaise apportent un nouvel éclairage sur les déplacements d'un individu à l'échelle journalière sur une période d'environ un an (Takahashi *et al.*, in press).

Les résultats d'études menées sur le comportement des pélagiques vis-à-vis de la palangre dérivante de surface ont été pris en compte pour monter ces premières opérations de marquage à petite échelle.

Le bilan de ces premiers tests est présenté et des propositions d'adaptation de la technique de capture sont apportées afin d'augmenter les chances de réussite sur les prochaines expérimentations. Les données bibliographiques seront prises en compte pour argumenter certains points de la discussion.

Matériel et méthodes

Marque archive de type pop up

Dans le cadre de cette étude, 2 modèles de marques pop up de différentes générations provenant tous de la société Microwave Telemetry (Columbia, Maryland) ont été utilisés. M. Paul Howey, directeur de cette société, nous a fourni gracieusement deux marques pop up pour essais dès le début de nos expérimentations. Les marques pop up simples (PTT-100 pop up tag) enregistrent une donnée de température chaque heure et une position géographique après libération de la balise. Les marques « pop up archives » (PTT-100 archival pop up tag) mesurent toutes les heures la température (entre 0 et 35 °C) et/ou la pression³ et calculent une position géographique journalière. Un capteur lumineux permet de déterminer les heures de lever et de coucher du soleil, permettant l'évaluation des coordonnées géographiques à partir de la durée du jour et l'heure de midi locale. L'ensemble des caractéristiques techniques est disponible sur le site internet suivant : <http://www.microwavetelemetry.com>. Il n'existe

aucune différence de forme et de poids entre ces deux modèles.

La balise est activée dès le retrait d'un aimant extérieur qui joue le rôle d'interrupteur. La mesure de la différence de potentiel entre les deux électrodes situées à l'extrémité permet de vérifier des pulsations caractéristiques attestant du bon fonctionnement du système de relargage. Après l'activation, celle-ci doit être placée à l'extérieur afin de pouvoir être détectée par un satellite. La durée de vie de chacune des marques est programmée à l'avance avec le constructeur, en accord avec les exigences de l'utilisateur. Deux variations notables sont à souligner dans l'évolution des produits testés. Ainsi, la durée de vie des balises était choisie en fonction d'un temps de fonctionnement alors qu'ensuite une date de libération de l'appareil était programmée; une fois arrivées en surface, les données seront captées par un satellite puis transmises au centre de traitements Argos. Par ailleurs, les spécimens de la première génération n'étaient testés qu'à une pression de 1 000 psi contre 3 000 psi pour le deuxième lot.

Instrumentation de l'engin de pêche et technique de capture

Au cours de ces campagnes de marquage, une portion de la palangre a été instrumentée avec des horloges d'hameçons construites par la société Micrel (fig. 1). Ces horloges sont constituées d'un bloc de résine époxy dans lequel sont inclus une montre et un contacteur magnétique. Sur la partie supérieure est fixé un bouchon amovible muni d'un aimant. En position de veille, ces deux parties sont solidaires. L'aimant active le contacteur magnétique, jouant le rôle d'interrupteur. La mise en marche de l'horloge intervient lorsque, sous l'effet d'une tension (supérieure à 4 kg), le bouchon est ôté. L'horloge mesure le temps séparant le moment où le poisson mord à l'hameçon et l'instant où celui-ci est monté à bord. L'initialisation de l'horloge a lieu lorsque le bouchon est remis en place.

Une agrafe est montée sur la partie fixe de l'horloge, l'avançon est de la même façon agrafé dans la boucle située à l'autre extrémité, côté bouchon. Ce montage permet d'accrocher le dispositif directement sur la ligne mère en amont de l'avançon et aux opérateurs de s'insérer dans l'opération de

3. En option.

mise à l'eau des hameçons sans gêner le travail de l'équipage. Des capteurs pression-température sont également placés sur la ligne mère pour suivre les mouvements de l'engin de pêche ainsi que la température à la profondeur atteinte. Ces mêmes capteurs ont été utilisés pour définir des profils profondeurs-température sur les lieux de pêche. Les attendus de ces expérimentations sont multiples : elles permettent de connaître le comportement des espèces vis-à-vis de l'engin de pêche. Ainsi les heures de pose peuvent-elles être « aménagées » pour augmenter les rendements.

Critères de choix des individus

Plusieurs critères ont été retenus au préalable pour choisir les animaux susceptibles d'être marqués. Cette action nécessite la capture d'animaux « actifs » d'un poids minimum de 20 kilogrammes. En effet, du fait de sa taille et de sa résistance, la marque pourrait influencer significativement sur les déplacements des poissons d'une taille inférieure. Ne seront pas considérés comme potentiellement « aptes » les individus n'ayant pas ingéré l'hameçon et ne présentant aucun saignement, principalement au niveau des branchies. De plus, l'animal devait être maintenu en permanence immergé durant toute la manipulation.

Application de la marque

La marque est appliquée en l'implantant à l'aide d'un harpon (fig. 2) qui permet d'ancrer la fléchette de nylon (floy tag®), solidaire de la balise, dans la chair de l'animal. Cette méthodologie s'inspire des travaux effectués sur le thon rouge (*Thunnus thynnus*; Chaprales *et al.*, 1998). Durant cette opération, l'animal est maintenu dans l'eau le long du bateau.



Figure 1 - Schéma de montage d'une horloge d'hameçon.



Balise pop up.

Fléchette reliée par un fil de nylon à la balise pop up.



Figure 2 - Balise pop up et dispositif de fixation.

Tableau 1 - Caractéristiques des marques déployées lors des campagnes expérimentales, heures et positions géographiques du marquage, date prévue de la libération des balises.

N° Identification	Type	Date et heure de marquage	Position géographique	Poids de l'individu (kg)	Durée de vie ou date de libération	Temps de survie de l'animal sur l'hameçon
7808		17/12/99 à 6h 48	21° 53' S 55° 05' E	25	5 jours	Pas capturé sur partie instrumentée
7809		16/04/00 à 9h 30	20° 51' S 53° 58' E	60	30 jours	9 h 10
7808b	3423	15/10/00 à 8h 23	4° 07' 065 S 58° 19' 829 E	30	23/11/00	5 h 46
7809b	3424	16/10/00 à 7 h 21	4° 01' 021 S 58° 18' 150 E	25	23/11/00	3 h 28
21369	3702	25/10/00 à 7 h 20	4° 06' 015 S 58° 21' 619 E	30	25/11/00	5 h 52
18710	3700	26/10/00 à 9h 33	4° 09' 017 S 58° 17' 012 E	25	15/01/01	Pas capturé sur partie instrumentée

Dans le tableau 1 figurent les informations relatives aux individus marqués : les dates, heures et positions de marquage, le poids estimé des individus, la durée de vie programmée de la marque ou la date de libération et le temps écoulé depuis la capture de l'animal sur la ligne.

Résultats

Comportement de l'espadon vis-à-vis de l'engin de pêche

Ciblage des espèces

Les expérimentations menées au cours du programme PPR ont révélé, d'une part, que plus de 50 % des espadons mordaient dans les trois heures qui suivaient la mise à l'eau de l'hameçon et d'autre part que les heures de « mordage » étaient liées au cycle lunaire. Compte tenu de ces résultats et dans l'optique d'optimiser cet engin de pêche, il faut

opter pour des filages expérimentaux limités en nombre d'hameçons et définir les heures de mouillage et de filage en fonction des paramètres environnementaux identifiés (Poisson *et al.*, in press).

Survie

Les observations effectuées au cours des campagnes expérimentales menées à bord des palangriers professionnels réunionnais ont montré que, sur les 319 espadons pêchés sur les portions de palangre instrumentées, 53 étaient vivants, soit 16,6 % des prises. Par contre, au cours des 9 filages effectués à bord de l'« Amitié », 29 individus sur 106, étaient vivants, soit 27,3 %. Les temps de survie ont pu être estimés à partir des données des horloges d'hameçons validées. La figure 3 présente le temps de survie en fonction de la taille des individus (lmf).

Comportement des individus capturés

Lorsqu'un espadon est capturé au voisinage d'une sonde, il est possible de suivre les mouvements de l'individu d'après les données enregistrées par la sonde. Les figures suivantes représentent les mouvements de la ligne à la suite du mordage d'individus de différentes tailles (fig. 4).

Bilan des opérations de marquage

Le tableau 2 présente, pour chacune des marques appliquées, les résultats obtenus. Ainsi, pour deux d'entre elles, aucun signal n'a été enregistré. Par contre, trois balises ont été détectées mais n'ont pu être localisées et aucune donnée n'a pu être transmise. Seule la dernière marque a fonctionné parfaitement.

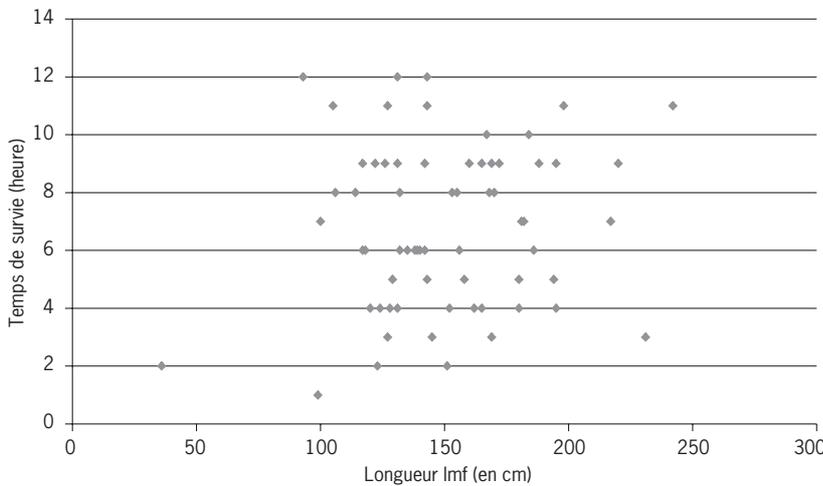


Figure 3 - Représentation du temps de survie des espadons en fonction de leur taille (lmf).

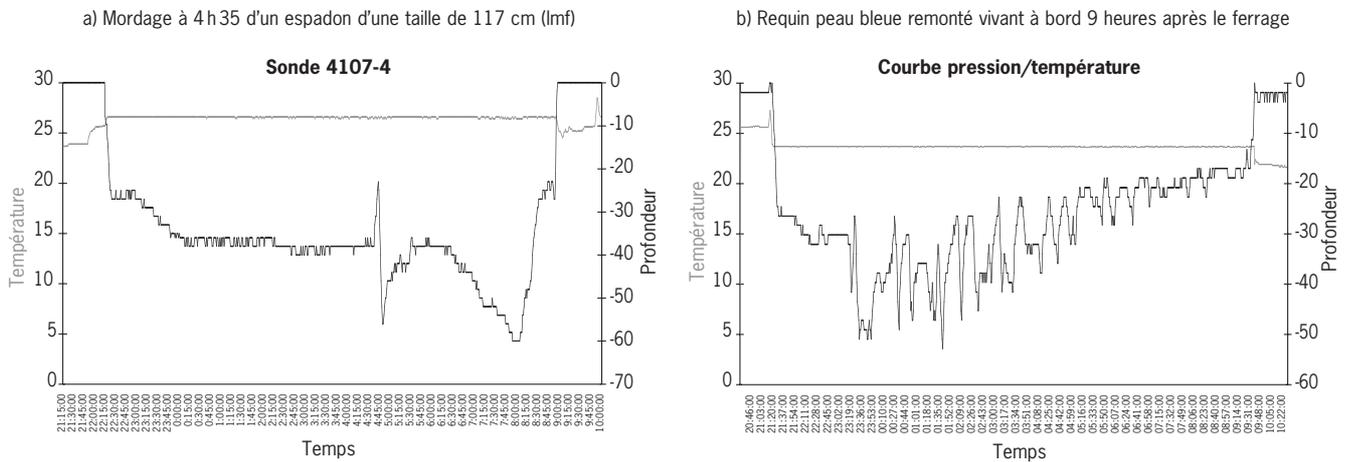


Figure 4 - Comportement d'un espadon et d'un requin peau bleue après leur capture sur la ligne.

Tableau 2 - Bilan des messages reçus.

N° Identification	Date de marquage	Position géographique	Poids de l'individu (kg)	Test de résistance à la pression	Résultats
7808	17/12/99 à 6h48	21° 53' S 55° 05' E	25	1000 psi	Aucune transmission
7809	16/04/00 à 9h30	20°51' S 53° 58' E	60	1000 psi	Déecté le 16/04/00 lors de phase d'initialisation avant le marquage
7808b	15/10/00 à 8h23	4° 07' 065 S 58 19'829 E	30	3000 psi	1 seul message non significatif reçu le 13/10/00 lors de la phase d'initialisation avant le marquage
7809b	16/10/00 à 7h21	4° 01' 021 S 58° 18'150 E	25	3000 psi	Aucune transmission
21369	25/10/00 à 7h 20	4° 06' 015 S 58° 21' 619 E	30	3000 psi	1 seul message non significatif reçu le 4/10/00 lors de la phase d'initialisation
18710	26/10/00 à 9h33	4° 09' 017 S 58° 17' 012 E	25	3000 psi	Localisé lors de la phase d'initialisation par 4° 37' S et 58° 16' E, Réception dès le 15/01/01 de la totalité des enregistrements

Les figures suivantes permettent de suivre les températures enregistrées heure par heure par la marque 18710, dans la colonne d'eau, depuis sa fixation sur l'espadon jusqu'à la transmission des données (fig. 5 et 6). L'application de la marque s'est faite à 9 h 33 en heure locale, soit entre la 5^e et 6^e heures. La température enregistrée la sixième heure indique que l'animal a sondé jusqu'à une profondeur au moins égale à 50 m à la suite du marquage, conformément au profil de température. L'espadon a ensuite oscillé entre 50 et 80 mètres avant de regagner la surface 8 h après le marquage. La chute continue de la température après cette période traduit la mort de l'animal. Après 10 h, le corps de l'animal se stabilise pendant 5 jours environ, vraisemblablement sur le fond, soit, d'après les cartes marines, à une profondeur de 2 700 mètres. La température minimale enregistrée est de 2,78 °C. La balise remonte ensuite en moins de 2 h à la surface pour dériver jusqu'à la date de largage et de transmission des informations au satellite. Rien ne permet de dire si celle-ci est restée fixée au corps de l'animal pendant cette phase. La figure 7 donne le profil de température entre la surface et 170 m sur le lieu de marquage.

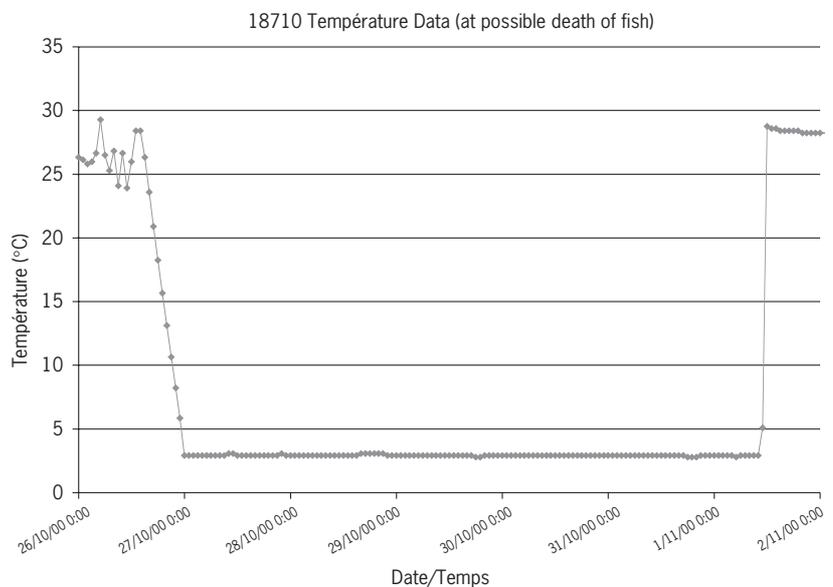


Figure 5 - Évolution des températures enregistrées par la marque pendant les premières heures qui ont suivi le marquage.

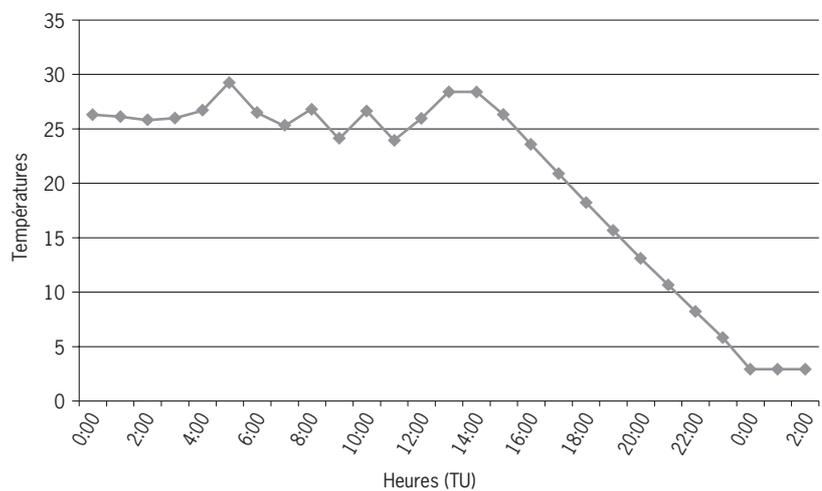


Figure 6 - Détail de l'évolution des températures enregistrées par la marque pendant les premières heures qui ont suivi le marquage.

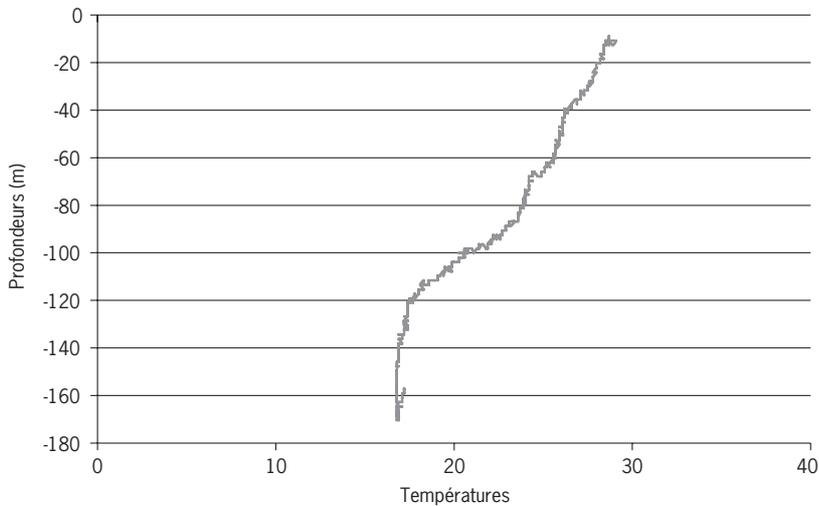


Figure 7 - Profil de température sur le lieu de marquage (marque 18710).

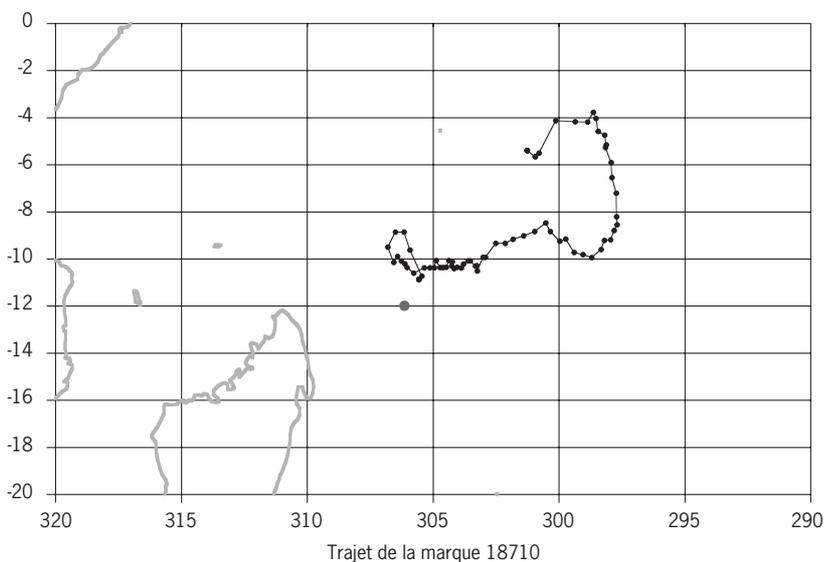


Figure 8 - Dérive estimée de la marque pop up 18710 du 26 octobre 2000 au 15 janvier 2001 (75 jours).

La figure 8 retrace le parcours de la marque 18710; celle-ci étant en surface, il s'agit en fait du trajet de sa dérive pendant 75 jours.

Discussion

Techniques de captures

Tous les animaux choisis avaient un comportement d'évitement du navire très marqué qui laissait supposer l'animal en pleine vitalité. Il est donc difficile de juger des chances de survie de l'animal. Dans le cas d'utilisation d'horloges d'hameçons, le temps de survie pourrait intervenir dans la décision de marquer l'individu. Il serait peut-être utile de considérer cette information comme déterminante.

Ces résultats amènent des réflexions sur le type d'engin à utiliser pour garantir la survie des individus. Le choix de la palangre a déjà été retenu par Carey (1990) pour l'espadon mais aussi dans le cadre des campagnes de marquage de thons obèses du programme de l'université d'Hawaii (Pelagic fisheries research programme). Nos résultats ont montré que le taux de survie des individus peut être augmenté lors de pêches expérimentales en adaptant une stratégie de pêche adaptée à cette espèce. Au cours de nos campagnes à bord de l'*Amitié*, il était difficile de gérer entièrement les temps de pêche, les virages de la ligne de nuit n'étant pas envisageables. En effet, le navire ne disposait pas d'un nombre de balises goniométriques suffisant pour assurer la récupération rapide de la ligne en cas de rupture de celle-ci. Le contrôle total de la mise à l'eau et de la récupération d'une palangre instrumentée (environ 300 hameçons) autoriserait des temps de pêche plus courts et devrait implicitement augmenter les taux de survie et, de ce fait, les chances de capture d'individus ayant mordu moins d'une heure avant la remontée de l'engin de pêche.

Les seuls résultats de marque archive publiés à l'heure actuelle ont été obtenus à partir d'un espadon marqué au harpon sur la côte est du Japon (Takahashi *et al.*, in press). Cette technique avait été utilisée, toujours dans le Pacifique, dans les expériences ultérieures menées par Carey & Robinson (1981). Un individu sur sept n'avait d'ailleurs pas survécu à cette manipulation. Cette pêche n'est praticable qu'en raison d'un comportement particulier, le phénomène de « basking » (Carey, 1990) adopté par l'espadon, celui-ci demeurant immobile en surface. Cette attitude favoriserait le réchauffement du corps de l'animal à la suite de plongées à grandes profondeurs. Ce comportement observé également chez le thon rouge n'a jamais été relaté par les pêcheurs locaux.

D'autres techniques de pêche doivent être expérimentées, telles que la pêche à la dérive autour de DCP. Une alternative serait d'utiliser des « hameçons injecteurs » mis au point et testés dans le cadre d'une des actions du PPR (voir p. 52). Ce type d'appareil permet la diffusion d'un anesthésiant au travers des branchies de l'individu ferré. Cette technique présente l'avantage de limiter le stress de l'animal lors de

la capture, l'effet étant quasi immédiat, mais aussi de faciliter la remontée du poisson en surface et l'application de la marque. Des expérimentations doivent être poursuivies pour favoriser un « réveil » de l'animal dans de bonnes conditions.

Techniques de marquages et performances de la marque

Dans le cas des marques de première génération, l'échec pourrait être dû (en dehors d'une mort précoce de l'individu toujours probable), d'une part, à une mauvaise résistance à la pression - les travaux de Takahashi *et al.* (in press) indiquent que l'espadon suivi atteint des profondeurs avoisinant les 900 m -, d'autre part, à une déficience des batteries internes, les marques, pendant 6 mois, n'ayant pas été stockées dans un réfrigérateur. Cette possibilité a été retenue par le constructeur.

La réception de données de qualité dans le cas du dernier essai tend à prouver que la balise a réellement bien résisté à de très fortes pressions (2 700 m) et apparemment sans subir de déformation importante. En effet, pour que l'émission puisse s'effectuer dans de bonnes conditions, l'antenne doit sortir hors de l'eau dans une position correcte autorisant une transmission parfaite des données aux satellites.

Contraintes d'utilisation

Ces appareils performants ont quelques caractéristiques d'utilisation contraignantes. Les appareils ne sont pas directement utilisables et nécessitent une préparation préalable difficile à réaliser. Ainsi, l'initialisation doit se faire, comme le préconise la notice d'utilisation, loin d'une masse métallique. Ces conditions sont difficiles à remplir lors de manipulations à bord de navires professionnels. Il est par ailleurs impossible *in situ* de savoir si la balise a bien été localisée par le satellite à l'issue de la phase d'initialisation. Le nouveau type de programmation de la durée de vie de la marque oblige à une expédition au constructeur dès que la date est proche ou dépassée. L'option choisie dans le cas de la génération précédente semblait préférable.

Validité des données de positionnement géographique

Le positionnement à partir des heures de lever et coucher du soleil pose des problèmes pour l'étude du patudo (Holland *et al.*, 1990) et de l'espadon (Takahashi *et al.*, in press) car les représentants de ces deux espèces restent à des profondeurs importantes, donc dans l'obscurité, pendant la journée. Devant l'impossibilité d'utiliser les données de luminosité, Takahashi *et al.* (in press) ont comparé les températures mesurées *in situ* avec les données océanographiques pour estimer le trajet suivi par l'espadon.

Conclusion

Les récents résultats de Takahashi *et al.* (in press) ont prouvé que l'espadon pouvait atteindre de grandes profondeurs et confirmé le comportement mis en évidence par les travaux de Carey (1990), comportement qui rend difficile l'estimation de la position géographique calculée d'après les données de luminosité enregistrées par le capteur de la balise. En cela, on constate clairement les limites de cet outil dans l'état actuel de son développement. Néanmoins, les marques sont des instruments susceptibles de pouvoir répondre à bon nombre d'interrogations des biologistes. Leur durée de vie doit permettre de suivre sur un cycle annuel le déplacement de certains individus et ainsi d'en connaître davantage sur les schémas migratoires possibles et autres questions posées à l'issue de nos travaux menés sur le cycle sexuel. À ce titre, des prélèvements de muscles devraient être concomitants à ces opérations.

Il ressort de ces premiers tests non concluants des informations primordiales qui devraient être prises en compte dans la préparation d'une campagne de marquage de plus grande envergure. Il n'est pas raisonnable d'envisager de telles opérations à bord de navires professionnels à moins de pouvoir maîtriser tous les facteurs opérationnels. Ainsi, en aménageant les techniques et en utilisant les données obtenues à partir des horloges d'hameçons, la pêche à la palangre

peut être envisagée. Des essais de marquage mettant en œuvre des « hameçons anesthésiants » doivent être tentés. Il faut par ailleurs garder à l'esprit que, compte tenu des rendements et du nombre réduit d'animaux potentiellement « aptes » au marquage, ces opérations nécessitent des embarquements longs et réguliers.

Il s'avère que ce type de balise est compatible avec cette espèce car il est susceptible de résister à des pressions à des profondeurs de l'ordre de 900 mètres. Le problème majeur réside dans la capture d'un individu.

Remerciements

À Mr Paul Howey, directeur de Microwave Telemetry et son équipe pour leur soutien, leur disponibilité et leur aide. À Molly Lutcavage pour ses conseils avisés.

Aux équipages du *Vetyver 5* et du *Néréides*, palan-griers de la flottille réunionnaise pour leur participation active à ce programme ainsi qu'aux marins de l'*Amitié*. Nous adressons de la même façon nos remerciements à nos collègues de la SFA et à Messieurs Leravallec et Mazzocchin du service de la coopération de l'ambassade de France aux Seychelles qui ont permis la mise en place de cette collaboration.

Références bibliographiques

- Carey F.G., Robinson H.B., 1981. Daily patterns in the activities of swordfish, *Xiphias gladius*, observed by acoustic telemetry. Fish. Bull., 79, 277-292.
- Carey F.G., 1990. Further acoustic telemetry observations of swordfish. In: Proceedings of the 2nd international billfish symposium, Planning the future of billfishes, Research and management in the 90s and beyond, 1-5 August 1988, Kalia-Kona, Hawaii, USA. Stroud R.H. (ed.). National coalition for marine conservation, Inc., Marine Recreational Fisheries, Savannah, Georgia, USA, 103-122.

Chaprales W., Lutcavage M., Brill R., Chase B., Skomal G., 1998. Harpoon method for attaching ultrasonic and "pop up" satellite tags to giant bluefin tuna and large pelagic fishes. MTS Journal, 32(1).

Holland K., Brill R., Chang R.K.C., 1990. Horizontal and vertical movements of yellowfin and bigeye tuna associated with Fish Aggregating Devices. Fish. Bull., 88, 493-507.

Takahashi M., Okazaki M., Okamura H., Yokama K., (in press). Preliminary analysis of swimming behaviour of a swordfish using an archival tag. Third international billfish symposium. 19-23 August 2001, Cairns, Australia.

Chapitre III

Étude des caractéristiques biologiques de l'espadon (*Xiphias gladius*) dans le sud-ouest de l'océan Indien

Étude de la croissance de l'espadon (*Xiphias gladius*)

Karine Vanpouille⁽¹⁾, François Poisson⁽¹⁾, Marc Taquet⁽¹⁾, André Ogor⁽²⁾, Hervé Troadec⁽²⁾

(1) Ifremer, laboratoire Ressources halieutiques, rue Jean Bertho, BP 60, 97822 Le Port Cedex, La Réunion, France

(2) Ifremer-IRD, laboratoire de Sclérochronologie des animaux aquatiques, BP 70, 29280 Plouzané, France

Introduction

La pêche palangrière réunionnaise a connu un développement important dans les dix dernières années. Parallèlement, la pression de pêche sur l'espadon a fortement progressé dans l'océan Indien, passant de quelques centaines de tonnes à plus de 35 000 tonnes actuellement.

Face à cette progression, l'effort de recherche sur la biologie de l'espadon dans la zone est resté modeste. Pourtant, la communauté scientifique est déjà sollicitée pour fournir des avis sur l'état des stocks. L'estimation de l'âge, qui permet d'établir la structure démographique d'un stock, est un des paramètres préalables indispensables pour ces évaluations. La présente étude, portant sur la croissance de l'espadon de l'océan Indien, constitue donc une priorité de recherche pour le laboratoire Ressources halieutiques de l'Ifremer à La Réunion.

Les méthodes d'estimation de l'âge sont de deux types (Panfili, 1992) :

- les **méthodes statistiques** appliquées à un groupe d'individus, qui donnent un âge moyen pour certaines catégories (classes de taille essentiellement) ;
- les **méthodes individuelles** qui reposent sur l'observation des marques de croissance inscrites sur les pièces minéralisées de chaque animal.

Jusque dans les années quatre-vingt, la plupart des travaux concernant l'âge et la croissance chez l'espadon ont été basés sur une analyse des distributions de fréquence de taille, appelée aussi méthode de Petersen (Kume & Joseph, 1969 ; Beckett, 1974 ; Ovchinnikov *et al.*, 1980). Progressivement, ces travaux se sont tournés vers l'observation de pièces dures (épines dorsales ou anales, otolithes ou vertèbres) en vue de réaliser des estimations directes de l'âge. Artüz (1963) a mené un des premiers travaux de ce type en étudiant les coupes de rayons de nageoires dorsales d'espadons

provenant de la mer de Marmara (Turquie) et sur lesquelles il a observé des anneaux concentriques pouvant être interprétés comme des marques de croissance. Quelle que soit la pièce utilisée, le principe consiste à réaliser une coupe dans un tissu osseux et à dénombrer les marques de croissance présentes sur ces coupes. Ces marques de croissance peuvent être traduites en terme de durée et donc d'âge lorsque l'on établit par ailleurs le rythme de leur dépôt (Panfili, 1992).

Ces études sur l'estimation directe de l'âge de l'espadon ont été menées principalement dans l'océan Atlantique (Berkeley & Houde, 1983 ; Radtke & Hurley, 1983 ; Wilson & Dean, 1983 ; Prince *et al.*, 1987 ; Ehrhardt, 1992, 1994) et de façon plus modeste dans l'océan Pacifique (Castro-Longoria & Sosa-Nishizaki, 1998 ; Uchiyama *et al.*, 1998). Mais la bibliographie ne fait mention d'aucune étude menée dans l'océan Indien sur ce thème.

Dans la présente étude, une chaîne de traitements numériques a été mise au point pour la lecture des marques de croissance présentes sur la section de la seconde épine de la nageoire anale de l'espadon.

Matériels et méthodes

Matériel biologique

L'espadon : croissance et longévité

Dans une première phase, l'analyse bibliographique des documents scientifiques disponibles sur l'espèce nous apporte quelques indications générales sur la croissance observée dans les autres océans.

L'espadon (*Xiphias gladius*) est considéré comme une espèce à croissance rapide bien que notre connaissance en soit quelque peu limitée et parfois contradictoire (Porter, 1993). Les femelles grandissent plus vite que les mâles, après l'âge estimé de 2 ou 3 ans, et atteignent des tailles supérieures (Berkeley & Houde, 1983 ; Tsimenides & Tserpes, 1989 ; Megalofonou *et al.*, 1990 ;

Ehrhardt *et al.*, 1995). Les mâles dépasseraient rarement la taille de 2 m (longueur maxillaire-fourche) et un poids de 120 kg (Beckett, 1974).

Les espadons connaissent une croissance rapide la première année de leur vie, avec des tailles de l'ordre de 90 cm atteintes en un an. Ensuite, cette croissance se ralentit sensiblement (Ehrhardt, 1992). Les modèles de croissance prévoient des longueurs (LMF) à l'infini de 190 à 217 cm (~130 kg) pour les mâles et de 246 à 364 cm pour les femelles (~350 kg; Ward & Elscot, 2000). D'après Quéro & Vayne (1997), le poids maximum atteint par ce poisson serait de 550 kilogrammes.

En Méditerranée, le taux de croissance est évalué à 2,3 mm/jour pour des espadons de 51 à 74 cm de longueur maxillaire-fourche, ce qui correspond à des âges estimés entre 87 et 147 jours (Megalofonou *et al.*, 1995). Le taux d'accroissement moyen estimé dans le Pacifique est d'environ 28 cm par an pour des espadons entre 74 et 157 cm de longueur cavité oculaire - fourche (Uchiyama *et al.*, 1998). Les espadons ont des taux d'accroissement variables qui dépendent de l'environnement individuel (disponibilité en nourriture et température de l'eau), des dépenses en énergie et du patrimoine génétique (Ward & Elscot, 2000).

La longévité de l'espèce serait d'au moins 15 ans, elle a été confirmée par une durée de liberté exceptionnelle de 11 ans sur un spécimen marqué à l'âge estimé de 4 ans (Hurley & Iles, 1980). L'âge estimé par Wilson & Dean (1983) atteint également 15 ans pour les femelles et 9 ans pour les mâles.

Choix des pièces osseuses étudiées

Les études sclérochronologiques menées sur l'espadon sont basées principalement sur l'observation des otolithes et des épines de la première nageoire anale (Berkeley & Houde, 1983; Radtke & Hurley, 1983; Wilson & Dean, 1983; Ehrhardt, 1992; Castro-Longoria & Sosa-Nishizaki, 1998). D'autres pièces osseuses comme les vertèbres ou les épines des nageoires dorsales peuvent également être utilisées (Uchiyama *et al.*, 1998). En revanche, l'utilisation des écailles comme méthode d'estimation d'âge est impossible car les espadons adultes ne possèdent pas d'écailles (Porter, 1993).

L'utilisation des épines des nageoires anales pour les estimations d'âge chez l'espadon est recommandée par de nombreux auteurs (Berkeley & Houde, 1983; Ehrhardt, 1992; Tserpes & Tsimenides, 1995; Castro-Longoria & Sosa-Nishizaki, 1998; Uchiyama *et al.*, 1998). Ces structures osseuses, dotées de stries de croissance supposées annuelles, présentent plusieurs avantages. Elles sont facilement récupérables sans altérer la valeur commerciale des poissons (Tserpes & Tsimenides, 1995; Castro-Longoria & Sosa-Nishizaki, 1998), peuvent être aisément traitées et se caractérisent par des marques de croissance facilement observables, un focus bien défini et une petite matrice centrale en comparaison à d'autres structures osseuses (Berkeley & Houde, 1983).

Néanmoins, des problèmes subsistent quant à l'utilisation de ces pièces osseuses, comme la présence d'anneaux multiples et la disparition possible des premiers anneaux au centre de la coupe (Berkeley & Houde, 1983; Tserpes & Tsimenides, 1995; Uchiyama *et al.*, 1998). Ce phénomène provoqué par une revascularisation des tissus est surtout présent chez les individus âgés. Le problème des anneaux multiples peut être éliminé par des lecteurs expérimentés, ne comptant dans ce cas que les anneaux les plus prononcés, alors que le problème de disparition des anneaux reste plus délicat (Tserpes & Tsimenides, 1995). Il nécessite que l'on détermine avec précision la position des premiers anneaux, permettant ainsi d'évaluer le nombre de stries manquantes chez les individus concernés afin de les ajouter aux nombres réels de stries observées.

L'intérêt des otolithes, pièces calcifiées présentant des stries de croissance journalières et annuelles, dans les études d'estimation d'âge a été démontré par Radtke & Hurley (1983) et Wilson & Dean (1983). Cependant, la principale difficulté de l'utilisation des otolithes réside dans l'extrême minutie nécessaire à l'extraction, la manipulation et la préparation de ces pièces osseuses minuscules et fragiles (Radtke & Hurley, 1983; Uchiyama *et al.*, 1998). Les techniques de microscopie électronique à balayage utilisées par Radtke & Hurley (1983) et Wilson & Dean (1983) sur les sagittae, semblent être prometteuses mais sont encore onéreuses et peu utilisées.

Compte tenu de ces observations et du caractère commercial de la pêche palangrière réunionnaise étudiée, le choix s'est porté sur les épines de nageoires anales. C'est la seconde épine de la première nageoire anale qui a été retenue car elle présente la plus petite matrice centrale et le plus grand diamètre (Berkeley & Houde, 1983).

Par convention, dans ce document, on appellera « nageoire anale » la première des 2 nageoires anales de l'espadon.

Collecte des échantillons

Les pièces calcifiées ont été prélevées sur des espadons pêchés par la flottille palangrière réunionnaise dans le sud-ouest de l'océan Indien, lors d'embarquements scientifiques réalisés par des agents du laboratoire. Ces opérations se sont déroulées sur 2 années et demi consécutives, de mai 1998 à janvier 2001.

Zone d'étude

La zone d'étude est située autour de l'île de La Réunion, entre 19° et 25° de latitude sud et entre 48° et 58° de longitude est, soit dans la zone subéquatoriale sud. Les positions des stations d'échantillonnage sont présentées sur la figure 1.

Campagnes d'échantillonnage

Les 52 campagnes d'échantillonnage biologique à bord des palangriers réunionnais ont été réalisées au cours des 2 premières années du programme, entre le 1^{er} mai 1998 et le 31 janvier 2001. Ces campagnes à la mer, correspondant à 255 opérations de pêche (tab. 1), ont permis l'échantillonnage de 1935 espadons et la collecte de 1 607 nageoires anales.

Parallèlement à la récupération des nageoires anales, plusieurs informations relatives aux individus échantillonnés sont notées : mesures biométriques (voir p.46), sexe (observation macroscopique)...

Une quinzaine de marées avec prélèvements biologiques, et en particulier prélèvements de nageoires anales, avaient déjà été effectués entre janvier 1995 et août 1996. Certains espadons échantillonnés lors de ces marées ont été ponctuellement utilisés dans la présente étude.

Prélèvements à bord

Les espadons pêchés sont remontés à bord où ils sont immédiatement traités. Ils sont tous éviscérés et pour la plupart traités en VDK c'est-à-dire vidés, décapités et débarassés des nageoires (Poisson & Macé, 1997). La nageoire anale est alors récupérée (fig. 2), placée dans un sachet plastique portant le numéro d'identification du poisson et conservée en cale, sous glace, jusqu'au débarquement, puis au congélateur avant traitement au laboratoire.

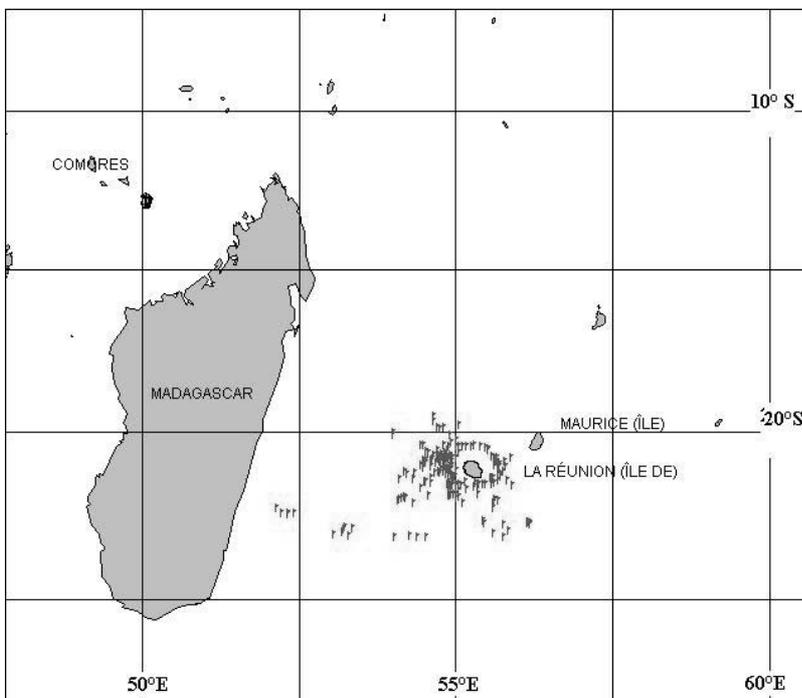


Figure 1 - Positions géographiques des lieux d'échantillonnage biologique entre le 1^{er} mai 1998 et le 31 janvier 2001 (chaque symbole identifie une opération de pêche).

Tableau 1 - Bilan des 52 marées expérimentales à bord des palangriers professionnels réunionnais.

Code_bateau	Marée	Date_début	Date_fin	Jmer	Filage
37	798	7-mai-98	12-mai-98	6	4
31	889	19-mai-98	23-mai-98	5	4
18	967	30-mai-98	6-juin-98	8	8
18	960	9-juin-98	16-juin-98	8	8
19	961	26-juin-98	1 ^{er} -juil-98	6	5
18	995	29-juil-98	10-août-98	13	9
43	1027	14-août-98	19-août-98	6	5
43	1081	1 ^{er} -oct-98	6-oct-98	6	5
43	1121	26-oct-98	31-oct-98	6	5
34	1111	18-nov-98	23-nov-98	6	6
34	1115	16-déc-98	19-déc-98	4	2
44	1137	16-déc-98	19-déc-98	4	4
44	1156	13-jan-99	17-jan-99	5	4
34	1168	14-jan-99	21-jan-99	8	6
44	1181	4-mars-99	7-mars-99	4	4
33	1219	27-mars-99	6-avril-99	11	10
44	1227	7-avril-99	13-avril-99	7	5
44	1256	20-avril-99	25-avril-99	6	5
44	1258	23-mai-99	31-mai-99	9	7
44	1261	14-juin-99	21-juin-99	8	6
46	1259	21-juin-99	24-juin-99	4	3
44	1262	19-juil-99	27-juil-99	9	6
43	1405	5-août-99	10-août-99	6	5
44	1267	1 ^{er} -sep-99	5-sep-99	5	4
41	1414	20-oct-99	24-oct-99	5	5
53	1411	12-nov-99	13-nov-99	2	1
3	1438	17-nov-99	21-nov-99	5	4
33	1453	25-nov-99	1 ^{er} -déc-99	7	4
44	1521	3-déc-99	8-déc-99	6	4
33	1454	9-déc-99	19-déc-99	11	7
31	1455	14-déc-99	20-déc-99	7	5
33	1517	12-jan-00	18-jan-00	7	2
13	1522	1 ^{er} -fév-00	3-fév-00	3	2
3	1524	21-fév-00	24-fév-00	4	3
1	1555	11-mars-00	16-mars-00	6	5
55	1541	30-mars-00	31-mars-00	2	1
56	1557	5-avril-00	11-avril-00	7	6
41	1592	15-avril-00	19-avril-00	5	5
41	1597	29-avril-00	1-mai-00	3	2
41	1598	18-mai-00	24-mai-00	7	6
41	1666	7-juin-00	10-juin-00	4	3
41	1678	22-juil-00	29-juil-00	8	6
41	1695	2-août-00	6-août-00	5	3
41	1692	11-août-00	14-août-00	4	3
41	1707	18-sep-00	23-sep-00	6	5
41	1708	26-sep-00	2-oct-00	7	6
41	1710	13-oct-00	19-oct-00	7	6
41	1716	21-oct-00	27-oct-00	7	6
56	1715	26-oct-00	2-nov-00	8	7
41	1778	1 ^{er} -nov-00	8-nov-00	8	6
41	1751	24-nov-00	2-déc-00	9	6
41	1779	17-jan-01	23-jan-01	7	6
				327	255



Figure 2 - Nageoire anale d'espadon.

Il est indispensable de récupérer la base de cette nageoire anale pour faciliter le traitement ultérieur, son absence, en particulier au niveau de la seconde épine, pouvant entraîner des difficultés lors de la localisation de la zone de coupe.

Une petite partie des poissons, majoritairement des petits individus (poids inférieur à 20 kg), est traitée en VAT (vidé avec tête, débarrassé des ouïes ; Poisson & Macé, 1997). Ces poissons sont débarrassés de

leurs ouïes mais les nageoires et la tête sont conservées. Il est alors impossible de récupérer la nageoire anale. Ce traitement explique en partie les 334 espadons échantillonnés pour lesquels la nageoire anale n'a pas pu être récupérée. À ceci s'ajoute le fait que peu de très jeunes individus ($l_{mf} < 90$ cm) ont été capturés lors des échantillonnages et que les jeunes individus remontés vivants sont très souvent relâchés. L'échantillonnage présente donc un déficit en très jeunes espadons.

Afin de compléter cet échantillonnage, les pêcheurs ont été sollicités pour rapporter des jeunes individus capturés et remontés morts. Ces jeunes individus, au nombre de 65, récupérés entiers pour la plupart, ont été mesurés et sexés au laboratoire. Les nageoires anales ont été récupérées sur 60 d'entre eux. Les vertèbres et la tête (pour récupération ultérieure des otolithes) ont également été conservées. Sur ces petits individus, les informations recueillies sont souvent moins précises (jour et zone de pêche inconnus, absence de sexe car certains poissons ont été préalablement éviscérés...).

Préparation des échantillons

Extraction de la seconde épine

La première nageoire anale comprend de 16 à 19 rayons épineux chez les adultes (Portthoff & Kelley, 1982). Chaque rayon est composé de deux éléments accolés maintenus par un tissu conjonctif central. La première épine est petite et large, mais peut être manquante chez certains individus. La seconde épine est plus grande, les suivantes se distinguent par leur forme digitée (Berkeley & Houde, 1983). Quatre cas de figure ont pu être observés dans la succession des épines (tab. 2).

La nageoire anale, jusqu'alors stockée au congélateur, est mise à bouillir, dans l'eau, afin de dégager la seconde épine du reste de la peau et des tissus. Le temps de cuisson doit être adapté en fonction de la taille et de la forme de la nageoire. Il ne faut pas cuire de façon excessive la périphérie de l'épine pour conserver la zone de coupe en bon état. Lors de cette extraction, le tissu conjonctif central maintenant les deux parties de l'épine est conservé afin de faciliter la coupe ultérieure.

Dans le 3^e cas (tab. 2), caractérisé par la présence de 2 épines moyennes, la plus grande des deux épines a été traitée. Une fois récupérées, les épines retenues sont mises à sécher sur une paillasse recouverte de papier absorbant pendant une semaine.

Préparation des coupes

La zone de coupe est repérée, conformément à la méthode de Ehrhardt (1994). Cette méthode consiste à mesurer la base de l'épîne dans sa plus grande largeur (d), entre les condyles de base ; la zone de coupe est située à d/2 au-dessus (fig. 3). Cette zone est matérialisée par une légère marque au crayon. Si la base de l'épîne est abîmée (absence d'un condyle...), une extrapolation est réalisée pour déterminer la distance d. Si la base de l'épîne est absente, l'échantillon est rejeté.

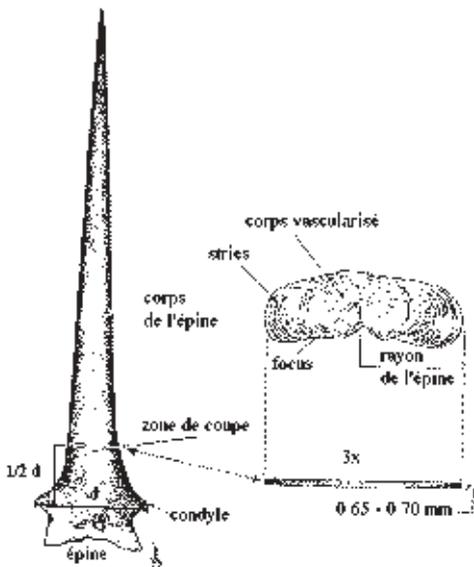


Figure 3 - Localisation de la zone de coupe. Source : Ehrhardt, 1994.

L'épîne est ensuite sectionnée, au niveau de la marque effectuée, à l'aide d'une tronçonneuse ou scie circulaire à vitesse lente de type Isomet®, équipée d'une lame diamantée (fig. 4). La coupe s'effectue en utilisant du liquide Isocut®.

Deux coupes successives d'une épaisseur moyenne de 0,65 mm (réglage au micromètre) sont réalisées (vitesse 5-6/10). Ces coupes sont facilement récupérées dans le bac de barbotage, situé sous la lame, à l'aide du panier prévu à cet effet.

Tableau 2 - Différents cas rencontrés dans la succession des épines de la nageoire anale. Source : Tréca, 1998.

	1 ^{re} épine petite épine	2 ^e épine épine(s) moyenne(s)	3 ^e épine épine digitée
1			
2	?		
3			
4	?	?	



Figure 4 - Tronçonneuse basse vitesse Isomet®.

Pour les petits individus (LMF < 80 cm en moyenne), la coupe de l'épîne brute est quasiment impossible, compte tenu de sa fragilité. Des inclusions dans de la résine ont été effectuées au Lasaa pour ces épines de petite taille.

Fixation des coupes sur lames de microscope
 Les deux coupes obtenues sont disposées de la même façon sur une lame de microscope préalablement référencée (fig. 5). Elles sont fixées grâce à de la résine Euckitt en évitant soigneusement la formation de bulles d'air. Ces préparations sont mises à sécher, à l'horizontal, dans un endroit sec, à l'abri de la poussière, pendant 24 heures.

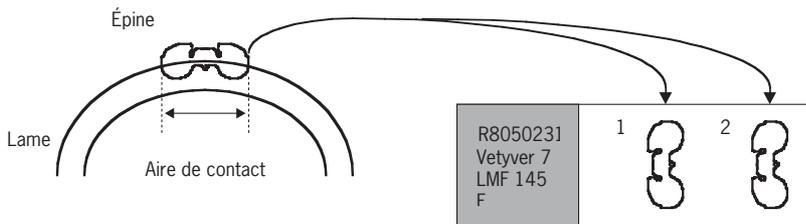


Figure 5 - Positionnement des 2 coupes sur la lame de microscope référencée.

Les 1 432 coupes ainsi effectuées sont conservées à l'abri de l'air et de la lumière, dans des boîtes de rangement pour lames de microscope adaptées.

Observation des coupes

Les coupes sont observées à la loupe binoculaire, en lumière transmise ou réfléchie.

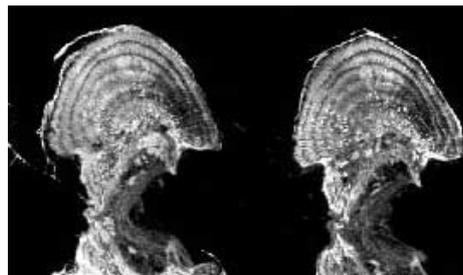


Figure 6 - Observation à la loupe binoculaire, sur fond noir, de coupes d'épine d'espadon.

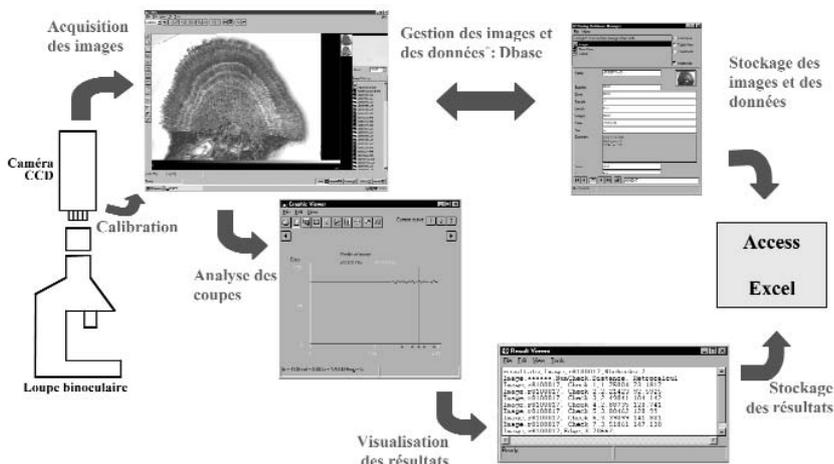


Figure 7 - Schéma des étapes de l'analyse des coupes d'épine avec le logiciel Visilog-TNPC.

Une bonne mise au point permet de visualiser une alternance de zones opaques et hyalines disposées de façon concentrique autour de la matrice centrale (fig. 6).

Initialement, la lecture se faisait entièrement sous loupe binoculaire à l'aide d'un micromètre oculaire. L'acquisition du logiciel Visilog-TNPC (traitement numérique des pièces calcifiées) et de la chaîne de traitement associée a considérablement facilité cette lecture.

La chaîne de traitement actuelle se compose d'une caméra CCD Sony, modèle XC 77 CE montée sur une loupe binoculaire Wild M7A. Le tout est relié à un ordinateur sur lequel est installé le logiciel Visilog-TNPC version 3.2.

Le logiciel Visilog-TNPC est basé sur le logiciel Visilog 5, un environnement d'analyse et de traitement d'images en 2 dimensions qui permet d'acquérir une image à partir d'une caméra ou d'un fichier, de l'afficher sur l'écran, de l'annoter, d'en extraire les mesures élémentaires et de l'imprimer. Les images ainsi obtenues peuvent être sauvegardées dans des formats universels (TIFF, BMP...) et les résultats numériques enregistrés en format texte.

Ce logiciel a été conçu par la Lasaa et la société Noesis pour le traitement numérique des pièces calcifiées (TNPC). Il permet d'établir le profil des coupes en niveaux de gris, d'identifier les différents anneaux et d'effectuer des mesures de distance. Les étapes du protocole d'analyse des coupes : acquisition, visualisation, traitements des images et traitements des données sont présentées à la figure 7. Une « calibration » permet d'établir la correspondance entre les distances en pixels, mesurées par défaut par le logiciel, et les distances réelles en millimètres.

Toutes les images des coupes sont enregistrées dans une base de données TNPC, au format Access, du type « Tnpc.mdb » : la « Dbase » (fig. 8). Dans cette base de données, à chaque coupe correspond une fiche d'identification comprenant sa photo et les caractéristiques de l'échantillon (numéro d'échantillon, LMF, sexe, date, bateau...).

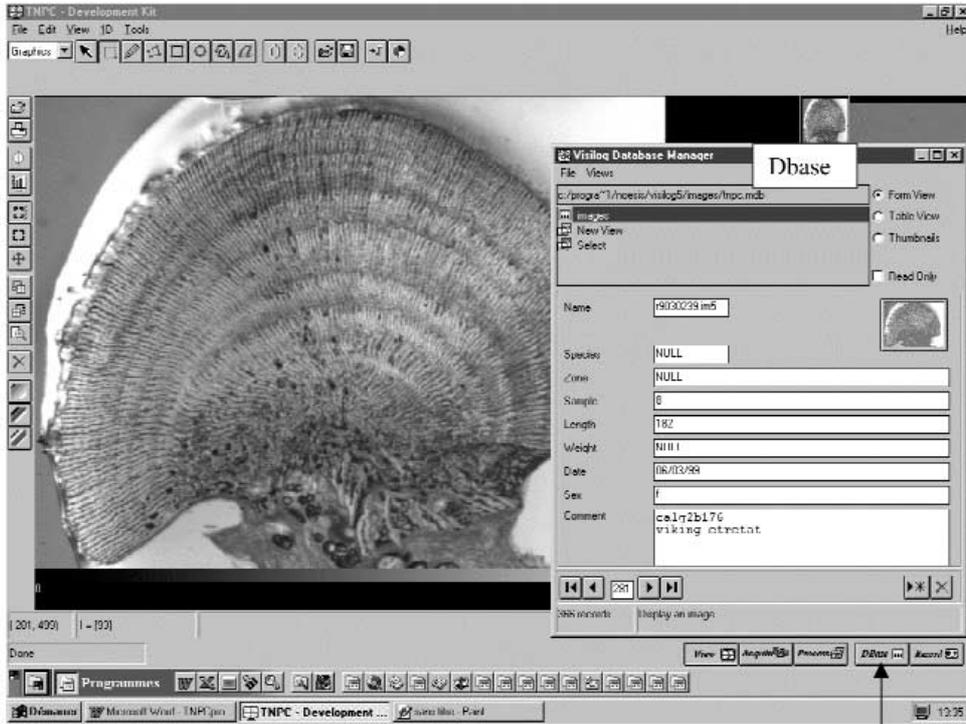


Figure 8 - Présentation de la Dbase.

Fonction base de données

Lecture des coupes

Pour chaque coupe, l'objectif est de déterminer le focus, de définir le positionnement des différentes stries de croissance et d'obtenir les distance focus-bord de la coupe et focus-différents annuli. Des informations qualitatives sont également recueillies. Ces observations portent notamment sur la forme et sur la lisibilité. La variable forme se décompose en 3 classes : 0 - forme normale arrondie; 1 - forme excentrée arrondie; 2 - forme pointue. De la même façon, la variable qualité se décompose en : 0 - bonne coupe; 1 - coupe présentant des zones aveugles; 2 - coupe illisible.

Le focus est positionné à l'intersection des deux droites imaginaires prolongeant les bords de la coupe et correspond au point de convergence des striations radiales (Ehrhardt *et al.*, 1995). Le profil est défini comme l'axe de croissance maximale, du focus jusqu'à la périphérie de la coupe. Il est matérialisé dans Visilog-TNPC par une longue flèche rouge et la décomposition en niveau de gris qui lui est associée apparaît automatiquement dans la fenêtre « Graphic Viewer » (fig. 10). Le profil ainsi tracé est alors enregistré et pourra être rechargé à tout moment.

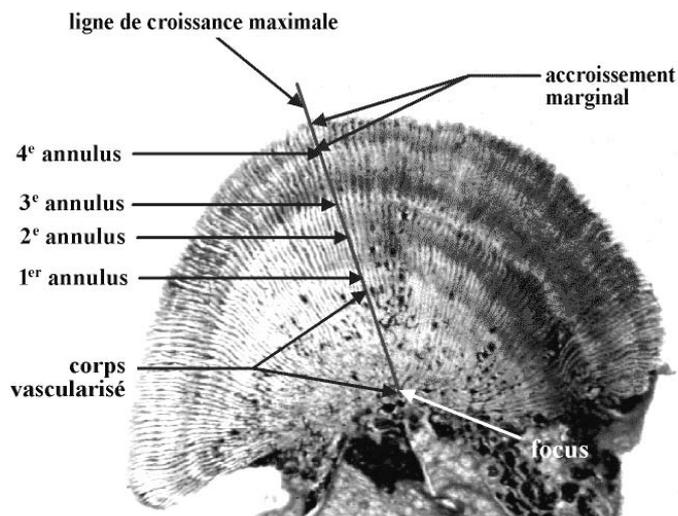


Figure 9 - Coupe d'épine d'espadon sur fond blanc.

Suppression de la zone remaniée

La matrice centrale des coupes est vascularisée et peut subir des remaniements vasculaires qui masquent souvent les premières stries de croissance. On parle alors de zone remaniée. Ce phénomène est quelquefois présent chez les jeunes individus mais semble s'accroître avec l'âge. La fonction « initialisation » de TNPC permet de faire abstraction de cette zone remaniée.

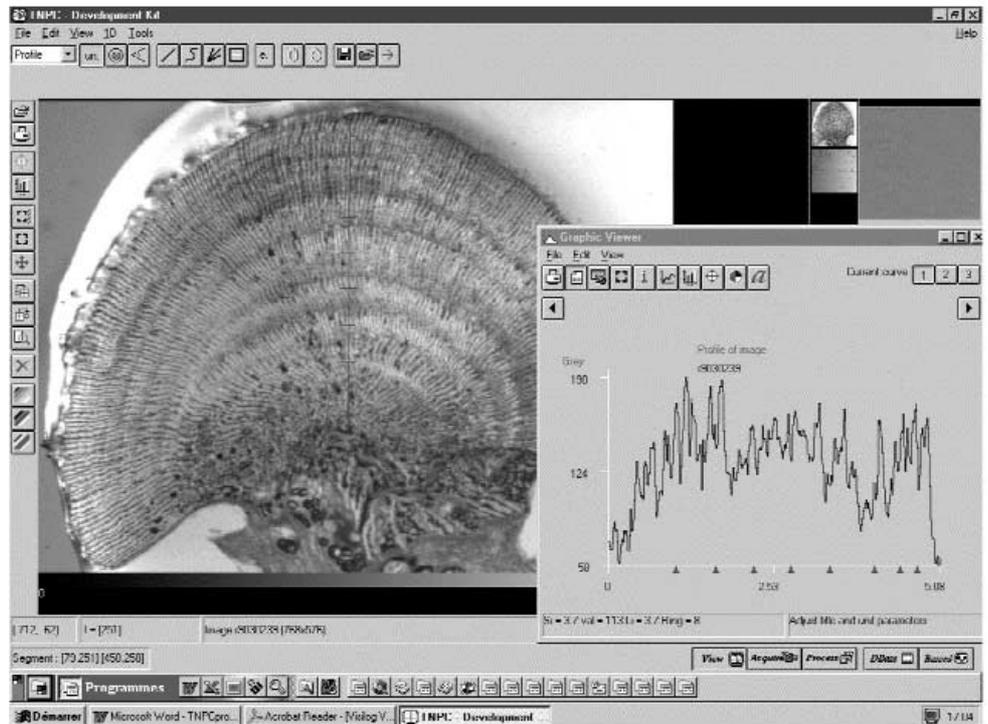


Figure 10 - Configuration de l'écran lors du traitement d'image avec présentation du Graphic Viewer.

Intégration de la portion restante du profil

Sur la portion restante, on applique la fonction « Intégration » de TNPC. Cette fonction permet de compiler les informations issues de 5 radiales situées de part et d'autre de la radiale initiale.

Application du script

Une série d'opérations est appliquée au profil afin de déterminer la position des différentes stries. Ces opérations sont réalisées à partir de différentes fonctions programmées dans TNPC (« smooth », « detrend », « top-hat »). Elles ont été regroupées dans un script afin d'être appliquées en routine sur les différents échantillons.

Validation des taquets

Des taquets sont automatiquement positionnés au niveau des zones d'intensité maximale du profil. Dans la mesure du possible, ce type de positionnement est conservé. Mais il peut s'avérer nécessaire d'ajouter ou de supprimer manuellement certains taquets dont la position n'est pas optimale. Le nombre d'anneaux ajoutés et le nombre d'anneaux supprimés, par rapport au nombre d'anneaux définis automatiquement par le script, seront notés pour chaque coupe étudiée. Cette variable, appelée variable d'ajustement, sert pour valider

la technique utilisée. Une fois retravaillés, les profils sont sauvegardés et pourront être rechargés si besoin est.

Caractérisation des stries

Les différentes stries observées sont caractérisées par leur qualité (contraste, continuité...) et par leur positionnement (interne ou externe) en cas de doublons. Ces informations sont utiles lors des traitements ultérieurs. La variable contraste indique au moyen d'un code numérique la qualité de chaque strie : 0 - anneau bien contrasté et continu; 1 - anneau discontinu ou faiblement contrasté. La variable d'ordre permet d'identifier les doublons en caractérisant chaque strie par une lettre : i - strie intérieure d'un doublon; e - strie extérieure d'un doublon; n - strie simple, sans doublon.

Enregistrement des données

Les informations contenues dans le profil sont visualisées dans une fenêtre de résultat TNPC (« Result Viewer »). Elles sont ensuite exportées vers Excel où elles sont compilées dans un fichier qui contient l'ensemble des coupes. Dans ce fichier, sont également saisies les caractéristiques de la coupe et des stries observées pour chaque individu (tab. 3).

Tableau 3 - Enregistrement des données sous Excel.

Name	NumCheck	Distance	Rétrocalcul	vcontrast	vordre	anneaumoins	anneauplus	vforme	vqual
r8100017	Check 1	1,69893	71,0444	0	n	1	2	1	0
r8100017	Check 2	2,21423	92,5925	1	i				
r8100017	Check 3	2,49968	104,529	0	e				
r8100017	Check 4	2,86642	119,865	0	n				
r8100017	Check 5	3,07296	128,502	1	n				
r8100017	Check 6	3,37933	141,314	0	i				
r8100017	Check 7	3,51861	147,138	1	e				
r8100017	Edge	3,70662							

Compte tenu du caractère automatique et reproductible du protocole, chaque coupe a fait l'objet d'une seule lecture. Ce protocole a été appliqué rigoureusement à 1 183 coupes. Pour 420 coupes supplémentaires, une analyse partielle a été menée, seules la caractérisation des coupes et la mesure du rayon de l'épine ont été effectuées.

Analyse des données

Avant tout traitement des données, un bilan des échantillonnages et des échantillons traités est présenté. Les effectifs d'espadons échantillonnés pourront différer légèrement d'un graphique à l'autre en fonction de l'exhaustivité des informations contenues dans les différentes bases de données (Activité des palangriers, TNPC).

Détermination des relations d'allométrie (RS-lmf)

Choix du meilleur ajustement

Le rayon de coupe (RS en millimètre) des épines de nageoire anale a été mis en relation avec la longueur (LMF en centimètre) des poissons. Pour ce traitement, effectué sous Excel, les individus dont la LMF est connue et dont les coupes ont fait l'objet d'une mesure du rayon d'épine ont été considérés. Les données relatives à 1494 individus traités principalement à l'Ifremer Réunion (1460 coupes) et au Lasaa (34 très jeunes individus) ont été regroupées.

Sachant que la croissance des mâles est supposée différente de celle des femelles, les 2 sexes ont été traités séparément.

Des tentatives d'ajustement de relations de types linéaire, puissance et logarithmique ont été menées sur les nuages de points obtenus. Les coefficients de détermination r^2 ont permis de retenir les meilleures régressions. Ces relations d'allométrie servent de base aux méthodes de rétrocalcul.

Test de signification de la pente

Pour résoudre le problème de non-linéarité rencontré avec les relations de type puissance ou logarithmique, la solution est de linéariser les équations par une transformation.

Prenons l'exemple d'une relation du type puissance $y = bx^a$. En transformant cette relation avec les logarithmes, elle devient une relation linéaire de la forme

$$\log y = \log b + a \log x.$$

En posant $\log y = Y$, $\log x = X$ et $\log b = B$, on obtient une relation linéaire du type $Y = B + AX$ (avec $\log = \ln$ ou logarithme népérien).

Afin de vérifier que la régression de LMF en RS établie est bien significative, un test de signification de pente a été réalisé sur les équations transformées. La méthode retenue est celle exposée par Scherrer (1984). Des tests de comparaison de pente ont également été réalisés pour comparer les régressions obtenues sur les mâles et les femelles ainsi que pour comparer nos résultats avec ceux d'autres auteurs (Ehrhardt, 1992; Tsimenides & Tserpes, 1989).

Longueurs rétrocalculées

Le rétrocalcul de la croissance est utilisé pour estimer la longueur des poissons à une date (ou à un âge) antérieur(e) à celle (ou à celui) de la capture. Cette méthode est fondée sur l'existence d'une relation entre la croissance en longueur (L) du poisson et celle (R) d'une pièce anatomique osseuse.

L'objectif est donc d'estimer la longueur L_i du poisson à l'âge i en fonction de la longueur du poisson L_c à la capture, du rayon R_i de l'épine à l'annulus i et du rayon de l'épine R_c à la capture. En l'absence de validation, nous avons estimé la longueur L_i du poisson à l'annulus i et non à l'âge i .

Dans un premier temps, c'est la méthode proportionnelle de Dahl-Lea (1910) qui a été utilisée comme méthode de rétrocalcul,

en supposant que la relation entre la 2^e épine et la longueur du poisson est plutôt de type linéaire :

$$L_i = (R_i/R_c)L_c$$

Cette équation est enregistrée dans TNPC, qui fournit automatiquement les longueurs rétrocalculées dans le « Result Viewer » parallèlement aux autres informations sur la coupe. Ces données sont également transférées sous Excel (tab. 3). Pour chaque espadon échantillonné, on dispose de n longueurs rétrocalculées où n est le nombre d'annuli observés. Dans une phase ultérieure, il serait souhaitable d'introduire directement dans TNPC, comme équation de rétrocalcul, les meilleures relations d'allométrie obtenues (meilleurs r^2).

Ajustements des courbes de croissance

À partir des longueurs rétrocalculées, un modèle de croissance de type Von Bertalanffy a été ajusté aux données. Ces paramètres ont été déterminés à l'aide du logiciel Vonbit disponible sur le site internet de la FAO (Stamatopoulos & Caddy, 1999). La mise en œuvre de ce logiciel suppose qu'il y a formation d'un et un seul anneau par an. Le nombre d'annuli observés peut alors être assimilé à un âge.

Des ajustements suivant le modèle de croissance de Von Bertalanffy ont été menés dans un premier temps sur l'ensemble des couples âge (en nombre d'anneaux)-longueur rétrocalculée. Pour chaque poisson, on a donc n (nombre d'anneaux) couples âge-longueur.

Des ajustements ont également été opérés sur des moyennes de longueurs par âge. Dans ce cas, deux approches ont été tentées. La première consiste à attribuer la fréquence 1 aux moyennes de longueurs obtenues pour les différents annuli. La seconde utilise une pondération des moyennes par les effectifs de classes de longueurs ayant permis leur calcul.

Dans un second temps, d'autres ajustements ont été menés non plus avec n couples âge-longueur par poisson mais avec un seul couple âge-longueur par poisson, en évaluant pour chaque individu son âge à la capture. Pour obtenir cet âge à la capture, nous utilisons la relation de type puissance calculée entre les annuli et leurs rayons moyens. Cette courbe nous permet d'obtenir un âge estimé en fonction du

rayon de l'épine. Nous disposons ainsi du couple de données âge-LMF nécessaire pour établir une relation de croissance à l'aide du logiciel Vonbit.

Validation

La méthode de validation tentée au cours de cette étude est l'utilisation de l'accroissement marginal. L'accroissement marginal, ou marginal increment (MI), se définit comme la distance comprise entre la dernière strie de croissance et le bord de l'épine. Le ratio d'accroissement marginal (RMI) représente le rapport entre l'accroissement marginal et la distance entre les deux dernières stries de croissance.

Pour chaque poisson, l'accroissement marginal et le ratio d'accroissement marginal ont été estimés avec les formules suivantes :

$$MI = R_c - R_n$$

$$RMI = \frac{R_c - R_n}{R_n - R_{n-1}}$$

(Hayashi, 1976 *in* Esteves *et al.*, 1995)

avec R_c : rayon de l'épine à la capture

R_n : rayon de l'épine au dernier annulus (n)

R_{n-1} : rayon de l'épine à l'avant-dernier annulus (n-1)

L'évolution mensuelle du ratio d'accroissement marginal a donc été étudiée sur une base pluri-annuelle. Cette évolution du RMI a été étudiée en séparant les individus par classe de taille ($LMF < 125$, $125 < LMF < 170$, $LMF > 170$ cm), par sexe car l'accroissement marginal varie considérablement en fonction de l'âge, de la taille et du sexe (Ehrhardt, 1992).

Reclassement des données

Les données brutes présentent un certain nombre d'incohérences dues en particulier aux remaniements vasculaires (disparition d'anneaux) et à la présence d'anneaux multiples (anneaux supplémentaires). Ceci se traduit par une variabilité importante au niveau de la position des différents annuli. Ainsi, on rencontre des individus très grands, avec des longueurs maxillaire-fourche supérieures à 200 cm, présentant seulement 1 ou 2 annuli. À l'inverse, on peut rencontrer des individus relativement petits présentant 8 ou 9 anneaux. L'objectif du reclassement est de proposer une nouvelle répartition des poissons dans les classes d'annuli.

Le premier tri envisagé consiste à utiliser les informations qualitatives issues des observations des coupes, comme les variables Vordre et Vcontrast. Ces variables permettent d'éliminer les anneaux doubles mais, en aucun cas, d'évaluer le nombre d'anneaux manquants. C'est pour cela qu'un traitement algorithmique basé sur la position moyenne des annuli a été utilisé.

Au préalable, les positions moyennes des différents anneaux (RM_i) sont calculées. On en déduit les positions des seuils :

$$S_i = (RM_{i+1} - RM_i) / 2$$

avec S_i seuil d'acceptation du i^e annulus, RM_{i+1} et RM_i les rayons moyens des annuli.

Considérons le i^e annulus, si R_i est supérieur à S_i , alors R_i doit être décalé vers la droite ; si R_i est inférieur à S_{i-1} , alors R_i doit être décalé vers la gauche ; dans les autres cas, il reste au même endroit. Pour effectuer ces reclassements, un algorithme a été réalisé en langage C++ (Borland®). L'opération est effectuée en boucle, jusqu'à ce que très peu de valeurs (2%) soient modifiées, les seuils étant recalculés à chaque itération.

L'ensemble des traitements présentés aux pages 148 et 149, et en particulier les ajustements de courbes de croissance de type Von Bertalanffy, est appliqué ensuite à la matrice de données issue de ce reclassement.

Résultats

Bilan des échantillonnages

Sur les 1935 espadons échantillonnés, 1607 nageoires anales ont été prélevées (fig. 11).

Les individus échantillonnés dont les tailles (longueur LMF) à la capture varient entre 69 et 289 cm présentent une distribution de fréquence de type normale couvrant les classes de taille allant de 60-70 à 280-290 cm, ceci avec un déficit important pour les classes de taille extrêmes et en particulier les jeunes individus. Ce manque d'individus de petite taille a été compensé par une soixantaine de jeunes espadons (LMF entre 50 et 100 cm) fournis par les pêcheurs eux-mêmes.

En moyenne, environ 50 individus par mois ont ainsi pu être échantillonnés. Si l'on fait un regroupement mensuel sur les différentes années du programme, l'échantillon s'élève à près de 100 individus par mois, excepté pour les mois de février (n=33) et de septembre (n=81 ; fig. 12). Le sex-ratio mensuel des espadons échan-

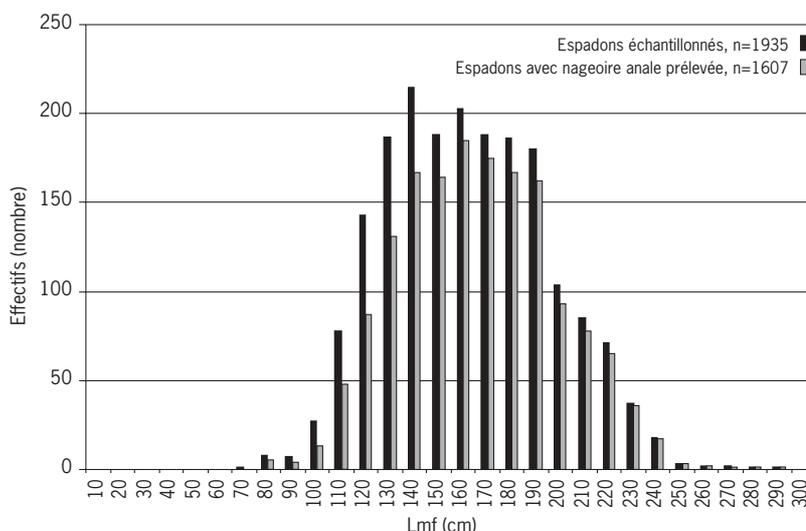


Figure 11 - Distribution de fréquence de taille des espadons qui ont fait l'objet d'un échantillonnage biologique au cours du PPR (n = 1935) et des espadons dont la nageoire anale a été prélevée.

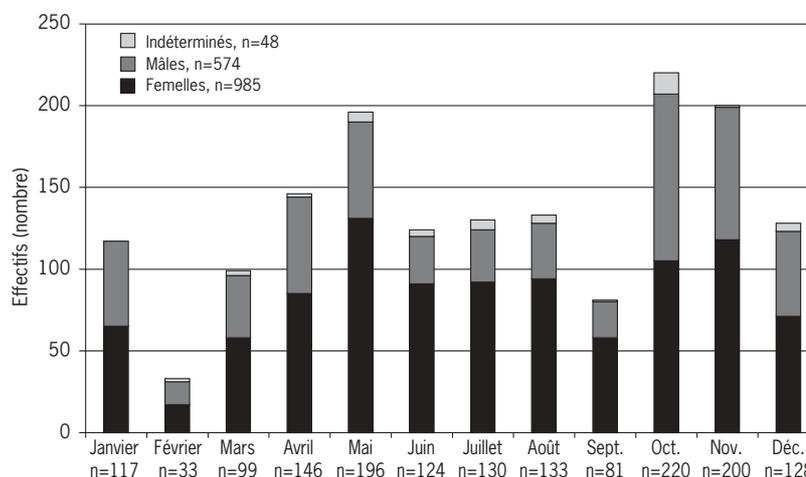


Figure 12 - Nombre d'espadons dont les épines ont été prélevées par mois pour l'étude « Ageage », n = 1607 (n femelles = 985, n mâles = 574, n indéterminés = 48).

tillonnés pour l'étude « Ageage » est à la faveur des femelles pour les 12 mois de l'année. Cependant, les proportions de mâles semblent particulièrement faibles (<30%) pour les mois de juin à septembre.

Caractérisation des épines prélevées

Les fréquences respectives des différents cas de figure observés (tab. 2) dans la succession des épines de nageoires anales ont été établies (tab. 4).

Tableau 4 - Fréquences d'apparition des différents cas de figure observés dans la succession des épines.

	1	2	3	4
Cas observés sur 1 603 nageoires	Cas normal	Pas de 1 ^{re} épine	Deux 2 ^e épines	Pas de 1 ^{re} ni de 2 ^e épine
Fréquence d'apparition	91 %	2,5 %	5,9 %	< 1 %

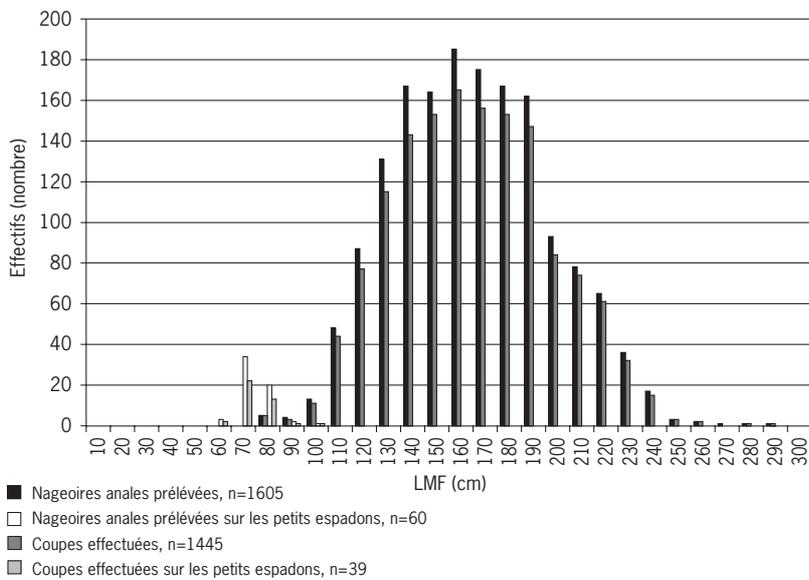


Figure 13 - Distribution de fréquence de taille (Longueur LMF) des espadons dont les nageoires ont été prélevées (n = 1 665) et dont les épines ont été coupées (n = 1 484).

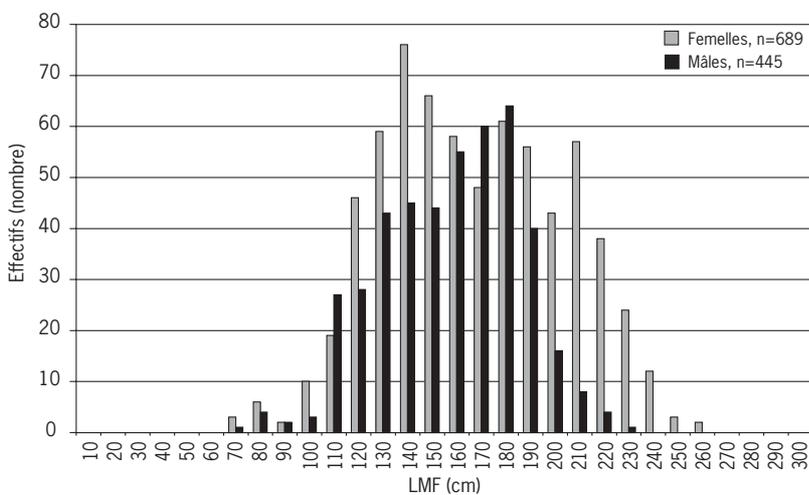


Figure 14 - Distribution des longueurs (lmf) pour les espadons dont les coupes ont été analysées (analyse complète) sous TNPC (coupes réalisées depuis 1995), n femelles = 689, n mâles = 445.

Sur les 1 605 épines collectées, 161 n'ont pas pu être coupées car la base était absente et la détermination de la zone de coupe impossible (fig. 13).

Bilan des échantillons traités

Pourcentage de coupes analysées

Les 1 603 coupes d'épines d'espadon ont été traitées avec l'analyseur d'image. Les espadons concernés proviennent pour la grande majorité des échantillonnages réalisés entre mai 1998 et janvier 2001. Mais certaines coupes réalisées en 1995, lors d'une étude préalable, sont venues compléter l'échantillon.

La répartition par sexe fait apparaître un plus grand nombre de coupes analysées pour les femelles (fig. 14) et en particulier pour les grandes classes de taille (>190 cm).

Forme des coupes

Pour 1 508 individus, on dispose de l'information sur la forme de la coupe, le sexe et la lmf. 944 coupes (soit 62,6 %) ont une forme « normale arrondie » (0), 203 coupes (soit 13,5 %) ont une forme « excentrée arrondie » (1) et 361 coupes (soit 23,9 %) ont une forme « pointue » (2).

Les informations sur la forme des coupes peuvent être présentées en fonction du sexe et de la taille des individus (tab. 5).

Il apparaît que la proportion de coupes dites « pointues » est plus importante chez les mâles que chez les femelles et cela au détriment des coupes « normales arrondies ». Ces coupes « pointues » se rencontrent particulièrement (à plus de 40 %) chez les jeunes individus (lmf < 125 cm) et leur proportion

Tableau 5 - Formes des coupes d'épines observées par sexe et par classe de taille, n = 1 508 coupes.

lmf	Nombre total	Normale arrondie (0)		Excentrée arrondie (1)		Pointue (2)	
		Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
Femelles							
<125	100	55	55,0	4	4,0	41	41,0
125-170	383	256	66,8	44	11,5	83	21,7
170-210	308	214	69,5	51	16,6	43	14,0
>= 210	133	91	68,4	24	18,0	18	13,5
Total femelles	924	616	66,7	123	13,3	185	20,0
Mâles							
<125	72	36	50,0	7	9,7	29	40,28
125-170	275	154	56,0	38	13,8	83	30,18
170-210	180	102	56,7	29	16,1	49	27,22
>= 210	7	5	71,4	1	14,3	1	14,29
Total mâles	534	297	55,6	75	14,0	162	30,34
Total	1 508	944	62,6	203	13,5	361	23,9

diminue avec l'âge. À l'inverse, les proportions des coupes « excentrées arrondies » et des coupes « normales arrondies » augmentent légèrement avec l'âge.

Qualité des coupes

Pour 1 510 individus, on dispose de l'information sur la qualité de la coupe, le sexe et la lmf; 665 coupes (soit 44 %) sont de bonne qualité, 816 coupes (soit 54 %) présentent des zones aveugles mais laissant 1 ou plusieurs anneaux visibles et seulement 29 coupes (soit moins de 2 %) sont réellement illisibles (tab. 6).

Le pourcentage de bonnes coupes est légèrement plus élevé chez les mâles et atteint presque les 50 % contre 40 % environ chez les femelles. Néanmoins, les pourcentages de bonnes coupes sont nettement plus élevés (64 % pour les femelles et 58,3 % pour les mâles) chez les jeunes individus (LMF < 125 cm). Puis ces proportions de

bonnes coupes diminuent considérablement avec l'âge pour arriver chez les individus de plus de 210 cm à moins de 30 % des coupes analysées. Parallèlement à la diminution de la proportion de bonnes coupes avec l'âge, il y a une augmentation des coupes présentant des zones aveugles, passant à l'inverse de 34 à 69 % pour les femelles et de 42 à 71 % pour les mâles.

Qualité des stries

Les informations sur la qualité des coupes peuvent être complétées par des informations sur la qualité des stries. Une coupe de bonne qualité peut présenter une strie mal contrastée ou discontinue et, à l'inverse, une coupe de mauvaise qualité, présentant des zones aveugles, peut posséder un ou plusieurs anneaux très bien contrastés. Les informations sur la qualité des stries, recueillies grâce à la variable Vcontrast (tab. 7), montrent que les anneaux observés

Tableau 6 - Qualité des coupes d'épines observées par sexe et par classe de taille, n = 1 510 coupes.

lmf	Bonne coupe (0)			Zone aveugle (1)		Illisible (2)	
	Nombre total	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
Femelles							
<125	100	64	64,0	34	34,0	2	2,0
125-170	384	172	44,8	207	53,9	5	1,3
170-210	309	99	32,0	202	65,4	8	2,6
>= 210	133	38	28,6	92	69,2	3	2,3
Total femelles	926	373	40,3	535	57,8	18	1,9
Mâles							
<125	72	42	58,3	30	41,7	0	0,0
125-170	275	142	51,6	126	45,8	7	2,5
170-210	180	73	40,6	104	57,8	3	1,7
>= 210	7	2	28,6	5	71,4	0	0,0
Total mâles	534	259	48,5	265	49,6	10	1,9
Total	1 510	665	44,0	816	54,0	29	1,9

Tableau 7 - Effectifs de la variable Vcontrast (0, anneau bien contrasté et continu, 1, anneau mal contrasté) pour les différents annuli, pour les mâles et les femelles.

Annuli	Femelles					Mâles				
	0		1		Total	0		1		Total
	Effectif	%	Effectif	%		Effectif	%	Effectif	%	
1	361	56,67	276	43,33	637	214	52,84	191	47,16	405
2	350	56,54	269	43,46	619	216	56,25	168	43,75	384
3	354	63,21	206	36,79	560	218	63,37	126	36,63	344
4	287	62,66	171	37,34	458	177	65,31	94	34,69	271
5	199	55,59	159	44,41	358	132	67,01	65	32,99	197
6	148	56,06	116	43,94	264	84	63,16	49	36,84	133
7	108	59,34	74	40,66	182	52	68,42	24	31,58	76
8	80	62,02	49	37,98	129	29	64,44	16	35,56	45
9	48	54,55	40	45,45	88	9	50	9	50	18
10	20	44,44	25	55,56	45	3	33,33	6	66,67	9
11	12	46,15	14	53,85	26	5	83,33	1	16,67	6
12	6	42,86	8	57,14	14	1	100	0	0	1
13	3	60	2	40	5					
14	2	100	0	0	2					

sont des anneaux continus et bien contrastés, pour plus de la moitié d'entre eux, pour les nombres d'annuli allant de 1 à 9, pour les mâles comme pour les femelles. Au-delà du 9^e anneau, ces pourcentages semblent diminuer mais les derniers ne sont pas à prendre en compte en raison des trop faibles effectifs ayant permis leur calcul.

La dernière information sur les coupes observées concerne la présence éventuelle d'anneaux multiples caractérisée par la variable Vordre (tab. 8). Pour les mâles comme pour les femelles, plus de 80 % des coupes présentent un i^e anneau simple. Les 20 % restant se partagent entre les anneaux internes et les anneaux externes. Le pourcentage d'anneaux simples augmente globalement avec le nombre d'annuli observés et atteint 100 % pour les mâles à partir du 9^e anneau et pour les femelles à partir du 10^e anneau. En conséquence, l'apparition des anneaux multiples semble avoir lieu en majorité dans les premières années de vie de l'espadon et ce phénomène devient rare chez les individus âgés.

Relations d'allométrie

Les régressions

La longueur du poisson (l_{mf} en centimètre) a été mise en relation avec le rayon (RS en millimètre) de l'épine pour obtenir un nuage de point. Ce traitement porte sur l'ensemble des individus (1 494), puis séparément sur les femelles (912) et sur les mâles (529).

Les meilleurs ajustements ont été obtenus avec les courbes de types linéaire et puissance. Les coefficients de corrélation sont respectivement $r^2 = 0,811$ et $r^2 = 0,8419$ pour les femelles et $r^2 = 0,7182$ et $r^2 = 0,7588$ pour les mâles.

Les équations puissances obtenues sont les suivantes :

- pour les 2 sexes confondus :

$$l_{mf} = 68,086RS^{0,6183}$$

($r^2 = 0,8507$, N = 1494)

- pour les femelles :

$$l_{mf} = 68,845RS^{0,6106}$$

($r^2 = 0,8419$, N = 912)

- pour les mâles :

$$l_{mf} = 72,148RS^{0,5781}$$

($r^2 = 0,7588$, N = 529)

Les équations linéaires obtenues sont les suivantes :

- pour les 2 sexes confondus :

$$l_{mf} = 24,237RS + 62,105$$

($r^2 = 0,8088$, N = 1494)

- pour les femelles :

$$l_{mf} = 23,57RS + 65,038$$

($r^2 = 0,811$, N = 912)

- pour les mâles :

$$l_{mf} = 23,446RS + 66,273$$

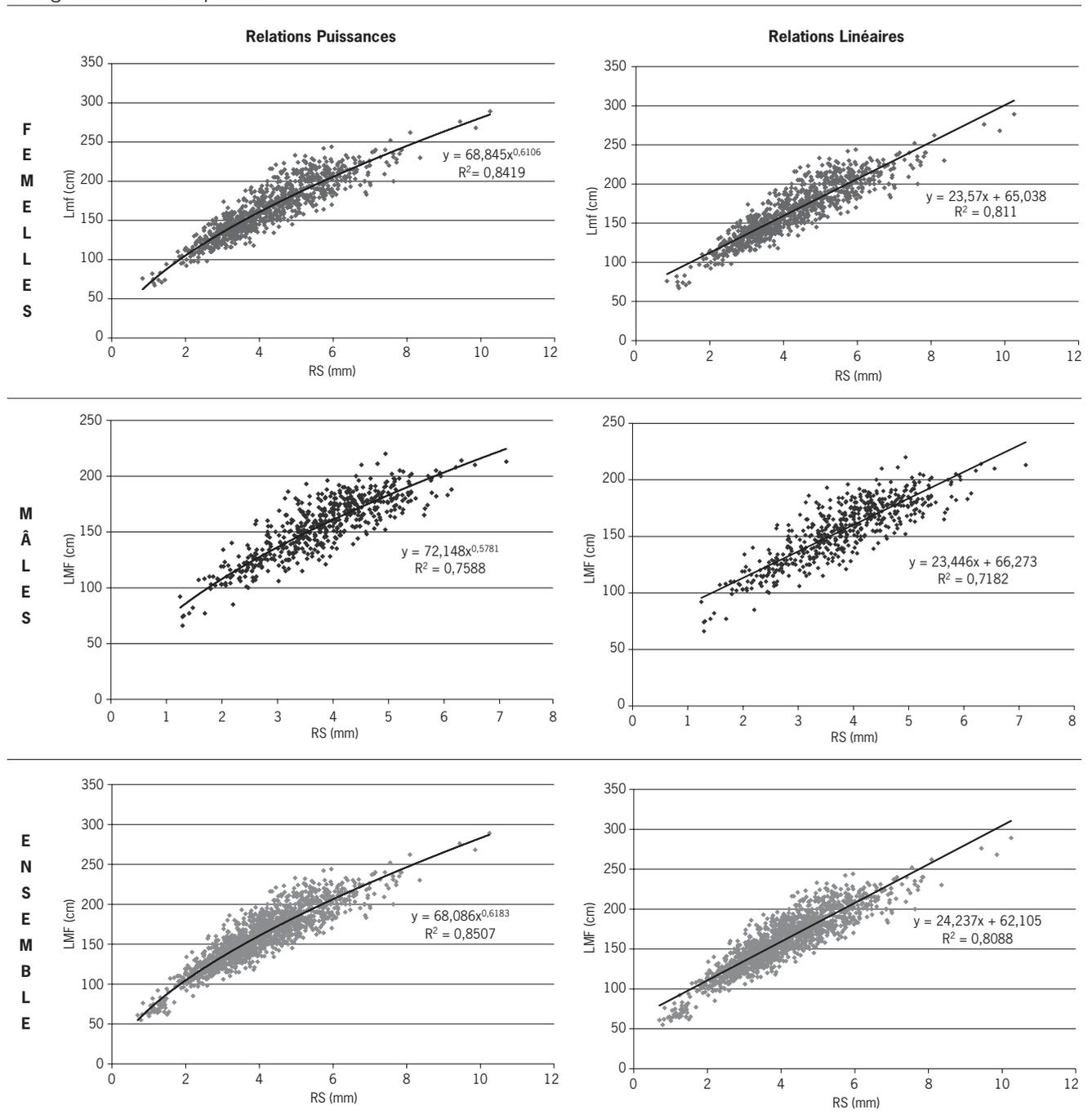
($r^2 = 0,7182$, N = 529)

Tableau 8 - Effectifs de la variable Vordre (n, anneau simple ; i, anneau multiple - bord interne ; e, anneau multiple - bord externe) pour les différents annuli, pour les mâles et les femelles.

	Femelles						Mâles							
	n		i		e		Total	n		i		e		Total
	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%		Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%	
1	562	88,36	74	11,64	0	0	636	361	89,14	44	10,86	0	0	405
2	500	80,91	44	7,12	74	11,97	618	304	79,17	36	9,38	44	11,46	384
3	473	84,62	42	7,51	44	7,87	559	281	81,69	27	7,85	36	10,47	344
4	385	84,25	30	6,56	42	9,19	457	227	83,76	17	6,27	27	9,96	271
5	312	87,39	14	3,92	31	8,68	357	168	85,28	11	5,58	18	9,14	197
6	239	90,87	10	3,80	14	5,32	263	114	85,71	8	6,02	11	8,27	133
7	170	93,41	2	1,10	10	5,49	182	63	82,89	5	6,58	8	10,53	76
8	125	96,90	2	1,55	2	1,55	129	40	88,89	0	0	5	11,11	45
9	86	97,73	0	0	2	2,27	88	18	100	0	0	0	0	18
10	45	100	0	0	0	0	45	9	100	0	0	0	0	9
11	26	100	0	0	0	0	26	6	100	0	0	0	0	6
12	14	100	0	0	0	0	14	1	100	0	0	0	0	1
13	5	100	0	0	0	0	5							
14	2	100	0	0	0	0	2							

Les représentations graphiques des nuages de points et des ajustements correspondants sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9 - Relations d'allométries établies entre la taille des poissons (Lmf en centimètre) et le rayon RS (en millimètre) des épines de nageoires anales d'espadon.



Test de signification de pente

La relation entre la taille du poisson et le rayon d'épine de nageoire anale a donc pu être établie. Les meilleures régressions sont obtenues avec la fonction puissance pour laquelle des tests de signification de pente ont donc été réalisés (tab. 10).

Au préalable, il faut transformer les équations de type puissance en relations linéaires, ce qui donne :

- pour les femelles :

$$\log \text{lmf} = \log 68,845 + 0,6106 \log \text{RS}$$

- pour les mâles

$$\log \text{lmf} = \log 72,148 + 0,5781 \log \text{RS}$$

Soit,

- pour les femelles :

$$\log \text{lmf} = 4,2319 + 0,6106 \log \text{RS}$$

$$\text{ou } Y = 4,2319 + 0,6106 X$$

- pour les mâles :

$$\log \text{lmf} = 4,2787 + 0,5781 \log \text{RS}$$

$$\text{ou } Y = 4,2787 + 0,5781 X$$

avec $\log =$ logarithme népérien.

Pour les mâles comme pour les femelles, la valeur observée de t_{ac} est supérieure à la valeur critique de $t_{\alpha/2}$ ($t_{0,05/2} = 1,96$ pour les femelles et pour les mâles). L'hypothèse H_0 est donc rejetée au seuil $\alpha = 0,05$. Elle le serait d'ailleurs aussi au seuil de 1 % ($t_{0,01/2} = 2,576$ pour les femelles et pour les mâles). La longueur du poisson est donc reliée positivement au rayon de l'épine pour les femelles comme pour les mâles.

Tableau 10 - Résultats des calculs effectués dans le cadre des tests de signification ou de comparaison de pente.

Paramètres	Femelles (n=912)	Mâles (n=529)
χ	1 290	687
γ	4 647	2 661
$\bar{\chi}$	1,41	1,3
$\bar{\gamma}$	5,1	5,03
\bar{S}_x^2	0,111	0,081
\bar{S}_x	0,333	0,284
\bar{S}_{xy}	0,049	0,036
\bar{S}_y	0,222	0,189
\bar{S}_{ny}	0,0678	0,04676
r	0,9175	0,8711
r^2	0,8419	0,7588
a, la pente	0,6106	0,5781
b, l'ordonnée à l'origine	4,2319	4,2787
Var(a)	$7,696 \times 10^{-5}$	0,000202
$\sqrt{\text{Var}(a)}$	0,00877	0,0142
$ t_{ac} $	69,6	40,7
Intervalle de confiance à 95 %	0,5933-0,6278	0,5503-0,6060

Comparaison des pentes obtenues pour les mâles et pour les femelles

On pose par exemple « α_{fb} est la pente de la régression obtenue pour les femelles (0,6106) » et on compare la pente obtenue pour les mâles à cette dernière.

Les hypothèses sont alors, dans le cadre d'un test bilatéral :

$$H_0 : a = 0,6106$$

$$H_1 : a \neq 0,6106$$

La variable aléatoire t'_{ac} prend la valeur :

$$t'_{ac} = -2,28$$

$|t'_{ac}|$ est supérieur à $t_{\alpha/2}$ ($t_{0,05/2} = 1,96$ pour les mâles), l'hypothèse H_0 est donc rejetée. Les pentes obtenues sont donc significativement différentes à un seuil de signification de 5 %.

Les traitements ultérieurs porteront sur l'ensemble des individus ayant fait l'objet d'une analyse complète, à savoir mesure du rayon d'épine et des distances focus-différents annuli. Compte tenu de la croissance apparemment différente des mâles et des femelles, les 2 sexes seront traités séparément.

Premiers traitements à partir des données brutes

Les traitements portent respectivement sur 647 femelles et 410 mâles pour lesquels des mesures du rayon et des distances focus-différents annuli sont disponibles. Parmi ces individus, 638 femelles et 405 mâles sont caractérisés par la présence d'au moins un anneau.

Relation entre la lmf et le nombre d'annuli observé

Pour les mâles comme pour les femelles, la taille (LMF) augmente avec le nombre d'annuli (tab. 11). Cette augmentation de la taille semble s'atténuer pour les nombres d'annuli élevés mais il reste difficile d'ajuster une courbe de tendance à ce type de graphique compte tenu de la variabilité importante des longueurs.

La tendance générale, à savoir l'augmentation de la LMF avec le nombre d'annuli, est confirmée, pour les femelles comme pour les mâles (tab. 12). Néanmoins, pour les nombres d'annuli élevés, ces données sont à prendre avec précaution car les effectifs ayant permis le calcul des moyennes sont extrêmement faibles.

Tableau 11 - Évolution des tailles (lmf) en fonction du nombre d'annuli observé, pour les femelles, n = 638, et pour les mâles, n = 405.

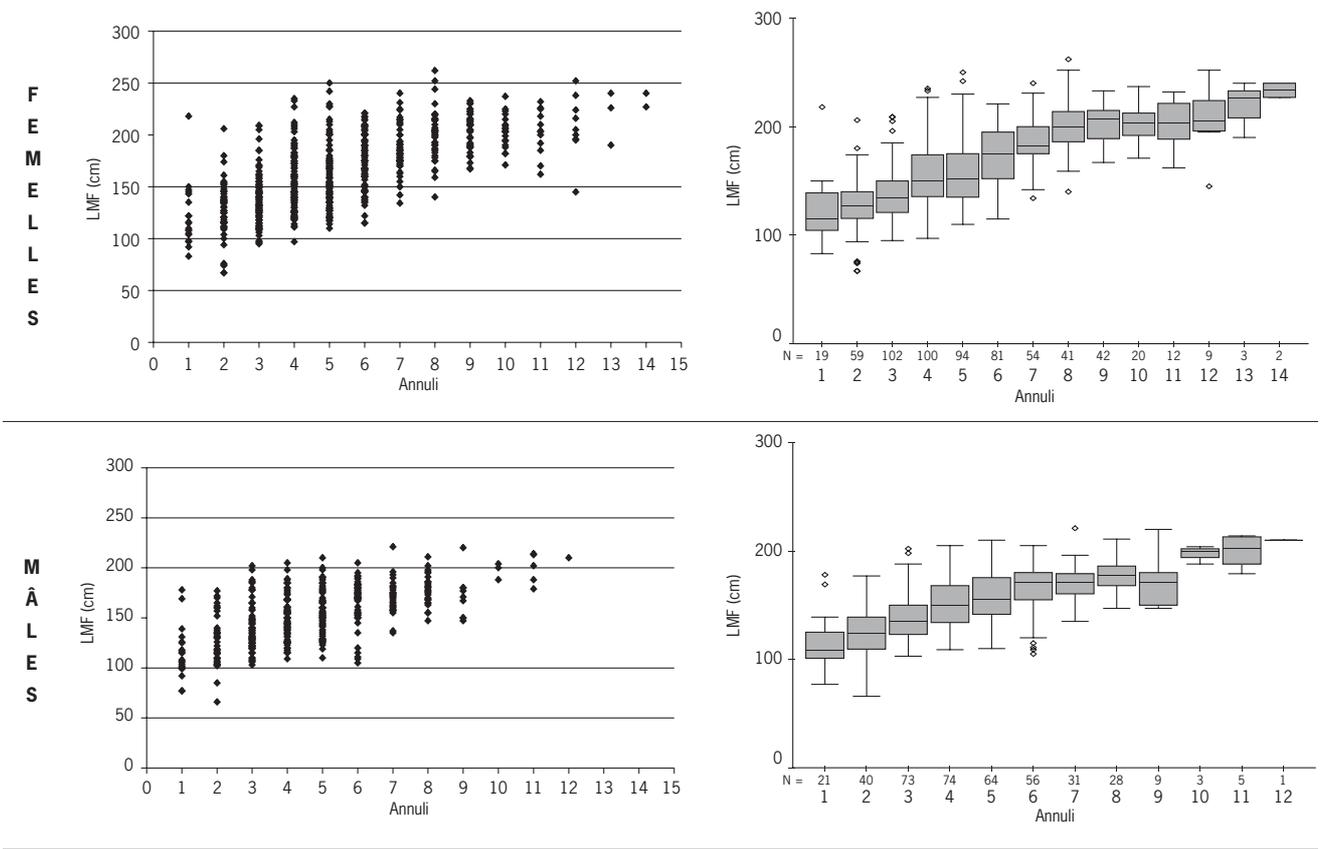


Tableau 12 - Longueur moyenne des individus à la capture pour les différents nombres d'annuli observés, pour les mâles et pour les femelles.

Annuli	Femelles			Mâles		
	Moyenne	Écart-type	N	Moyenne	Écart-type	N
1	122,00	30,39	19	114,57	25,03	21
2	127,44	25,88	59	127,20	24,93	40
3	137,27	23,83	102	140,11	23,93	73
4	154,92	28,52	100	149,99	21,95	74
5	158,70	30,94	94	157,03	22,65	64
6	174,48	26,94	81	166,43	21,97	56
7	185,59	22,22	54	170,74	16,75	31
8	200,02	23,92	41	177,82	14,95	28
9	203,17	17,68	42	171,33	22,56	9
10	203,15	16,29	20	197,33	8,33	3
11	202,25	22,05	12	199,20	15,42	5
12	207,89	30,64	9	210,00	—	1
13	218,67	25,79	3	—	—	—
14	233,50	9,19	2	—	—	—

Tableau 13 - Positions moyennes des différents annuli pour les mâles et les femelles.

	Femelles			Mâles		
	Moyenne	Écart-type	N	Moyenne	Écart-type	N
1	2,22	0,89	638	2,11	0,80	405
2	2,70	0,92	619	2,55	0,81	384
3	3,17	0,96	560	2,94	0,80	344
4	3,61	1,00	458	3,29	0,79	271
5	4,00	1,04	358	3,58	0,79	197
6	4,45	1,02	264	3,85	0,73	133
7	4,76	0,96	183	4,01	0,69	77
8	5,07	0,98	129	4,28	0,77	46
9	5,26	0,99	88	4,36	0,87	18
10	5,33	0,96	46	4,99	0,90	9
11	5,61	1,10	26	5,09	1,18	6
12	6,19	1,19	14	4,40		1
13	6,19	1,17	5			
14	6,40	1,53	2			

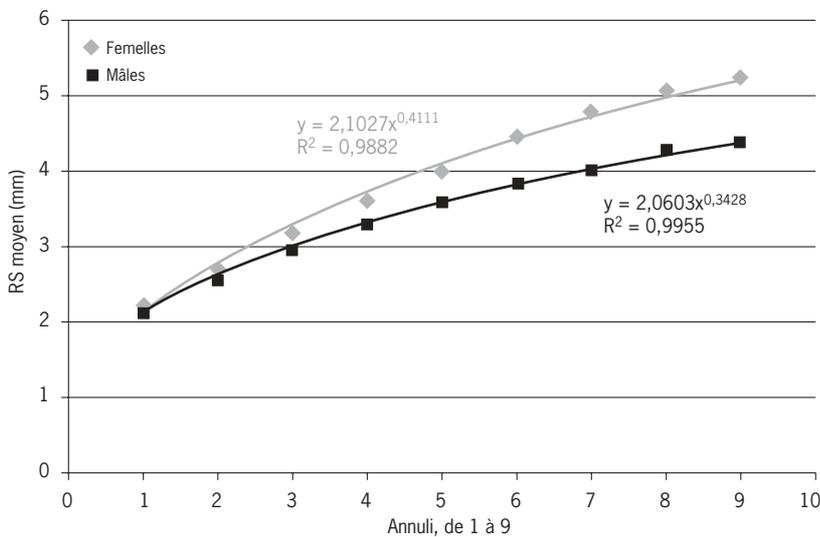


Figure 15 - Position moyenne des annuli, de 1 à 9, pour les mâles et les femelles.

Position des différents annuli

La position moyenne pour chaque annulus par rapport au focus a été calculée en tenant compte de toutes les distances mesurées sur l'ensemble des coupes (tab. 13).

À partir du 10^e anneau, les effectifs deviennent faibles, en particulier pour les mâles et l'utilisation de ces données pourrait fausser l'analyse. C'est la raison pour laquelle, dans le traitement suivant, seuls les 9 premiers anneaux ont été considérés.

Pour les mâles et les femelles, des courbes de type puissance ont été ajustées aux positions moyennes des annuli (fig. 15). Les équations obtenues sont les suivantes :

- pour les mâles :

$$y = 2,0603 x^{0,3428} (r^2 = 0,9955, n = 405)$$

- pour les femelles :

$$y = 2,1027 x^{0,4111} (r^2 = 0,9882, n = 638)$$

Longueurs rétrocalculées

Les longueurs rétrocalculées peuvent être mises en relation avec les différents annuli correspondants, pour les mâles comme pour les femelles (fig. 16, 17).

Pour un annulus donné, la gamme couverte par les longueurs rétrocalculées est très large. Pour le premier annulus des femelles, par exemple, elle s'étale de 13 à 205 centimètres.

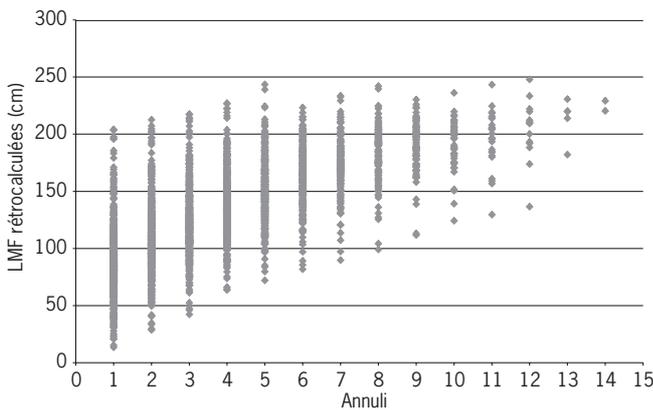


Figure 16 - Longueurs (lmf) rétrocalculées en fonction des nombres d'annuli observés, pour les femelles.

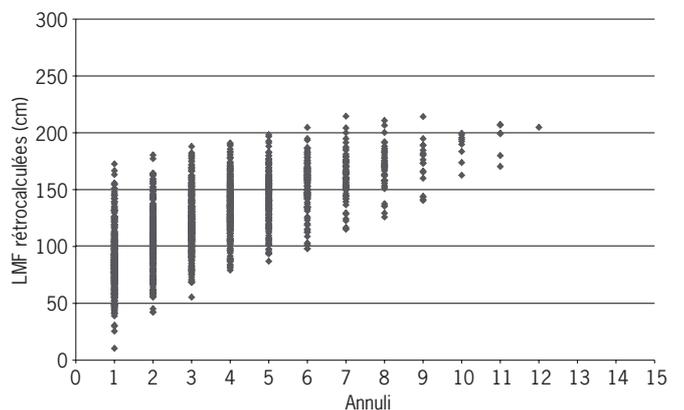


Figure 17 - Longueurs (lmf) rétrocalculées en fonction des nombres d'annuli observés, pour les mâles.

La distribution de fréquence des longueurs rétrocalculées est présentée graphiquement pour chaque annulus pour les femelles et pour les mâles (fig. 18, 19). Un décalage du mode vers les grandes longueurs est

observé parallèlement à l'augmentation du nombre d'annuli. Ce décalage est assez prononcé au début, puis se ralentit progressivement pour les mâles comme pour les femelles.

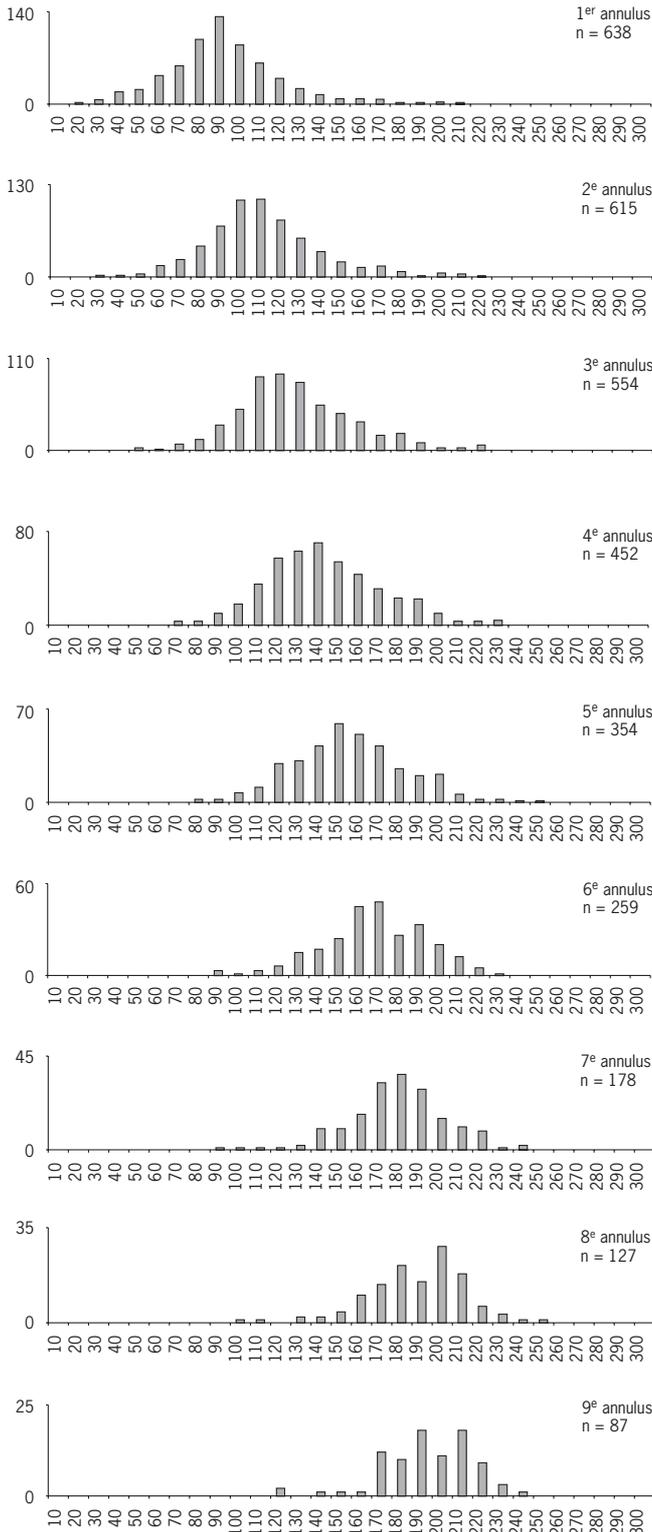


Figure 18 - Histogrammes des longueurs rétrocalculées (Lmf) par âge pour les femelles, n = 638.

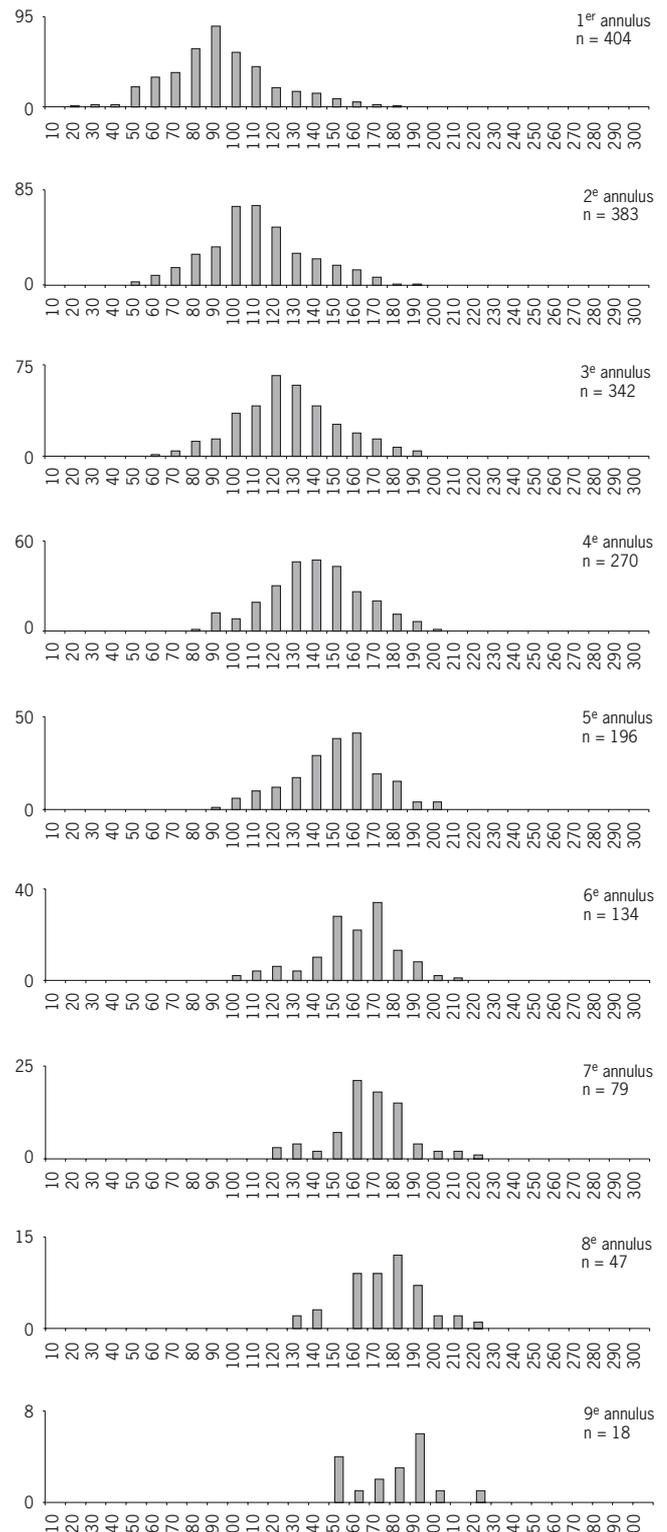


Figure 19 - Histogrammes des longueurs rétrocalculées (Lmf) par âge pour les mâles, n = 404.

Pour chaque annuli, les informations caractérisant les longueurs, telles que la moyenne, l'écart-type et la plage de données couverte par ces longueurs, sont présentées dans le tableau 14.

Premiers essais d'ajustement de courbes de croissance

Si l'on tente d'ajuster une courbe de croissance sur les longueurs rétrocalculées (données brutes ; lmf), la gamme de tailles pour les différents annuli observés est tellement large que le logiciel Vonbit n'arrive pas à effectuer d'ajustement sur ces données, pour les mâles comme pour les femelles.

Dans un premier temps, différentes tentatives ont donc été effectuées en utilisant les moyennes pour les mâles comme pour les femelles : la première en utilisant les moyennes obtenues pour l'ensemble des annuli, la seconde en utilisant les moyennes obtenues pour les 9 premiers annuli seulement et la troisième en utilisant les moyennes obtenues pour l'ensemble des annuli mais en attribuant à chaque moyenne, comme fréquence d'apparition, le nombre d'individus correspondant à l'annuli considéré. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 15.

Tableau 14 - Longueurs rétrocalculées moyennes (lmf) des individus pour les différents nombres d'annuli.

Annuli	Femelles			Mâles						
	Moyenne	Écart-type	N	Min	Max	Moyenne	Écart-type	N	Min	Max
1	87,65	28,96	638	13,47	204,19	87,41	25,68	404	10,38	172,57
2	106,17	28,51	615	28,68	212,54	105,73	24,87	383	42,05	180,45
3	123,16	28,59	554	42,31	217,36	121,14	24,4	342	55,28	187,88
4	137,87	28,94	452	63,63	227,08	134,08	23,12	270	79,04	191,03
5	150,26	28,16	354	72,02	243,49	144,23	22,11	196	86,95	198,24
6	163,31	25,57	259	81,82	223,13	153,85	20,96	134	98,00	204,52
7	173,22	24,25	178	89,68	233,48	161,02	19,21	79	115,13	214,52
8	182,36	24,19	127	98,94	241,86	168,77	18,39	47	125,93	210,65
9	188,37	22,42	87	111,70	230,23	172,17	20,41	18	140,35	214,23
10	190,78	21,98	45	124,20	236,11	187,8	12,39	9	162,72	199,67
11	195,39	24,48	26	129,53	243,15	193,77	15,17	6	170,28	207,24
12	203,49	27,04	14	136,54	247,87	204,8		1	204,80	204,80
13	213,26	18,44	5	182,12	230,63					
14	224,68	6,17	2	220,32	229,05					

Tableau 15 - Paramètres de croissance de Von Bertalanffy à partir des moyennes calculées sur les données brutes.

	Données utilisées	K min	K max	K step	Kopt	R sq	T ₀	L _∞
Femelles	Totalité	0,01	1	0,001	0,115	0,993	-2,738	254,124
	9 premiers annuli	0,01	1	0,001	0,127	0,9996	-2,43	247,358
	Moyenne pondérée	0,01	1	0,001	0,134	0,9999	-2,361	240,704
Mâles	Totalité	0,01	1	0,001	0,081	0,992	-3,917	276,526
	9 premiers annuli	0,01	1	0,001	0,178	0,9997	-2,226	199,984
	Moyenne pondérée	0,01	1	0,001	0,157	0,9999	-2,444	210,058

Les graphiques suivants présentent les premières courbes de croissance de type Von Bertalanffy établies sur la base des moyennes pondérées calculées sur les données brutes (fig. 20, 21).

Dans un second temps, des ajustements de Von Bertalanffy ont été effectués à partir de l'âge estimé à la capture (un couple de données par poisson). L'ensemble des paramètres correspondant est regroupé dans le tableau 16.

Les équations entre l'âge (A) et le rayon de l'épine (RS) utilisées sont les suivantes :

- pour les femelles :

$A = 0,1803 RS^{2,3582}$, $r^2 = 0,9913$ (équation déterminée à partir de l'ensemble des rayons moyens)

$A = 0,1704 RS^{2,4038}$, $r^2 = 0,9882$ (équation déterminée à partir des rayons moyens de R1 à R9);

- pour les mâles :

$A = 0,1451 RS^{2,7643}$, $r^2 = 0,9676$ (équation déterminée à partir de l'ensemble des rayons moyens)

$A = 0,1233 RS^{2,9044}$, $r^2 = 0,9955$ (équation déterminée à partir des rayons moyens de R1 à R9).

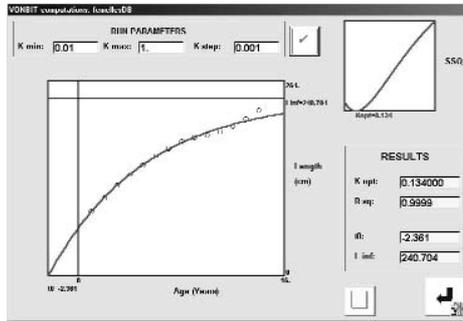


Figure 20 - Courbe de croissance de type Von Bertalanffy pour les femelles («moyennes pondérées») et paramètres associés.

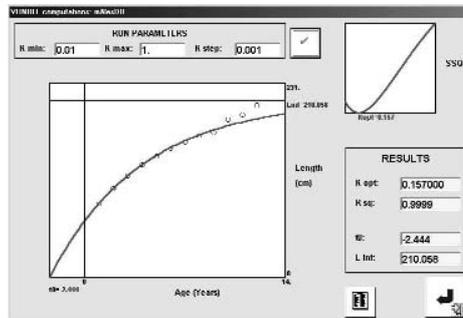


Figure 21 - Courbe de croissance de type Von Bertalanffy pour les mâles («moyennes pondérées») et paramètres associés.

Tableau 16 - Paramètres de croissance de Von Bertalanffy pour les données brutes (1 couple de données par poisson échantillonné).

	Données utilisées	K min	K max	K step	Kopt	R sq	T ₀	L ∞
Femelles	anneaux 1-14	0,01	1	0,001	0,159	0,8162	-3,082	227,607
	anneaux 1-9	0,01	1	0,001	0,158	0,816	-3,162	226,678
Mâles	anneaux 1-12	0,01	1	0,001	0,171	0,6966	-3,885	195,571
	anneaux 1-9	0,01	1	0,001	0,169	0,6958	-4,084	193,965

Les graphiques suivants présentent les courbes de croissance établies sur la base des âges estimés à la capture en fonction du rayon de l'épine (fig. 22, 23).

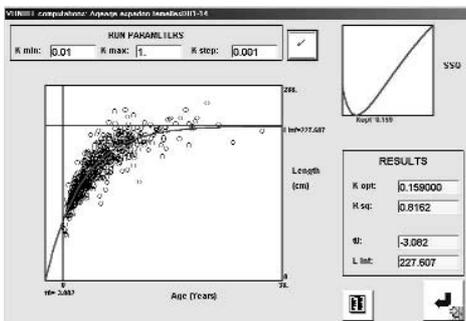


Figure 22 - Courbe de croissance de type Von Bertalanffy pour les femelles (âges estimés à partir des rayons moyens d'épine, anneaux de 1 à 14) et paramètres associés (n = 638).

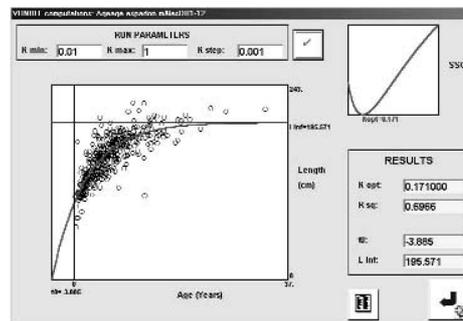


Figure 23 - Courbe de croissance de type Von Bertalanffy pour les mâles (âges estimés à partir des rayons moyens d'épine, anneaux de 1 à 12) et paramètres associés (n = 405).

Traitements issus des données reclassées

L'algorithme a tourné 3 fois pour les mâles comme pour les femelles sur les données brutes. Après 3 passages, les pourcentages de valeurs modifiées au niveau du 1^{er} anneau sont inférieurs à 2 % (tab. 17).

Tableau 17 - Pourcentages des valeurs modifiées lors des différents tours de l'algorithme sur la première colonne de la matrice correspondant au 1^{er} anneau.

	Femelles (n=638)			Mâles (n=405)		
	1 ^{er} tour	2 ^e tour	3 ^e tour	1 ^{er} tour	2 ^e tour	3 ^e tour
Valeurs inchangées	177	622	633	103	382	398
Valeurs modifiées	461	16	5	302	23	7
	72,30 %	2,50 %	0,80 %	74,60 %	5,70 %	1,70 %

Les moyennes des rayons des différents annuli restent stables. L'âge estimé à partir de ces rayons moyens n'est donc pas modifié. De ce fait, les paramètres du modèle de Von Bertalanffy restent approximativement les mêmes. L'intérêt de l'algorithme de reclassement réside essentiellement dans la réduction de variabilité des longueurs rétrocalculées. Il permet donc d'utiliser de nouveau le logiciel Vonbit avec toutes les données rétrocalculées et reclassées (fig. 24, 25).

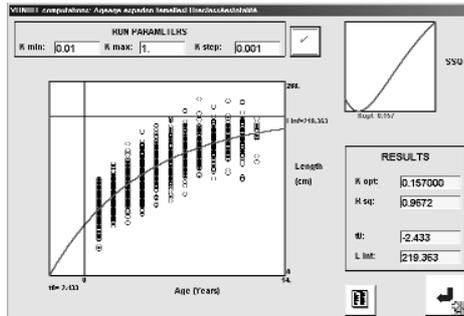


Figure 24 - Courbe de croissance de type Von Bertalanffy pour les femelles.

Tableau 18 - Paramètres de croissance de Von Bertalanffy pour les données reclassées.

		K min	K max	K step	Kopt	R sq	T ₀	L _∞
Tous les anneaux	Femelles	0,01	1	0,001	0,157	0,9672	-2,433	219,363
	Mâles	0,01	1	0,001	0,239	0,9664	-2,077	175,152
Dernier anneau	Femelles	0,01	1	0,001	0,205	0,7737	-2,131	207,778
	Mâles	0,01	1	0,001	0,339	0,6454	-1,597	165,064

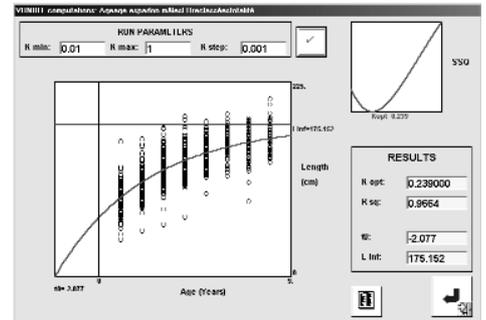


Figure 25 - Courbe de croissance de type Von Bertalanffy pour les mâles.

En complément des courbes de croissance réalisées avec l'ensemble des données rétrocalculées, des ajustements ont été effectués en ne retenant que le dernier anneau pour chaque poisson. Les paramètres obtenus décrivent une croissance plus lente pour les femelles et pour les mâles (tab. 18).

Aspects de validation

L'étude de l'évolution mensuelle du ratio d'accroissement marginal ne s'est pas révélée concluante. Aucune tendance sur la période d'apparition des dépôts dans l'année ne se dégage clairement. La variabilité mensuelle moyenne du ratio d'accroissement marginal est trop importante.

Discussion

Qualité des échantillonnages

Les embarquements et donc les échantillonnages sont dépendants des conditions climatiques. En période cyclonique (de décembre à mars), un embarquement prévu peut être reporté plusieurs fois à l'annonce d'une forte dépression tropicale. Ceci explique notamment le plus faible échantillonnage du mois de février. Malgré cette contrainte climatique, un embarquement par mois a pu être assuré sur les deux années et demi d'échantillonnage, voire même deux ou trois embarquements pour certains mois.

Les échantillonnages dépendent également de la variabilité mensuelle des captures, plus importantes durant l'été austral que durant l'hiver. Un échantillonnage d'au moins 100 espadons par mois a pu être réalisé, excepté pour les mois de février et de septembre. Il est également à noter une variabilité importante de l'échantillonnage mensuel au niveau du sex-ratio (moins de

mâles que de femelles). À l'avenir, il faudrait veiller à intensifier l'échantillonnage global pour les mois de février et de septembre et l'échantillonnage des mâles pour les mois de juin à septembre.

Il apparaît un déficit dans les classes extrêmes de la distribution de fréquence de taille des espadons. Il est souvent difficile, dans un échantillonnage, d'accéder aux extrêmes d'une population. L'aide des professionnels (apports de petits individus) a permis d'augmenter l'échantillonnage dans les classes de tailles inférieures. Il serait intéressant de poursuivre et d'intensifier cette collaboration sur ce point particulier. La réalisation des expérimentations ne doit pas gêner les opérations de pêche. Les prélèvements biologiques ne doivent pas entraîner une dégradation de la qualité du poisson. Les nageoires anales présentent l'avantage d'être facilement récupérables sans altérer la valeur commerciale des poissons (Tserpes & Tsimenides, 1995 ; Castro-Longoria & Sosa Nishizaki, 1998).

Qualité des échantillons

Forme des coupes

La majorité des coupes (plus de 60 %) a été classée dans la catégorie « normales arrondies » (0). Mais cette proportion varie avec la taille et également avec le sexe des individus. Les différentes formes d'épines observées peuvent en partie correspondre à des différences morphologiques entre les individus. Mais on peut supposer que, pour un même individu, la morphologie de ses épines puisse également évoluer avec l'âge. Les formes « pointues » des épines chez les jeunes pourraient évoluer vers des formes arrondies.

La répartition des formes par sexe montre une proportion d'épines « pointues » supérieure chez les mâles. Cette observation peut s'expliquer par des différences morphologiques entre les 2 sexes et par leur différence de croissance. La caractérisation des coupes par la variable forme reste malgré tout très subjective. Il pourrait être envisagé d'intégrer à ce critère des indications de type géométrique plus précises. Sur l'espadon, peu d'auteurs ont évoqué ces aspects de forme de coupe. Pourtant, il apparaît logique que la forme des coupes joue sur les relations de type RS-LMF.

Qualité des coupes

Pour l'ensemble des coupes analysées, moins de 50 % des coupes sont considérées comme exploitables (« bonnes coupes »). La mauvaise qualité de certaines coupes a pour causes l'opacité, une dégradation de la résine protectrice ou la présence d'artéfact. L'opacité peut provenir de la qualité des tissus, d'un temps de séchage inadapté ou de l'épaisseur de la coupe. L'utilisation d'une étuve avec atmosphère contrôlée pourrait permettre d'optimiser le temps de séchage. L'épaisseur de la coupe peut varier légèrement d'une coupe à une autre ou d'une partie de la coupe à l'autre. La température ambiante pourrait être un des facteurs intervenant sur ces variations d'épaisseur.

La résine Euckitt s'altère avec le temps. Elle a tendance à se craqueler légèrement. La dégradation commence souvent à l'extérieur de la coupe mais gagne très vite la coupe elle-même. Le positionnement d'une lamelle de protection sur la coupe pourrait peut-être améliorer sa tenue. Beaucoup de coupes scannées font apparaître cette dégradation de l'Euckitt. À l'avenir, il pourrait être intéressant de scanner les coupes avant inclusion (ce qui a été fait en complément du protocole classique sur un certain nombre de coupes), de scanner les coupes plus rapidement après inclusion ou alors de trouver une résine mieux adaptée à l'inclusion.

Les artéfacts pouvant apparaître sur les coupes sont très souvent des bulles d'air. Elles peuvent être aisément enlevées au moment de l'inclusion, quand la résine est neuve et relativement fluide. Mais, en vieillissant, la résine devient plus visqueuse et solidifie beaucoup plus vite, il devient alors difficile de retirer la totalité des bulles d'air qui se forment. Il est important d'utiliser des petits flacons de résine, de bien conserver cette résine au froid et de refermer systématiquement le contenant après chaque utilisation pour limiter au maximum l'oxydation de l'Euckitt. On peut également envisager l'utilisation du méthylcyclohexane (en petite quantité) pour fluidifier cette résine.

Les critères de sélection ont permis de ne rejeter qu'un nombre limité de coupes (< 2%). Ce pourcentage de lisibilité est nettement inférieur aux pourcentages de 13 % et de 17 % observés respectivement par Berkeley & Houde (1983) et par Tserpes & Tsimenides (1995). Néanmoins, dans cette étude, seulement 44 % des

coupes ont été considérées comme bonnes, au sens « ne présentant pas de zones aveugles ou opaques rendant une partie de la coupe difficilement lisible ».

La diminution des pourcentages de « bonnes coupes » avec l'âge est en accord avec la tendance globale observée par Berkeley & Houde (1983) mais elle est nettement plus marquée dans la présente étude. Si l'on étudie la répartition de la qualité des coupes par sexe, on s'aperçoit que les femelles présentent davantage de coupes avec des zones aveugles (58 % en moyenne), ce qui peut s'expliquer par le fait que la proportion d'individus atteignant de grandes classes de taille est supérieure chez les femelles.

Compte tenu de l'importante proportion prise par les « coupes à zones aveugles » et de la variété de cas observés dans cette catégorie (allant de la coupe bonne avec une petite zone opaque à la coupe quasi illisible avec seulement un ou deux anneaux visibles), il pourrait être judicieux d'envisager d'ajouter une 4^e catégorie. Les 4 catégories suivantes sont proposées :

0 bonne coupe

1 bonne coupe avec zones aveugles

2 coupe illisible avec quelques informations

3 coupe illisible.

Critique sur les lectures

La lecture des coupes d'épines de nageoires anales d'espadon pose quelques difficultés. Les déterminations du focus, du bord de la coupe et le choix de la ligne de croissance maximale sont relativement subjectifs et pourraient nécessiter une lecture multiple ou une automatisation. La fonction pour détecter automatiquement le bord de l'épine existe sous le logiciel TNPC mais n'est pas toujours performante, notamment en présence d'une zone d'ombre ou d'un artefact sur le bord de la coupe. Des essais de triangulation ont été menés par le Lasaa pour tenter d'automatiser la détermination du focus mais ils ne se sont pas révélés concluants.

Les coupes peuvent présenter des stries de croissance mal contrastées. De plus, les espadons se caractérisent par d'importants remaniements médullaires au niveau des épines de nageoires et la présence éventuelle d'anneaux dédoublés (Berkeley & Houde, 1983 ; Tserpes & Tsimenides, 1995). Ces différents éléments rendent les lectures plutôt délicates.

Le protocole actuel permet de caractériser l'ensemble des coupes par leur qualité et leur forme (Vforme et Vqual) ainsi que l'ensemble des stries dénombrées (Vcontraste et Vordre). Ces informations constituent une grille de traitement précise et permettent de travailler sur la quasi-totalité des coupes.

Les auteurs travaillant sur l'estimation de l'âge de l'espadon fournissent généralement des indications sur la qualité et la lisibilité des coupes (Berkeley & Houde, 1983 ; Tserpes & Tsimenides, 1995). En revanche, peu d'entre eux ont réellement fourni une appréciation de la qualité de chacune des stries de croissance observées. Cette caractérisation a néanmoins été utilisée dans des études portant sur d'autres espèces de poissons pélagiques, comme le listao (Antoine & Mendoza, 1986).

Dans cette étude, la présence des anneaux multiples a donc été caractérisée par la variable Vordre. Les individus concernés par ces anneaux multiples peuvent éventuellement être écartés des traitements. En revanche, le problème de la disparition des anneaux au niveau de la zone médullaire n'a pas pu être résolu. Ces éléments sont en accord avec Tserpes & Tsimenides (1995) qui considèrent que le problème des anneaux multiples peut être éliminé par des lecteurs expérimentés alors que le problème de disparition d'anneaux au centre reste plus délicat. Pour réduire les problèmes liés aux anneaux multiples et aux anneaux manquants, la solution retenue a été un reclassement des données en fonction des positions des différents anneaux au moyen d'un algorithme en langage C++.

L'utilisation du logiciel Visilog-TNPC pour le traitement des coupes d'épines nous permet d'analyser des images avec une vitesse et une précision impossibles à atteindre à la seule loupe binoculaire. En conséquence, il est possible de traiter un plus grand nombre de coupes dans le même temps. Malgré tout, il est préférable de vérifier l'échantillon à l'œil, en faisant varier légèrement l'éclairage. Des détails qui n'apparaissent pas sur l'image figée peuvent ainsi se révéler.

Cette chaîne de traitement permet de manipuler et de stocker un grand nombre de coupes sous des formats images universels. Une fois numérisées, les images sont figées et peuvent ainsi résister au temps,

contrairement aux coupes elles-mêmes qui subissent le vieillissement de la résine. Ce stockage informatique des images et des distances mesurées permet des échanges aisés avec le Lasaa.

Relation RS-lmf

Relations observées dans la littérature

La plupart des auteurs utilisent des fonctions de type linéaire pour modéliser la relation RS-LMF. Dans cette étude, les meilleurs ajustements ont été obtenus avec des fonctions de type puissance (tab. 19).

Comparaisons de pente

Les équations de type puissance obtenues ont été comparées à celles proposées par Ehrhardt. Le test statistique effectué révèle que la pente obtenue pour les femelles n'est pas significativement différente de celle proposée par Ehrhardt (1992). En revanche, la pente obtenue pour les mâles est significativement différente de celle obtenue par Ehrhardt à un seuil de signification de 5 %. Afin de comparer les pentes des équations obtenues avec celles proposées par d'autres auteurs, les intervalles de confiance de ces pentes (à 95 %) ont été calculés.

Les pentes des relations linéaires obtenues par Tsimenides & Tserpes (1989) sont extrêmement proches des celles obtenues dans la présente étude et entrent dans les intervalles de confiance établis.

Relation nombre d'annuli-longueur rétrocalculée

Une augmentation de la taille des longueurs rétrocalculées avec l'âge a pu être mise en évidence pour les mâles comme pour les femelles, avec un ralentissement de croissance pour les âges supérieurs. Malgré ce schéma de croissance classique observé sur les données brutes, les histogrammes de fréquence de LMF rétrocalculées couvrent des gammes de taille relativement larges. Pour un même nombre d'annuli, les longueurs rétrocalculées supérieures correspondent essentiellement à des individus présentant un remaniement vasculaire au centre de l'épine alors que les longueurs rétrocalculées inférieures correspondent à des individus présentant des anneaux multiples. Pour atténuer cet étalement des longueurs, l'algorithme de reclassement des données a été appliqué.

Les longueurs rétrocalculées moyennes, établies à partir des données brutes comme à partir des données reclassées, sont supérieures, quel que soit l'âge considéré, pour les femelles. Ce résultat peut être comparé à celui de Berkeley & Houde (1983) qui ont mis en évidence une croissance plus rapide chez les femelles à partir de l'âge estimé de 2 ans.

Les longueurs rétrocalculées moyennes en fonction de l'âge estimé des poissons en nombre d'annuli peuvent être comparées aux données de la littérature en admettant

Tableau 19 - Relations entre la longueur des poissons (lmf) et le rayon des épines (RS) de nageoires anales. Comparaison des résultats de la présente étude et des données bibliographiques.

Auteurs	Type de relation	Femelles	Nf	Mâles	Nm	Deux sexes combinés	Nt	Zone
Présente étude	Puissance	$lmf = 68,845RS^{0,6106}$ $r^2 = 0,8419$	912	$lmf = 72,148RS^{0,5781}$ $r^2 = 0,7588$	529	$lmf = 68,086RS$ $r^2 = 0,8507$	1494	Sud-ouest océan Indien
Présente étude	Linéaire	$lmf = 23,57RS + 65,038$ $r^2 = 0,811$	912	$lmf = 23,446RS + 66,273$ $r^2 = 0,7182$	529	$lmf = 24,237RS + 62,105$ $r^2 = 0,8088$	1494	Sud-ouest océan Indien
Ehrhardt <i>et al.</i> (1995)	Puissance	$lmf = 1,5592RS^{0,5598}$ avec S en microns => $lmf = 74,52RS^{0,5598}$	789	$lmf = 2,8721S^{0,4822}$ avec RS en microns => $lmf = 80,32RS^{0,4822}$	667			Atlantique
Ehrhardt (1992)	Puissance	$lmf = 66,3368 RS^{0,6127}$	162	$lmf = 66,2971RS^{0,6237}$	263		439	Atlantique
Clear <i>et al.</i> (2000)	Puissance					$lmf = 78,8*S^{0,535}$ $r^2 = 0,811$	50	Côte est australienne
Berkeley & Houde (1983)	Linéaire					$lmf = 58,50 + 23,90RS$ $r = 0,94$	439	Côtes de Floride
Megalofonou <i>et al.</i> (1990)	Linéaire	$lmf = 71,1 + 19,20RS$ $r = 0,93$	108	$lmf = 70,0 + 19,69RS$ $r = 0,91$	129	$lmf = 71,07 + 19,22RS$ $r = 0,92$	241	Eaux grecques
Esteves <i>et al.</i> (1995)	Linéaire					$lmf = 25,52RS + 43,8$ $r^2 = 0,761$	67	Les Açores
Tsimenides & Tserpes (1989)	Linéaire	$lmf = 61,60 + 23,10RS$ $r = 0,983$		$lmf = 59,77 + 23,96RS$ $r = 0,977$		$lmf = 60,92 + 23,37RS$ $r = 0,980$	974	Mer Égée
Tserpes & Tsimenides (1995)	Linéaire	$lmf = 62,43 + 17,02RS$ $r^2 = 0,98$		$lmf = 59,09 + 18,32RS$ $r^2 = 0,98$		$lmf = 61,45 + 17,39RS$ $r^2 = 0,98$		Méditerranée
Tserpes & Tsimenides (1995)	Puissance linéarisé	$Ln(lmf) = 4,30 + 0,44(LnRS)$ $r^2 = 0,96$		$Ln(lmf) = 4,30 + 0,43(LnRS)$ $r^2 = 0,94$		$Ln(lmf) = 4,30 + 0,44(LnRS)$ $r^2 = 0,96$		Méditerranée

une nouvelle fois qu'un annulus correspond à un an (tab. 20). Les longueurs rétrocalculées, à partir des données brutes comme à partir des données reclassées, sont globalement inférieures aux longueurs rétrocalculées citées dans la littérature (Ehrhardt, 1992; Tserpes & Tsimenides, 1995), pour les mâles comme pour les femelles. Cette différence est relativement faible, voire inexistante pour les âges inférieurs mais s'accroît avec l'âge.

L'algorithme de reclassement pourrait être sensiblement amélioré au niveau de la détermination des seuils. En effet, dans ces analyses préliminaires, nous avons choisi les valeurs seuils en référence aux moyennes des rayons des annuli. Cette méthode réduit la variance mais modifie très peu les positions moyennes des anneaux. Une méthode plus efficace de détermination des seuils, basée sur l'expertise et sur les données qualitatives disponibles (sous-exploitées à ce stade de l'étude), permettrait de tirer le meilleur profit de ce reclassement. Il ne faut pas exclure la possibilité que 2 anneaux puissent se former une même

année. Dans les zones tempérées, on admet généralement qu'un anneau se forme à la fin du ralentissement annuel de croissance hivernal. Dans l'océan Indien, le climat subtropical est caractérisé par des variations saisonnières de température moins marquées mais également par des perturbations climatiques telles que les dépressions tropicales et les cyclones. Des marques de croissance complémentaires peuvent correspondre éventuellement à ces accidents climatiques ou, encore, à un phénomène physiologique interne tel que la reproduction.

Modèles de croissance

Différents ajustements de courbes de croissance ont pu être menés, aussi bien sur les données brutes que sur les données reclassées (tab. 21). Si l'on fait abstraction des valeurs extrêmes observées, le paramètre « Longueur infinie » prend des valeurs allant de 207 à 254 cm pour les femelles et de 165 à 210 cm pour les mâles. Ces valeurs confirment le fait que les femelles atteignent des tailles supérieures à celles des mâles.

Tableau 20 - Longueurs maxillaire-fourche rétrocalculées moyennes en fonction de l'âge estimé pour les espadons des côtes de Floride (Ehrhardt, 1992), de Méditerranée (Tserpes & Tsimenides, 1995) et de la zone sud-ouest de l'océan Indien (présente étude, 2001).

Âge estimé	Longueur maxillaire-fourche rétrocalculée							
	Présente étude (2001)		Présente étude (2001)		Tserpes & Tsimenides (1995)		Ehrhardt (1992)	
	Données brutes		Données reclassées		Mâles	Femelles	Mâles	Femelles
1	87,4	87,7	90,6	91,2	—	—	89,7	89,8
2	105,7	106,2	108,5	110	106,85	108,84	117	118,9
3	121,1	123,2	123,0	124,1	126,14	128,44	137,3	142,9
4	134,1	137,9	133,3	137,1	141,34	145,48	153,4	161,3
5	144,2	150,3	142,0	152	153,80	159,88	168,9	177,2
6	153,9	163,3	151,3	161,3	165,06	172,64	181,8	189,6
7	161	173,2	151,7	170,6	173,32	182,24	195,3	204,4
8	168,8	182,4	160,9	177		190,17	206,1	214,7

Tableau 21 - Récapitulatif des paramètres obtenus par les différents ajustements de type Von Bertalanffy testés sur les données brutes ou reclassées, pour les mâles comme pour les femelles.

Données utilisées			Kopt	R sq	T ₀	Lmf à 8 ans (cm)	L _∞ (cm)
Données brutes (n données par poisson)	Femelles	Totalité	0,115	0,9930	-2,738	180,2	254,124
		9 premiers annuli	0,127	0,9996	-2,430	181,6	247,358
		Moyenne pondérée	0,134	0,9999	-2,361	180,7	240,704
	Mâles	Totalité	0,081	0,9920	-3,917	171,2	276,526
		9 premiers annuli	0,178	0,9997	-2,226	167,6	199,984
	Moyenne pondérée	0,157	0,9999	-2,444	169,3	210,058	
Données brutes (1 donnée par poisson)	Femelles	anneaux 1-14	0,159	0,8162	-3,082	188,5	227,607
		anneaux 1-9	0,158	0,8160	-3,162	187,8	226,678
	Mâles	anneaux 1-12	0,171	0,6966	-3,885	169,9	195,571
		anneaux 1-9	0,169	0,6958	-4,084	168,8	193,965
Données reclassées 3 fois	Femelles	Tous les anneaux	0,157	0,9672	-2,433	176,72	219,363
		Dernier anneau	0,205	0,7737	-2,131	181,73	207,778
	Mâles	Tous les anneaux	0,239	0,9664	-2,077	159,39	175,152
		Dernier anneau	0,339	0,6454	-1,597	158,69	165,064

Tableau 22 - Modèles de croissance utilisés dans la littérature.

Auteurs	Zone d'étude	Pièce osseuse	Modèle	Femelles				Mâles			
				T ₀	K	L _∞ (cm)	Longueur à 8 ans (lmf en cm)	T ₀	K	L _∞ cm	Longueur à 8 ans (lmf en cm)
Uchiyama <i>et al.</i> , 1998	Pacifique	Nageoires anales	Standard*	-1,3	0,14	321		-1,3	0,14	321	
Ehrhardt, 1992	Atlantique Nord-Ouest	Nageoires anales	Généralisé Chapman*	Lo = 2,047 δ̂ = -0,9860	0,03676	326		Lo = 2,047 δ̂ = -1,0273	0,04541	281	
Ehrhardt <i>et al.</i> , 1995	Atlantique Nord-Ouest	Nageoires anales	Généralisé Richards*	-0,556 m = -0,898	0,0262	365		-0,410 m = -1,009	0,1050	190	
Tsimenides & Tserpes, 1989	Mer Égée	Nageoires anales	Standard	-1,516582	0,25112	220		-1,21867	0,34239	194	
Tserpes & Tsimenides, 1995	Méditerranée	Nageoires anales	Standard	-1,165	0,210	227	193,47	-1,205	0,241	203	180,98
Tserpes & Tsimenides, 1995	Méditerranée	Nageoires anales	Généralisé	δ̂ = -1,140	0,037	275	193,04	δ̂ = -1,434	0,020	293	184,05
Berkeley & Houde, 1983	Côtes de Floride	Nageoires anales	Standard	-2,5912	0,09465	340	215,25	-2,0444	0,1948	217	186,64
Radtke & Hurley, 1983	Atlantique Nord-Ouest	Otolithes	Standard	-1,678	0,120	267	183	-3,942	0,073	277	161
Chalabi <i>et al.</i> , 1994	Côtes algériennes	Nageoires anales	Standard	-3,102	0,03	613		-1,96	0,125	277	
Clear <i>et al.</i> , 2000	Côte est australienne	Nageoires anales	Standard	-1,552	0,27	216,5		-1,552	0,27	216,5	

* Modèle standard de Von Bertalanffy : $L_t = L_{\infty}(1 - e^{-k(t-t_0)})$

Modèle généralisé de Chapman : $L_t = [L_{\infty}^{(1-\delta)} - (L_{\infty}^{(1-\delta)} - L_0^{(1-\delta)})e^{-k(1-\delta)t}]^{1/(1-\delta)}$

Modèle généralisé de Richards (1959) : $L_t = L_{\infty}(1 - e^{-k(1-m)(t-t_0)})^{1-m}$

Les modèles de la littérature prévoient des longueurs infinies allant de 216 à 365 cm pour les femelles (en faisant abstraction de la valeur extrême de 613 cm) et de 190 à 321 cm pour les mâles. Nos longueurs infinies, pour les mâles comme pour les femelles, sont comprises dans ces gammes de taille mais se rapprochent plus particulièrement des données obtenues par Tserpes & Tsimenides (1995) et Tsimenides & Tserpes (1989), avec le modèle standard de Von Bertalanffy (tab. 22).

Les résultats obtenus dans la présente étude fournissent les premières indications sur la croissance de l'espadon dans l'océan Indien. Mais ces résultats pourraient être améliorés en augmentant la quantité d'échantillons afin de pouvoir effectuer une sélection plus forte qui permettrait de ne retenir que les très bonnes coupes. De plus, les observations concernant la forme des coupes, la qualité des coupes et des stries, la présence de doublons ont été, jusqu'à présent, sous-utilisées.

Aspects de validation

Dans la présente étude, nous avons fait l'hypothèse qu'une strie de croissance représente une année. Cependant, compte tenu de la variabilité mensuelle du ratio

d'accroissement marginal observée, nous n'avons pas réussi à valider le rythme d'apparition des dépôts sur les épines de nageoires anaes.

Jusqu'à présent, personne n'a encore pu valider, de façon définitive, une méthode d'estimation de l'âge chez l'espadon. Les méthodes semi-directes de validation utilisant l'étude des structures naturelles, comme le ratio d'accroissement marginal, ont été utilisées mais sans beaucoup de succès. Les résultats de Prince *et al.* (1987) confirment ceux de Berkeley & Houde (1983). Ils ont observé une variabilité importante attachée aux valeurs moyennes mensuelles des MI ou RMI et n'ont pas réussi à valider le rythme d'apparition des dépôts sur les épines de nageoires anaes. Seuls Ehrhardt (1992), Tserpes & Tsimenides (1995) ont réussi à effectuer une validation partielle des estimations d'âge utilisant des rayons de nageoires anaes au moyen du RMI. Mais cette méthode reste toujours semi-directe. Elle ne peut pas être aussi fiable qu'une méthode directe comme l'utilisation, par exemple, des marqueurs chimiques.

Dans cette étude, il avait également été envisagé une comparaison entre différents tissus : otolithes, épines de nageoires anaes

et vertèbres pour les petits individus. Les récupérations de pièces anatomiques ont pu être effectuées mais les traitements ne sont pas encore disponibles. Wilson & Dean (1983) et Radtke & Hurley (1983) ont pu vérifier la concordance entre les observations faites sur différentes pièces osseuses. Mais cette vérification ne constitue pas en elle-même une validation.

Des informations sur les recaptures éventuelles des 28 espadons marqués en 1991, 1992 et 1993 par Uchiyama *et al.* (1998) permettraient une réelle validation des courbes de croissance.

Conclusion

L'étude de la croissance de l'espadon, réalisée dans le cadre du Programme Palangre Réunionnais, est une des toutes premières études sur ce thème dans le sud-ouest de l'océan Indien. Plus de 1 600 épines de nageoires anales d'espadon ont été traitées. L'analyse a été effectuée grâce à une chaîne de traitement numérique des pièces calcifiées (Visilog-TNPC). Les coupes et les traitements associés sont stockés sous forme informatique et constituent une banque de données historique pour le sud-ouest de l'océan Indien.

Cette étude permet de proposer l'ajustement des premières courbes de croissance de type Von Bertalanffy pour l'espadon, dans la zone sud-ouest de l'océan Indien. Ces premiers ajustements montrent que les espadons peuvent atteindre des tailles maximales de 207 à 254 cm pour les femelles et de 165 à 210 cm pour les mâles et confirment une croissance plus rapide chez les femelles. Mais l'ensemble de nos analyses est basé sur l'hypothèse d'un dépôt annuel des marques de croissance. Il reste donc à confirmer cette hypothèse en validant le rythme d'apparition des dépôts. Les méthodes semi-directes de validation, comme l'utilisation du ratio d'accroissement marginal, n'ont pas fourni de résultats satisfaisants. Pour l'espadon, la validation idéale semble résider dans une opération de marquage avec des marqueurs chimiques du type tétracycline, d'où la nécessité de poursuivre cette étude sur l'estimation de l'âge chez l'espadon en axant tout particulièrement les recherches sur ces aspects de validation par des marquages-recaptures. Il serait également très intéres-

sant de continuer l'étude actuelle pendant quelques années, en collectant d'autres échantillons à un rythme mensuel. Ceci permettrait d'opérer des sélections pour ne conserver que les excellentes coupes. Par ailleurs, l'extension de cette étude à une échelle régionale permettrait de comparer les accroissements marginaux mensuels suivant les différentes latitudes (Seychelles, Réunion, Afrique du Sud). Les variations de croissance éventuelles entre les zones étudiées pourraient fournir des informations complémentaires sur la structure des stocks et le comportement migratoire de l'espèce dans l'océan Indien.

Références bibliographiques

- Antoine L., Mendoza J., 1986. L'utilisation du rayon de la nageoire dorsale pour l'étude de la croissance et l'écologie du listao. *In: Proceedings of the ICCAT conference on the international skipjack year programme.* Symons P.E.K., Miyabe P.M., Sakawaga G.T. (eds), Madrid, ICCAT, 317-324.
- Artüz M.I., 1963. Contribution to the knowledge of the biology of the swordfish (*Xiphias gladius*) in the Sea of Marmara. *Proc. Gen. Fish. Coun. Médit., Tech. Pap.*, 47(7), 459-471.
- Beckett J.S., 1974. Biology of swordfish, *Xiphias gladius* L., in the Northwest Atlantic Ocean. *In: Proceedings of the international billfish symposium.* Shimura R.S., Williams F. (eds). Kailua-Kona, Hawaii, US Dep. Commer, NOAA Tech. Rep. NMFS SSRF, 675, 103-106.
- Berkeley S.A., Houde E.D., 1983. Age determination of broadbill swordfish, *Xiphias gladius*, from the straits of Florida, using anal fin spine sections. *US Dep. Commer, NOAA Tech. Rep. NMFS*, 8, 137-143.
- Castro-Longoria R., Sosa-Nishizaki O., 1998. Age determination of swordfish, *Xiphias Gladius* L., from waters of Baja California, Mexico, using anal fin rays and otoliths. *In: Proceedings of international symposium on Pacific swordfish.* Sosa-Nishizaki O., Barrett I., Bartoo N. (eds), Ensenada, Mexico. *US Dep. Commer., NOAA Rech. Rep. NMFS*, 142, 276p.

- Chalabi A., Cherrak I., Hamida S., Sail M., 1994. La croissance de l'espadon pêché près des côtes algériennes. ICCAT, SCRS/94/93, 305-308.
- Clear N., Davis T., Carter T., 2000. Developing techniques to estimate the age of bigeye tuna and broadbill swordfish off eastern Australia: A pilot project. CSIRO.
- Ehrhardt N.M., 1992. Age and growth of swordfish, *Xipbias gladius*, in the north-western Atlantic. Bull. Mar. Sci., 50(2), 292-301.
- Ehrhardt N.M., 1994. On the age and growth of swordfish, in the northwest Atlantic Ocean. ICCAT, SCRS/94/67, 8 p.
- Ehrhardt N.M., Robbins R.J., Arocha F., 1995. Age validation and growth of swordfish, *Xipbias gladius*, in the north-western Atlantic. ICCAT, SCRS/95/99, 24 p.
- Esteves E., Simoes P., Da Silva H., Andrade J.P., 1995. Ageing of swordfish, *Xipbias gladius* Linnaeus, 1758, from the Azores, using sagittae, anal-fin spines and vertebrae. Arquipelago, Cienc. Biol. Mar., Life Mar. Sci., 13A, 39-51.
- Hurley P., Iles T.D., 1980. Report of the Canadian research programme on large pelagic fishes. Collective volume of scientific papers. Recl. Doc Sci. CICTA, vol. IX(3), SCRS/79, Madrid, 601-605.
- Kume S., Joseph J., 1969. Size composition and sexual maturity of billfish caught by Japanese longline fishery in the Pacific Ocean east of 130°W. Bull. Far. Seas Fish. Res. Lab., 2, 115-162.
- Megalofonou P., Dean J.M., De Metrio G., Wilson C., Berkeley S., 1995. Age and growth of juvenile swordfish, *Xipbias gladius* Linnaeus, from the Mediterranean Sea. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 188, 79-88.
- Megalofonou P., De Metrio G., Lenti M., 1990. Catch, size distribution, age and some population parameters of swordfish, *Xipbias gladius* L., in the Greek seas. In: Rapport ICCAT, 33, 168-178.
- Ovchinnikov V.V., Grudtsev M.E., Kholodkova S.V., 1980. Length-age composition of the tropical Atlantic swordfishes (*Xipbias gladius*, L.). In: Rapport ICCAT, 621-623.
- Panfili J., 1992. Estimation de l'âge individuel des poissons : Méthodologie et applications à des populations naturelles tropicales et tempérées. Thèse de 3^e cycle, université de Montpellier II, 456 p.
- Poisson F., Macé N., 1997. Biométrie de l'espadon dans la zone sud-ouest de l'océan Indien. Le Port, Ifremer La Réunion/PTRII/CAN Réunion, 31 p.
- Porter J.M., 1993. Review of swordfish age and growth data and methodologies. In: Rapport ICCAT, Department of fisheries and oceans, 100-103.
- Porthoff T., Kelley S., 1982. Development of the vertebral column, fins and fin supports, branchiostegal rays, and squamation in the swordfish, *Xipbias gladius*. Fish. Bull., 80(2), 161-186.
- Prince E.D., Lee D.W., Berkeley S.A., 1987. Use of the marginal increment analysis to validate anal spine method for ageing atlantic swordfish and other alternatives for age determination. ICCAT Working document, 194-200.
- Quéro J.C., Vayne J.J., 1997. Les poissons de mer des pêches françaises (identification, inventaire et répartition de 209 espèces). Lausanne-Paris, 226-227.
- Radtke R.L., Hurley P., 1983. Age estimation and growth of broadbill swordfish, *Xipbias gladius*, from the northwest Atlantic based on external features of otoliths. NOAA tech. rep. NMFS, 8, 145-150.
- Scherrer B., 1984. Biostatistique. Gaëtan Morin Éd., Chicoutimi, Québec, Canada, 850 p.
- Stamatopoulos C., Caddy J.F., 1999. Estimation of Von Bertalanffy growth parameters: A versatile linear regression approach. FAO, Regional office for Africa, Accra.
- Tréca K., 1998. Étude des caractéristiques biologiques de l'espadon (*Xipbias gladius*) dans le sud-ouest de l'océan Indien : estimation de l'âge et étude de la biologie de la reproduction. Mémoire de DAA, Ensar, Rennes, 83 p.

- Tserpes G., Tsimenides N., 1995. Determination of age and growth of swordfish, *Xiphias gladius* L., 1758, in the eastern Mediterranean using anal-fin spines. Fish. Bull., 93(3), 594-602.
- Tsimenides N., Tserpes G., 1989. Age determination and growth of swordfish, *Xiphias gladius*, in the Aegean Sea. Fish. Research., 8, 159-168.
- Uchiyama J.H., Skillman R., Sampaga J.D., DeMartini E.E., 1998. A preliminary assessment of the use of hard parts to age Central Pacific swordfish, *Xiphias gladius*. In: Proceedings of the international symposium on Pacific swordfish. Sosa-Nishizaki O., Barrett I., Bartoo N. (eds). NOAA Rech. Rep. NMFS. Ensenada, Mexico, US Dep. Commer., 142, 276.
- Ward P., Elscot S., 2000. Broadbill swordfish status of world fisheries. Bureau of Rural Sciences, Canberra, 208 p.
- Wilson C.A., Dean J.M., 1983. The potential use of sagittae for estimating age of Atlantic swordfish, *Xiphias gladius*. NOAA Tech. Rep. NMFS, US Dep. Commer., 8, 151-156.

Biologie de la reproduction de l'espadon (*Xiphias gladius*)

François Poisson⁽¹⁾, Corentin Marjolet⁽¹⁾, Christian Fauvel⁽²⁾

(1) Ifremer, laboratoire Ressources halieutiques, rue Jean Bertho, BP 60, 97822 Le Port Cédex, La Réunion, France

(2) Ifremer, laboratoire Recherches aquacoles, chemin de Maguelone, 34250 Palavas-les-Flots, France

Introduction

Les prises d'espadon (*Xiphias gladius*) dans l'océan Indien ont augmenté de manière significative entre 1990 et 2000, passant de 6 000 à 30 000 tonnes. Inscrit dans cette dynamique, une pêcherie palangrière s'est développée à La Réunion depuis 1991. Les débarquements d'espadon enregistrés par cette flottille s'élèvent à 1 700 tonnes en 2000, ce qui confère à la France une part de responsabilité croissante dans la gestion de cette ressource commune.

La connaissance des différents aspects de la biologie de la reproduction de l'espadon est essentielle pour la compréhension de la dynamique et la gestion rationnelle de cette espèce. Le stock ne peut se maintenir que si la biomasse féconde est suffisante pour compenser les prélèvements effectués par les pêcheries. Les connaissances de la fécondité et du sex-ratio sont nécessaires pour calculer la dimension du stock. Par ailleurs, dans la perspective d'étudier les stades larvaires et juvéniles, il est primordial de caractériser la reproduction tant aux niveaux spatial que temporel.

Une revue bibliographique montre que le sujet est faiblement documenté sur l'espadon dans l'océan Indien. Yabe *et al.* (1959 *in* Palko *et al.*, 1981) relatent, au mois d'avril, les captures de femelles prêtes à pondre (sans préciser de zone géographique) et de jeunes individus près de l'équateur en août, novembre et décembre. Ces mêmes auteurs, après analyses de contenus stomacaux de thons et de marlins, concluent que la saison de ponte doit se situer entre avril et décembre. Nishikawa *et al.* (1985 *in* Ward & Elscot, 2000) signalent de fortes concentrations de larves d'espadon dans la zone nord-est de l'océan Indien (au large de la côte nord-ouest de l'Australie et au sud-est de Java) mais soulignent leur rareté du côté ouest. La présence de larves a été observée au sud-est de Sumatra, plus abondamment entre 12 et

17° S dans une zone correspondant au courant sud-équatorial et dans un espace compris entre 85° et 87° E et 5° N et 17° S par Bogorov & Rass (1961, *in* Palko *et al.*, 1981). Des larves d'espadons sont récoltées, dans le canal du Mozambique fin janvier par Kondritskaya (1970) et sur la côte est malgache par Lütken en 1880 (*in* Palko *et al.*, 1981) et Gorbunova (1969); par contre, aucune information n'est fournie quant à la période de l'année pour ces dernières observations.

De nombreuses études sur les différents aspects de la reproduction ont été, par contre, réalisées dans diverses autres régions du monde, en mer de Marmara (Artüz, 1963), en Méditerranée (Sella, 1911; Sanzo, 1922 et Cavaliere, 1963; De la Serna *et al.*, 1995), dans la zone est-Pacifique (Kume & Joseph, 1969; Nakano & Bayliff, 1992), dans le Pacifique nord (Miyabe & Bayliff, 1987; Uchiyama & Shomura, 1974; Hinton *et al.*, 1997; DeMartini *et al.*, 2000), en Atlantique nord (Arocha & Lee, 1995, 1996); Taylor & Murphy, 1992), en Atlantique sud (Amorim Ferreira *et* Arfelli, 1980 *in* Palko *et al.*, 1981).

Le présent travail s'inscrit dans le cadre du « Programme scientifique et technique d'accompagnement au développement de la pêcherie hauturière des grands pélagiques à La Réunion » financé par le Fonds européen de développement régional (FEDER), les conseils général et régional de La Réunion.

Les objectifs de notre étude visent à analyser les différents aspects de la biologie de la reproduction de l'espadon dans la zone sud-ouest de l'océan Indien. L'échelle de maturité macroscopique des gonades est proposée et mise en parallèle, d'une part, avec l'indice de maturité défini par Hinton *et al.* (1997) et, d'autre part, avec les distributions de fréquence des diamètres des ovocytes. L'évolution cytologique des ovocytes au cours d'un cycle annuel est décrite. La taille de première maturité pour chacun

des sexes, les lieux et saison de reproduction ainsi que les premières estimations de la fécondité établies à partir de 7 individus sont présentés. L'ensemble des résultats de cette étude est finalement comparé à ceux obtenus dans les autres régions du monde.

Matériel et méthodes

Zone d'étude

La zone d'étude s'étend de 19° à 25° S en latitude et entre 48 et 58° de longitude est, soit dans la région subéquatoriale sud. Tous les prélèvements de pièces biologiques ont été effectués lors d'embarquements à bord de 16 palangriers professionnels réunionnais entre le 1^{er} mai 1998 et le 31 janvier 2001. Les positions de l'ensemble des stations d'échantillonnage ou positions de départ de la ligne de pêche lors du filage sont présentées sur la carte suivante (fig. 1).

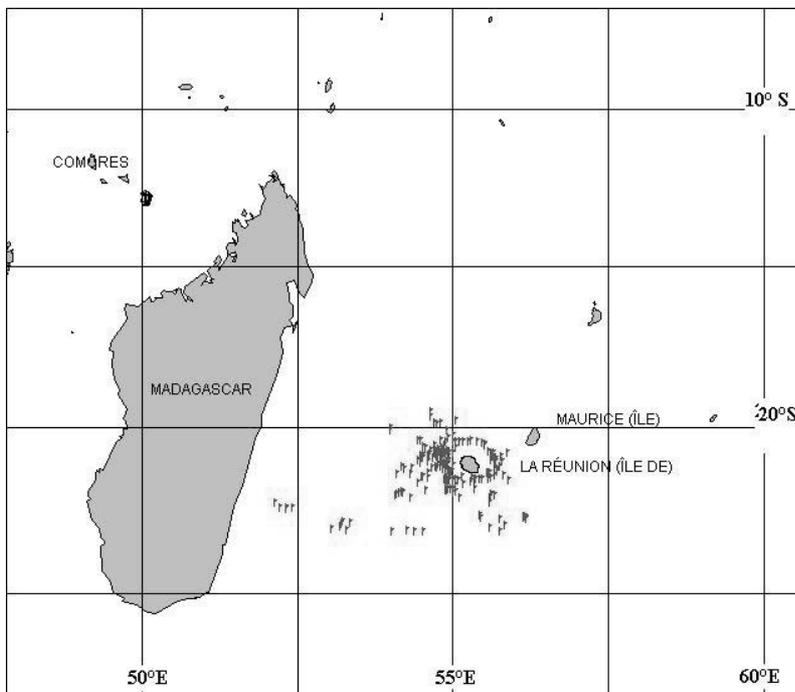


Figure 1 - Positions géographiques des lieux d'échantillonnage biologique entre le 1^{er} mai 1998 et 31 janvier 2001 (chaque symbole identifie une opération de pêche).

Campagnes d'échantillonnage

Au total, 1 727 paires de gonades (1 107 paires d'ovaires et 620 paires de testicules) ont été collectées au cours de 52 campagnes effectuées en mer à bord des palangriers professionnels. Ces campagnes à la mer, correspondant à 255 opérations de pêche suivies, ont été réparties mensuellement lors de la première phase du programme.

La collecte de matériel biologique a toujours été associée à des mesures biométriques (Poisson & Macé, 1997).

Le tableau 1 récapitule, pour chacune des campagnes de pêche, le code du navire, les dates de départ et d'arrivée au port, le nombre de jours de mer et le nombre de filages suivis correspondant.

Pour les analyses relatives aux variations spatiales de la taille et de la composition de la population par sexe, des données complémentaires recueillies avant ce programme au cours de campagnes d'échantillonnages menées entre 1994 et 1998 dans d'autres zones géographiques ont été utilisées. Ces campagnes ont été effectuées soit dans le canal du Mozambique et dans le sud de Madagascar, soit dans les eaux seychelloises, à bord de navires professionnels réunionnais mais aussi à bord du navire scientifique de la Seychelles Fishing Authority (SFA) au cours de missions scientifiques communes menées dans le cadre du programme de coopération entre les deux organismes scientifiques nationaux (Ifremer-SFA).

Prélèvement et traitement des échantillons

Prélèvements à bord

Après extraction de la totalité des organes lors de l'éviscération, le sexe de l'individu est déterminé. Il est relativement aisé d'identifier le sexe d'après l'aspect morphologique des gonades. Les testicules sont des organes allongés, aplatis et blanc rosé, présentant de nombreux nodules sur la partie externe et de forme triangulaire en coupe transversale. La laitance est facilement observable sur les individus matures. Les ovaires ont une apparence externe lisse. En section transversale, la forme des ovaires est toujours ronde et un orifice ou lumen se distingue dans la partie centrale.

Pour l'étude histologique ultérieure, un premier fragment de gonade (2 cm³), prélevé sur chaque poisson (mâles et femelles), est fixé dans du liquide de Bouin-Hollande (Gabe, 1968).

Pour établir les distributions de fréquence de taille des ovocytes, deux fragments d'ovaire sont placés respectivement dans du liquide du Gilson modifié (Lowerre-Barbieri & Barbieri, 1993) et dans du formol à 5 %. Ces prélèvements sont réalisés dans la partie centrale du plus gros des ovaires.

Tableau 1 - Descriptif des 52 marées expérimentales à bord des palangriers durant lesquelles ont été effectués des échantillonnages biologiques correspondant à 255 opérations de pêche et 327 jours de mer entre le 1^{er} mai 1998 et 31 janvier 2001.

Code bateau	Marée	Date début	Date fin	Jours de mer	Filages
37	798	7-mai-98	12-mai-98	6	4
31	889	19-mai-98	23-mai-98	5	4
18	967	30-mai-98	6-juin-98	8	8
18	960	9-juin-98	16-juin-98	8	8
19	961	26-juin-98	1-juil-98	6	5
18	995	29-juil-98	10-août-98	13	9
43	1027	14-août-98	19-août-98	6	5
43	1081	1 ^{er} -oct-98	6-oct-98	6	5
43	1121	26-oct-98	31-oct-98	6	5
34	1111	18-nov-98	23-nov-98	6	6
34	1115	16-déc-98	19-déc-98	4	2
44	1137	16-déc-98	19-déc-98	4	4
44	1156	13-janv-99	17-janv-99	5	4
34	1168	14-janv-99	21-janv-99	8	6
44	1181	4-mars-99	7-mars-99	4	4
33	1219	27-mars-99	6-avril-99	11	10
44	1227	7-avril-99	13-avril-99	7	5
44	1256	20-avril-99	25-avril-99	6	5
44	1258	23-mai-99	31-mai-99	9	7
44	1261	14-juin-99	21-juin-99	8	6
46	1259	21-juin-99	24-juin-99	4	3
44	1262	19-juil-99	27-juil-99	9	6
43	1405	5-août-99	10-août-99	6	5
44	1267	1 ^{er} -sept-99	5-sept-99	5	4
41	1414	20-oct-99	24-oct-99	5	5
53	1411	12-nov-99	13-nov-99	2	1
3	1438	17-nov-99	21-nov-99	5	4
33	1453	25-nov-99	1-déc-99	7	4
44	1521	3-déc-99	8-déc-99	6	4
33	1454	9-déc-99	19-déc-99	11	7
31	1455	14-déc-99	20-déc-99	7	5
33	1517	12-janv-00	18-janv-00	7	2
13	1522	1 ^{er} -fév-00	3-fév-00	3	2
3	1524	21-fév-00	24-fév-00	4	3
1	1555	11-mars-00	16-mars-00	6	5
55	1541	30-mars-00	31-mars-00	2	1
56	1557	5-avril-00	11-avril-00	7	6
41	1592	15-avril-00	19-avril-00	5	5
41	1597	29-avril-00	1 ^{er} -mai-00	3	2
41	1598	18-mai-00	24-mai-00	7	6
41	1666	7-juin-00	10-juin-00	4	3
41	1678	22-juil-00	29-juil-00	8	6
41	1695	2-août-00	6-août-00	5	3
41	1692	11-août-00	14-août-00	4	3
41	1707	18-sept-00	23-sept-00	6	5
41	1708	26-sept-00	2-oct-00	7	6
41	1710	13-oct-00	19-oct-00	7	6
41	1716	21-oct-00	27-oct-00	7	6
56	1715	26-oct-00	2-nov-00	8	7
41	1778	1-nov-00	8-nov-00	8	6
41	1751	24-nov-00	2-déc-00	9	6
41	1779	17-janv-01	23-janv-01	7	6
				327	255

Les gonades sont ensuite placées dans un sac plastique portant le numéro d'identification du poisson et stockées en chambre froide ou au congélateur jusqu'au débarquement. Pour chaque échantillon, le jour de pêche, la position géographique du filage de la palangre ainsi qu'une ou plusieurs mesures de taille de l'individu sont consignés.

Traitements des échantillons au laboratoire

Pesée et détermination du stade de maturité

La totalité des gonades échantillonnées sont, après décongélation, séchées sur du papier absorbant puis pesées. Les testicules et les ovaires d'un poids inférieur à 400 g sont pesés à 0,1 g près (balance Mettler, modèle p1210), le poids des plus gros ovaires est mesuré à 5 g près (balance Berkel). Le stade de maturation de chaque gonade est déterminé d'après une échelle de maturité des gonades définie en sept stades pour les femelles et 5 stades pour les mâles. Dans le but de définir ultérieurement des critères sur l'état de maturation plus précis et adaptés à l'espèce, une photographie de chaque gonade est archivée. Les critères qui permettent de distinguer les différents stades sont la forme, la taille, la coloration, la consistance et la vascularisation.

Traitements spécifiques pour l'estimation de la fécondité

Parmi l'ensemble des échantillons récoltés, 7 paires de gonades contenant des ovocytes hydratés, visibles à l'œil nu en transparence de la membrane ovarienne, ont été choisies pour estimer la fécondité (fig. 2). L'une des paires provient d'une femelle espadon pêchée en décembre 1999. Cet échantillon a été conservé au congélateur jusqu'à la manipulation. Les 6 autres paires récupérées au cours de la saison de ponte 2000-2001 ont été traitées directement après conservation en chambre froide. Uchiyama



Figure 2 - Gonade d'une femelle espadon pêchée au large de La Réunion, le 28 février 2001 (R1020176, poids de la gonade : 4470 g).

& Shomura (1974) ont mis en évidence que la distribution des diamètres ovocytaires est hétérogène au sein de l'ovaire d'espadon. Les prélèvements ont donc été effectués de façon aléatoire et non systématiquement dans la partie médiane.

Indice biologique

Il est d'usage d'utiliser l'indice gonadosomatique (IGS) pour suivre dans le temps l'évolution de la maturation sexuelle des individus des deux sexes. L'IGS est défini comme le rapport entre le poids de la gonade, multiplié par un facteur 10^4 , et la longueur de référence élevée au cube correspondant au poids théorique de l'animal. Cette longueur varie suivant les auteurs.

$$IGS = (Pg/L^3) * 10^4$$

avec Pg : poids des gonades (en gramme)
L : longueur de référence (en centimètre)

Cet indice a été couramment utilisé (avec des données de tailles différentes) pour définir les saisons de ponte chez l'espadon, (Kume & Joseph, 1969; Shingu *et al.*, 1974; Miyabe & Bayliff, 1987; Sosa-Nishida, 1990 *in* Hinton *et al.*, 1997; Arocha & Lee, 1995, 1996).

En 1997, Hinton *et al.* recommandent d'adopter pour les femelles un autre indice, que nous appellerons dans cette étude IGH, défini comme suit :

$$IGH = \frac{\ln(Pg)}{\ln(lcof)}$$

avec Pg : poids des gonades (en gramme)
lcof : longueur cavité oculaire-fourche (en centimètre)

Si la longueur cavité oculaire-fourche n'a pas été enregistrée lors des échantillonnages, elle est alors estimée à partir des équations morphométriques (Poisson & Macé, 1997).

Histologie

Les fragments d'ovaires échantillonnés sont préalablement fixés au liquide de Bouin pendant 48 h minimum puis stockés dans l'éthanol à 70 % jusqu'au traitement histologique. Les échantillons sont ensuite déshydratés puis inclus dans la paraffine. Ils sont coupés en sections de 5 μ m d'épaisseur puis colorés. La coloration choisie est une coloration uniquement topographique permettant de mettre en évidence l'ensemble des structures cellulaires et l'organisation de la gonade. Il s'agit du procédé

de coloration de Dominici (1897 *in* Gabe, 1968) utilisant l'érythrosine et le bleu de toluidine (dit de Dominici). Le calibrage et les mesures des photographies ont été réalisés à l'aide du logiciel Visilog 5.1 (Noesis®). Les coupes histologiques ont été réalisées sur 60 individus. Elles sont examinées au microscope à différents grossissements (entre 10 et 100). La détermination du stade de développement se fait sur un lot d'ovocytes les plus avancés. Les trois phases caractéristiques du déroulement de l'ovogenèse ont été observées tout au long de l'année. Les critères de différenciation des différentes phases de l'ovogenèse sont la taille des cellules, leur nombre, l'aspect et la quantité d'inclusions cellulaires ainsi que la morphologie des chromosomes.

Fréquence de taille des ovocytes

Utilisation de l'analyseur d'images

Le système d'analyse d'images est constitué d'un ordinateur Pentium 400 MHz (128 Mo), d'une caméra CCD (Sony, type XC77C 2/3), d'une carte d'acquisition (Matrox Météor) pilotée par un logiciel de traitement d'images Visilog 5.1 (Noesis®) (fig. 3).

Pour déterminer la distribution des diamètres, les échantillons d'ovocytes sont disposés, sous la caméra, sur une table lumineuse avec écran en matière plastique opalisée. La caméra est fixée sur un statif réglable et est équipée d'un objectif macroscopique (AF Micro-Nikkor 60 mm f/2,8 D). Le logiciel Visilog est un environnement d'analyse d'images 2D qui se compose de six modules.

Le module Acquire (1) permet d'acquérir une image à partir d'un fichier (sous différents formats universels : BMP, TIF...) ou de la numériser directement depuis une caméra (grâce à la carte d'acquisition). Le module View (2) permet d'afficher l'image à l'écran, de l'annoter, de l'éditer et d'en extraire quelques mesures élémentaires (analyses statistiques de l'image, histogrammes et profils d'intensité). Les nombreuses procédures et fonctions du module Process (3) sont disponibles pour modifier, préparer l'image brute avant l'analyse et annoter celle-ci pour que chaque « objet » la composant soit identifié. Le module Analyse (4) permet d'obtenir divers paramètres sur l'image et les éléments la constituant. Les mesures ainsi obtenues sont transférables directement sur tableur

pour y être compilées. Le module Développement (5) autorise l'intégration directe des images et des données issues d'analyses dans une base de données exportable. La mémorisation et l'enregistrement, sous forme de scripts, d'une succession de procédures définies par l'utilisateur est rendu possible grâce au module Enregistrement (6).

Les résultats du traitement sont stockés sous forme d'images (format_ima5, spécifique à ce logiciel) et de fichiers numériques.

Étalonnage

Afin de conserver la taille réelle des échantillons, un micromètre (10 mm, Bausch & Lomb, ref. 31-16) est utilisé pour l'étalonnage. Après mise au point définitive du système optique, une photographie du micromètre est enregistrée sous le module Acquire. L'utilisateur définit alors la correspondance entre la taille réelle de l'objet photographié (en millimètre) et le nombre de pixels de l'image numérisée. Une fois cet étalonnage enregistré, l'analyse des échantillons d'ovocytes peut débuter. Toutefois, toute modification de la mise au point du système optique induit un nouvel étalonnage.

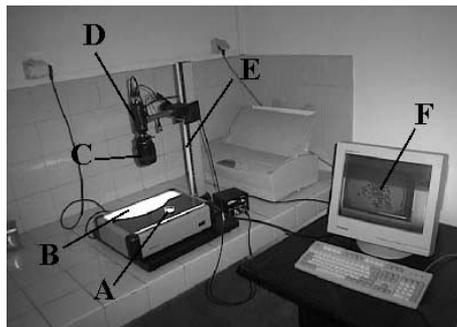


Figure 3 - Vue d'ensemble de la chaîne de traitements. A : échantillon d'ovocytes; B : table lumineuse; C : zoom macroscopique; D : caméra CCD; E : statif; F : écran de visualisation.

Traitement de l'image

Sous le module Acquire, l'image brute de l'échantillon d'ovocytes est visualisée sur l'écran de l'ordinateur avant son enregistrement. La qualité du cliché de départ apparaît comme un critère primordial pour l'optimisation de la détection des ovocytes. Pour les besoins propres de cette étude, un script¹ a été développé. Le but de ce script est d'individualiser et d'extraire les ovocytes identifiés à partir de critères basés sur la forme et

1. Le script est défini comme un prototypage rapide de fonctions propres au logiciel.

la densité des « objets » repérés. La figure 4 résume l'ensemble des étapes depuis la prise de vue jusqu'à l'obtention des valeurs numériques (diamètres). Sur cet organigramme, les différentes opérations automatisées du processus sont indiquées dans des cadres gris et se distinguent des tâches accomplies par l'opérateur (cadres blancs).

À l'initialisation du script, l'utilisateur choisit l'image à analyser puis, la fonction « threshold » du module Process est automatiquement activée. Celle-ci permet de détecter les contours par différences des contrastes et de trier les éléments photographiés. Pour cela, l'opérateur doit sélectionner un « seuil de niveau de gris » (compris entre 0 à 256).

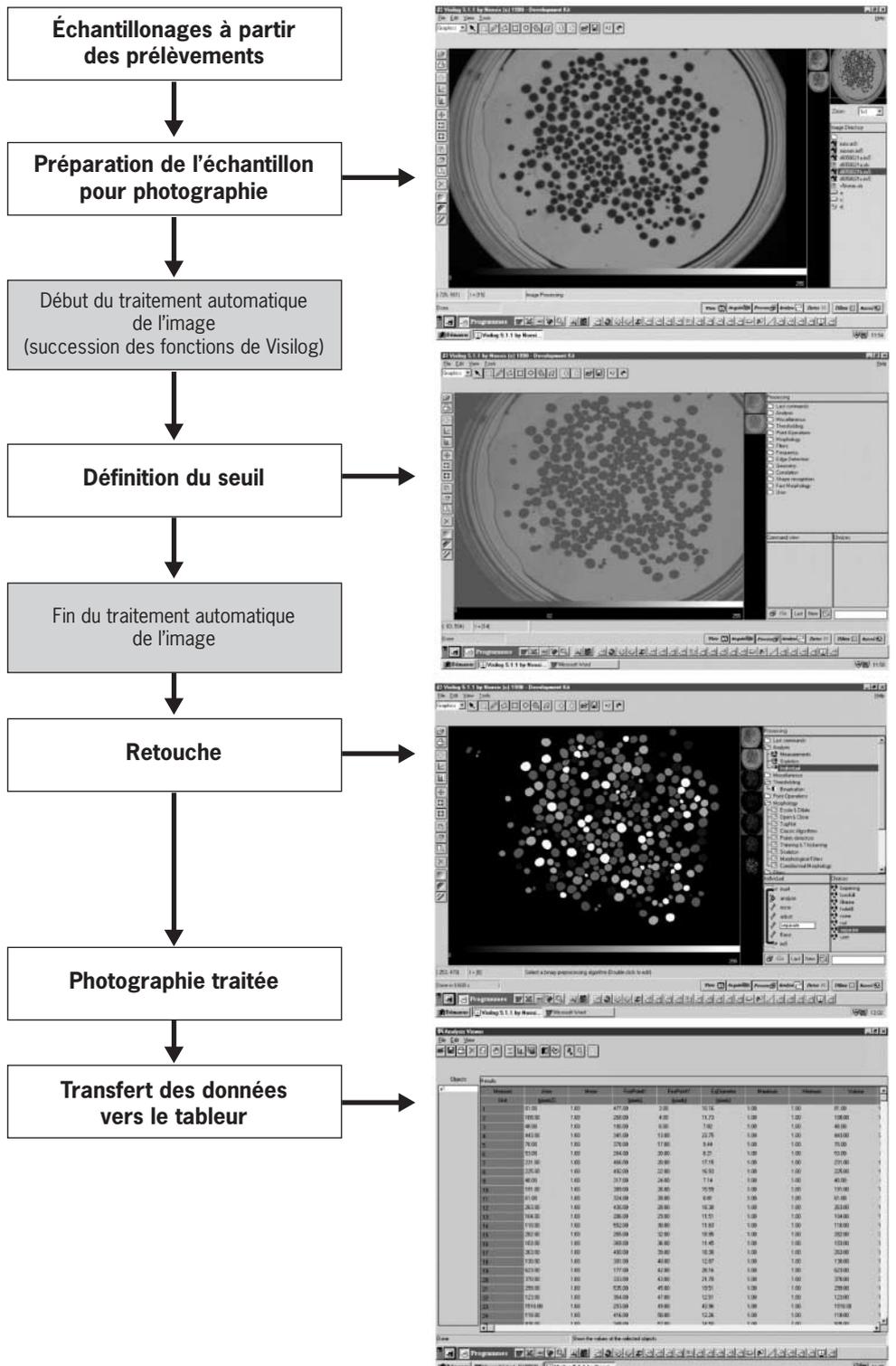


Figure 4 - Schéma des différentes étapes automatisées (cadre gris) et des tâches accomplies directement par l'opérateur au cours de l'exécution de la chaîne de traitements (cadre blanc).

Après validation, le script se poursuit en utilisant la fonction de binarisation « *threshold\binarisation* » qui convertit les « objets » de l'image en système binaire. L'effectif retenu de 100 à 200 ovocytes garantit une bonne répartition des ovocytes sur toute la surface d'observation. En complément, une série de fonctions permet d'améliorer la qualité de l'image avant l'analyse. La fonction « *erode* » réduit le rayon des éléments. À l'issue de cette phase, les éléments de petite taille sont éliminés (stroma, tissu conjonctif et artéfacts). La fonction « *reconstruct* » permet aux éléments encore visibles de retrouver leurs dimensions initiales. Ensuite, chaque élément est identifié en fonction de sa surface (calculée).

Sous le module Analyse, des fonctions de retouche permettent d'effectuer des modifications manuelles. Il a été convenu, toujours en se référant à l'image de départ :

- de supprimer les éléments ne présentant pas une forme sphérique (ovocytes éclatés) ainsi que les objets parasites (tissus résiduels, débris cellulaires ou les bordures de la boîte de Pétri);
- de séparer les ovocytes accolés identifiés comme un élément unique.

Une fois les modifications sauvegardées, les données relatives aux ovocytes (diamètre, surface et nombre) sont transférées dans un fichier de type Excel (Microsoft®). La distribution des tailles des ovocytes d'un individu est établie à partir d'un nombre d'ovocytes minimal fixé à 400. Pour chaque individu, quatre sous-échantillons sont ainsi traités.

Estimation des diamètres ovocytaires et du nombre d'ovocytes identifiés

Une application informatique sur tableur (Excel, Microsoft®) a été développée au laboratoire afin d'automatiser la compilation, le tri et la mise en forme des données des quatre échantillons. La figure 5 décrit les différentes étapes et traitements accomplis au cours de l'exécution de cette application. Dans le menu principal, l'utilisateur exécute le traitement automatique des données en cinq étapes. (1) Les valeurs mesurées sous Visilog de chaque sous-échantillon sont importées. (2) Un traitement préparatoire permet de vérifier si l'effectif d'ovocytes pour chacune des photographies est adéquat, soit inférieur à 250. (3a et 3b) Les données sont compilées en prenant en compte les

variations induites par l'utilisation des conservateurs. (3) et (4) Les histogrammes et tableaux de fréquence de diamètre ovocytaires sont créés. (5) Finalement, pour chaque individu, un fichier de synthèse est enregistré, regroupant trois feuilles de données distinctes comprenant :

- les valeurs brutes et corrigées des diamètres mesurés;
- les tableaux et graphiques de distribution des diamètres ovocytaires des 4 sous-échantillons;
- le tableau et le graphique de distribution des diamètres ovocytaires de l'échantillon.

Préparation des échantillons

Principe général

Les opérations de préparation des échantillons sont réalisées avec une solution d'eau salée à 9 ‰. Une fraction du fragment d'ovaire en solution dans le conservateur est rincée 3 fois afin d'éliminer le maximum d'impuretés. Quatre sous-échantillons contenant chacun 100 à 200 ovocytes sont prélevés. Une fois les conditions d'acquisition étalonnées, les ovocytes sont placés sous la caméra de l'analyseur d'images. Le cliché est enregistré après avoir remué légèrement la boîte de Pétri afin d'éviter que les ovocytes ne s'agrègent. Lors du traitement, le « seuil de niveau de gris » est fixé entre 0 et 100, et pourra être ajusté en fonction de la qualité du sous-échantillonnage.

Principe avec filtration

Pour séparer les différentes catégories d'ovocytes, des filtrations successives sont réalisées. La méthode développée s'inspire du « washing process » décrite par Lowerre-Barbieri & Barbieri (1993) en utilisant des tamis. Ceux-ci sont composés d'une pièce de filtre à plancton en nylon collée sur une section de tube PVC de 2 cm de hauteur. Chaque tamis s'emboîte sur un flacon plastique (40 ml) afin de recueillir la fraction « passante » composée d'ovocytes dont le plus grand diamètre est inférieur à la maille. La séparation est facilitée en rinçant la fraction « restante » sur le filtre. Le tamis est ensuite retourné pour recueillir les plus gros ovocytes dans une boîte de Pétri. Les ovocytes étant ovoïdes, certains peuvent passer à travers un filtre même si dans une dimension leur diamètre est supérieur à la maille du tamis. Il convient alors de

prendre en compte ces éléments dans le lot des ovocytes de diamètre supérieur à la maille du tamis. Suivant un schéma identique, la fraction « passante » peut subir une nouvelle séparation en utilisant un

tamis de maillage plus fin. Pour chaque lot obtenu, une fraction dénombrable d'ovocytes est prélevée aléatoirement en vue d'être traitée.

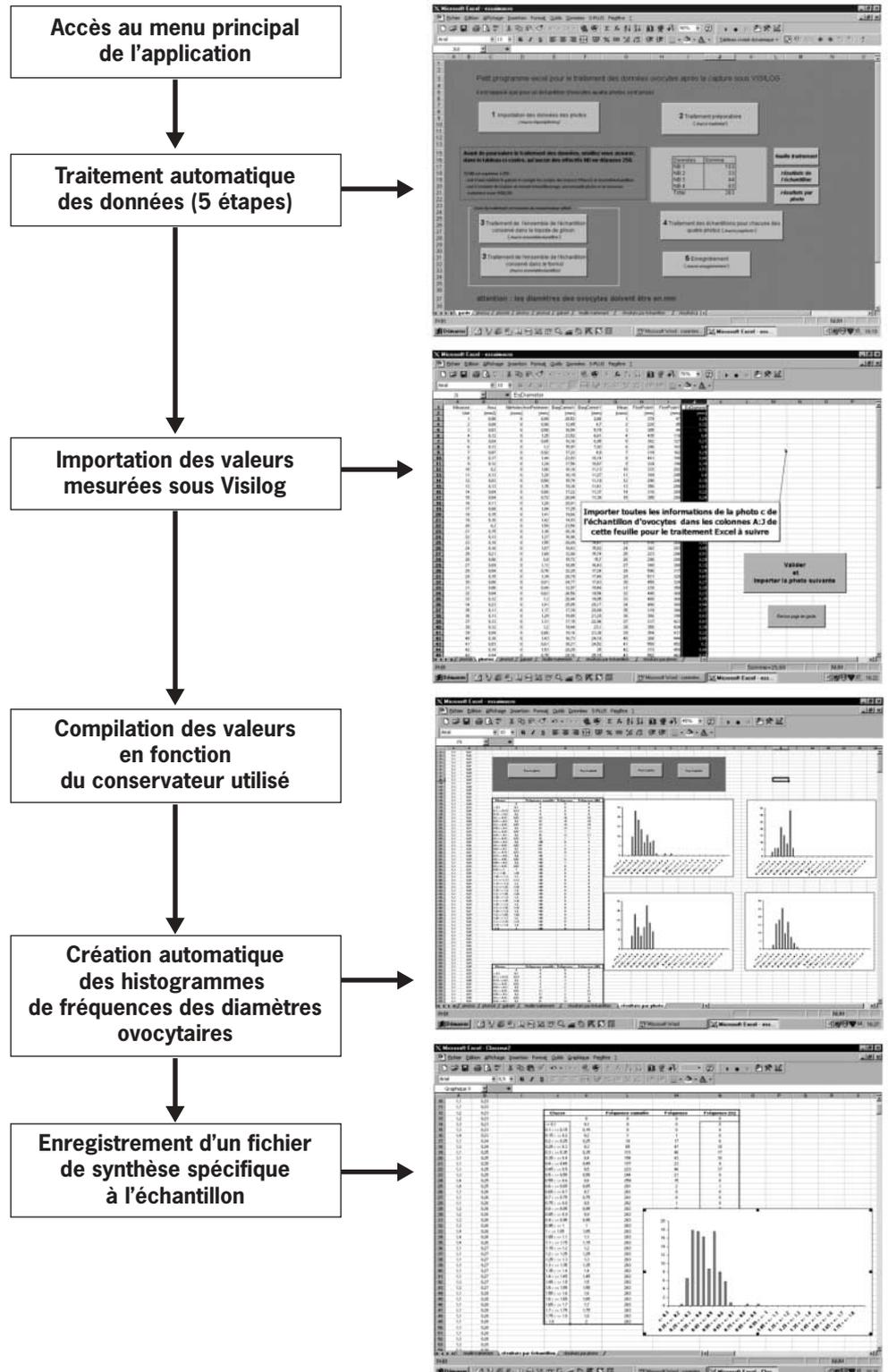


Figure 5 - Schéma des différentes étapes accomplies par l'opérateur au cours de l'exécution de l'application sous tableur.

Utilisation de colorant

Cette technique a été développée dans le but de mesurer le diamètre des ovocytes « frais » (n'ayant pas été congelés) et plus particulièrement ceux dont le diamètre est supérieur à 1 mm (soit en fin de maturation). À ce stade, le contenu cellulaire de ces ovocytes est clair, ce qui limite la détection des ovocytes par l'analyseur d'images (la gamme des « niveaux de gris » est étendue et introduit de nombreux artefacts). Après quelques essais, l'utilisation du carmin de cochenille² s'est avérée intéressante puisqu'il permet d'homogénéiser la teinte des ovocytes hydratés sans les altérer (fig. 6). Après avoir extrait les quatre lots de l'échantillon, les ovocytes sont colorés dans 2 ml de carmin dilué. La solution colorante est obtenue en diluant 3,5 g de carmin de cochenille en poudre dans 200 ml d'eau salée à 9 ‰. Passé un délai de 10 minutes, le colorant est éliminé en prenant soin de ne pas retirer d'ovocytes. Deux bains successifs à l'eau clarifient le milieu juste avant l'analyse.

Estimation de l'influence du liquide de Gilson sur les ovocytes

Le formol et le liquide de Gilson modifié, conservateurs couramment utilisés, ont des propriétés différentes. Le formol conserve la structure initiale du matériel biologique. Son utilisation s'accompagne d'une légère action sur la taille des ovocytes (Hunter, 1985). Le liquide de Gilson permet de dissocier les ovocytes initialement agrégés dans le conjonctif ovarien. Cette propriété s'accompagne d'un phénomène de rétraction ovocytaire mis en évidence chez d'autres espèces (Conand, 1975; Stéquert & Ramcharrun, 1995b; Mugnier, 1996). Régulièrement, le liquide de Gilson est renouvelé. Les échantillons sont stockés au minimum pendant six mois et agités pour optimiser l'action de ce conservateur.

Trois protocoles sont réalisés afin d'estimer le changement des diamètres des ovocytes sous l'action du liquide de Gilson modifié. Les cinétiques sont étudiées à partir de 3 paires de gonades matures « fraîches » contenant des ovocytes à différents stades de maturité. Le suivi des variations de diamètre n'a pas été réalisé individuellement (Stéquert & Ramcharrun, 1995b) mais sur un

lot d'ovocytes. La méthodologie employée utilise la filtration. Dès la dernière phase de rinçage, un cliché est pris pour l'échantillon témoin (J0).

Cas d'une gonade en ovulation (cas a)

Deux fractions d'ovocytes sont prélevées (environ 1 g) au centre de la plus grosse gonade d'un individu (échantillon R1010300, lmf : 192 cm, poids estimé : 86 kg). Grâce à une double filtration, les ovocytes de diamètre supérieur à 1 mm et ceux compris entre 0,5 et 1 mm sont étudiés séparément. L'action du liquide de Gilson sur les ovocytes a été suivie régulièrement pendant 30 jours.

Cas d'une gonade en ovulation (avec coloration; cas b)

La préparation est identique à la précédente; toutefois, les ovocytes de diamètre supérieur à 1 mm sont colorés au carmin de cochenille (échantillon R1010173, lmf : 198 cm, poids estimé : 95 kg). La cinétique de rétraction est établie sur 25 jours en fonction d'un nombre d'heures de mise en solution dans le liquide de Gilson.

Cas d'une gonade en fin de maturation (cas c)

Une seule filtration (tamis de 500 microns) sépare les ovocytes d'un diamètre inférieur à 0,5 mm (échantillons R1030180, lmf : 217 cm, poids estimé : 126 kg et R1030170, lmf : 206 cm, poids estimé : 107 kg). La rétraction ovocytaire de ce stade est suivie pendant 30 jours.

Taille de première maturité

Il est nécessaire de définir la taille à la première maturité pour connaître la contribution des poissons de petite taille à la production totale d'œufs. Deux techniques différentes ont été appliquées en fonction du sexe.

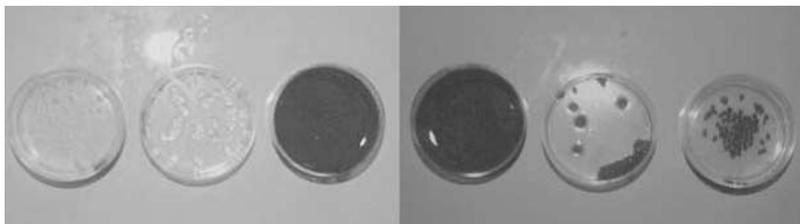


Figure 6 - Coloration des ovocytes hydratés au carmin de cochenille.

2. Le carmin est un colorant rouge naturel extrait de la cochenille (hyménoptère) qui entre dans la composition de différents médicaments, produit de beauté et produits alimentaires (E 120).

Femelles

Durant la saison de ponte, les femelles pour lesquelles l'indice IGH est supérieur ou égal à la valeur seuil de 1,375 (Hinton *et al.*, 1997) ainsi que les individus identifiés en phase d'atrésie sont considérés comme « matures ». La taille de première maturité (L_{50}) est la taille à laquelle 50 % des individus sont capables de se reproduire. L'ajustement d'une courbe à la distribution des fréquences de taille des femelles matures par classe de 5 cm (lmf) permet d'estimer cette valeur. Pour cette estimation, la fonction suivante a été ajustée aux données :

$$P_x = \frac{1}{1 + \exp(a - b * (lmf))}$$

avec P = pourcentage d'individus matures à une longueur x
lmf : longueur maxillaire-fourche
 $L_{50} = a/b$

Mâles

Dans le cas des mâles, seuls les résultats de l'analyse macroscopique des gonades sont pris en compte. Les individus « spermiantes » ou en atrésie dans la période comprise entre octobre et avril sont considérés comme matures. La définition de la taille de première maturité ainsi que la méthode d'estimation sont identiques à celles utilisées pour les femelles. Pour cette analyse, seuls ont été retenus les individus pour lesquels le stade de maturation a été validé.

Par ailleurs, la taille minimum à la première maturité, définie comme étant la taille du plus petit individu capable de se reproduire, est identifiée pour chacun des sexes.

Fécondité

Définitions

Les travaux d'Uchiyama & Shomura (1974), de Taylor & Murphy (1992) et ceux d'Arocha & Lee (1996) ont mis en évidence que l'espadon fait partie des espèces qui émettent leurs œufs, en lots successifs, au cours de la période de ponte.

Pour les géniteurs, la fécondité peut s'exprimer de trois façons (Bagenal, 1973 ; Cayré & Farrugio, 1996).

La fécondité absolue annuelle ou fécondité individuelle totale

Elle correspond à la quantité d'ovocytes fécondables émis lors de la saison de reproduction. Cette valeur dépend du nombre de ponte pendant cette période. Chez l'albacore, la fécondité annuelle excède la quantité d'ovocytes présents dans la gonade à n'importe quel moment de la saison de ponte (Schaefer, 1996). Il en est de même pour l'espadon.

La fécondité absolue par acte ponte (« batch fecundity ») ou fécondité partielle

La fécondité absolue par acte ponte est un indice clé usité pour caractériser les espèces à pontes asynchrones. Elle est définie comme étant « le nombre d'ovocytes dont les diamètres constituent la distribution modale la plus avancée au moment de l'acte de ponte » (Fontana & Le Guen, 1969). L'estimation doit avoir lieu « avant que l'émission ne commence » (ISRA-Orstom 1979 in Cayré & Farrugio, 1996). Préalablement au calcul de cette valeur, une estimation du nombre moyen d'ovocytes par gramme de gonade est réalisée. S'agissant d'individus capturés avant la ponte, la gonade contient des ovocytes à différents stades de développement. Les quantités moyennes d'ovocytes hydratés (H) et non hydratés (NH) sont déterminées à partir des relations suivantes :

$$H = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{m_i}$$

avec n, le nombre d'ovocytes hydratés par échantillon

m, le poids de l'échantillon en gramme

k, le nombre de prélèvements

et

$$NH = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{o_i}{m_i}$$

avec o, le nombre d'ovocytes non hydratés par échantillon

m, le poids de l'échantillon en gramme

k, le nombre de prélèvements.

Le ratio R, calculé entre les deux valeurs définies ci-dessus, permet de comparer le potentiel de reproduction entre les femelles.

Ainsi, la fécondité moyenne de ponte (F) est donc définie comme suit :

$$F = H * M$$

avec M, le poids de la paire d'ovaires sans leur enveloppe gonadique.

La fécondité relative

La fécondité relative est le nombre d'ovocytes hydratés rapporté au poids du corps entier ou à une taille de référence de l'individu :

$$Fr = \frac{F}{A}$$

où A correspond à une valeur de poids ou une valeur de taille.

Estimation du nombre d'ovocytes

Pour réaliser le comptage individuel des ovocytes de poissons, deux méthodes sont couramment employées (Hunter *et al.*, 1985). La technique volumétrique consiste à séparer les ovocytes hydratés grâce à leur différence de densité dans une solution saline. La méthode gravimétrique retenue consiste à peser et comptabiliser les ovocytes hydratés d'un lot de 30 échantillons prélevés aléatoirement dans l'une des gonades. Ce choix est justifié par le fait que les deux premières paires de gonades étudiées comptaient un ovaire inexploitable. Les lots sont compris entre 0,15 et 0,25 gramme pour limiter la dispersion de l'échantillonnage. Le manipulateur procède à l'échantillonnage des ovocytes par « carottage » aléatoire dans toute la gonade (sans oublier d'éliminer le tissu conjonctif en excès sur l'enveloppe gonadique) (fig. 7).



Figure 7 - Technique de prélèvement des ovocytes dans l'ovaire avec la sonde cannelée.

Le matériel utilisé pour cette opération se compose de boîtes de Pétri (350 x 10 mm), d'une sonde cannelée et d'une aiguille lancéolée (fig. 8). Chaque boîte de Pétri est tarée (balance électronique Precisa, type XB 320 M, précise à 0,01 g) et numérotée. Les ovocytes y sont soigneusement déposés avec l'aiguille lancéolée et pesés avec précision³. Les ovocytes subissent ensuite une double filtration (tamis de 500 µm et 1 mm) et sont colorés au carmin de coch-

nille. Le seuil de « niveau de gris » utilisé sous le logiciel Visilog est fixé à [0 ; 130].

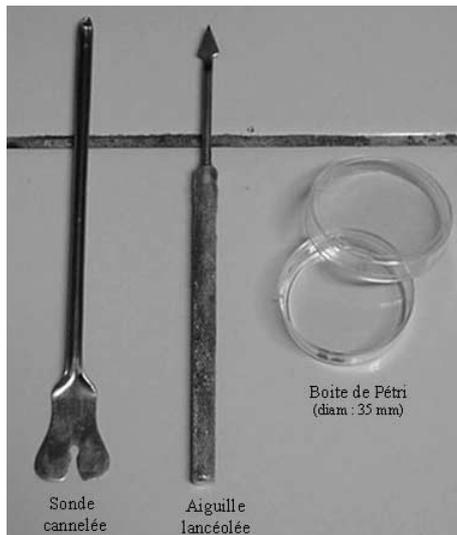


Figure 8 - Matériel utilisé pour l'échantillonnage de l'ovaire.

Estimation de la fréquence des pontes

L'estimation de la fréquence de ponte est adaptée de la méthodologie utilisée par Arocha & Lee (1996) sur l'espadon. Pour chaque mois de la saison de ponte, les effectifs de femelles sexuellement actives (E_s) et de femelles prêtes à pondre (E_p) sont calculés en utilisant l'indice IGH d'Hinton *et al.*, (1997) d'une part et les observations macroscopiques d'autre part (stade 5). L'ensemble des données collectées lors du programme ont été agrégées.

La moyenne des proportions mensuelles de femelles prêtes à pondre permet d'établir le nombre moyen de jour séparant deux pontes successives (N_j). Les conditions suivantes sont retenues : l'ovulation intervient en quelques heures, l'échantillonnage des femelles sexuellement actives est représentatif de la population, il n'existe pas de variabilité au sein des années considérées. Ainsi, la fréquence de ponte (P) est estimée suivant l'équation :

$$P = \frac{1}{100 * m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{E_{p_i}}{E_{s_i}} * 100 \right)$$

avec $P = 1/N_j$

et m, la durée de la saison de ponte en mois.

Le nombre théorique total de pontes d'un individu est estimé en multipliant la fréquence (P) par la durée en jours de la saison de ponte.

3. Lors du premier prélèvement, si le poids total de l'échantillon est supérieure à 0,25 g, la totalité des ovocytes est déposée dans la boîte de Pétri et l'excédent est retiré aléatoirement. À l'inverse, si la masse totale du lot est inférieure à 0,15 g, un deuxième prélèvement est réalisé exactement au même endroit et la totalité des ovocytes est déposée dans la boîte de Pétri. L'éventuel excédent est de la même manière éliminé.

Résultats

Échantillonnage

Le nombre total d'espadons échantillonnés au cours de cette étude correspond à environ 1,65 % du nombre total d'individus débarqués par la flottille sur cette période.

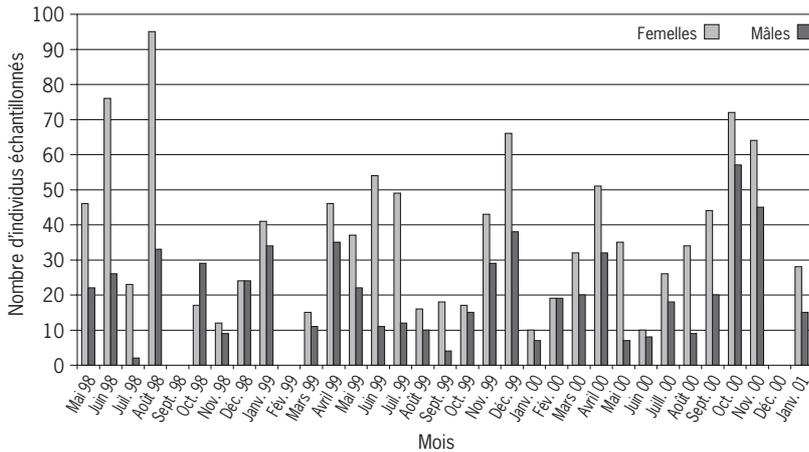


Figure 9 - Répartition mensuelle du nombre d'individus échantillonnés entre le 1^{er} mai 1998 et 31 janvier 2001.

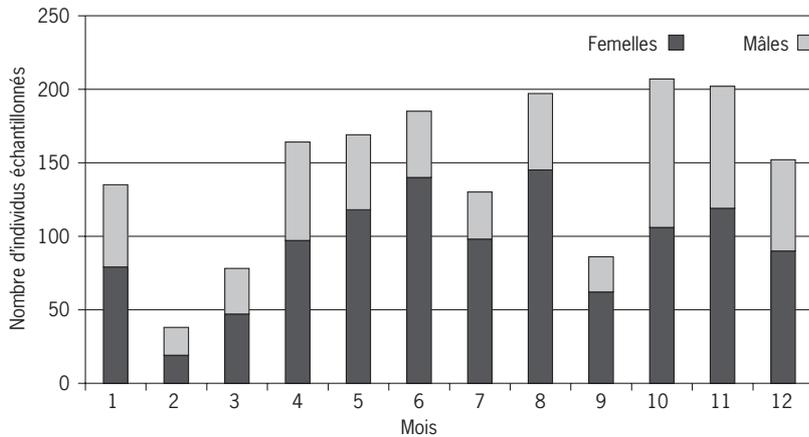


Figure 10 - Nombres de femelles et de mâles échantillonnés par mois (effectif total = 1 727).

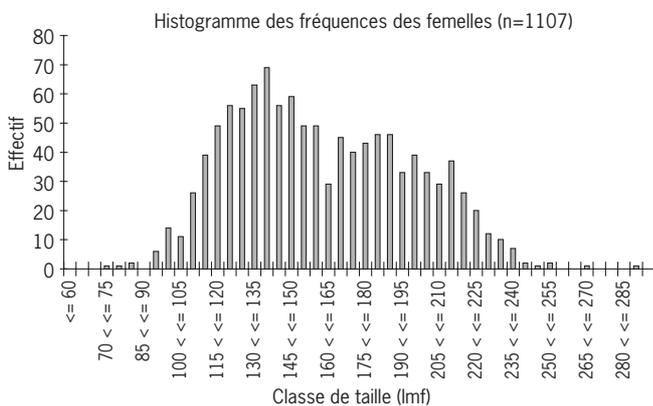


Figure 11 - Distribution des fréquences de taille des individus femelles dont les gonades ont été prélevées (effectif total = 1 107).

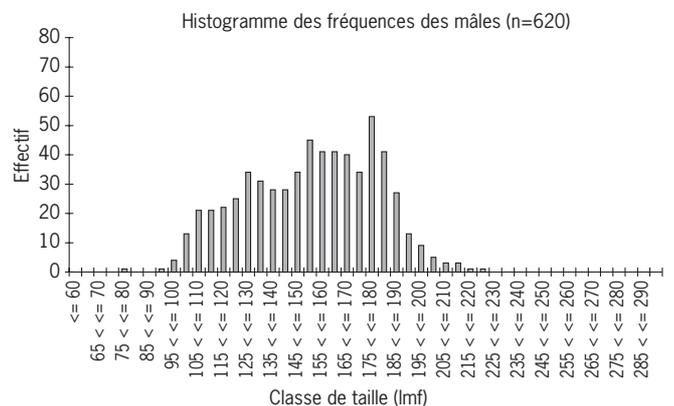


Figure 12 - Distribution des fréquences de taille (lmf) des individus mâles dont les gonades ont été prélevées (effectif total = 620).

Le nombre total d'espadons capturés est estimé en considérant le poids moyen d'un espadon (50 kg en poids vif) et les captures enregistrées sur la même période.

La répartition mensuelle du nombre d'individus échantillonnés est présentée à la figure 9. La majorité de la période a été couverte, à l'exception des mois de septembre 1998, février 1999 et décembre 2000.

La distribution mensuelle du nombre d'individus échantillonnés, sans prise en compte de l'année, met en évidence un effectif plus faible des échantillons en février et mars (fig. 10). À cette période, les dépressions tropicales fréquentes immobilisent les navires au port. Globalement, l'échantillonnage est assez bien reparti avec un effectif mensuel moyen voisin de 145 individus.

Les distributions de taille (lmf) des individus échantillonnés sont présentées aux figures 11 et 12.

Les tailles des femelles se répartissent entre 75 et 289 cm (lmf), la distribution des fréquences de taille laisse apparaître trois modes centrés autour de 137,5, 182,5 et 212,5 centimètres. La moyenne des tailles (lmf) est de $160,8 \pm 2,1$ centimètres.

Trois modes apparaissent dans la distribution des fréquences de taille des mâles qui s'étend de 79 à 221 cm, centrés autour de 127,5, 152,5 et 177,5 centimètres. La taille (lmf) moyenne des mâles échantillonnés est de $154,0 \text{ cm} \pm 2,0$ centimètres.

Aspect macroscopique des gonades au cours du cycle sexuel

L'étude de l'aspect macroscopique externe des gonades d'espadon a permis d'établir, pour chacun des sexes, une échelle de

maturité spécifique à cette espèce dérivée de celles mises en place par Stéquert & Ramcharrun (1995b) et Cayré & Farrugio (1996) pour le listao (*Katsuwonus pelamis*).

Tableau 2 - Caractérisation des différents stades de maturation identifiés pour les femelles.

Stades		Gonades femelles
0	X	Gonades en développement : les gonades se présentent sous forme de filaments et ne sont pas identifiables à l'œil nu
1		Immature : le sexe est identifiable à l'œil nu. Les ovaires sont de forme ronde et cylindrique, de consistance ferme et de couleur rose
2		Début de maturation : le sexe est identifiable. Les ovaires sont de consistance ferme et de couleur blanchâtre. Le lumen est visible après section, les ovocytes ne sont pas visibles
3		Maturation : la taille de l'ovaire est plus importante, la vascularisation plus prononcée et les ovocytes visibles
4		Fin de maturation : la gonade a pris une extension importante dans la cavité abdominale, elle est turgescente, de consistance molle et très vascularisée. Les ovocytes bien individualisés sont de couleur crème
5		Ovulation : les ovaires sont très vascularisés, translucides. La fraction des ovocytes hydratés est bien visible en transparence et leur émission est imminente. Les ovules s'écoulent après incision de la paroi de l'ovaire
6		Post-ponte ou atrésie : l'aspect est fonction du temps écoulé depuis la dernière ponte et de la période dans la saison. Les ovaires sont flasques et creux, de couleur rougeâtre à grisâtre. Les ovaires reviennent progressivement à un aspect de stade 3 pour débiter un nouveau cycle de maturation ou regressent pour entamer un repos sexuel

Les critères retenus pour distinguer les différents stades de développement des gonades sont la taille, la consistance, la texture, la vascularisation et l'épaisseur de la paroi de la gonade. La différence de grosseur entre les deux gonades est systématiquement observée. DeMartini *et al.* (2000) ont estimé que l'ovaire droit était 28 % plus lourd que le gauche. Les caractéristiques des différents stades de maturation identifiés pour les deux sexes sont décrites dans les tableaux 2 et 3. Cette échelle comprend 7 stades pour les femelles et 5 pour les mâles. Le stade 0 correspond à des individus dont le sexe n'est pas identifiable car les gonades se présentent sous la forme d'un fin ruban. Les plus petits spécimens observés correspondant au stade 0 ont été observés dans des estomacs de prédateurs comme la dorade coryphène.

Évolution de l'indice biologique

L'indice proposé par Hinton *et al.* (1997) a été validé à partir de l'analyse des coupes histologiques. En effet, l'étude histologique constitue la méthode la plus fiable pour déterminer l'état précis de maturation des gonades d'un individu. Dans le cadre de l'étude, ce dernier indice (IGH) a donc été choisi pour caractériser l'état de maturité des femelles. Celles-ci sont sexuellement actives ou plus précisément en stades de fin de maturation et d'ovulation (stades 4 et 5 de l'échelle adoptée) lorsque l'indice gonadique (IGH) est supérieur ou égal à 1,375.

Le tableau 4 montre clairement que, pour les quelques individus dont le stade est supérieur à 3, la valeur de l'indice est bien supérieure à 1,375. En phase d'atrésie, l'indice peut être inférieur à la valeur critique à la fin de la saison de reproduction.

Tableau 3 - Caractérisation des différents stades de maturation identifiés pour les mâles.

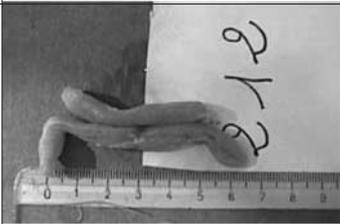
Stades		Gonades mâles
0	X	Gonades en développement : les gonades se présentent sous forme de filaments et ne sont pas identifiables à l'œil nu
1		Début de maturation : le sexe est identifiable, les gonades de couleur rosée à rouge sont minces et effilées
2		Maturation : le développement en taille s'accroît, la vascularisation est plus prononcée
3		Fin de maturation : les testicules sont de couleur blanche à rosée, ils sont pleinement développés ; après section le sperme s'écoule toujours
4		Post-maturation ou atrésie : les testicules sont très vascularisés de couleur rouges à blanchâtres

Tableau 4 - Valeur de l'indice proposé par Hinton *et al.* (1997) pour les individus dont le stade a été déterminé après analyse des coupes histologiques.

Échantillons	Stades de maturation déterminés d'après les coupes histologiques	IGH Indice d'Hinton
R9080298	3	0,959
R9090081	3	0,962
R9090062	3	0,985
R9090161	3	1,144
R8060158	3	1,216
R9042843	3	1,318
R9040026	3	1,367
R9100292	4	1,511
R9110019	4/pré-hydratation	1,567
R9110007	4/pré-hydratation	1,577
R9100068	5	1,647
R9100206	5	1,655
R9100188	5	1,659
R9042812	5	1,690
R9110158	5	1,713
R9100207	5	1,787
R9120287	5	1,800
R9040136	6	1,626
R9040257	6	1,316

Les pourcentages mensuels de femelles sexuellement actives identifiées durant ces 32 mois d'étude ont été déterminés à l'aide de l'indice défini par Hinton *et al.* (1997) (fig. 13). La saison de ponte dans la zone prospectée a lieu principalement entre le mois octobre et le mois d'avril, ce qui correspond à l'été austral. Toutefois, quelques individus arrivés à maturité sexuelle sont encore capturés en mai et juin. Pour les mois de novembre 1998, mars 1999 et février 2000, les pourcentages de femelles actives sont supérieurs à 50 %. Aucun spécimen sexuellement actif n'a été capturé pendant les mois de juillet, août et septembre. Pour les mâles, la représentation de l'évolution moyenne mensuelle de l'IGS semble indiquer des valeurs minimales voisines de 0,1 de juillet à septembre, ce qui correspond au repos sexuel mis en évidence chez les femelles (fig. 14).

Aspect microscopique des ovaires au cours de la gamétogenèse

Les prélèvements des ovaires au cours de l'année ont permis d'observer les caractéristiques majeures des phases du développement ovocytaire basées sur leur description morphofonctionnelle.

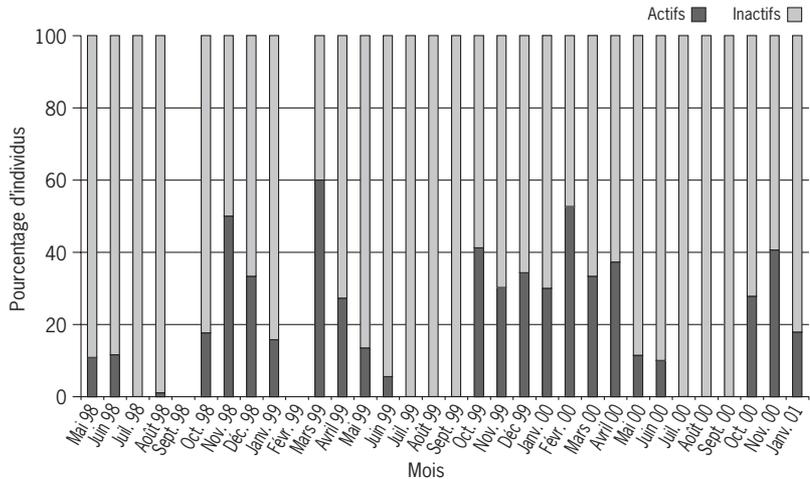


Figure 13 - Évolution mensuelle de l'activité sexuelle des femelles au cours de la période d'étude.

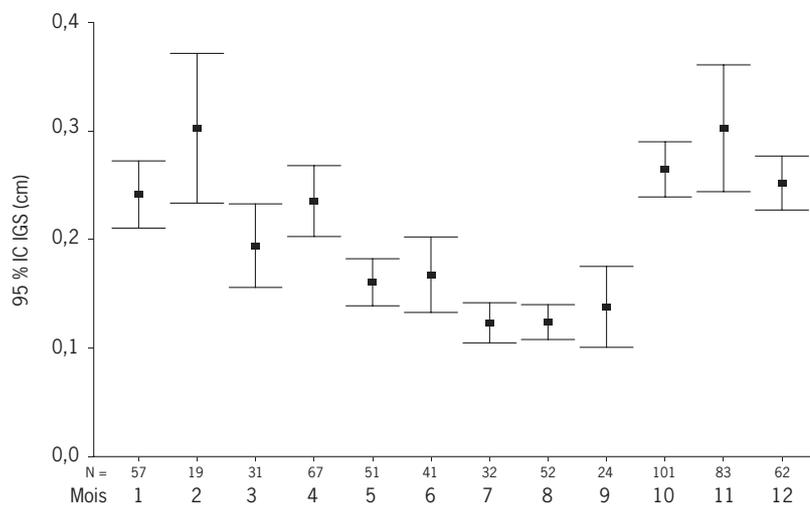


Figure 14 - Évolution des valeurs moyennes mensuelles de l'IGS pendant la période d'échantillonnage.

Multiplication goniale et prévitellogenèse

La première étape du développement des gamètes femelles est la prolifération des gonies par mitoses successives à partir des gonies primaires. Les ovogonies sont des cellules dont le noyau est volumineux et dont le cytoplasme est peu développé. Elles se présentent sous une forme ovoïde et parfois polyédrique au sein de petits amas germinatifs insérés dans le tissu somatique (fig. 15). Les gonies à la périphérie des amas germinatifs entrent en méiose et deviennent de ce fait des ovocytes. Ceux-ci se bloquent en prophase de première division (stade diplo-tène) caractérisée par un noyau peu dense présentant des amas de chromatine répartis dans l'ensemble du volume nucléaire. La seconde phase de développement correspond à la prévitellogenèse. En termes morphologiques, le noyau commence à présenter des nucléoles tandis que le rapport

nucléocytoplasmique se réduit du fait de l'accroissement du cytoplasme ovocytaire. Celui-ci devient très dense et chromophile (fixe bien le bleu de toluidine). L'accroissement du cytoplasme durant la prévitellogenèse est dû à l'accumulation de réserves d'origine endosynthétique et composé principalement de protéines et d'ARN. En fin de prévitellogenèse, le rapport nucléocytoplasmique est de l'ordre de 0,7 à 0,8 et le noyau des ovocytes présente de nombreux nucléoles périphériques (fig. 16). Les stades de développement décrits ci-dessus sont observés quelle que soit la période de l'année. De plus, l'observation simultanée d'ovocytes de taille croissante en prévitellogenèse rend compte de la continuité des phases initiales de l'ovogenèse, comme c'est le cas chez d'autres espèces de poissons.

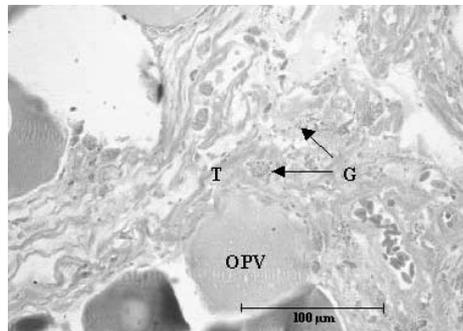


Figure 15 - Ovaire de femelle en repos sexuel (ovogonies (G) réparties dans le tissu mésodermique (T), OPV : ovocyte en prévitellogenèse).

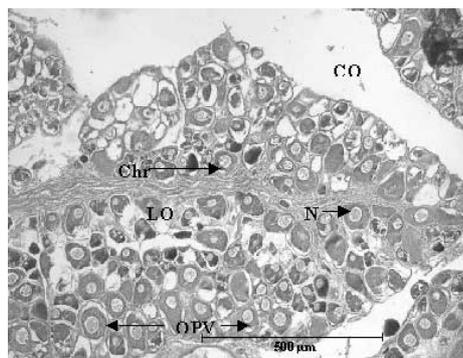


Figure 16 - Ovaire de femelle en période de repos sexuel (CO : cavité ovarienne, Chr : chromatine en amas, LO : lamelle ovigère, OPV : ovocytes en prévitellogenèse, N : noyau).

Vitellogenèse

L'espadon présente une phase de grand accroissement ovocytaire périodique appelée vitellogenèse. Durant cette phase, les ovocytes sont toujours bloqués en prophase de méiose, ils sont individuellement enveloppés dans une double couche cellulaire composée de la thèque et de la granulosa avec laquelle ils sont en contact par l'intermédiaire de microvillosités. Au début de la

vitellogenèse, les ovocytes présentent une couronne de vésicules vitellines d'aspect vacuolaire autour du noyau (fig. 17) qui seront progressivement repoussées à la périphérie lors de la constitution du vitellus. Ces vésicules vitellines sont à l'origine des alvéoles corticaux.

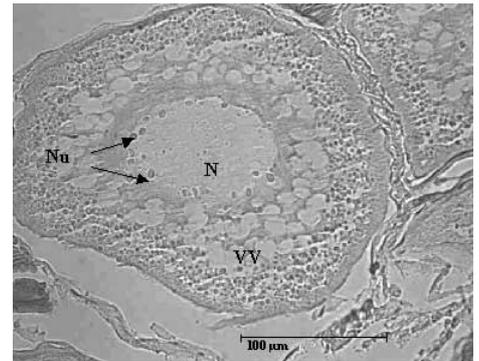


Figure 17 - Coupe d'ovaire en début de vitellogenèse ; ovocyte (V) : vésicules vitellines, N : noyau, Nu : nucléole.

L'événement majeur de la vitellogenèse est l'accroissement important des ovocytes par l'incorporation massive de globules vitellins lipoprotéiques. Ces globules, d'origine majoritairement exogène, sont constitués d'un précurseur du vitellus synthétisé par les hépatocytes, véhiculé par le sang et appelé vitellogénine. La vitellogénine est captée par des récepteurs spécifiques et internalisée par endocytose avant d'être stockée dans le cytoplasme (Mommensen & Walsh, 1998). Lors de cette phase, le noyau est central et présente toujours des amas de chromatine et de nombreux nucléoles à la périphérie. Au cours de la vitellogenèse, une couche anhiste ou *zona radiata* se développe progressivement entre la membrane plasmique de l'ovocyte et la granulosa. L'observation d'ovaires ne présentant pas d'ovocytes en vitellogenèse pendant une partie de l'année rend compte de la discontinuité du phénomène (fig. 18).

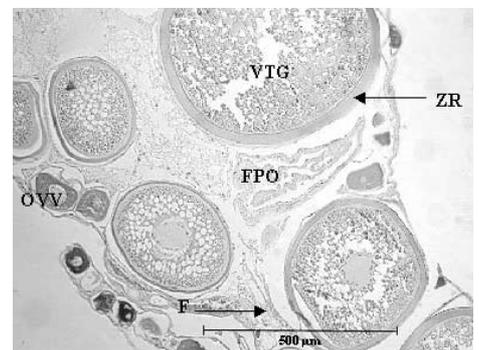


Figure 18 - Ovaire en vitellogenèse. Présence d'ovocytes vitellogénétiques à différents stades de développement (OVV : ovocytes au stade vésicule vitelline ou début de vitellogenèse, VTG : ovocytes présentant des globules vitellins, F : enveloppe folliculaire, ZR : zona radiata, FPO : follicule post-ovulatoire).

Maturation et ovulation

Lorsque la vitellogénèse est achevée, l'ovocyte subit des modifications importantes. Le noyau migre vers la périphérie de l'ovocyte et progressivement ne présente plus de nucléoles. Le vitellus perd son aspect d'amas de globules homogènes pour prendre un aspect plus différencié. Il présente alors des amas denses de taille variable (protéines) parsemés de gouttes vides (lipides dissous lors du traitement histologique) (fig. 19).

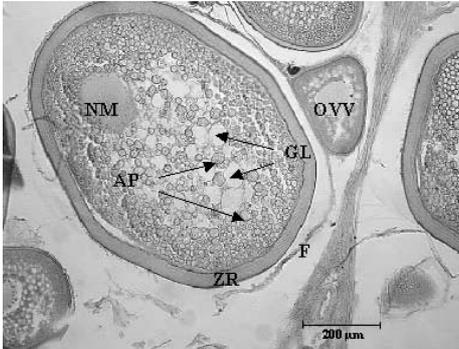


Figure 19 - Début de maturation (NM : Noyau en migration, GL : gouttes lipidiques, AP : amas protéiques, F : follicule, ZR : zona radiata, OVV : Ovocyte au stade vésicules vitellines).

Dans une étape ultérieure, les gouttes lipidiques entrent en coalescence tandis que la flaque protéique se développe en perdant sa densité. Ces modifications sont dues à une hydratation très importante de l'ovocyte permettant une dissolution des globules vitellins et une lyse des lipoprotéines, suivies d'un regroupement des lipides par interaction hydrophobe. Le diamètre ovocyttaire s'accroît jusqu'à 1 200 µm alors que la structure du follicule est intégralement conservée (fig. 20).

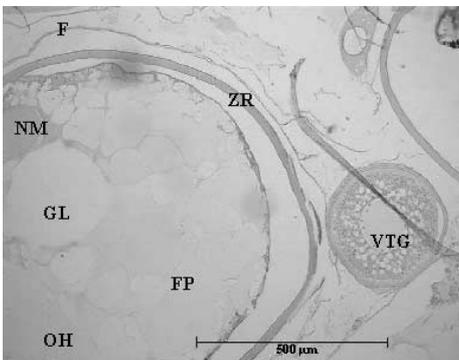


Figure 20 - Ovaire en cours d'hydratation (OH : ovocyte en cours d'hydratation, NM : noyau, GL : gouttelette lipidique, VTG : ovocyte en vitellogénèse, ZR : Zona radiata, F : follicule ovocyttaire, FP : flaques protéiques).

Au stade ultime, le noyau de l'ovocyte disparaît par rupture de sa membrane et individualisation des chromosomes lors de la reprise de la méiose. Les couches folliculaires

se déchirent sous l'effet de la tension créée par l'hydratation et libèrent l'ovule.

Post-ponte et atresie

En pleine période de ponte, la présence de follicules post-ovulatoires au sein d'ovocytes en vitellogénèse avancée est la preuve d'une ponte récente (fig. 18).

À la fin de la période de reproduction, une partie des ovocytes vitellogénétiques ne sont pas arrivés à terme et n'ont pas été ovulés. Ces ovocytes entrent en atresie. Leur cytoplasme présente un aspect vacuolaire (fig. 21) tandis que la zona radiata se délite (fig. 22). Les cellules folliculaires somatiques de l'ovaire se regroupent en une sorte de kyste et résorbent progressivement l'ovocyte (fig. 23).

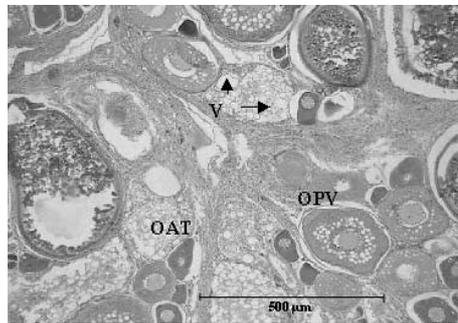


Figure 21 - Coupe d'ovaire atresique (OAT : ovocytes en atresie présentant de nombreuses vacuoles cytoplasmiques (V); OPV : ovocytes en prévitellogénèse).

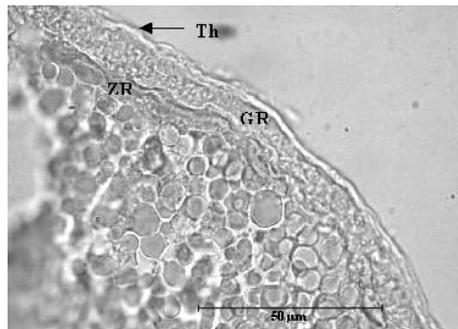


Figure 22 - Coupe d'ovaire atresique : discontinuité de la zona radiata (ZR) entre l'ovocyte et les couches cellulaires du follicule; GR : granulosa, Th : thèque.

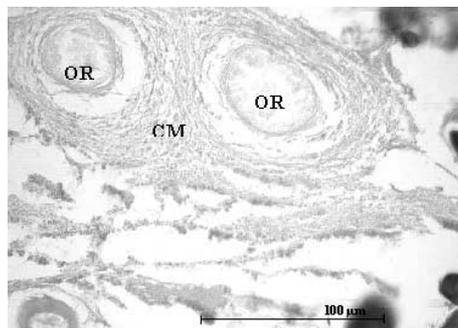


Figure 23 - Coupe d'ovaire en régression. Enkystement des ovocytes en cours de résorption (OR) par les cellules mésodermiques (CM).

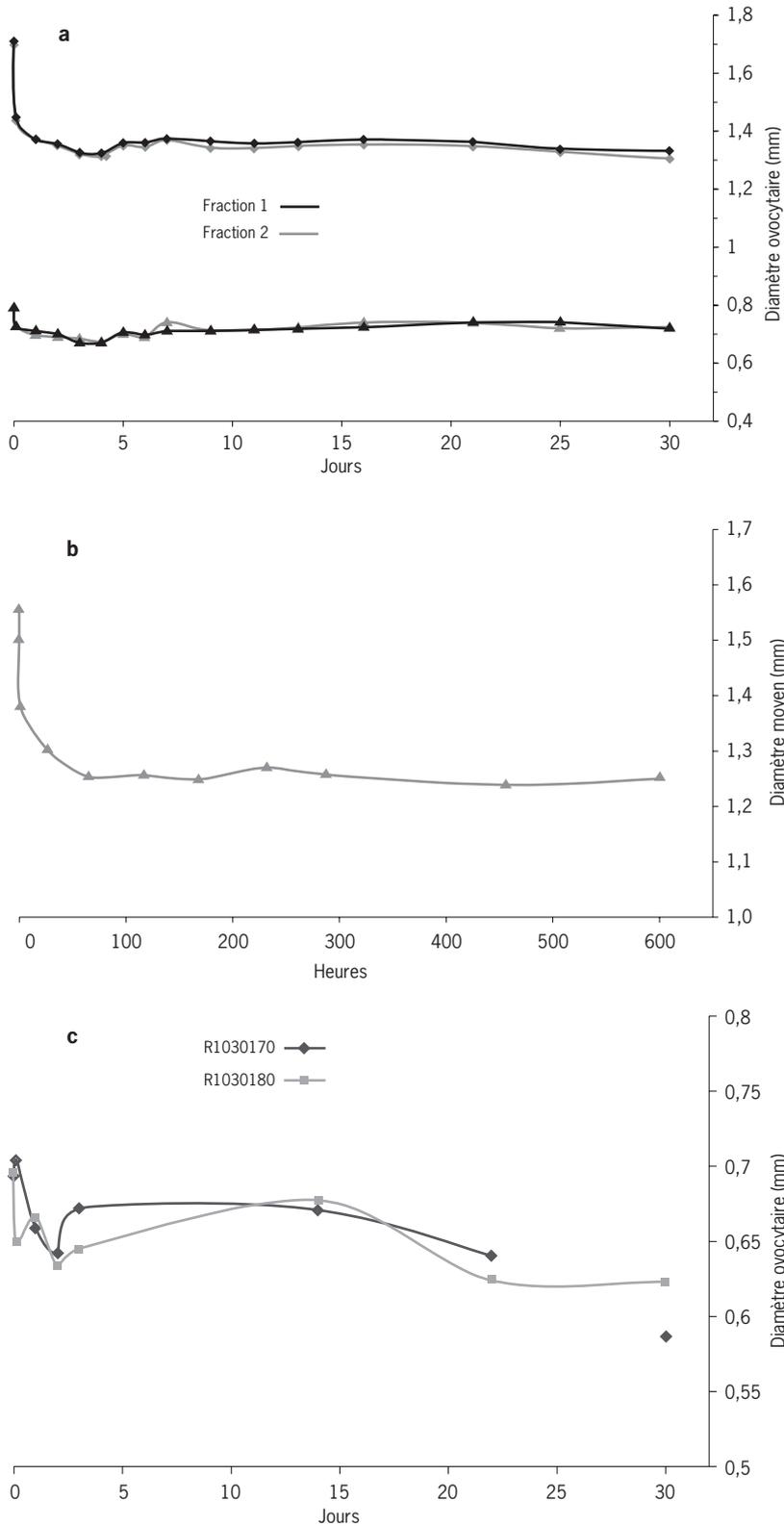


Figure 24 - Cinétiques de rétraction du diamètre moyen ovocytaire dans le liquide de Gilson; cas d'une gonade en ovulation (a), d'une gonade en ovulation avec coloration au carmin de cochenille (b) et d'une gonade en fin de maturation (c).

Distribution des fréquences de taille des ovocytes

Action du liquide de Gilson

Après coloration au carmin de cochenille, le diamètre moyen du lot d'ovocytes hydratés est sensiblement égal au diamètre moyen du lot témoin (fig. 24b). Dans tous les cas de figure, le rétrécissement dû au liquide de Gilson modifié est le plus important dès les premières heures. À partir du quatrième jour, l'action du conservateur se stabilise (fig. 24). Au bout de 30 jours, les pourcentages moyens de rétraction sont respectivement de 20 % et 10 % pour les lots d'ovocytes dont le diamètre moyen est supérieur à 1 mm et ceux compris entre 0,5 et 1 millimètre. Sur la figure 24 c, la brusque diminution du diamètre moyen en fin de maturation pour l'échantillon R1030170 est consécutive à l'assèchement des ovocytes.

Dans le but de caractériser le phénomène de rétraction, deux régressions linéaires ont été déterminées pour les deux lots distincts d'ovocytes (fig. 25). Après un séjour d'au moins 25 jours dans le conservateur, les diamètres initiaux ou « réels frais » se calculent à partir des équations suivantes :

- pour les ovocytes d'un diamètre supérieur à 1 mm :

$$d_r = 2,0127 * d_g - 951,74$$

(n = 3 et r² = 0,933)

- pour des ovocytes compris entre 0,5 et 1 mm :

$$d_r = 1,0528 * d_g + 30,527$$

(n = 4 et r² = 0,979)

avec d_r , le diamètre « réel frais » de l'ovocyte (en microns)
 d_g , le diamètre de l'ovocyte placé dans le conservateur (en microns).

Ces deux relations sont systématiquement appliquées lors des mesures des diamètres ovocytaires. Dans la suite de l'étude, les histogrammes de distribution de diamètre présentent les valeurs estimées du diamètre « réel frais ».

Caractérisation des stades de maturation

Pour vérifier que les stades macroscopiques identifiés correspondent bien à une croissance progressive des ovocytes, les distributions de fréquence de taille ovocytaire ont été suivies tout au long du cycle annuel. Les caractéristiques des individus étudiés figurent dans le tableau 5.

Tableau 5 - Les caractéristiques biologiques des individus et gonades étudiés.

n° échantillon	lmf (cm)	Poids individuel (kg)*	Poids des gonades (g)
R9040257	210	114	982
R9042843	186	78	1 014
R9040021	183	74	685
R9042812	191	85	5 900
R9100292	222	135	2 980
R9110007	190	84	3 280
R9100206	215	122	6 030
R9100188	210	114	5 900
R9100068	197	93	5 000
R9042860	215	122	6 300
R9100207	220	131	12 620
R9110158	226	143	8 940
R9120287	184	76	10 640
R9110019	210	114	3 660

*Le poids vif théorique est calculé à partir d'une relation entre le poids (kg) et la taille (lmf, cm) des espadons (poids = 1,33 x 5,8641 x 10⁶ x lmf^{3,0849}).

Sept stades de maturation des ovaires ont été identifiés. Le caractère ténu du tissu gonadique des individus en tout début de maturation (stade inférieur au stade 3) n'a pas permis la dissociation des ovocytes. Parmi les 14 individus étudiés, 4 ont été retenus pour présenter les différents indices du lot d'ovocytes le plus avancé pour les stades 3 à 6 (tab. 5). L'identification du groupe modal le plus avancé au sein des distributions des diamètres ovocytaires permet d'identifier les différents stades de maturation et de les caractériser. Afin de pouvoir comparer les distributions, la représentation des effectifs en pourcentage est privilégiée, les effectifs des différents échantillons n'étant pas homogènes (minimum de 415 ovocytes pour l'échantillon R9110019 et maximum de 847 ovocytes pour l'échantillon R9100188). Pour établir ces histo-

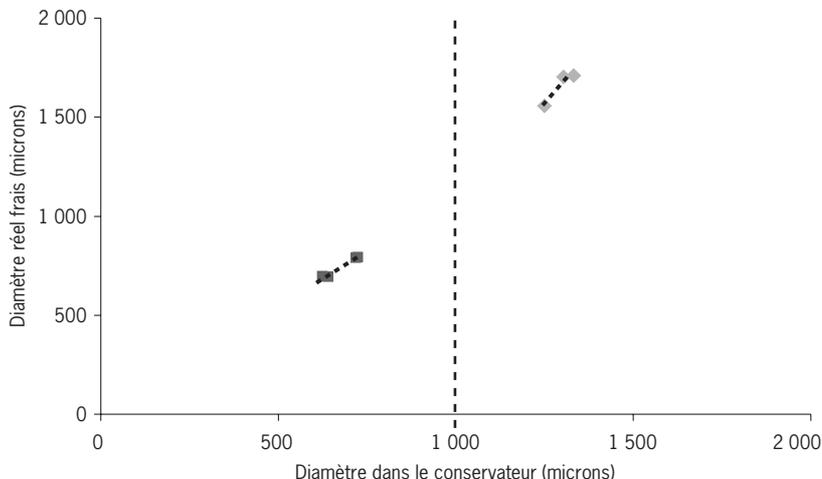


Figure 25 - Relations entre le diamètre « réel frais » d'un ovocyte et son diamètre après conservation dans le liquide de Gilson modifié pendant 25 jours.

grammes, les mesures ont été regroupées par classes de 0,05 mm (fig. 26).

La distribution est unimodale pour les stades de début de maturation (stade 3) et d'atrésie (stade 6). Elle est plurimodale pour les stades de fin de maturation (stade 4) et d'ovulation (stade 5).

Pour les individus de stade 3, l'étendue de la distribution est faible, les ovocytes ont une taille homogène comprise entre 0,2 et 0,5 millimètre. La vitellogénèse va débiter. À ce stade, il s'agit soit de femelles qui ne sont jamais reproduites, soit d'individus qui sont en état de repos sexuel. Les ovocytes de réserve d'une taille inférieure n'ont pu être dissociés et ont été éliminés lors de la préparation des échantillons.

Au stade 4, soit en fin de maturation, les tailles des ovocytes varient entre 0,2 et 0,8 millimètre. L'étalement de la distribution traduit une croissance continue et asynchrone des ovocytes dès le début de la vitellogénèse.

Au stade de l'ovulation, on observe un déplacement de la distribution vers la droite et trois modes bien distincts qui correspondent respectivement aux ovocytes les moins développés (<0,7 mm), en fin de vitellogénèse (entre 0,7 et 0,9 mm) et aux ovocytes en phase d'hydratation qui vont incessamment être émis. Les tailles de ce dernier lot bien dissocié s'étalent entre 1,2 et 1,55 millimètre. Le lot intermédiaire sera recruté pour la prochaine ponte.

En fin de saison de ponte, les individus en atrésie (stade 6) présentent de nouveau une distribution réduite centrée autour de 0,3 millimètre. C'est le cas typique, ren-

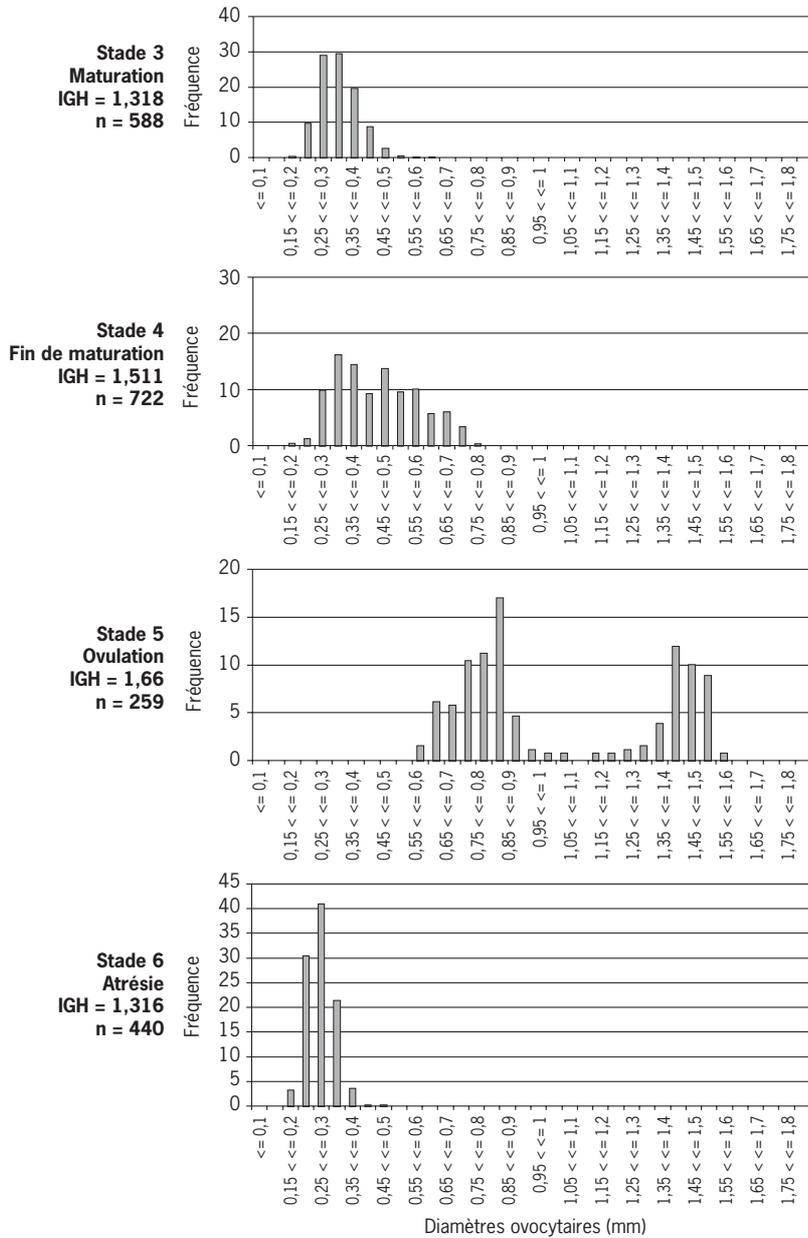


Figure 26 - Distribution de fréquences des diamètres « réels frais » correspondant aux différents stades macroscopiques de maturité identifiés. Pour chaque stade sont mentionnés : le nombre d'échantillons (n), la valeur de l'IGH.

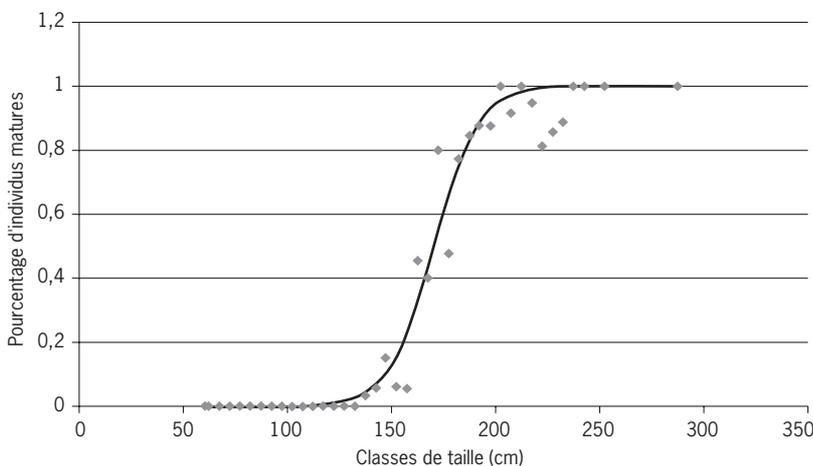


Figure 27 - Proportion de femelles matures par classe de taille de 5 cm (l_{mf}) pour les individus capturés durant la période de ponte (entre octobre et avril).

contré en mai, d'une femelle qui, ayant émis ses derniers œufs depuis longtemps, entre en repos sexuel. Par contre, dans le cas de post-ponte récente, plusieurs modes de petites tailles peuvent être observés. La distinction entre le stade 3 et le stade 6 est validée d'après la date de capture.

La figure 26 présente les distributions de fréquences de taille pour les quatre derniers stades de maturation.

Taille de première maturité sexuelle

Femelles

La taille de première maturité est définie à partir des individus capturés pendant la période de plus forte activité sexuelle, entre octobre et avril. Les effectifs des classes de taille de 5 cm varient entre 1 et 31 individus, les plus petits effectifs sont observés aux deux extrémités de la distribution des tailles (individus < 85 cm et > 240 cm). Les caractéristiques de la courbe ajustée (fig. 27) sont les suivantes :

$$\% \text{ mature} = \frac{1}{1 + \exp(a - b * (l_{mf}))}$$

avec :

a = 16,2506

b = 0,0953421

r² = 0,998

effectif total = 553.

Pour les femelles la L₅₀ (l_{mf}) prend pour valeur 170,4 ± 2,1 cm (95 % ic). Par ailleurs, la plus petite femelle échantillonnée au stade 5 durant cette étude avait une taille de 127 cm (l_{mf}) pour un poids de gonades de 1920 grammes.

Mâles

Les effectifs des classes de taille de 5 cm varient entre 1 et 27 individus à partir d'un effectif de 282 individus (sous-échantillons de la totalité des individus observés pendant l'étude) d'une taille comprise entre 79 et 221 cm (l_{mf}). Les caractéristiques de la courbe ajustée (fig. 28) sont les suivantes :

$$\% \text{ mature} = \frac{1}{1 + \exp(a - b * (l_{mf}))}$$

avec :

a = 10,17580

b = 0,0848839

r² = 0,994

effectif total = 282.

Pour les mâles, la L_{50} prend pour valeur $119,8 \pm 1,9$ cm (95 % ic). Par ailleurs, le plus petit individu spermiant identifié durant cette étude avait une taille de 101 cm (lmf) pour un poids de gonades de 5 grammes.

Estimation de la fécondité

Comptages intermédiaires

Les 7 femelles échantillonnées pour l'étude de la fécondité ont été pêchées entre décembre 2000 et mars 2001. Les quantités moyennes d'ovocytes hydratés (N) et non hydratés (NH) varient suivant les femelles étudiées. Les quantités d'ovocytes hydratés et non hydratés par gramme d'ovaire sont comprises respectivement entre 337 et 518, et 582 et 1 125 (tab. 6). Dans le cas des ovocytes hydratés, les intervalles de confiance à 95 % sont faibles (entre 12 et 22) par rapport à ceux de l'autre groupe (entre 54 et 87).

Le nombre d'ovocytes hydratés représente 1/4 à 1/2 de la quantité totale d'ovocytes d'une gonade en ovulation (ratio compris entre 0,7 et 0,37).

Fécondité par ponte

La membrane ovarienne et la totalité des ovocytes contenus ont été pesées pour 6 ovaires. Pour ajuster au mieux la fécondité, le poids de la membrane est soustrait au

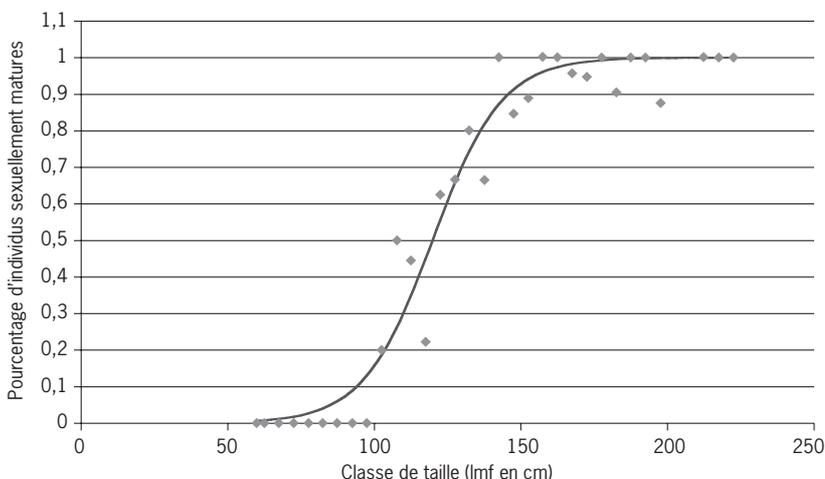


Figure 28 - Proportion de mâles matures par classe de taille de 5 cm (lmf) pour les individus capturés durant la période de ponte (entre octobre et avril).

poids de l'ovaire. La relation suivante permet de déterminer le poids des ovocytes contenus dans l'ovaire :

$$Mo = 99,838 * \text{Log}(Mg) - 560,89$$

avec Mo : poids des ovocytes en grammes

Mg : poids de l'ovaire

La fécondité absolue par ponte a été estimée pour 7 femelles en phase d'ovulation (stade 5 de l'échelle définie précédemment). Les valeurs sont comprises entre 900 000 ovocytes pour l'individu mesurant 127 cm (lmf) et 4,19 millions pour une femelle de 225 cm (lmf) avec des intervalles de confiance (à 95 %) globalement voisins de 4 % (tab. 7).

Tableau 6 - Quantité d'ovocytes comptabilisés lors de l'échantillonnage des femelles étudiées.

Échantillon	H	Nb moyen d'ovocytes hydratés/g d'ovaire			Nb moyen d'ovocytes non hydratés/g d'ovaire			r
		ic (95 %)	min	max	NH	ic (95 %)		
R1020153	518	± 13	462	630	1 023	± 57	0,506	
R9120017 *	459	± 22	305	638	999	± 54	0,460	
R1020173	408	± 20	294	494	582	± 66	0,701	
R1030174	404	± 16	297	488	1 125	± 68	0,359	
R1010300	373	± 12	302	443	550	± 47	0,678	
R1020176	338	± 14	255	448	917	± 85	0,369	
R1030179	337	± 14	272	425	866	± 87	0,389	

* Les ovaires de cet individu ont été décongelés.

Tableau 7 - Estimation de la fécondité par acte de ponte des femelles étudiées.

Échantillon	Taille lmf (cm)	Masse** (kg)	IGH	Poids des ovocytes dans la gonade (g)	Nombre d'ovocytes hydratés par gramme de corps	Fécondité par acte de ponte (en millions)		
						F, avec ic (95 %)	min	max
R1020153	127	24	1,61	1 650	38	0,91 (± 2,47 %)	0,76	1,04
R1010300	192	86	1,73	6 940	30	2,55 (± 4,29 %)	2,10	3,07
R1020176	155	44	1,85	8 040	60	2,65 (± 4,01 %)	2,19	3,42
R1030174	157	46	1,83	7 670	66	3,04 (± 4,02 %)	2,28	3,74
R1020173	198	95	1,78	9 370	39	3,67 (± 4,80 %)	2,75	4,63
R9120017	235*	160	1,7	8 270	23	3,69 (± 4,83 %)	2,52	5,28
R1030179	225	141	1,78	12 440	30	4,19 (± 4,29 %)	3,17	5,57

* Lors de l'échantillonnage de cette femelle, seule la longueur ck a été mesurée. La lmf est donc calculée à partir de la relation : $lmf = 1,5411 * ck + 19,605$.

** Les poids des individus ont été calculés à partir de la longueur lmf.

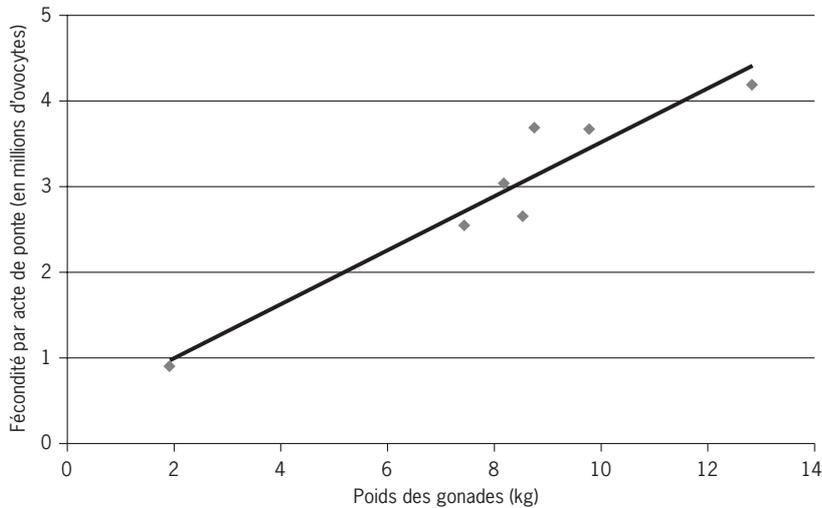


Figure 29 - Fécondité par ponte en fonction du poids des gonades de l'espadon.

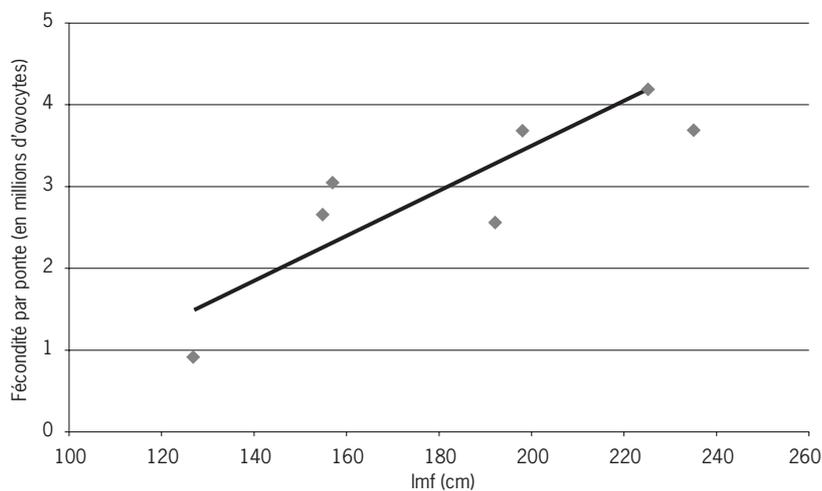


Figure 30 - Fécondité par ponte en fonction de la taille de l'espadon.

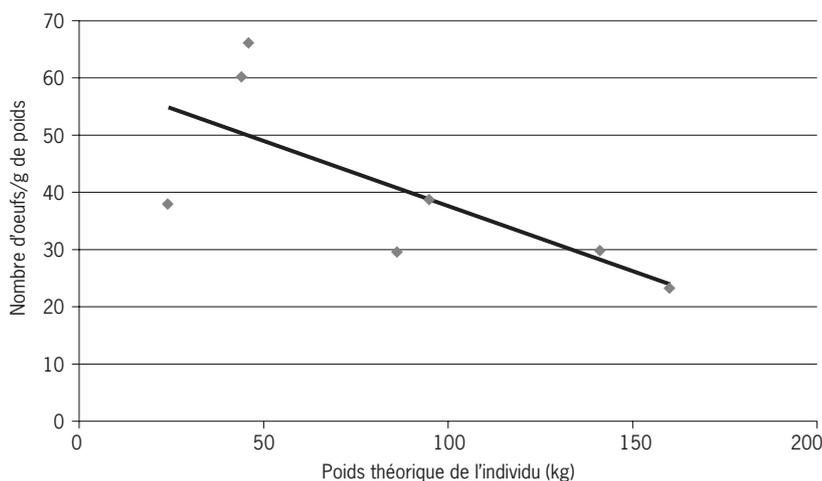


Figure 31 - Relation fécondité relative (en nombre d'oeufs par gramme de corps) - poids du corps de l'espadon (kg).

Ainsi, pour l'échantillon R1020176, la fécondité par ponte est de 2,65 millions à plus ou moins 106 000 ovocytes près. Les valeurs de l'IGH sont supérieures à 1,7, à l'exception de l'individu le plus petit.

Relation fécondité par acte de ponte-poids des gonades

La fécondité moyenne par ponte (F) est représentée en fonction du poids (M) des gonades (fig. 29). Les valeurs de fécondité sont comprises entre 0,91 million pour des ovaires de 2 kg et plus de 4 millions d'ovocytes pour ceux de 12 kilogrammes. L'ajustement linéaire simple ($r = 0,955$) est retenu en raison de sa plus grande simplicité (Conand, 1975 ; Cayré & Farrugio, 1996). La relation entre la fécondité moyenne par ponte et le poids des gonades se caractérise donc par l'équation :

$$F = 0,3154 + 0,3706M$$

avec F en millions d'ovocytes hydratés et M en kilogrammes.

Relation fécondité par ponte-taille individuelle des espadons

L'équation entre la fécondité moyenne par acte de ponte (F) et la taille individuelle (L, lmf) des individus est étudiée (fig. 30). La fécondité augmente avec la taille. La corrélation la plus représentative est l'ajustement semi-logarithmique de type $F = a * \text{Log}L + b$ ($r = 0,872$).

De la même façon, l'ajustement linéaire simple ($r = 0,866$) est conservé. La relation entre la fécondité moyenne par ponte et le poids des gonades s'écrit :

$$F = 0,0275 * L - 1,998$$

avec F en millions d'ovocytes hydratés et L en centimètres (lmf) et pour des longueurs comprises entre 127 et 235 centimètres.

Ainsi, pour une femelle espadon de 170 cm (lmf) correspondant à la taille moyenne de première maturité sexuelle, la fécondité par acte de ponte est estimée à environ 3 millions d'ovocytes.

Relation fécondité relative-poids du corps entier

La fécondité relative en nombre d'ovocytes par gramme de poids du corps entier a été calculée pour les 7 échantillons et représentée en fonction du poids de l'individu entier. Celle-ci semble diminuer avec le poids (fig. 31).

Cette relation linéaire s'écrit :

$$y = -0,2275 x + 60,124$$

$$n = 7$$

$$r = 0,716$$

pour des poids théoriques compris entre 24 et 160 kilogrammes.

Nombre de pontes par saison de reproduction
Le pourcentage moyen de femelles en phase d'ovulation par rapport au nombre de femelles sexuellement actives durant les 7 mois de la saison de ponte est de 36,04 %. Ainsi, l'intervalle moyen de temps séparant deux pontes successives est évalué à 2,77 jours. La saison de ponte a lieu d'octobre à avril autour de La Réunion, soit un total de 212 jours. Le nombre théorique de pontes au cours de cette période est ainsi estimé à 76 (tab. 8).

Tableau 8 - Pourcentages moyens mensuels de femelles en phase d'ovulation et de femelles actives.

Mois	Es : nombre d'individus actifs	Ep : nombre d'individus au stade 5	%
Octobre	31	12	38,71
Novembre	46	21	45,65
Décembre	32	16	50
Janvier	14	4	28,57
Février	10	4	40
Mars	20	6	30
Avril	31	6	19,35
Moyenne			36,04
Total	184	69	

Sex-ratio

La figure 32 permet de suivre l'évolution du sex-ratio de la totalité des individus sexés sur l'ensemble de la période. Afin de définir plus précisément cette évolution sur un cycle annuel, ces données ont été cumulées par mois (fig. 33).

Un test de khi-deux appliqué au sex-ratio mensuel (nombre de femelles par rapport au nombre de mâles) sur l'ensemble des individus sexés au cours des échantillonnages montre une différence significative ou très significative pour la majorité des mois de l'année (tab. 9). À l'exception des mois de janvier, février et octobre, les femelles prédominent sur les mâles. Le sex-ratio annuel de 1,8 (1 259 femelles pour 701 mâles) est très significativement différent de 1 (khi-deux 0,05, 1 = 158,86).

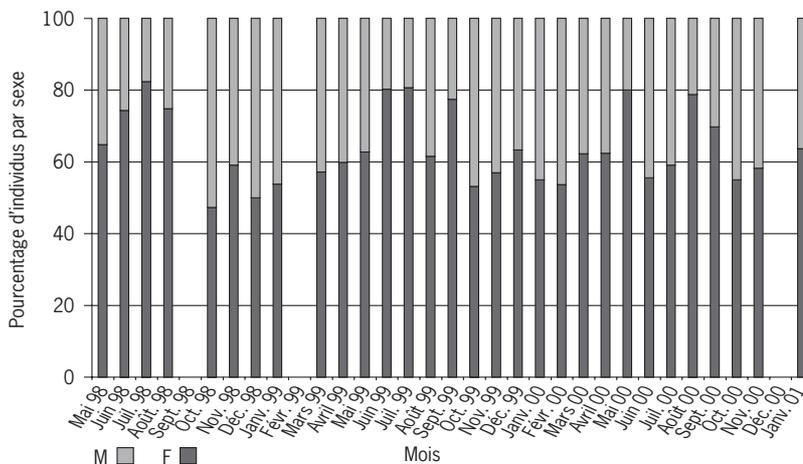


Figure 32 - Évolution du sex-ratio des individus échantillonnés lors des campagnes expérimentales (1259 femelles, 701 mâles).

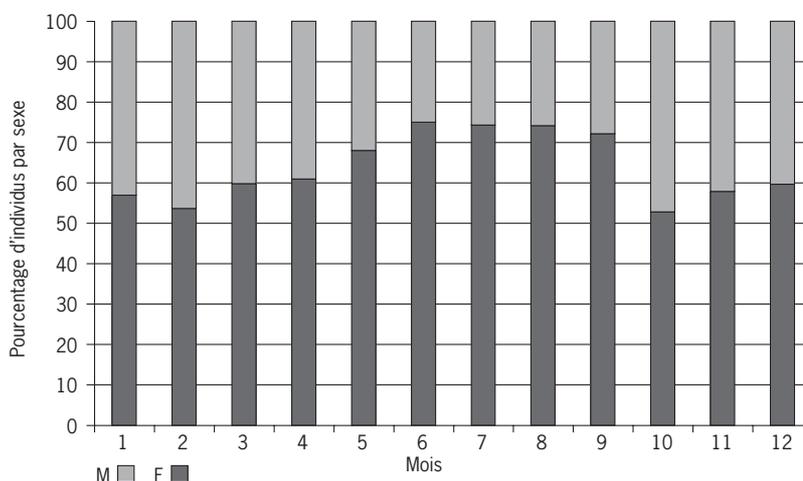


Figure 33 - Évolution du sex-ratio mensuel cumulé établi sur la période d'échantillonnage (1 259 femelles, 701 mâles).

Tableau 9 - Évolution mensuelle du sex-ratio dans la zone d'étude (* significatif à 5 %).

Mois	Nombre de femelles	Nombre de mâles	Ratio	khi-deux	dll
Janvier	82	62	1,32	2,78	1
Février	22	19	1,16	0,22	1
Mars	61	41	1,49	3,92 *	1
Avril	120	77	1,56	9,39 *	1
Mai	119	56	2,13	22,68 *	1
Juin	159	53	3,00	53,00 *	1
Juillet	104	36	2,89	33,03 *	1
Août	169	59	2,86	53,07 *	1
Septembre	70	27	2,59	19,06 *	1
Octobre	115	103	1,12	0,66	1
Novembre	133	97	1,37	5,63 *	1
Décembre	105	71	1,48	6,57 *	1
Total des khi-deux				210,01 *	12
Khi-deux des totaux	1 259	701	1,80	158,86 *	1
Hétérogénéité des khi-deux				51,15	11

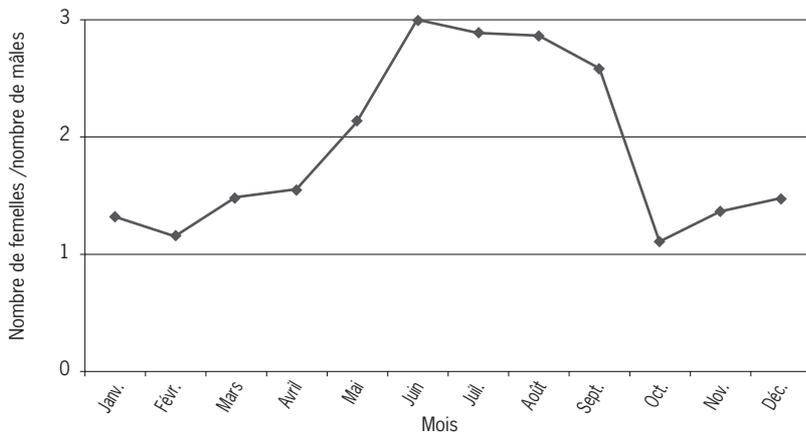


Figure 34 - Évolution du sex-ratio mensuel (nombre de femelles/nombre de mâles).

Tableau 10 - Sex-ratios de deux zones du sud-ouest de l'océan Indien.

Zone		Mâles	Femelles	Ratio	khi-deux	dll
Tropicale (entre 10° S et 5° N)	Sur toute l'année	825	397	2,07	149,9 *	1
Canal du Mozambique et Sud Madagascar	Entre juillet et septembre	259	83	3,1	90,5 *	1

* Significatif à 5%.

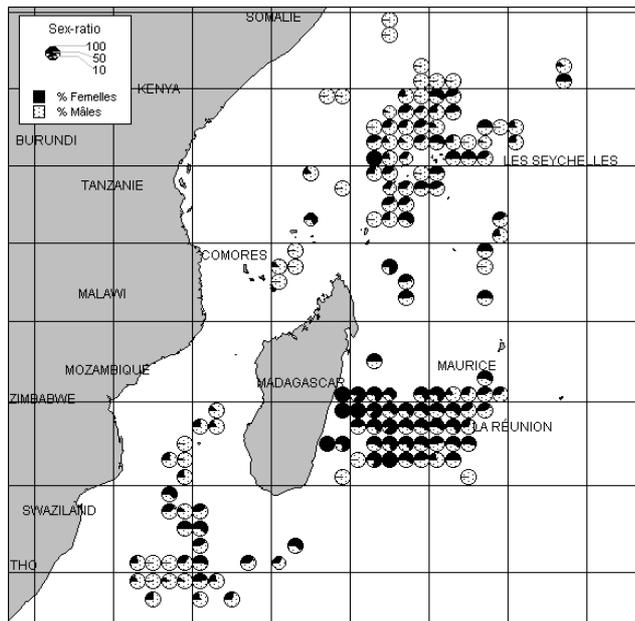


Figure 35 - Pourcentage d'individus par sexe par carré de 1 degré à partir des données collectées entre février 1994 et janvier 2001 (n=4809).

Compte tenu de l'effectif très faible en février, le résultat pour ce mois particulier est à prendre avec précaution. Il est important de souligner que les plus forts ratios sont observés pendant la période de repos sexuel (fig. 34).

Le même type d'analyse a été entrepris sur l'ensemble des données recueillies dans la zone tropicale (entre 10°S et 5°N) et dans une zone englobant le canal du Mozambique et le sud de Madagascar (dans un carré compris entre 20 et 34°S et 35 et 47° E) (tab. 10). Les résultats montrent que dans ces deux régions les mâles dominent. Toutefois, ce résultat est à considérer avec précautions car l'effectif dans la zone sud est réduit et limité à une période de trois mois.

La figure 35 représente le sex-ratio par carré statistique de 1 degré pour l'ensemble des individus échantillonnés (n=4809) au cours des différentes campagnes effectuées entre février 1994 et janvier 2001. Suivant la même agrégation spatiale, les données ont été regroupées par mois entre octobre et avril, puis entre mai et septembre, respectivement pendant et hors période de ponte identifiée.

Malgré un échantillonnage principalement concentré aux abords de La Réunion et faible dans les autres zones (Seychelles, canal du Mozambique et sud de Madagascar), la représentation spatiale du pourcentage d'individus par sexe sur la période 1994-2001 met en évidence la dominance des femelles aux latitudes comprises entre 20 et 25° S et plus fortement le long de la côte est malgache (fig. 37). Cet effet est d'autant plus marqué durant la saison hivernale (fig. 36).

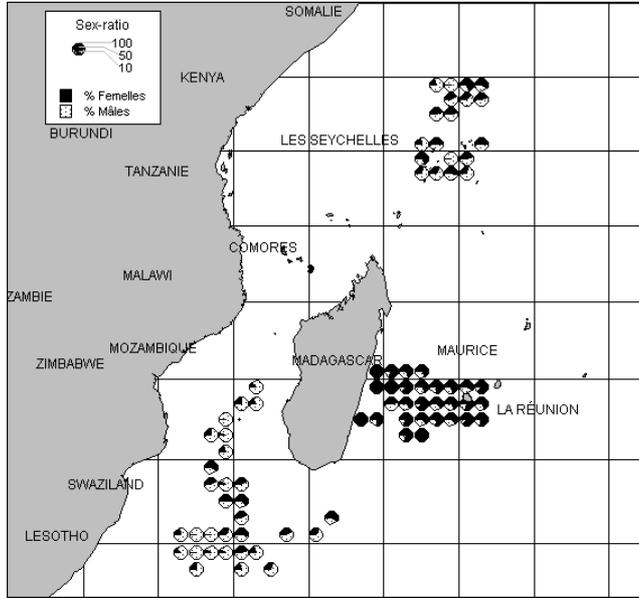


Figure 36 - Pourcentage d'individus par sexe par carré de 1 degré en saison hivernale, de mai à septembre, à partir des données collectées entre février 1994 et janvier 2001 (n=2049).

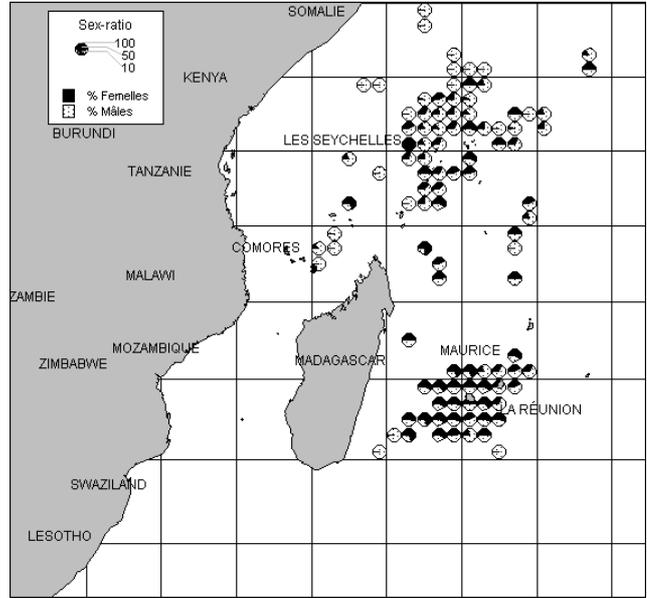


Figure 37 - Pourcentage d'individus par sexe par carré de 1 degré entre octobre et avril (saison de ponte) à partir des données collectées entre février 1994 et janvier 2001 (n=2760).

Taille et composition par sexe

La répartition du sex-ratio (nombre de femelles/nombre total d'individus) par classe de taille de 5 cm des individus dont les gonades ont été prélevées et traitées (taille supérieure à 105 cm de lmf) fait apparaître deux modes (fig. 38). Cette configuration montre que les femelles prédominent parmi les individus juvéniles d'une taille comprise entre 120 et 150 cm mais aussi, de façon plus nette, parmi les individus les plus grands. En effet, à partir de 165 cm, le pourcentage des femelles est croissant pour atteindre le maximum à partir de 230 centimètres.

Entre les valeurs extrêmes, une relation peut être établie afin de prédire la proportion de femelles en fonction de la taille des individus (fig. 38). Une équation polynomiale est ajustée :

$$y = 1E-11x^6 - 1E-08x^5 + 5E-06x^4 - 0,0011x^3 + 0,1355x^2 - 8,3638x + 209,38$$

$$r^2 = 0,9444$$

$$n = 26$$

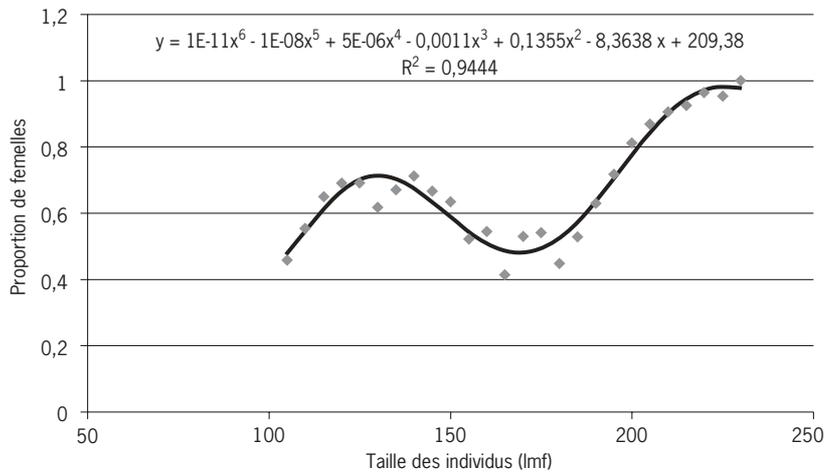


Figure 38 - Relation entre le sex-ratio (nombre de femelles/total des individus) par classe de 5 cm pour l'ensemble des individus d'une taille supérieure à 105 cm (lmf) dont les gonades ont été prélevées et traitées sur toute la période de l'étude et estimation du pourcentage de femelles par classe de 5 cm pour les individus d'une taille comprise entre 105 et 230 cm (lmf).

Lors des échantillonnages de taille effectués au cours des débarquements, le sexe des individus n'est pas identifiable. La détermination de l'équation proposée ci-dessous pourrait donc permettre de répartir, par sexe, la totalité des poissons mesurés. Pour cela, il est toutefois nécessaire que cette

distribution soit homogène dans le temps et dans l'espace. Sur cette base, les pourcentages des individus par classe de taille sont calculés pour chacun des sexes. Les histogrammes suivants présentent la répartition théorique annuelle des femelles (fig. 39) puis des mâles (fig. 40).

Femelles

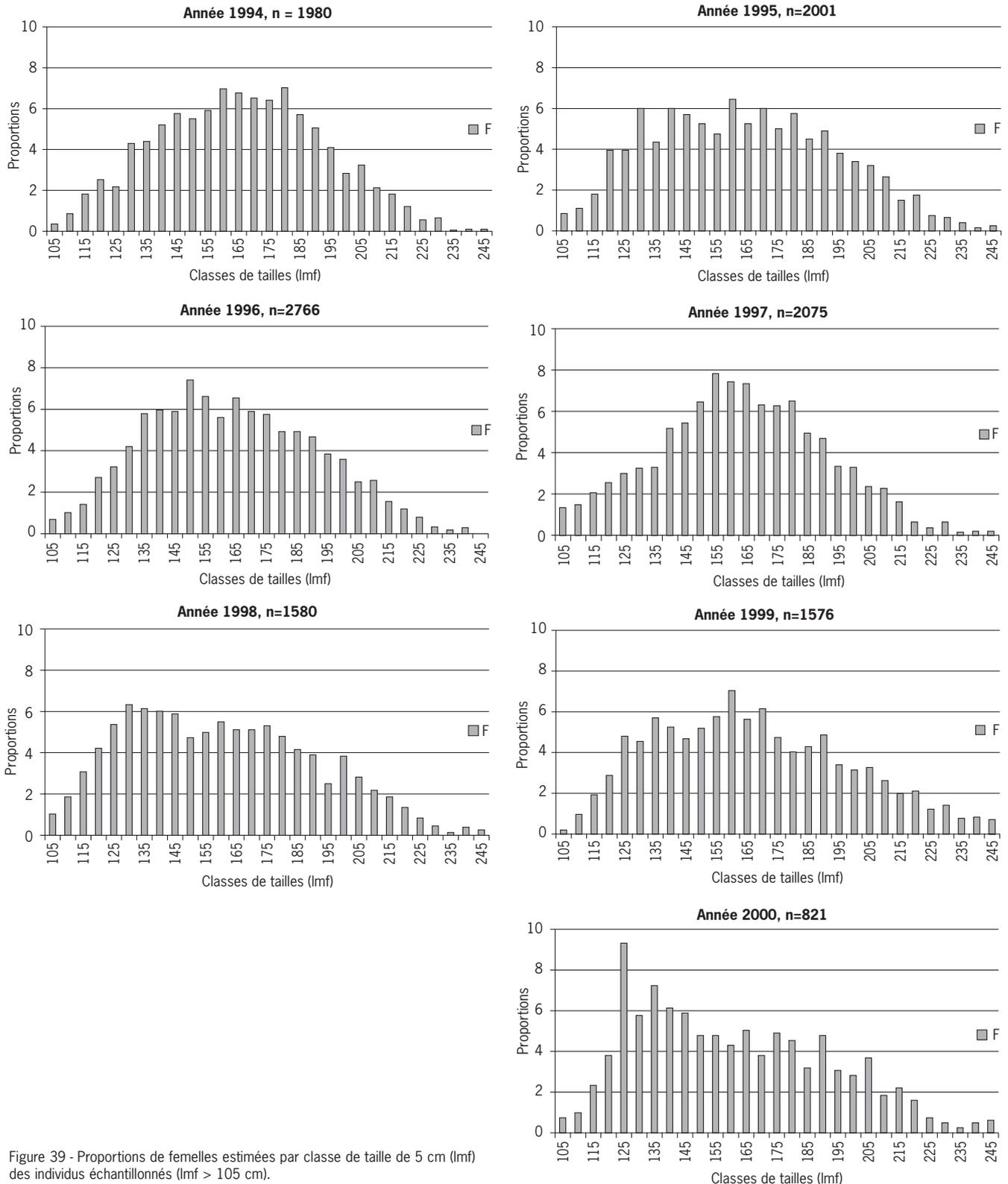


Figure 39 - Proportions de femelles estimées par classe de taille de 5 cm (Imf) des individus échantillonnés (Imf > 105 cm).

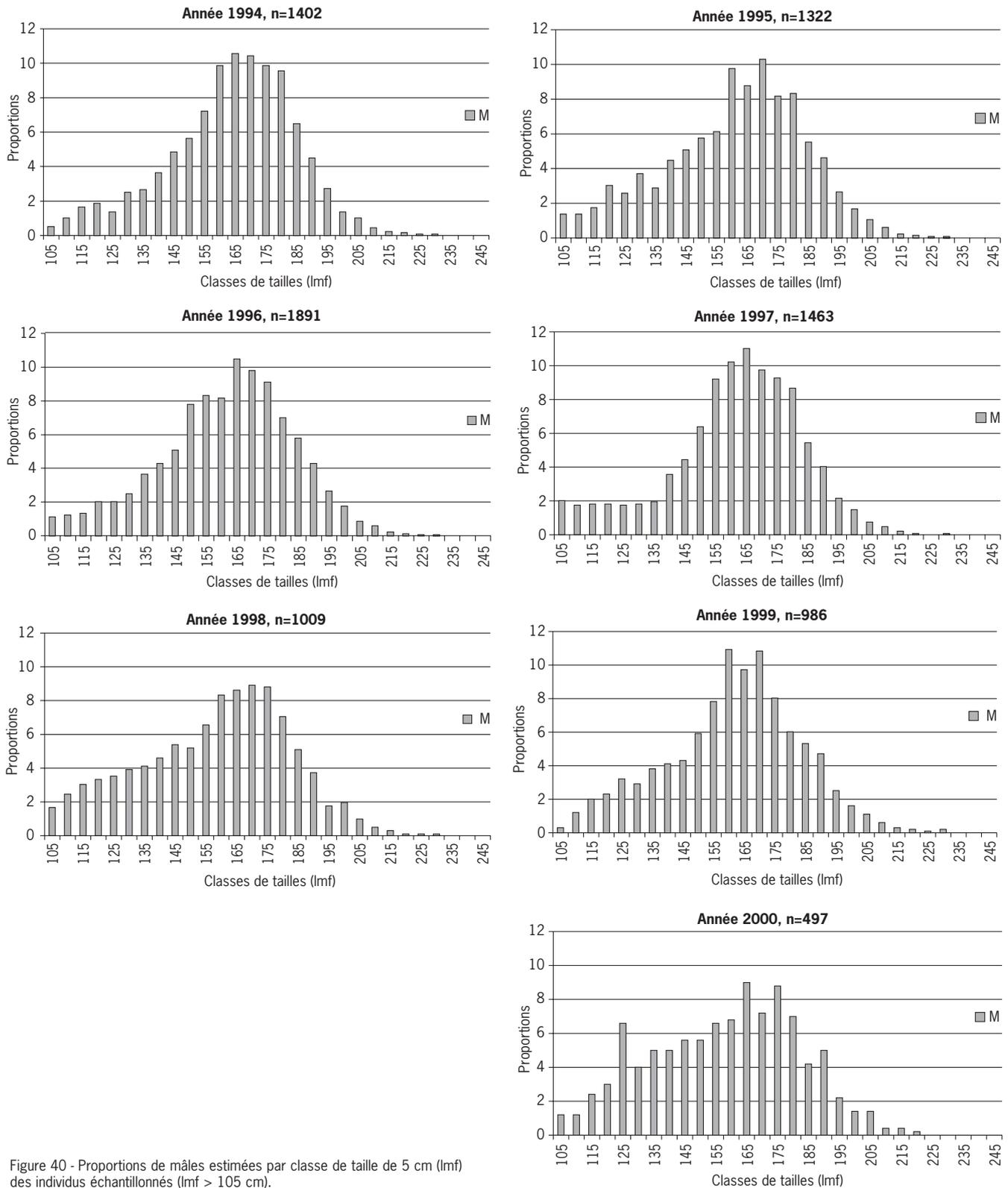


Figure 40 - Proportions de mâles estimées par classe de taille de 5 cm (lmf) des individus échantillonnés (lmf > 105 cm).

Mâles

L'examen des histogrammes de fréquences de taille fait apparaître des variabilités interannuelles. Toutefois, il sera nécessaire

de mettre en œuvre des analyses statistiques adaptées afin de caractériser de manière plus formelle, les variabilités observées.

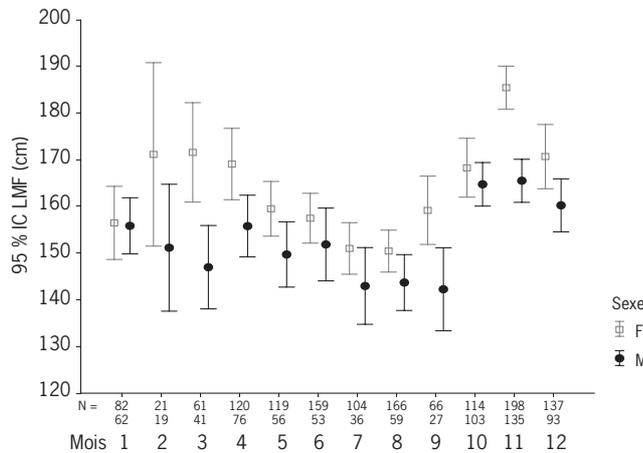


Figure 41 - Évolution des tailles moyennes (lmf) par mois et par sexe des individus échantillonnés pendant la période de l'étude (n=2107).

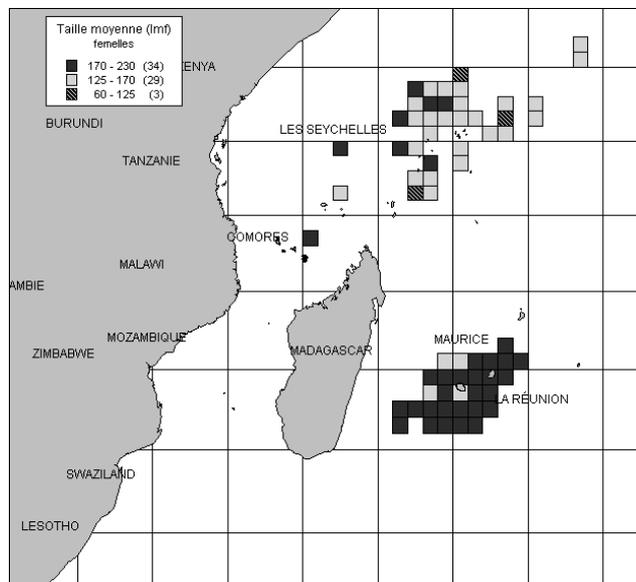


Figure 42 - Répartition des espadons femelles par classe de taille (lmf) et par carré statistique de 1 degré après agrégation pendant la saison de ponte (d'octobre à avril).

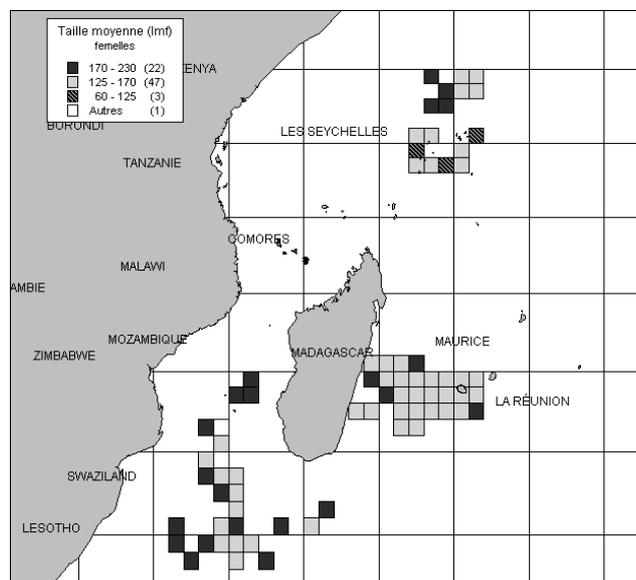


Figure 43 - Répartition des espadons femelles par classe de taille (lmf) et par carré statistique de 1 degré après agrégation hors saison de ponte (de mai à septembre).

Variations saisonnières de la taille suivant le sexe

Plusieurs types de représentations ont été choisis pour mettre en évidence les tendances et les fluctuations des tailles pour chacun des sexes suivant différentes strates temporelles et spatio-temporelles.

Variation saisonnière

Les mesures de taille par sexe ont été agrégées sur toute la période. L'évolution des moyennes mensuelles de la longueur maxillaire-fourche (lmf) est présentée sur la figure 41. Lorsque la lmf n'a pas été mesurée directement, elle est estimée à partir des relations morphométriques (Poisson & Macé, 1997).

Moyenne des tailles par carré statistique

Les cartes de répartition spatiale des tailles moyennes des individus par classe de taille (lmf) et par sexe ont été dressées à une résolution de grille de 1 degré pendant et hors saison de ponte à partir d'échantillonnages aléatoires menés entre février 1994 et janvier 2001. Les 16823 individus mesurés sont répartis en trois classes : les petits individus (lmf < 125 cm); les individus de taille moyenne (lmf entre 125 et 170 cm) et les grands individus (lmf > 170 cm). Cette classification est généralement adoptée lors de groupes de travail statistique de l'ICCAT⁴ (Anonyme, 1999).

Les grands individus femelles dominent dans les captures pendant la période de ponte autour de La Réunion dans la majorité des unités spatiales couvertes. *A contrario*, les individus de taille moyenne semblent être majoritaires dans la zone des Seychelles (fig. 42). En dehors de la saison de ponte (fig. 43), les carrés représentant les plus grands individus, peu nombreux, semblent être concentrés dans le canal du Mozambique.

Ces observations restent aussi valables, dans une moindre mesure, pour les mâles (fig. 44, 45) compte tenu des différences de croissance entre les sexes. Par contre, les grands individus semblent dominer dans la partie sud de Madagascar. Les zones dans lesquelles la taille moyenne des individus est comprise entre 60 et 125 cm sont localisées exclusivement aux latitudes de la zone tropicale.

4. ICCAT : Commission Internationale pour la conservation des thonidés de l'Atlantique.

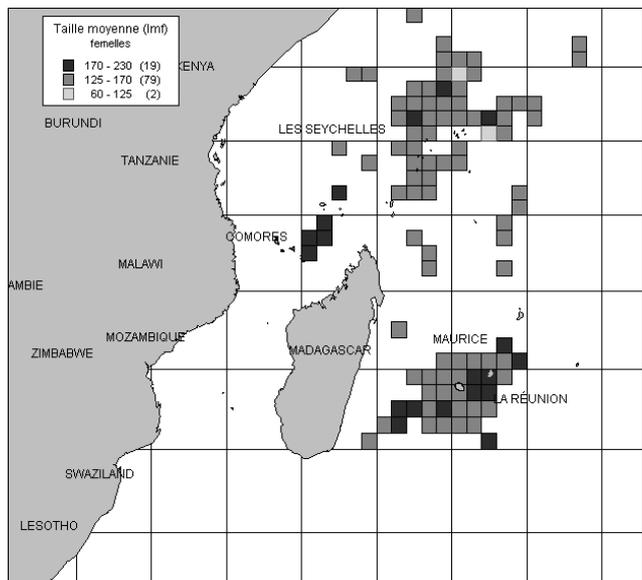


Figure 44 - Répartition des espadons mâles par classe de taille (Lmf) et par carré statistique de 1 degré après agrégation pendant la saison de ponte (d'octobre à avril).

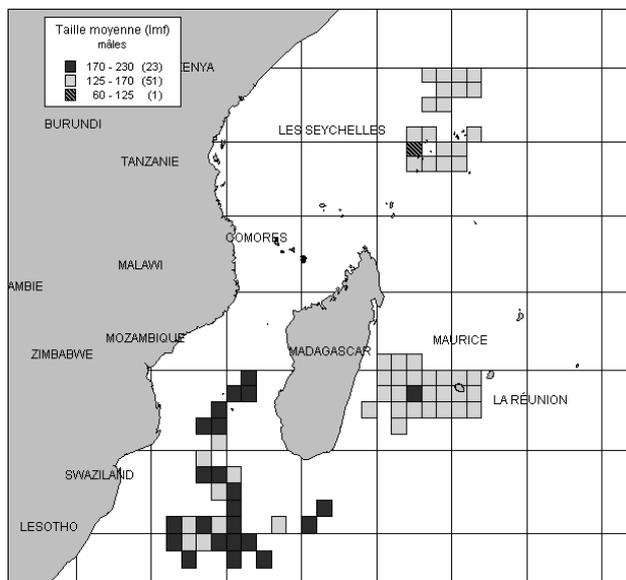
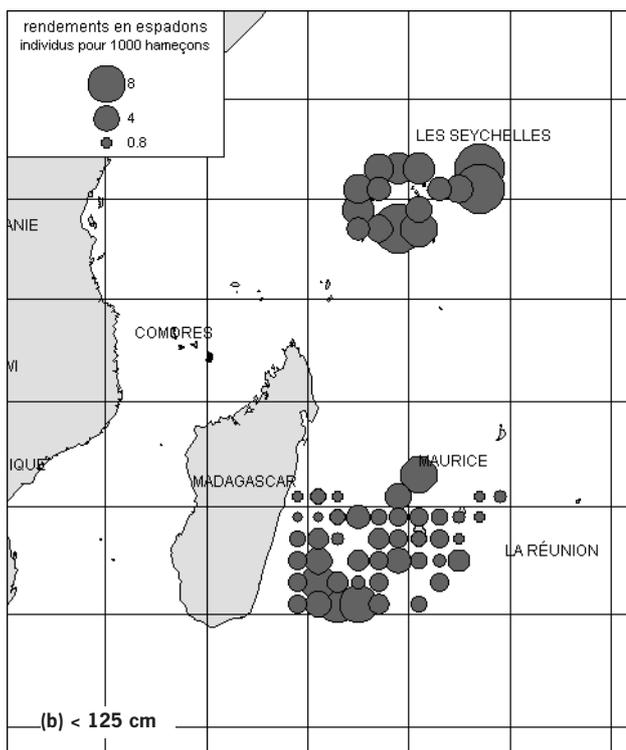
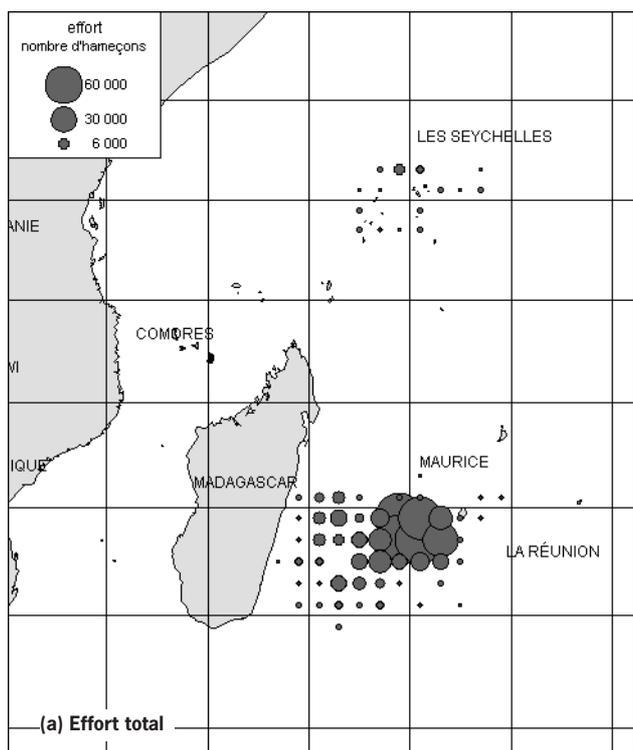


Figure 45 - Répartition des espadons mâles par classe de taille (Lmf) et par carré statistique de 1 degré après agrégation hors saison de ponte (de mai à septembre).

Rendements par classe de taille

Du 19 mai 1994 au 22 janvier 2001, au cours de 1532 opérations de pêche correspondant à la mise à l'eau de 1 439 220 hameçons (fig. 46 a), les échantillonnages ont été systématiques ; ainsi, la **totalité des espadons** pêchés a été mesurée.

Les 10 553 individus échantillonnés (sexes confondus) sont classés suivant les trois catégories définies précédemment. L'effort total (nombre d'hameçons) pour la période et les rendements (nombre d'individus par 1 000 hameçons) par carré statistique de 1 degré pour les trois classes de taille ont été calculés (fig. 46).



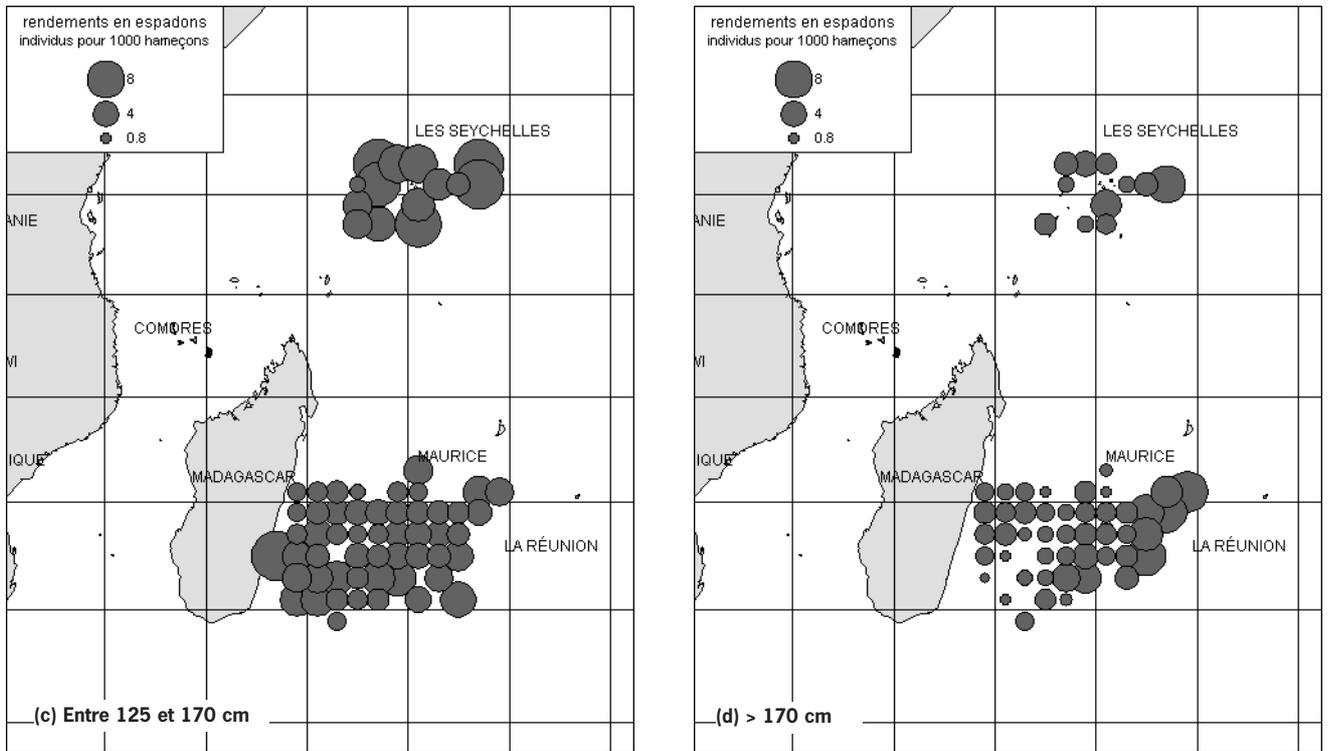


Figure 46 - Rendements par classe de taille, par carré statistique de 1 degré.

Les rendements par classe de taille sont complémentaires des représentations spatiales des tailles moyennes. Ces résultats confirment la dominance d'individus de petite taille et de tailles intermédiaires dans la zone des Seychelles mais révèlent des rendements majeurs en individus de grandes tailles dans la partie est de La Réunion.

En dehors de la saison de ponte, les rendements en petits individus sont supérieurs surtout dans les parties ouest et sud-ouest de La Réunion, à l'inverse de ce que l'on observe autour des Seychelles (fig. 47). Les cartes présentées aux figures 47 et 48 mettent en évidence la prédominance de grands individus en période estivale australe.

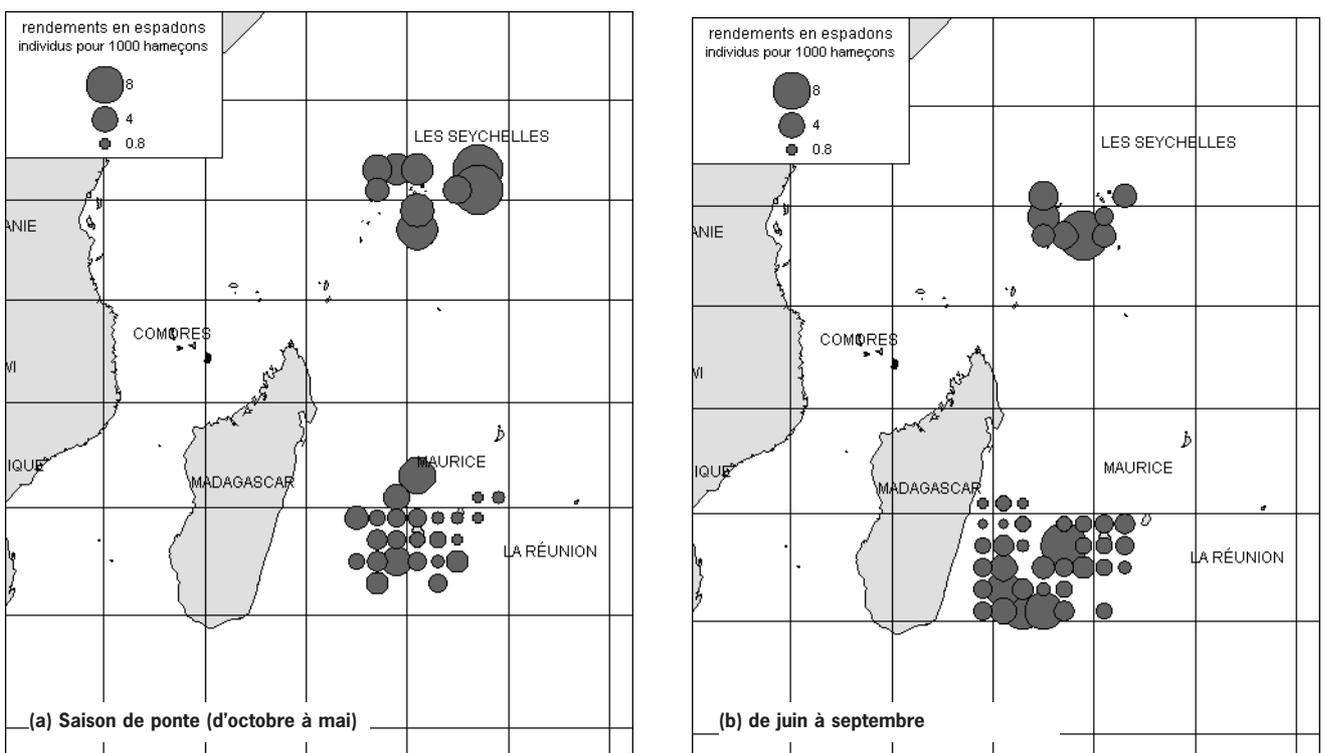


Figure 47 - Rendements par carré statistique de 1 degré pour les petits individus.

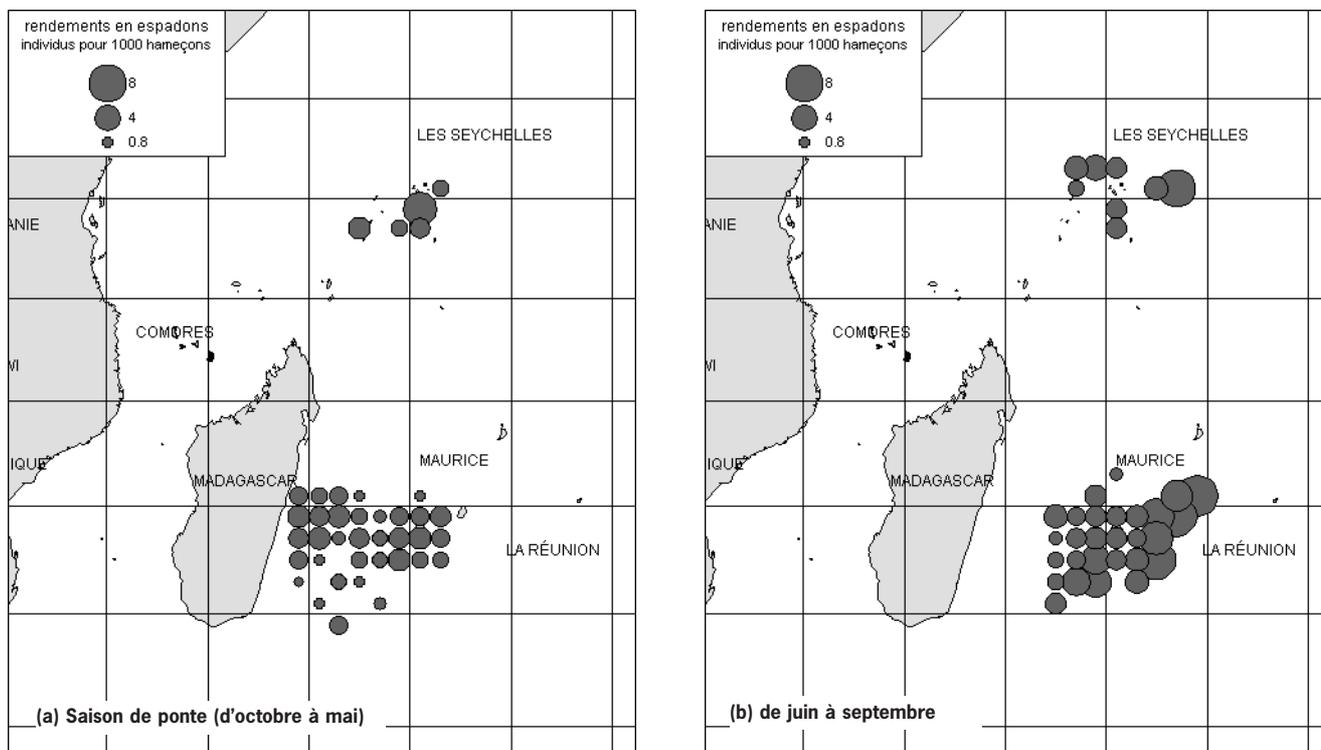


Figure 48 - Rendements par carré statistique de 1 degré pour les grands individus.

Discussion

Échantillonnage

Le nombre d'individus échantillonnés au regard de la quantité d'espadons débarqués par la flottille locale paraît faible mais est tout à fait suffisant pour déterminer le cycle de cette espèce dans la zone étudiée. Compte tenu des rendements journaliers moyens peu élevés (6,8 individus sur toute la période) et d'un rapport de 1,3 jour passé en mer pour une opération de pêche, les échantillonnages d'espadons capturés à la palangre nécessitent une forte mobilisation dans un tel programme. Ces opérations ont été facilitées du fait de l'implication forte de la profession. Malgré tout, faute de temps lors de l'opération de pêche, 223 individus ont été sexés et mesurés sans que les gonades n'aient pu être conservées (80 mâles et 143 femelles). Par ailleurs, 124 individus ont été mesurés mais non sexés, soit un taux de perte d'informations de l'ordre de 17 %.

À l'issue de cette étude, les échantillonnages en mer doivent être poursuivis en intensifiant l'effort sur les zones les moins prospectées jusqu'à présent. Un rapproche-

ment des équipes de scientifiques de la COI⁵ (et plus largement de la CTOI) partageant les mêmes protocoles doit être entrepris. Un travail de collaboration dans ce sens a déjà été engagé entre la SFA⁶ et notre laboratoire. La mise en commun des données permettra d'aller plus loin dans les analyses.

Indice biologique

Selon Hinton *et al.* (1997) et DeMartini *et al.* (2000), la détermination la plus fiable du stade de développement sexuel est obtenue par examen des coupes histologiques ou par détermination de la taille des diamètres ovocytaires (Taylor & Murphy, 1992; Arocha & Lee, 1995). L'indice gonado-somatique (IGS) jusqu'alors utilisé dans de nombreux travaux n'est pas suffisant pour distinguer, hors période de ponte, les femelles matures au repos des femelles immatures. En effet, un ovaire contenant des ovocytes en vitellogenèse avancée peut avoir un poids proche d'un autre ovaire en tout début de maturation. L'application directe de l'indice d'Hinton *et al.* (1997) après vérification sur 85 cas étudiés en histologie, a permis d'identifier les individus

5. COI : Commission de l'océan Indien.

6. SFA : Seychelles Fishing Authority.

sexuellement actifs et de déterminer, en fonction de leur occurrence, la saison de ponte dans la zone étudiée. Cette méthode permet de s'abstenir d'une détermination systématique de l'état de maturation de chaque individu échantillonné par analyse histologique, technique à la fois longue et coûteuse. Le travail de Hinton *et al.* (1997) remet en cause la validité des résultats obtenus préalablement sur le sujet dès lors que l'indice gonado-somatique est utilisé.

Saison de ponte

Les échelles macroscopiques de maturité proposées doivent être utilisées avec réserve. Comme nous l'avons démontré précédemment, elles ne permettent en aucune façon une classification catégorique du stade de maturation de l'animal. L'interprétation des différents critères par des opérateurs différents peut entraîner des variations dans les résultats. Ces planches décrivant l'aspect macroscopique des gonades demeurent néanmoins utiles lors des échantillonnages sur le terrain.

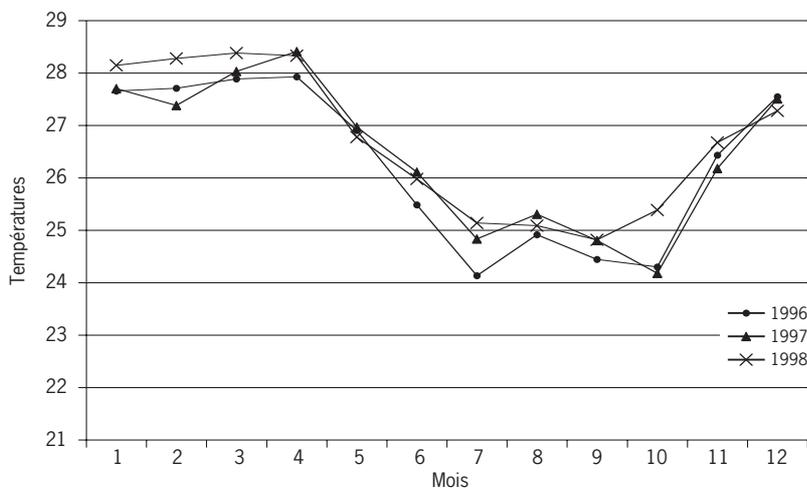


Figure 49 - Évolution moyenne mensuelle de la température de surface à proximité de La Réunion (station située à 30 milles à l'ouest de La Réunion) : données fournies par IRD/SEAS.

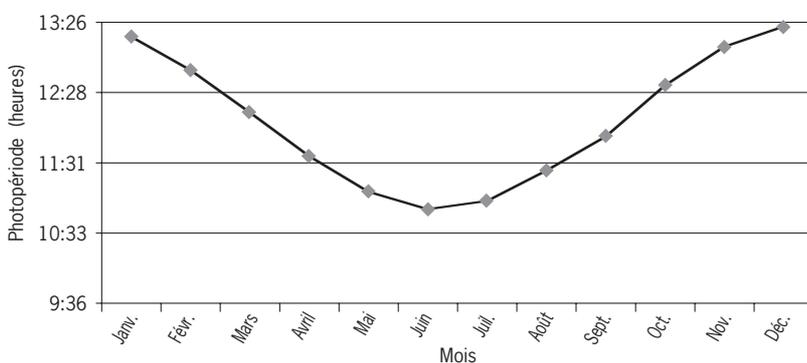


Figure 50 - Évolution moyenne mensuelle de la photopériode à La Réunion.

L'activité de ponte a été déterminée d'après le suivi de l'évolution de l'IGH. Dans la zone étudiée, soit à une latitude comprise entre 19 et 25° Sud, la reproduction a lieu entre octobre et avril, durant l'été austral (fig. 49). Si l'on observe, d'une part, l'évolution de la température de surface à un point situé à 30 milles à l'ouest de La Réunion et d'autre part l'évolution de la photopériode (fig. 50), on constate donc que la maturation débute durant la phase ascendante de la photopériode et lors du réchauffement de l'eau. Si l'espadon passe la journée à des profondeurs importantes, les travaux de Carey (1981) ont mis clairement en évidence des mouvements verticaux calés sur ce cycle. Ces deux facteurs, qui sont classiquement utilisés pour le conditionnement des géniteurs de poissons marins en aquaculture (De Vlaming, 1972; Girin & Devauchelle, 1978), pourraient de la même façon induire la maturation et la ponte chez l'espadon.

Par ailleurs, l'absence d'individus actifs en juillet août et septembre peut soit correspondre à une phase de repos sexuel soit traduire la migration des individus prêts à se reproduire. Seuls les résultats de marquage pourraient permettre d'en savoir plus sur les schémas possibles de migration des espadons dans cette partie du monde et, de ce fait, confirmer ces quelques hypothèses. La détermination de la saison de ponte en période d'été austral semble corroborer les récentes observations faites sur la zone est de l'Australie (Young *et al.*, 2000) à des latitudes légèrement plus sud (entre 24° et 35° S). Les auteurs identifient aussi la période de reproduction entre octobre et avril, soit pendant l'été austral. Les études menées dans l'hémisphère nord à des latitudes voisines associent, de la même façon, la saison de reproduction à la période printanière et estivale (avril-juillet; Uchiyama & Shomura, 1974; DeMartini *et al.*, 2000; Ward & Elscot, 2000; Taylor & Murphy, 1992). Ceci renforce l'hypothèse émise préalablement sur l'influence de la photopériode et l'évolution des températures. Par ailleurs, d'autres travaux indiquant des pontes tout au long de l'année dans les zones équatoriales nous ont amenés à ne pas traiter simultanément les données récoltées lors des campagnes au voisinage des Seychelles.

Choix de la méthode

Zones de prélèvement

L'échantillonnage au centre de la gonade est suffisant pour les études descriptives des ovocytes. Pour les études quantitatives telles que la fécondité, il convient de réaliser un échantillonnage aléatoire de la gonade. Uchiyama & Shomura (1974) ont réalisé une Anova à partir de dix-huit échantillons (de 200 ovocytes), prélevés à différents endroits d'une seule gonade et concluent qu'il y a hétérogénéité des distributions d'ovocytes aux différents sites. Il faut garder à l'esprit que, dans ce cas, nous nous trouvons à la limite de signification biologique de tels types de tests, ce qui justifie le fait que l'hypothèse de l'homogénéité des distributions des ovocytes au sein de la gonade soit généralement admise.

Action des conservateurs

Le conservateur influe sur la qualité du matériel biologique traité. L'utilisation du formol à 5 % présente les avantages d'avoir peu d'effets sur le diamètre ovocytaire (Hunter, 1985) et de permettre d'identifier les différents modes de la phase d'ovulation. Par contre, ce conservateur sépare difficilement les ovocytes immatures des impuretés. Le formol a même tendance à compacter les ovocytes, augmentant alors la durée des phases de préparation de l'échantillon.

Le liquide de Gilson modifié présente l'intérêt de faciliter la dissociation des ovocytes par dégradation du tissu conjonctif. Son emploi implique, par contre, un renouvellement périodique du liquide (au minimum tous les mois) et une mise en suspension régulière par agitation des échantillons. Des rinçages méthodiques des échantillons permettent par ailleurs un gain de temps lors de la phase de « retouche » des images. La présente étude a permis de caractériser l'effet majeur du liquide de Gilson sur la taille des ovocytes d'espadon. Cette rétraction des diamètres ovocytaires a lieu essentiellement durant les premiers jours suivant la mise en solution dans le liquide de Gilson. Cette tendance est confirmée par les travaux de Stéquert & Ramcharrun (1995b) sur le listao (*Katsuwonus pelamis*). Le pouvoir de rétraction est plus important pour les ovocytes au stade de maturation le plus avancé. Ainsi, le changement de diamètre des ovocytes de turbot, dû à une conservation de 30 jours dans le liquide de Gilson, est voisin de 14,5 % et 10 % respectivement pour des

ovocytes en début et en fin de vitellogénèse (Mugnier, 1996). Pour les ovocytes hydratés d'espadon, la rétraction est estimée à 20 % au bout d'un mois.

Enfin, les différents traitements effectués montrent que les ovocytes conservés dans le liquide de Gilson ont un diamètre plus petit que ceux conservés dans le formol alors qu'ils proviennent initialement d'un même site chez la femelle. L'évolution de la taille moyenne des 50 plus gros ovocytes aux différents stades confirme cette tendance. Ceci s'explique par le fait que le liquide de Gilson a un effet de rétraction sur les ovocytes plus important que le formol (Lowerre-Barbieri & Barbieri, 1993). Selon le conservateur utilisé, les distributions des diamètres ovocytaires d'un même échantillon sont différentes mais le nombre de modes est identique.

Détermination des diamètres ovocytaires

La mise en place d'une méthodologie de détermination des diamètres ovocytaires avait pour buts, à partir d'un nombre réduit d'échantillons, de déterminer les tailles des lots caractéristiques de chaque stade mis en évidence par l'étude histologique, de vérifier le caractère fractionnel des pontes chez cette espèce et d'estimer les différents indices de fécondité.

L'analyseur d'images, comme tout autre procédé, présente des limites et des contraintes d'utilisation qu'il a fallu déterminer avant la mise en œuvre de la chaîne de traitements « en routine ». D'une part, les bornes de seuil de coloration ont une influence prépondérante sur le recrutement des « objets » parasites. D'autre part, l'étendue du « seuillage » fait varier le contour, donc la surface des « objets » recrutés. Pour garantir l'efficacité de la phase de « retouche », il a donc fallu définir un seuil de coloration et une valeur optimale de l'effectif de l'échantillon. Il convient d'apporter une attention particulière à la préparation des échantillons pour éliminer au maximum les particules associées (débris cellulaires) et favoriser l'individualisation des ovocytes sans les déformer. Le respect de ces paramètres garantit une analyse d'image optimale. Au regard des autres méthodes, l'utilisation de l'analyseur présente de nombreux avantages.

L'utilisation de la loupe et d'un micromètre oculaire est un des moyens les simples pour obtenir ces mesures (Conand, 1975).

Cependant, cette technique uniquement manuelle trouve ses limites dans le nombre et la taille des effectifs traités.

Une autre méthode consiste à analyser des clichés d'échantillons (diapositives) projetés sur une table à digitaliser. La mesure de deux diamètres par cellule est faite à l'aide d'une souris d'ordinateur. Un logiciel associé permet le calcul des diamètres et la compilation des données (Mugnier, 1996). Les sources d'erreurs apparaissent lors de la sélection des « objets » par l'opérateur.

Le granulomètre est un Coulter LS 130 à large gamme (0.1 à 900 μm) généralement utilisé en géologie pour mesurer la répartition de particules au sein d'un sédiment peut être employé. Le volume de toute particule est calculé en fonction de l'angle de réfraction du rayon laser (Mugnier, 1996). Ce procédé permet d'obtenir la répartition par classe de taille (en pourcentage) de l'ensemble des particules mesurées mais le nombre de particules reste inconnu car les celle-ci peuvent effectuer plusieurs passages devant la cellule.

La taille de première maturité

Plusieurs estimations de la taille de première maturité reposant sur l'analyse macroscopique des gonades ou sur le calcul d'indice gonadique ont été avancées. Compte tenu des réserves émises sur l'utilisation de ces critères et indices, ces valeurs sont à prendre avec précaution. Ainsi, dans le Pacifique, Yabe *et al.* (1959 in DeMartini, 1999) estiment que les femelles dans la zone ouest, sont sexuellement matures à partir d'une taille comprise entre 150 et 170 cm (lcof), soit entre 170 et 192 cm (lmf). Les estimations plus récentes faites par Sosa-Nishida (1990 in DeMartini, 1999) donnent une taille comprise entre 140 et 180 cm (lcof), soit 160-202 cm lmf. Les tailles de première maturité semblent plus importantes dans la zone Atlantique, aussi bien au voisinage des côtes de la Floride avec 182 cm (lmf) pour Taylor & Murphy (1992) que dans la zone nord-ouest avec 179 à 189 cm (lmf) d'après Arocha *et al.* (1994) et Arocha & Lee (1995). Au contraire, en Méditerranée, les tailles définies sont inférieures. De Metrio *et al.* (1995), De la Serna *et al.* (1995) estiment que 50 % des femelles sont matures respectivement à partir d'une taille de 135 cm et de 142 cm (lmf).

Le tableau 11 synthétise les principaux résultats de travaux réalisés dans différentes régions du Pacifique, de l'Atlantique et la Méditerranée. À la zone géographique sont associées la saison de ponte et les méthodes utilisées pour la déterminer ainsi que les tailles de première maturité. Aucune référence sur l'océan Indien n'ayant été trouvée, nos résultats constituent la première référence sur le sujet.

Sur la base d'analyses histologiques des gonades, DeMartini *et al.* (2000) obtiennent, dans l'hémisphère nord, une taille de première maturité de 144 cm \pm 2,8 (lcof), soit 164 cm (lmf) à des latitudes comprises entre 17 et 41° N. Cette valeur est très voisine de celle obtenue dans le cadre de notre étude : 170 cm \pm 2,1 (lmf). Cette variation trouve peut-être une partie de son explication dans l'étendue géographique couverte. Ainsi, dans une étude sur la fécondité de *Euthynnus lineatus*, Schaefer (1987) montre que les valeurs les plus fortes de fécondité et les plus courtes fréquences entre deux pontes sont observées pour les poissons pêchés dans les latitudes les plus basses. Ces deux phénomènes sont apparemment compensés par une saison de ponte plus courte et une taille de première maturité plus grande. L'adaptation de ces paramètres est à mettre en relation avec les conditions environnementales favorables au développement des larves (vent, température de l'eau...). Il est généralement admis que, pour l'espadon, les pontes ont lieu toute l'année dans les eaux équatoriales, la période se restreignant au printemps et à l'été dans les latitudes plus importantes (Ward & Elscot, 2000).

Sexe et composition des tailles

Le sex-ratio varie d'une façon temporelle et récurrente sur la période de plusieurs cycles annuels suivis. La proportion de femelles peut désormais être estimée sur la base du modèle proposé dans les limites géographiques définies. La définition de cette relation est indispensable quand les scientifiques ne peuvent avoir accès qu'aux poissons traités lors des débarquements. Comme dans les autres régions du globe, le dimorphisme sexuel est observé. Ce phénomène s'explique par le fait que les mâles, mûrant plus tôt, voient leur croissance réduite. À l'inverse, pendant la première phase de leur vie, le taux de croissance des

Tableau 11 - Méthodologies utilisées pour déterminer l'activité des femelles dans différentes régions du monde (IGS calculé avec lcof, IG avec lmf, IGH indice gonadique d'Hinton *et al.*, 1997).

Zone d'étude	Saison de ponte	Méthode de détermination de la maturité	Taille de première maturité	Auteurs
Pacifique nord	–	Analyse macroscopique des gonades	lcof entre 150 et 170 cm	Yabe <i>et al.</i> , 1959
Pacifique : à l'ouest de 98° W et entre 12° N et 31° S	Latitudes les plus nord : de mars à juillet Latitudes sud : janvier	IGS ≥ 3,0		Kume & Joseph, 1969
Pacifique : à l'ouest de 95° W entre 10° N et 30° S	Toute l'année	IGS > 3		Shingu <i>et al.</i> , 1974
Pacifique : au large d'Hawaii	D'avril à juillet	Distribution des diamètres ovocytaires		Uchiyama & Shomura, 1974
Pacifique : à l'ouest de 110° W entre 10° N et 30° S	Prépondérance d'individus matures au premier et dernier trimestres mais présence de matures entre 145° et 150° W au second et quatrième trimestres	IGS ≥ 7,0	lcof > 150 cm	Miyabe & Bayliff, 1987
Pacifique : à l'ouest de 135° W entre 25° N et 15° S	Au nord de l'équateur : second trimestre Au sud de l'équateur : quatrième trimestre	IGS ≥ 7,0		Nakano & Bayliff, 1992
Pacifique		IGS ≥ 7,0	lcof entre 140 et 160 cm	Sosa-Nishizaki, 1990 <i>in</i> Ward & Elscot, 2000
Pacifique : entre 141 et 180° W entre 17° N et 41° N	Mars à juillet avec un pic entre mai et juin	Analyses histologiques et indice de Hinton	144 cm (lcof)	DeMartini <i>et al.</i> , 2000
Pacifique : côte est de l'Australie entre 24° et 35° S	Entre octobre et mai	Analyses histologiques Indice de Hinton	156 cm (lcof)	Young <i>et al.</i> , 2000
Atlantique : entre 5° N et 55° N		IG ≥ 3	lmf > 185 cm	Arocha <i>et al.</i> , 1993
Atlantique : entre 13° N et 35° N		IGS ≥ 7,0	179 cm (lmf)	Arocha & Lee, 1995
Atlantique : le long de la côte de Floride : À l'est de 80° E entre 24 et 28° N	Fin du printemps jusqu'à la mi-été soit globalement d'avril à juillet	Analyses histologiques	182 cm (lmf)	Taylor & Murphy, 1992
Méditerranée occidentale		IGS ≥ 3	140 cm (lmf)	De La Serna <i>et al.</i> , 1995

femelles est supérieur (Berkeley & Houde, 1983). Ainsi, la catégorie de grands individus est constituée principalement de femelles. Berkeley & Houde (1983) n'excluent pas le fait que les femelles pourraient avoir une longévité supérieure aux mâles. Cette hypothèse ne pourra être confirmée que dès qu'il sera possible de valider l'âge des plus gros individus. À l'heure actuelle, aucune étude n'a encore pu lever cette interrogation. Enfin, Ehrhardt *et al.* (1996) évoquent l'hypothèse d'une croissance différente due à des cycles de migration distincts en fonction du sexe des individus. Ce thème de mouvement migratoire différent entre les sexes de différentes classes de taille est aussi repris par Arocha *et al.* (1994).

Variations saisonnières

Les figures 32 et 33 mettent en évidence des variations mensuelles et régulières du sex-ratio sur toute la période d'échantillonnage. Taylor & Murphy (1992) et Guitart-Manday (1964) observent que le nombre de mâles est supérieur au nombre de femelles durant la saison de ponte, soit au printemps et en été sur les côtes de Floride et au large de Cuba. Dans la zone d'étude choisie, ce phénomène n'a pas été observé, les femelles dominant de façon très significative surtout pendant la phase de repos sexuel (tab. 9 et fig. 34). Parallèlement, une diminution de la taille moyenne des femelles est observée à cette période de l'année (fig. 41).

Variations spatiales

Les représentations spatiales établies à partir de jeux de données complémentaires mettent en évidence la présence de femelles de grande taille (> 170 cm) au voisinage de l'île de La Réunion pendant la période de reproduction alors que la moyenne des tailles des femelles pendant l'hiver austral est inférieure. Ces mêmes observations peuvent aussi s'appliquer aux mâles (fig. 42 à 45). Ces tendances dans la variation saisonnière des tailles sont confirmées par les figures 35 à 37 qui ont été dressées à partir d'un jeu de données plus important (individus non sexés). Ces différentes observations permettent de proposer deux hypothèses : ce phénomène est simplement dû à une différence de comportement des individus les plus âgés (vis-à-vis de la nourriture dans des strates différentes), donc à un changement de la capturabilité lié à leur activité sexuelle, à moins qu'il ne s'agisse d'une migration d'une certaine frange de la population de femelles, notamment des individus les plus âgés, dès la période de reproduction achevée.

L'analyse de répartition des individus par sexe (tab. 9), basée sur un effectif conséquent, met en évidence une prédominance des femelles dans la région étudiée, cette tendance est inversée dans la zone tropicale et dans le canal du Mozambique, et dans le

sud de Madagascar pendant la période hivernale. Compte tenu des faibles effectifs des échantillons, ces deux derniers résultats doivent être considérés avec précaution. Par ailleurs, la figure 51 montre que la taille des espadons augmente avec la latitude, phénomène décrit dans le Pacifique par Caton *et al.* (1998), Dinardo & Kwok (1998) et DeMartini *et al.* (2000). La dominance des mâles dans la zone tropicale de l'Atlantique est de la même façon observée par Beckett (1974).

À ce stade, seuls les résultats de marquages permettront de valider ces hypothèses. Les quelques données obtenues avec des marques de type archive prouvent déjà que les représentants de cette espèce peuvent parcourir de grandes distances avant de revenir dans la même zone plusieurs mois plus tard (Takahashi *et al.*, in press).

Fécondité et fréquences de ponte

Les résultats préliminaires de séparation des ovocytes par la technique volumétrique ne se sont pas avérés concluants pour deux raisons principales :

- l'état de fraîcheur du matériel biologique dû aux contraintes de stockage prolongé en chambre froide à bord ;
- l'état de maturation des ovocytes qui peut varier fortement en quelques heures, modifiant la flottabilité (volumétrie maximale) des ovocytes.

Au cours de cette étude, plusieurs indices de fécondité ont été estimés. Les erreurs systématiques inhérentes à la méthodologie sont parfois négligées. Elles sont dues à la perte d'ovocytes hydratés lors des différentes manipulations de ce matériel biologique jusqu'au laboratoire ainsi qu'au moment des traitements des échantillons. La part d'erreur peut être importante lors de la phase de comptages. Ainsi, pour une même photographie, les valeurs comptées par deux manipulateurs peuvent différer de quelques ovocytes par gramme. Pour une gonade de 5 kg, l'erreur peut atteindre plus de 100 000 ovocytes.

Le nombre d'échantillons traités paraît faible mais, au regard des travaux similaires, l'effectif est comparable. Seul Arocha & Lee (1995) ont étudié plus de 8 individus (tab. 12).

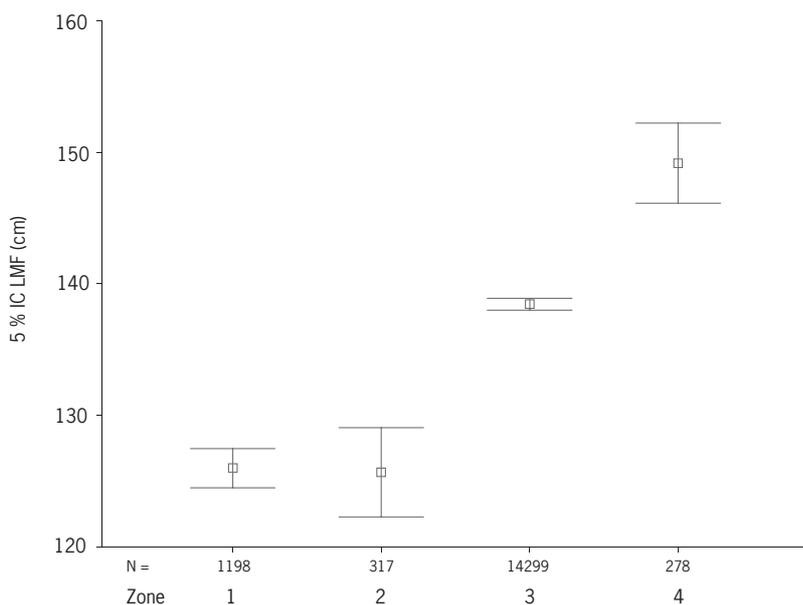


Figure 51 - Tailles moyennes en fonction de la latitude (1 : entre l'équateur et 6° S, 2 : entre 7 et 12° S; 3 : entre 13 et 25° S; 4 : > 25° S).

Tableau 12 - Sites de pêche, technique d'échantillonnage, résultats de fécondité des différents auteurs.

Auteurs	Sites de pêche	Technique d'échantillonnage	Résultats (F en nombre d'ovocytes matures, Q en nombre total d'ovocytes, taille en lmf)
Uchiyama & Shomura (1974)	Nord-Est Pacifique	Méthode gravimétrique Étude sur 8 espadons	F = $3 \cdot 10^6$ pour 80 kg à $6,2 \cdot 10^6$ pour 200 kg
Cavallaro <i>et al.</i> (1990)	Mer Tyrrhénienne	Méthode volumétrique Sur 1 individu	F = $1,6 \cdot 10^6$ pour un espadon de 192 cm et 130 kg
Taylor & Murphy (1992)	N-O Atlantique	Méthode gravimétrique Ovocytes > 750 mm Étude sur 7 espadons	F = $1,4 \cdot 10^6$ à $4,2 \cdot 10^6$ pour des espadons de 177 à 281 cm soit de 69 à 268 kg
Arocha & Lee (1995)	N-O Atlantique	Méthode gravimétrique Ovocytes > 100 mm Étude sur 29 femelles matures	F = $0,99 \cdot 10^6$ pour 166 cm à $9 \cdot 10^6$ pour 245 cm
Young <i>et al.</i> (2000)	Est Australie	Méthode gravimétrique, avec comptage sous stéréomicroscope Effectif étudié non spécifié	F = $1,18 \cdot 10^6$ à $1,87 \cdot 10^6$ pour des espadons de 173 à 190 cm (lcof)

L'établissement des relations entre la fécondité par ponte et la longueur de l'individu, entre d'une part cette fécondité, et le poids de leurs gonades, d'autre part, montre que la relation la plus significative est obtenue avec le poids des gonades. Les unités pour exprimer ce paramètre sont multiples. Généralement, la relation fécondité par ponte-poids du corps entier est utilisée ; dans notre cas, cette mesure est extrapolée à partir des tailles.

Taylor & Murphy (1992) n'observent aucune corrélation tant avec le poids qu'avec la taille. Par contre, Uchiyama & Shomura (1974) travaillent sur 8 échantillons et trouvent que la fécondité augmente avec le poids total du poisson. Arocha & Lee (1995) montrent que la meilleure corrélation s'obtient entre la fécondité par acte de ponte et la longueur (lmf). Celle-ci augmenterait avec l'âge.

Mais les résultats obtenus entre la fécondité relative par poids de corps entier et le poids de l'individu tendraient à prouver une diminution de la fertilité (nombre d'ovocytes par gramme de poisson) avec l'âge. Néanmoins, il semble que la courbe de tendance présente une phase ascendante jusqu'à une valeur seuil (environ 45 kg) suivie d'une baisse continue pour les plus grands spécimens. Seule la poursuite des estimations dans la gamme de poids appropriée permettra de le vérifier.

L'intervalle de taille des animaux étudiés varie entre 127 et 235 cm et trois espadons sur les sept échantillonnés mesurent moins de 160 centimètres. Pour Taylor & Murphy (1992), le plus petit spécimen analysé a une de taille de 170 cm (lmf) tandis qu'Arocha & Lee (1995) présentent 150 cm comme étant le minimum étudié dans le nord-ouest de l'océan Atlantique. Il s'avère donc que notre travail porte sur des animaux plus petits que ceux recensés dans la bibliographie.

Nos estimations de fécondité par acte de ponte (0,9 à 4,2 millions d'ovocytes hydratés) semblent être dans la continuité de celles calculées pour des espadons de plus grandes tailles pêchés au large d'Hawaii par Uchiyama & Shomura (1974). Des différences importantes sont mises en évidence en comparant les résultats d'autres travaux. Ainsi, pour une taille de 250 cm, les valeurs de la fécondité par acte de ponte s'échelonnent de 1,4 million (Taylor & Murphy, 1992) à 9 millions (Arocha & Lee, 1995) avec plusieurs valeurs intermédiaires (plus de 6 millions pour Uchiyama & Shomura, 1974).

Les écarts observés pour les estimations des indices de fécondité pourraient être dus à la localisation spatio-temporelle de l'échantillon, à l'état de maturation intrinsèque des individus (stade plus ou moins avancé), à des différences de fécondité entre les pontes successives (Knusen, 1977 *in* Cayré & Farrugio, 1996) ainsi qu'à l'utilisation de plusieurs méthodes d'estimation.

Pour une femelle espadon de 171 cm (lmf) correspondant à la taille moyenne de première maturité sexuelle, la fécondité par acte de ponte est d'environ 3 millions d'ovocytes. Le nombre de pontes ayant été estimé à 77 au cours de la saison, l'individu pourrait alors pondre plus de 230 millions d'ovocytes hydratés par an, soit 3 300 ovocytes hydratés par gramme de poids corporel. Pour une femelle de 179 cm (lmf), Arocha & Lee (1995) estiment cette production

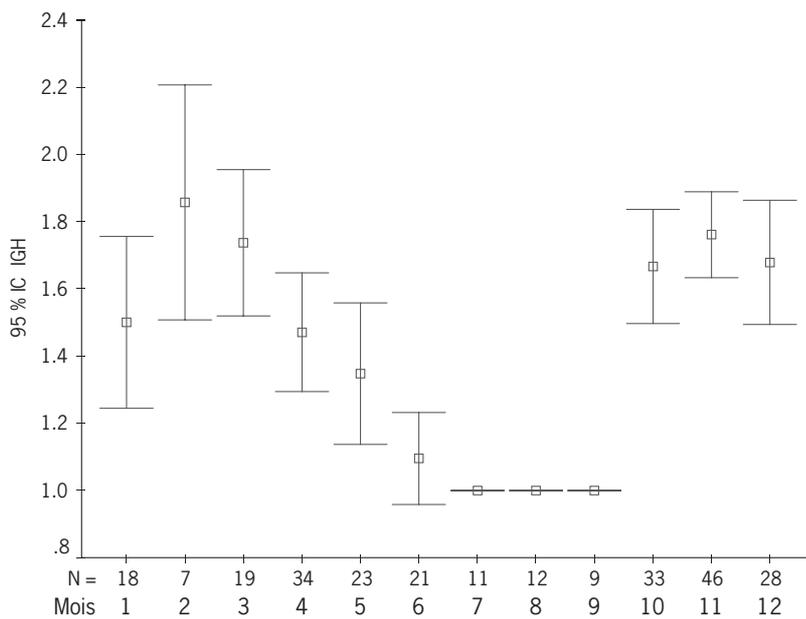


Figure 52 - Évolution de l'IGH moyen pour les femelles d'une taille supérieure à 190 cm permettant de mettre en évidence les 7 mois durant lesquels la ponte se produit (IGH>1,375).

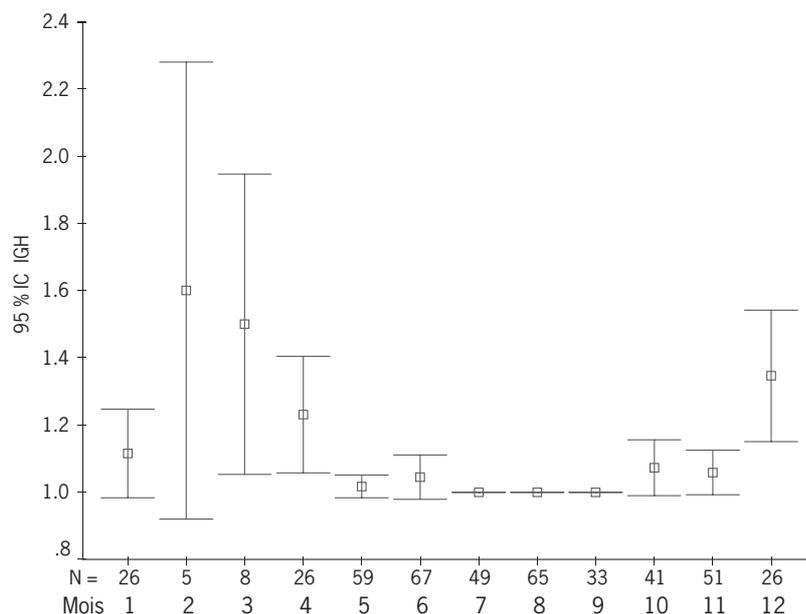


Figure 53 - Évolution de l'IGH moyen pour les femelles d'une taille comprise entre 140 et 190 cm permettant de mettre en évidence les 3 mois durant lesquels la ponte se produit (IGH>1,375).

à 160 millions d'ovocytes pour 92 actes de ponte sur 7 mois. Pour le listao, autre espèce pélagique migratrice à pontes séquentielles, la quantité d'ovocytes hydratés rapportée au poids du poisson est estimée à 7 600 sur trois mois de ponte (Stéquert & Ramcharrun, 1995b). La fécondité relative moyenne de notre échantillon de sept individus (en moyenne 41 ovocytes hydratés par gramme de poids corporel) permet de situer l'espadon entre le thon jaune (entre 54,7 et 63,5 ovocytes; Itano, 2000; ou 68 ovocytes; Schaefer, 1996) et le listao (100 ovocytes par gramme de poids de corps; Stéquert & Ramcharrun, 1995a; ou 107 pour Cayré & Farrugio, 1996).

À titre de comparaison, pour le thon jaune (*Thunnus albacares*), Schaefer (1996) et Itano (2000) définissent dans l'océan Pacifique respectivement des fréquences moyennes de ponte de 1,14 jours et 1,99 jours.

Si la réduction de la saison de ponte peut être compensée par une augmentation de la fécondité (Schaefer, 1987), il paraît important de prendre en compte la notion d'énergie dépensée par ponte pour décrire les phénomènes.

Nous pouvons penser de la même manière que la « forte fertilité » des individus de taille moyenne (entre 140 et 190 cm de lmf) est compensée par un temps réduit de trois mois de ponte alors que les plus gros individus (> 190 cm de lmf) semblent émettre leurs œufs sur toute la période identifiée (fig. 52, 53).

Les techniques d'estimation de la fécondité ont été mises au point à l'aide d'outils performants. Il paraît important de poursuivre les estimations de fécondité afin d'affiner les différentes relations présentées et de répondre aux différentes interrogations que suscitent ces premiers résultats. L'élaboration d'une série chronologique est impérative pour identifier d'éventuelles variations annuelles de la fécondité dans la zone de cette espèce.

L'un des objectifs pourrait être la vérification des hypothèses avancées par De Sylva *et al.* (2000) qui postulent que les activités humaines en dehors de la pêche (pollution par les pesticides et métaux lourds, urbanisation de la frange côtière...) peuvent potentiellement affecter les comportements liés à la ponte (lieu, taux de fertilité) et la survie des larves et des juvéniles (croissance, alimentation, développement et mortalité).

Conclusion

La reproduction de l'espadon n'avait pas fait l'objet d'une étude régionale et les résultats présentés constituent une avancée importante. Ce travail a été mené à partir d'échantillons très localisés situés entre 19° et 25° de latitude sud et entre 48 et 58° de longitude est. Cette zone peut être désormais clairement identifiée comme une zone de reproduction « intensive » durant l'été austral (octobre à avril). Sur la base de travaux récents effectués dans d'autres régions du monde, les tailles de première maturité, les différents indices de fécondité ont pu être déterminés. L'analyse des données recueillies depuis 1994 a permis de mettre en évidence l'influence de la latitude sur le sex-ratio ainsi que sur la composition en taille des individus dans la zone sud-ouest de l'océan Indien. Cela confirme les résultats obtenus dans les deux autres océans. Les différences de taille significatives enregistrées sont en relation avec le cycle sexuel. Mais les échantillonnages de sex-ratio doivent être soutenus car, pour certaines zones, les effectifs sont faibles et quelquefois inexistant certains mois.

Les variations observées dans la composition des tailles et des sexes aussi bien aux niveaux spatial que temporel nous amènent, comme DeMartini *et al.* (2000), à recommander la prise en compte de ces résultats dans les stratifications pour la standardisation des CPUE.

Des opérations de marquage couplées à des études génétiques pourraient permettre de lever un bon nombre d'interrogations soulevées au cours du chapitre consacré à l'évolution spatio-temporelle des tailles, de valider l'hypothèse des schémas migratoires et de définir des taux d'échanges entre l'océan Indien et les océans Atlantique et Pacifique.

Devant une intensification de l'exploitation de l'espadon, ces recherches sur les paramètres biologiques et écologiques sont par nature indispensables pour permettre aux scientifiques de réaliser de bonnes évaluations des stocks et aux gestionnaires d'assurer une gestion durable soutenue des ressources halieutiques. Divers cas de rapide surexploitation locale de l'espadon ont été observés dans l'Atlantique et certaines régions du Pacifique. Ces phénomènes montrent que ces recherches de base sont particulièrement indispensables pour

une bonne gestion des stocks d'espadon dès qu'un effort de pêche significatif s'intensifie. Notre étude a été menée par anticipation, avant que les classiques symptômes de la surexploitation de l'espadon - une forte baisse des rendements et des tailles moyennes - ne se manifestent.

Références bibliographiques

- Amorim Ferreira A., Arfelli C.A., 1980. The reproduction of swordfish (*Xipbias gladius*, L., 1758) in the southeast and south of Brazil. ICCAT, Coll. Vol. Sci. Pap., 9, 624-626.
- Anonyme, 1999. Rapport de la session ICCAT/SCRS d'évaluation des stocks d'espadon. ICCAT, Rapport détaillé.
- Arocha F., Lee D.W., 1995. The spawning of the swordfish from the Northwest Atlantic. ICCAT, Coll. Vol. Sci. Pap., 44(3), 179-186.
- Arocha F., Lee D.W., 1996. Maturity at size, reproductive seasonality, spawning frequency, fecundity and sex-ratio in swordfish from the Northwest Atlantic. ICCAT, Coll. Vol. Sci. Pap., 45(2), 350-357.
- Arocha F., Lee D.W., Grubich J.R., 1994. Observations on sex-ratio, maturity stages, and fecundity estimates of swordfish, *Xipbias gladius*, in the Northwest Atlantic Ocean. ICCAT, Coll. Vol. Sci. Pap., 42(1), 309-318.
- Artüz M.I., 1963. Contribution to the knowledge of the biology of the swordfish (*Xipbias gladius* L.) in the sea of Marmara. Proc. Gen. Fish. Council. Medit., 7, 459-471. Tech. Pap., 47.
- Bagenal T.B., 1973. Fish Fecundity and its relations with stock and recruitment. Rapp. P.-V. Réun. Cons. perm. int. explor. mer., 164, 186-198.
- Beckett J.S., 1974. Biology of swordfish, *Xipbias gladius* L., in the North-west Atlantic Ocean. In: Proc. Int. Billfish Symp., Part 2, Review and contributed papers. Shomura R.S., Williams F., (eds). US Dep. Commer., NOAA Tech. Rep. NMFS/SSRF-675, 105-106.
- Berkeley S.A., Houde E.D., 1983. Age determination of swordfish, *Xipbias gladius*, in the northwestern Atlantic. Bull. Mar. Sci., 50, 292-301.

- Carey F.G., Robinson H.B., 1981. Daily pattern in the activities of swordfish, *Xiphias gladius*, observed by acoustic telemetry. Fish. Bull., 79, 277-292.
- Caton A., Colgan K., Stewart P., Ramirez C., Scott M., 1998. Broadbill swordfish in the Australian fishing zone. In: Biology and fisheries of swordfish (*Xiphias gladius*). Izadore Barrett, Oscar Sosa-Nishizaki, Normam Bartoo (eds). Papers from the international symposium on Pacific swordfish, Ensenada, Mexico, 11-14 December 1994. US Dep. Commer., NOAA Tech. Rep. NMFS, 142, 276 p.
- Cavaliere A., 1963. Studi sulla biologica e pesca di *Xiphias gladius*. Nota II. Boll. Pesca Piscic. Idobiol., 18, 143-170. [Transl. Fish. Res. Board Can. Trans. Ser., 2298].
- Cavallaro G., Potoschi A., Cefali A., 1990. Fertility, gonad-somatic index and catches of eggs and larvae of *Xiphias gladius* L., 1758 in southern Tyrrhenian sea. SCRS/90/44, 502-507.
- Cayré P., Farrugio H., 1996. Reproduction biology of the skipjack (*Katsuwonus pelamis*) in the Atlantique Ocean. In: ICCAT Conf. on the international skipjack year programme. Symons P.E.K., Miyake P.M., Sakagawa G.T. (eds). ICCAT, Madrid, Spain, 252-272.
- Conand C., 1975. Maturité sexuelle et fécondité du tassergal, *Pomatomus saltator* (L., 1766), Poissons, Pomatomidae. Extrait du bulletin de l'Institut fondamental d'Afrique Noire. 37A(2), 397-466.
- De la Serna J.M., Ortiz de Urbina J.M., Macias D., 1995. Observations on sexratio, maturity and fecundity by length-class for swordfish (*Xiphias gladius*) captured with surface longline in the western Mediterranean. SCRS/95/45.
- De Vlaming V.L., 1972. Environmental control of teleost reproductive cycles: a brief review. J. Fish Biol., 4, 131-140.
- De Sylva A., Richards W.J., Capo T.R., Serafy J.E., 2000. Potential effects of human activities on billfishes (Istiophoridae and Xiphiidae) in the western Atlantic Ocean. Bull. Mar. Sci., 66(1), 187-198.
- DeMartini E., 1999. Size-at-maturity and related reproductive biology. Session report. Proceedings of the second international Pacific swordfish symposium. NOAA TM NMFS/SWFSC, 263, 161-169.
- DeMartini E.E., Uchiyama J.H., Williams H.A., 2000. Sexual maturity, sex-ratio, and size composition of swordfish, *Xiphias gladius*, caught by the Hawaii-based pelagic longline fishery. Fish. Bull., 98, 489-506.
- De Metrio G., Giacchetta F., Santamaria N., 1995. Sex-ratio and gonadosomatic index of swordfish (*Xiphias gladius*) in the northern Ionian Sea and southern Adriatic Sea. 25^e Congresso della Societa Italiana di Biologia Marina, 2, 479-481
- Dinardo G.T., Kwok W., 1998. Spatio-temporal dynamics of swordfish (*Xiphias gladius*) landings in the Hawaii-based North Pacific pelagic longline fishery. In: Biology and fisheries of swordfish (*Xiphias gladius*). Izadore Barrett, Oscar Sosa-Nishizaki and Normam Bartoo (eds). Papers from the international symposium on Pacific swordfish, Ensenada, Mexico, 11-14 December 1994. US Dep. Commer., NOAA Tech. Rep. NMFS, 142, 276 p.
- Ehrhardt N.M., Robbins R.J., Arocha F., 1996. Age validation and growth of swordfish, *Xiphias gladius*, in the northwestern Atlantic. ICCAT, Coll. Vol. Sci. Pap., 45(2), 358-367.
- Fontana A., Le Guen J.C., 1969. Étude de la maturité sexuelle et de la fécondité de *Pseudotolithus (Fonticulus) elongatus*. Cah. Orstom, sér. Océanogr., 7, 9-19.
- Gabe M., 1968. Techniques histologiques, Éd. Masson & Cie, Paris, 1113 p.
- Girin M., Devauchelle N., 1978. Décalage de la période de reproduction par raccourcissement des cycles photopériodiques et thermiques chez des poissons marins. Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys., 18, 1059-1065.
- Gorbunova N.M., 1969. Breeding grounds and food of the larvae of the swordfish [*Xiphias gladius* Linne (Pisces, Xiphiidae) sic.]. Probl. Ichthyol., 9, 375-387.

- Guitart-Manday D., 1964. Biologica pesquera del emperadoro pez espada, *Xipbias gladius* Linnaes (Teleostomi : Xiphiidae) en las aguas de Cuba. [In Sp., Engl.synp.] Poeyana, Ser. B., n° 1, 37 p.
- Hinton M.G., Taylor R.G., Murphy M.D., 1997. Use of gonad indices to estimate the status of reproductive activity of female swordfish, *Xipbias gladius*: A validated classification method. Fish. Bull., 95, 80-84.
- Hunter J.R., 1985. Preservation of northern anchovy in formaldehyde solution. In: An egg production method for estimating spawning biomass of pelagic fish: Application to the northern anchovy, *Engraulis mordax*. Lasker R. (ed.). US Dep. Commer., NOAA Tech. Rep. NMFS, 36, 63- 65.
- Itano D.G., 2000. The reproductive biology of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in Hawaiian waters and the western Tropical Pacific Ocean. Project summary, Report, 75 p.
- Kondrinskaya S.I., 1970. The larvae of the swordfish (*Xipbias gladius* L.) from Mozambique Channel. J. Ichthyol., 10, 853-854.
- Kume S., Joseph J., 1969. Size composition and sexual maturity of billfish caught by the Japanese longline fishery in the Pacific Ocean east of 130° W. Bull. Far Seas Fish. Res. Lab., 2, 115-177.
- Lowerre-Barbieri S.K., Barbieri L.R., 1993. A new method of oocyte separation and preservation for fish reproduction studies. Fish. Bull., 91, 165-170.
- Miyabe N., Bayliff W.H., 1987. A review of the Japanese longline fishery for tunas and billfishes in the eastern Pacific Ocean, 1981-1987. ICCAT, Bull. 19(1).
- Mommsen T.P., Walsh P.J., 1998. Vitellogenesis and oocyte assembly in fish physiology, vol. XI. The physiology of developing fish, Part a/Egg and larvae. Hoar W.S., Randall D.J. (eds), Academic Press, San Diego, California.
- Mugnier C., 1996. Analyse morphologique et endocrinienne des dernières étapes de l'ovogénèse et recherche d'un traitement de l'induction de l'ovulation chez le turbot (*Scophthalmus maximus*). Thèse, université de Rennes I, 129 p.
- Nakano H., Bayliff W.H., 1992. A review of the Japanese longline fishery for tunas and billfishes in the eastern Pacific Ocean, 1981-1987. ICCAT, Bull., 20(5).
- Nishikawa Y., Ueyanagi S., 1974. The distribution of the larvae of swordfish *Xipbias gladius* in the Indian and Pacific Oceans. In: Proceedings of the international billfish symposium, Kailua-Kona, Hawaiï, 9-12 Aug. 1972. Part 2. Review and contributed papers. Shimura R.S., Williams F. (eds). US Dep. Comm., NOAA Tech Rep. NMFS/SSRF, 675, 261-264.
- Palko B.J., Beardsley G.L., Richards W.J., 1981. Synopsis of the biology of the swordfish, *Xipbias gladius* Linnaeus. FAO Fish. Synopsis, 127, 25 p.
- Poisson F., Macé N., 1997. Biométrie de l'espardon (*Xipbias gladius*) dans la zone sud-ouest de l'océan Indien. Série Doc. Sci. Association Thonière, 32, 31 p.
- Sanzo L., 1922. Uovo e larva di *Xipbias gladius*. Rap. Com. Talassogr. Ital. Mem., 79, 17 p.
- Schaefer K.M., 1987. Reproductive biology of black skipjack, *Euthynnus lineatus*, an eastern Pacific tuna. IATTC, Bull., 19(2), 259 p.
- Schaefer K.M., 1996. Spawning time, frequency, and batch fecundity of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*), near Clipperton Atoll in the eastern Pacific Ocean. Fish. Bull., 94, 98-112.
- Sella M., 1911. Contribut oalla conoscenza della riproduzione e dell sviluppo del pesce spada (*Xipbias gladius* L.). R. Com. Talassogr. Ital. Mem., 2, 1-16.
- Shingu C., Tomlinson P.K., Peterson C.L., 1974. A review of the Japanese longline fishery for tunas and billfishes in the eastern Pacific Ocean, 1967-1970. ICCAT, Bull., 16(2).

- Stéquert B., Ramcharrun B., 1995a. Cycle sexuel du listao (*Katsuwonus pelamis*) de l'ouest de l'océan Indien. Aquat. Liv. Resour., 9, 235-247.
- Stéquert B., Ramcharrun B., 1995b. La fécondité du listao (*Katsuwonus pelamis*) de l'ouest de l'océan Indien. Aquat. Liv. Resour., 8, 79-89.
- Takahashi M., Okazaki M., Okamura H., Yokama K., (in press). Preliminary analysis of swimming behaviour of a swordfish using an archival tag. Third international billfish symposium, 19-23 August 2001, Cairns, Australia.
- Taylor R.G., Murphy M.D., 1992. Reproductive biology of the swordfish *Xiphias gladius* in the straits of Florida and adjacent waters. Fish. Bull., 90, 809-816.
- Uchiyama J.H., Shomura R.S., 1974. Maturation and fecundity of swordfish, *Xiphias gladius*, from Hawaiian waters. US Nat. Mar. Fish. Serv., NOAA Tech. Rep. NMFS/SSRF, 675(2), 142-148.
- Ward P., Elscot S., 2000. Broadbill swordfish : Status of world fisheries. Bureau of rural Sciences, Canberra, 208 p.
- Yabe H., Ueyanagi S., Kikawa S., Watanabe H., 1959. Study on the life history of the swordfish (*Xiphias gladius*) Linnaeus. Rep. Nankai Reg. Fish. Res. Lab., 10, 107-150.
- Young J., Drake A., Carter T., Farley J., 2000. Reproductive dynamics of broadbill swordfish (*Xiphias gladius*) in the eastern Australian AFZ: preliminary results. In: Thirteen meeting of the standing committee on tuna and billfish. Noumea, New Caledonia, 5-12 July 2000. BBRG, 12, 6 p.

Chapitre IV

Optimisation de la pêche

Régulation du stress lors de la capture des grands poissons pélagiques

David Roos⁽¹⁾, Agnès Riom⁽²⁾, François Poisson⁽¹⁾

(1) Ifremer, laboratoire Ressources halieutiques, rue Jean Bertho, BP 60, 97821 Le Port Cedex, La Réunion, France

(2) Institut national des sciences appliquées de Lyon, 20 avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex, France

Avant-propos

Cette étude est le résultat d'une collaboration étroite entre le laboratoire Ressources halieutiques de l'Ifremer à La Réunion et les stagiaires de l'école nationale vétérinaire de Nantes, de la faculté des sciences et techniques de l'université de Corse et du département de biochimie de l'institut national des sciences appliquées de Lyon. Ces stages ont donné lieu à trois rapports qui ont contribué de manière significative à cette étude. Il s'agit de :

Dezier C., 1998. Contribution à l'amélioration de la qualité des poissons pélagiques pêchés à La Réunion : proposition d'un protocole diminuant le stress dès le ferrage. Thèse de docteur vétérinaire, ENV de Nantes, 141 p.

Kerveillant E., 1998. Amélioration de la capture des grands pélagiques : technique de pêche et traitement après capture. Mémoire de DESS « Ressources animales et végétales », université de Corse, 52 p.

Riom A., 1999. Technique des hameçons injecteurs : amélioration de la qualité de la chair des poissons pélagiques par la diminution du stress intervenant lors de leur capture. Rapport de fin d'étude, INSA Lyon, 31 p.

Introduction

Depuis 1988, les captures de grands poissons pélagiques à l'île de La Réunion témoignent d'un véritable essor du secteur de la pêche, tous métiers confondus. De 350 tonnes en 1990, les captures de poissons pélagiques ont atteint plus de 3000 tonnes en 1996 (estimation en poids vif; Roos *et al.*, 1998). Cette progression est essentiellement liée à la mise en place, dès 1987, de dispositifs de concentration de poissons (DCP; Biais & Taquet, 1992; Roos *et al.*, 1998; Tessier & Poisson, 1997) et au développement d'une pêcherie palangrière pélagique, ciblant l'espadon à la palangre dérivante de surface (Poisson *et al.*,

1994). De fait, ce secteur devient l'une des priorités des gestionnaires et des acteurs du développement local.

Les ressources des océans sont exploitées à un niveau élevé et les nouvelles potentialités d'expansion se raréfient. En parallèle, la demande en produits de la mer augmente, surtout pour les espèces nobles bénéficiant de circuits de commercialisation efficaces sur des marchés porteurs comme l'Union européenne, le Japon et les États-Unis (80 % de la demande mondiale). Pour certaines ressources océaniques, comme le thon rouge (*Thunnus maccoyii*), l'albacore (*Thunnus albacares*) ou le thon obèse (*Thunnus obesus*), expédiées sur le marché du sashimi¹ de Tokyo ou pour l'espadon (*Xiphias gladius*) à destination de l'Europe, on peut véritablement parler de « pétrole bleu ».

Pour accéder à ce marché, il faut produire du poisson de qualité « supérieure ». De façon traditionnelle, il existe des techniques de décérébration, de saignée, de congélation qui concernent le poisson déjà remonté à bord. Toutefois, des problèmes de qualité liés à la dégradation de la chair subsistent malgré ces traitements. Citons, à titre d'exemple, le syndrome du « thon cuit » (Cramer *et al.*, 1981; Davie & Sparksman, 1986) qui se caractérise par une chair à l'aspect pâle, visqueuse, molle et qui développe un goût aigre. Il est de plus en plus probable que le stress et la fatigue musculaire en soient l'origine (Watson *et al.*, 1988). Sur cette base, certains professionnels de la pêche, et en particulier les palangriers, pensent qu'une « anesthésie » dans l'eau, dès le « ferrage² », permettrait d'éviter ce phénomène d'altération précoce. La méthode développée dans la présente étude pour tenter de réduire le stress est l'utilisation d'un produit anesthésiant injecté à l'aide d'un hameçon expérimental désigné sous l'appellation « hameçon injecteur ».

1. Sashimi : spécialité japonaise à base de poisson cru.

2. Ferrage : action qui consiste à tirer énergiquement sur la ligne au moment de la touche pour assurer l'accrochage de l'hameçon dans la gueule du poisson.

Pour vérifier l'efficacité de la méthode de traitement, des indicateurs sanguins ont été dosés et analysés (Dezier, 1998). Dans le cadre des programmes scientifiques de marquage, les manipulations sont souvent stressantes et traumatisantes pour le poisson. L'utilisation d'hameçons injecteurs lors des campagnes de marquage peut faciliter la capture et la mise à bord des animaux, en augmentant les taux de survie après remise à l'eau. Les expériences ont été menées à partir d'un bateau de pêche artisanale réunionnais « *Portus Veneris* », pêchant les poissons pélagiques à la ligne autour des DCP.

La qualité de la chair des poissons

Sur le marché du poisson, la bonne qualité du produit est indispensable et constitue un réel enjeu économique. En effet, pour les plus grandes espèces telles que les thons, une qualité supérieure peut leur permettre de rejoindre le marché du sashimi au Japon. Pour accéder à ce marché, plusieurs critères sont pris en compte : la fraîcheur, l'apparence, la texture et la couleur de chair. La préparation du sashimi constitue un véritable art culinaire.

Processus de dégradation de la chair

La figure 1 résume les caractéristiques et l'évolution des différentes phases qui se succèdent lors de la dégradation post-mortem des tissus (Sinclivier & Soudan, 1983). Elle montre aussi les étapes où le stress et l'activité musculaire intense interviennent dans la dégradation.

La première phase est celle de *pré-rigor*. Les fibres musculaires sont encore excitables, l'actine et la myosine sont libres. Puis, tant que le calcium intracellulaire est en concentration suffisante, des molécules d'ATP³ sont dégradées pour former irréversiblement de l'actomyosine. Les molécules d'ATP sont produites par glycolyse anaérobie, d'où la présence de lactate. La *rigor mortis* est caractérisée par cet état de contraction musculaire intense. Cette phase prend fin lorsque le stock d'ATP est épuisé. Entrent alors en jeu les protéases neutres activées par le calcium (CANPs), ainsi que d'autres enzymes intracellulaires (cathep-

sines, collagénases...). Elles dégradent la troponine, les stries Z, et ainsi les sarcomères (permettant la relaxation musculaire), les protéines sarcoplasmiques et le collagène, d'où la phase de résolution de la *rigor mortis*. La structure des cellules musculaires se détériore peu à peu. Les enzymes lysosomiales sont libérées, ce qui accélère la dégradation des fibres musculaires et permet l'entrée de bactéries au sein du muscle, stérile en condition normale. Les bactéries utilisent alors les molécules libérées comme substrat. La chair entre dans la phase d'autolyse et devient impropre à la consommation.

Une activité musculaire intense stimule la libération de calcium dans le sarcoplasme. La concentration intracellulaire en calcium est donc élevée. De plus, des molécules d'ATP sont produites en quantité pour répondre à ce besoin énergétique supplémentaire. La réaction au stress a plusieurs conséquences, dont l'une est de fournir à l'organisme des molécules énergétiques directement utilisables, l'ATP. La voie métabolique préférentielle est celle de la glycolyse anaérobie (d'où la production de lactate).

Le fait que les concentrations intracellulaires en calcium et en ATP soient fortes augmente la quantité de complexe d'actomyosine qui se forme et, par ce biais, la contraction musculaire de la phase de *rigor mortis*. Ceci provoque des lésions au niveau des fibres musculaires (permettant l'entrée de bactéries extérieures). De plus, la production de lactate abaisse le pH intracellulaire, ce qui endommage les structures cellulaires, libérant les enzymes lysosomiales, ce qui accélère la dégradation des tissus.

Le syndrome du « thon cuit » (ou burnt tuna)

Le syndrome du « thon cuit » se caractérise par une chair pâle, exsudative, développant un goût aigre. Il touche tout ou une partie du thon. Ce phénomène semble être la conséquence de l'accélération et de l'amplification du processus post-mortem de dégradation des fibres musculaires. Il est notamment dû à l'activation des CANPs par le Ca²⁺ libéré lors d'un effort musculaire intense (Watson *et al.*, 1988). Les CANPs

3. ATP : adénosine triphosphate.

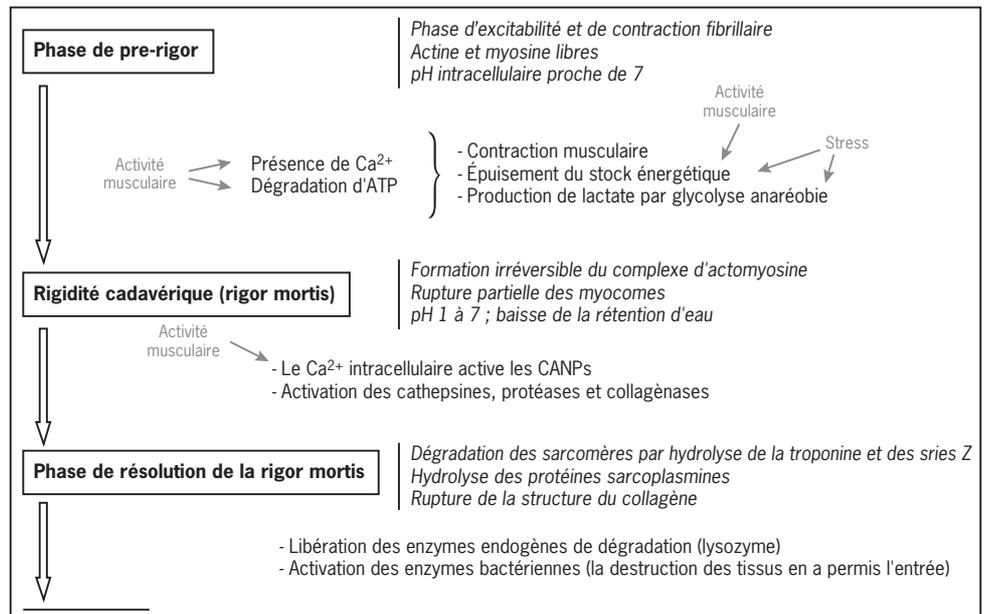


Figure 1 - Évolution post-mortem de la chair de poisson (d'après Sinclivier & Soudan, 1983).

sont des enzymes cytoplasmiques, ubiquistes, de pH optimal compris entre 5,5 et 8,0, et qui restent actives même en dessous de 5 °C.

Même si Cramer *et al.* (1981) démontrent l'absence de relation directe entre la température interne et le phénomène de « thon cuit », il est indéniable que la capacité de thermorégulation des thons accentue ce phénomène (Block, 1994). En effet, ils peuvent conserver la chaleur produite par leur activité musculaire grâce à leur système de circulation sanguine. Comme la température corporelle est plus élevée, les réactions métaboliques sont catalysées, ce qui procure au thon puissance et rapidité. Toutefois, cette adaptation à la nage a des conséquences sur la conservation de la chair, après la mort. La taille imposante de ces poissons et leur température interne élevée (jusqu'à 38 °C à la mise à bord) conduisent à un refroidissement très lent des chairs, notamment des couches musculaires les plus profondes. La chaleur active les enzymes de dégradation, ce qui aggrave le syndrome du « thon cuit ». Ce phénomène est amplifié par le choc thermique que le poisson subit lorsqu'il est plongé dans la glace et qui provoque une réponse réflexe du système nerveux central : l'augmentation de la température interne (avec les conséquences que cela implique...).

En conclusion, il semble donc que le stress et l'activité musculaire intense accentuent le phénomène de « thon cuit » qui conduit à une dépréciation non négligeable de la chair.

Comment ralentir la dégradation des tissus ?

Parce que les poissons sont prélevés au sein de populations sauvages, les pêcheurs ne peuvent contrôler la qualité de la chair par les biais de la sélection des géniteurs et du choix de l'alimentation, comme c'est le cas dans l'aquaculture. Ainsi, la qualité initiale du poisson doit être considérée comme donnée et l'accent doit être mis sur la préservation de cette qualité initiale, depuis la capture jusqu'à la vente.

Dans ce contexte, plusieurs méthodes sont déjà appliquées en vue de l'obtention de la qualité sashimi (Williams, 1986). Le poisson est capturé par la technique la moins stressante et est remonté à bord délicatement (l'utilisation de la gaffe est proscrite). La manipulation doit être la plus douce et la plus rapide possible. La mise à mort se fait par décérébration et destruction de la moelle épinière (afin d'éviter les réactions réflexes d'élévation de la température interne). Le poisson est alors saigné puis mis à refroidir dans un mélange eau de mer-glace. La température de stockage doit être idéalement maintenue autour de 0 °C si le poisson a été pris dans des eaux proches du Japon ou à -60/-70 °C pour des eaux plus lointaines.

Toutes ces manipulations concernent le poisson capturé, qui se trouve déjà dans un état de stress donné. Il semble donc intéressant de remonter plus en amont du problème : puisque le stress du poisson et son activité musculaire juste avant la capture sont directement impliqués dans la perte de qualité de la chair, il faut les réduire au maximum. Pour obtenir des poissons les plus calmes possible, l'Ifremer Réunion a décidé de mettre en place une nouvelle technique impliquant l'utilisation d'un anesthésiant lors du ferrage du poisson : ce sont les hameçons injecteurs.

Matériel et méthodes

Les techniques de pêche utilisées

Autour des DCP, les hameçons injecteurs ont été employés avec les techniques de la traîne, de la dérive et sur des palangres verticales (Roos *et al.*, 2000). Seule la première technique a donné des résultats satisfaisants. La ligne de traîne est constituée d'un fil de nylon monofilament (50 à 200/100 mm). Elle est montée sur une canne équipée d'un moulinet et terminée par un leurre artificiel. Les thons, la dorade coryphène, le thon banane et les poissons à rostre sont les principales espèces ciblées par cette technique pratiquée de jour.

Élaboration des hameçons injecteurs

L'hameçon injecteur conçu en 1997 (Dezier, 1998) permet de diffuser un anesthésiant dès que les poissons mordent. Le modèle retenu est constitué d'un tube métallique ou plastique (fig. 2), à l'intérieur duquel un piston permet l'administration d'une substance anesthésique à l'intérieur ou devant la gueule du poisson, lors du mordage. L'ensemble du mécanisme est relié à la ligne principale fixée à une canne de traîne munie d'un moulinet. La taille du cylindre, et donc sa capacité, sont variables selon les espèces ciblées (de 2 à 20 ml).

Choix de l'anesthésiant

Plusieurs anesthésiants sont disponibles sur le marché de l'aquaculture : étomidate, CO₂, MS222 (tricaine méthane sulfonate). Nous avons choisi de tester un produit néozélandais, l'Aqui-S (<http://www.aqui-s.com>), composé de 50 % de 2-méthoxy-4-propényl phénol et 50 % de polysorbate 80 %. D'un usage courant en aquaculture, il est en cours d'homologation en Europe.

Ce produit est utilisé notamment pour les thons rouges (*Thunnus maccoyii*), élevés en cage en Australie, afin de faciliter leur manipulation. À raison de 5 à 10 ml de produit pur pour 1 000 litres d'eau, il provoque une anesthésie légère : perte d'équilibre, mauvaise coordination des mouvements de la nage. Avec un volume de 17 à 25 ml pour 1 000 l d'eau, le poisson est soumis à une anesthésie profonde qui se manifeste par une diminution de la ventilation des ouïes, voire une absence pendant 5 min (<http://www.aqui-s.com>). Il présente plusieurs avantages par rapport à d'autres produits :

- le produit est très concentré, ce qui permet de l'utiliser dans de petites quantités (2 ml par seringue en général, 20 ml au maximum) et d'avoir un système anesthésiant discret ;
- il n'est pas trop onéreux : 4 FF par seringue de 2,5 ml ;
- le temps de récupération après le choc anesthésique est court (1 min pour une anesthésie légère, 5-10 min pour une anesthésie profonde) ;
- le poisson n'a pas besoin d'être mis en quarantaine avant d'être abattu et peut être consommé sans délai.

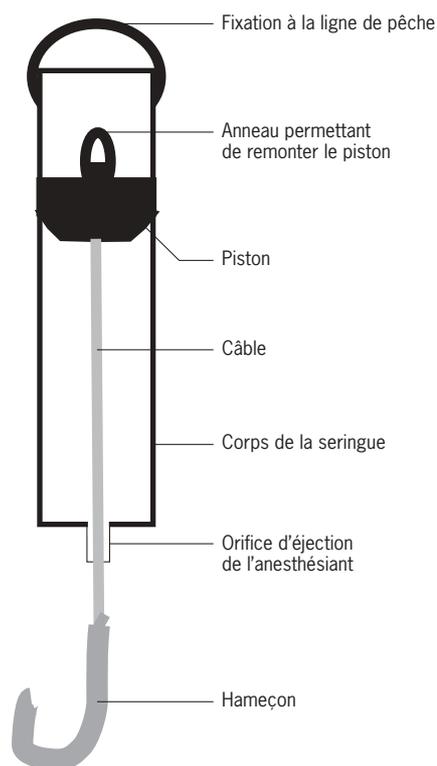


Figure 2 - Schéma d'un hameçon injecteur.

Choix des facteurs de stress

L'analyse du comportement du poisson lors de la capture reste subjective. Pour évaluer l'effet du traitement et les voies physiologiques concernées, plusieurs dosages sont proposés par Mazeau & Mazeau (1981) puis par Barton & Iwama en 1991 (fig. 3). Ce schéma permet de visualiser l'interaction qui existe entre la réponse au stress et les effets d'une activité musculaire intense.

Pour évaluer le stress, 4 facteurs sanguins ont été retenus : le cortisol, le lactate, le glucose et les ions chlorures. Ils permettent d'examiner les différentes voies métaboliques, à différents niveaux. Cependant, les résultats ne sont pas toujours homogènes. D'autres indicateurs de stress, comme le pH sanguin, ont donc été envisagés (Comte, 1995), mais des difficultés de mise en œuvre et de coût n'ont pas permis d'utiliser ces indicateurs.

Protocole appliqué à chaque échantillon

Les poissons sont remontés à bord, si possible sans être gaffés, pour ne pas provoquer de stress supplémentaire. Puis, ils sont immobilisés et des prélèvements sanguins sont effectués. En général, la ponction se fait au niveau du cœur, sans ouvrir le poisson. Par contre, le prélèvement sanguin en aveugle est très difficile à réaliser chez la dorade. Dans ce cas, il faut donc l'ouvrir très rapidement et piquer directement le cœur. Pour chaque poisson, 2 prélèvements sont effectués dans des tubes distincts. En effet, selon les molécules recherchées, le sang est recueilli sur anticoagulant ou non :

- tubes secs : dosages du cortisol et des ions chlorure ;
- tubes avec fluorure de sodium-oxalate de potassium : dosages du lactate et du glucose. Un minimum de 5 ml de sang est nécessaire pour recueillir ensuite suffisamment de plasma.

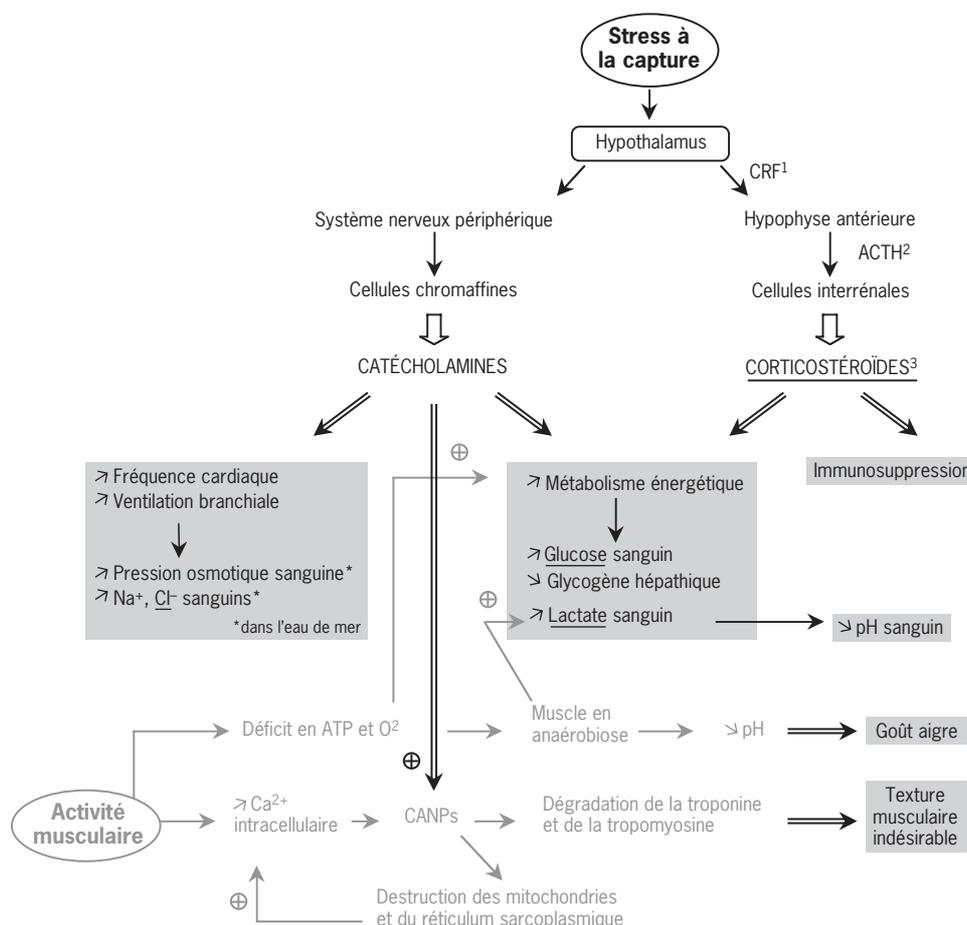


Figure 3 - Stress, activité musculaire et qualité de la chair.

Les échantillons sont conservés temporairement dans de la glace pilée additionnée d'eau de mer.

Lors de chaque capture, une grille d'observations est remplie.

Traitement des échantillons

Chaque tube est centrifugé 10 minutes à 5 000 tours par minute. Le surnageant est récolté dans un tube Eppendorf. Un minimum de 0,5 ml est requis pour effectuer les dosages. Les échantillons sont stockés à -18 °C avant d'être transmis pour analyse au laboratoire de biochimie de l'hôpital de Bellepierre, à Saint-Denis de La Réunion.

Analyse statistique

L'analyse statistique a été menée grâce au logiciel SPSS 8.0 pour Windows. Les tests sont tous réalisés avec le risque de première espèce $\alpha = 5 \%$. Les distributions de fréquence sont présentées sous forme d'histogrammes. Les fréquences sont exprimées non pas en effectifs mais en pourcentages pour permettre une comparaison directe des courbes entre elles. Pour chaque espèce, les 4 indicateurs de stress sont mis en parallèle, pour comparer les poissons témoins et les poissons anesthésiés.

Les valeurs aberrantes sont recherchées puis éliminées s'il est possible de les expliquer. Les tests des valeurs extrêmes tels que les tests de l'étendue, de Dixon ou de Grubs ne peuvent être appliqués que sur des distributions normales et n'ont aucune valeur si cette condition n'est pas remplie. Nous ferons donc appel à des notions plus subjectives, en nous appuyant sur les « boîtes à moustaches ».

Test de normalité

Deux tests sont proposés par le logiciel SPSS 8.0 pour établir la normalité des distributions :

- Kolmogorov-Smirnov : test de normalité basé sur la valeur absolue de la différence maximale entre la distribution cumulée observée et celle, théorique, basée sur l'hypothèse de normalité;
- Shapiro-Wilk : teste l'hypothèse selon laquelle l'échantillon provient d'une distribution normale. Il est plus puissant que le test de Kolmogorov-Smirnov, mais la taille de l'échantillon doit être inférieure à 50. Pour que les distributions soient considérées comme normales, les 2 tests devront être concordants pour le même échantillon.

Test de comparaison des lots anesthésiés par rapport aux témoins

Pour une question d'homogénéité des résultats, ce sont des tests non paramétriques qui sont utilisés, que les populations soient normales ou non. Ces tests non paramétriques sont suffisamment puissants pour être utilisés, même sur des populations normales.

Deux tests non paramétriques sont disponibles sur le logiciel :

- Z de Kolmogorov-Smirnov : test permettant de déterminer si 2 échantillons ont la même distribution. Il est sensible à n'importe quel type de différence entre les 2 distributions (médiane, dispersion, asymétrie...). Ce test compare les 2 distributions cumulées et porte sur la plus grande différence entre les 2 distributions;
- U de Mann-Whitney : détermine si 2 échantillons indépendants sont issus de la même population. Il utilise les rangs des observations : U est le nombre de fois qu'une valeur du 1^{er} groupe précède une valeur du 2nd groupe, quand les valeurs sont triées dans l'ordre croissant. Il ne se base que sur les tendances centrales et ne tient pas compte des autres paramètres de distribution (variance, asymétrie...).

C'est le test de Mann-Whitney qui est utilisé, car c'est la tendance centrale qui nous intéresse. En effet, l'anesthésie peut très bien modifier la variance et la distribution des concentrations sanguines : tous les poissons, en fonction de leurs caractéristiques propres (poids, sexe, stade de maturité sexuelle, état de stress initial, réponse physiologique à l'anesthésiant...), n'auront pas la même réaction face au traitement. De plus, il est très difficile de contrôler la quantité qui a effectivement été absorbée par le poisson. Sa réponse risque d'être différente s'il a reçu une dose simple ou double. Une différence de la variance ou de distribution ne signifie donc pas forcément que l'anesthésiant a un effet sur les concentrations sanguines. Par contre, ce qui est intéressant, c'est de savoir si, de façon globale, la tendance centrale est modifiée par l'anesthésie.

Des tests unilatéraux sont réalisés car on connaît le sens théorique de variation des différents indicateurs de stress : l'anesthésie devrait abaisser les concentrations en chlore, cortisol, glucose et lactate.

Résultats

Distributions de fréquence

Pour chaque espèce et chaque indicateur de stress, les histogrammes de distribution sont représentés sur la figure 4 et mettent en parallèle les poissons témoins et les anesthésiés. Sur chaque graphique est aussi juxtaposée la courbe de Gauss théorique, correspondant aux valeurs observées.

Les histogrammes ne présentent, pour la plupart, pas de grande similitude avec les courbes normales. Il est toutefois intéressant de constater que, par contre, les lots témoins présentent pour les chlorures une distribution assez proche de la théorique. Il est à noter aussi que les poissons anesthésiés ont des distributions de formes beaucoup moins régulières. Souvent, la courbe de distribution des lots anesthésiés se décompose en 2 parties :

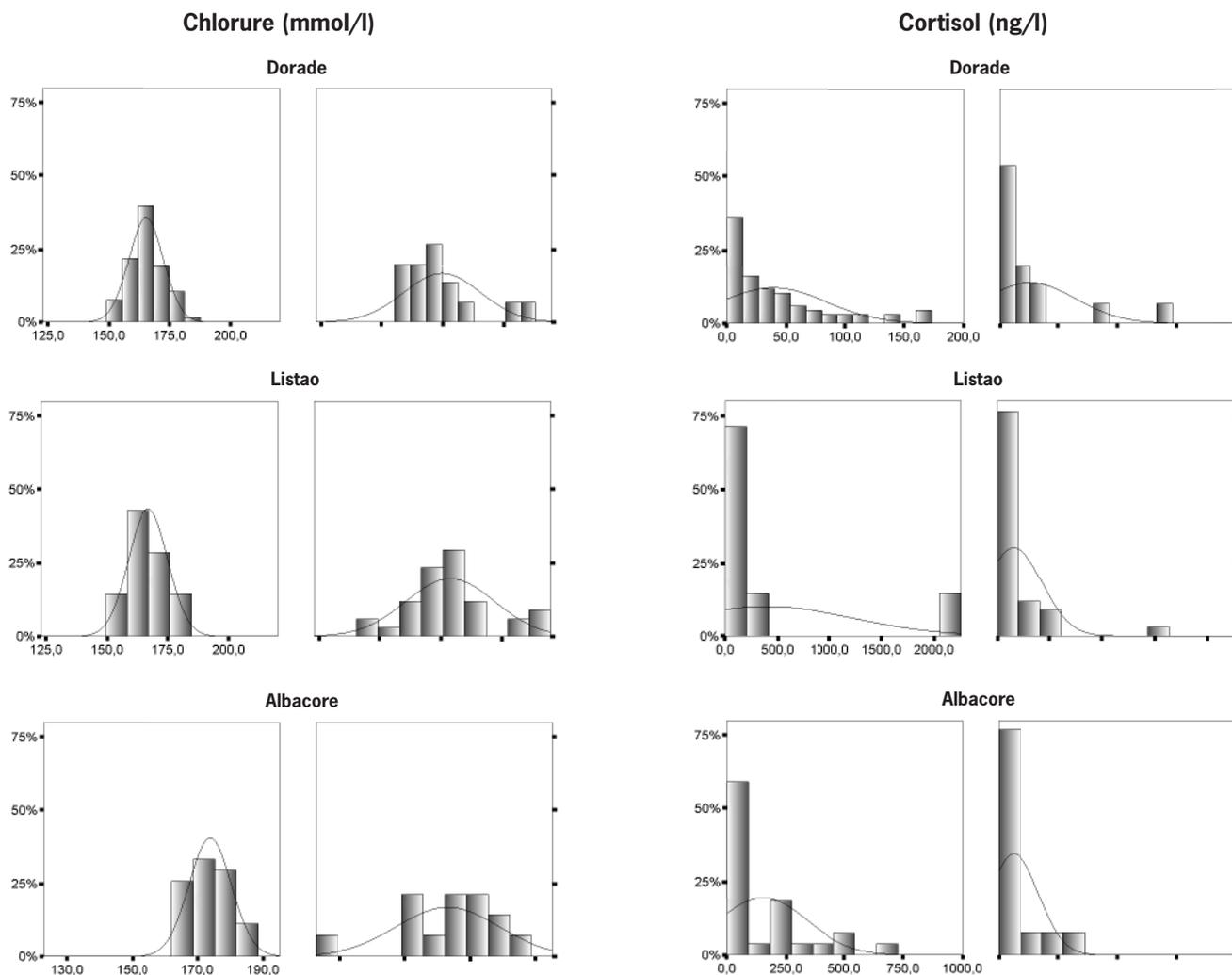
- la première, centrale, regroupe la majorité des valeurs ;

- la deuxième se détache des autres et concerne les concentrations supérieures.

Les histogrammes montrant le dosage du cortisol ont une allure caractéristique : ils présentent un maximum de fréquence pour les plus faibles valeurs, puis la fréquence décroît progressivement lorsque les concentrations sanguines augmentent. L'étendue des valeurs est très importante puisque pour le lot de listao témoin, elles s'étalent de 0 à 2 255 nanogrammes par litre.

Valeurs aberrantes

Pour déterminer quelles sont les valeurs aberrantes, nous utilisons la représentation de « boîte à moustaches » qui fait apparaître les valeurs extrêmes (fig. 5).



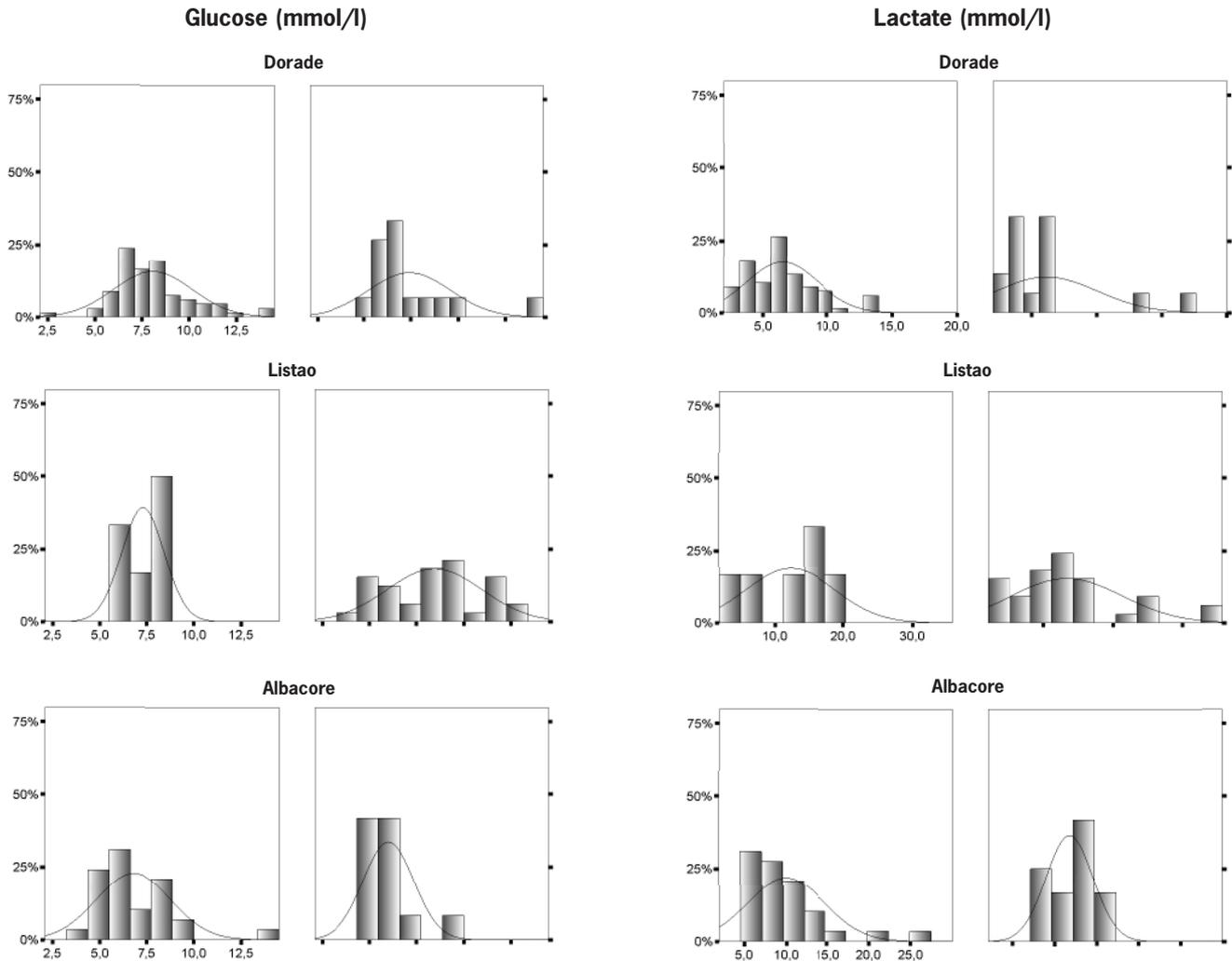


Figure 4 - Concentration des indicateurs de stress pour les 3 espèces (témoins à gauche, anesthésiés à droite).

L'observation des valeurs extrêmes permet de mettre en évidence que certains poissons ont plusieurs de leurs indicateurs de stress qui appartiennent aux valeurs extrêmes. Ainsi, le poisson n° 20 a trois de ses indicateurs de stress (glucose, lactate et cortisol) dont les concentrations sont parmi les plus élevées. Cela signifie donc que ce poisson était dans un état de stress particulièrement grand, qui sortait du cadre des conditions expérimentales. Les poissons n° 143 (cortisol et lactate) et 72 (glucose et lactate) sont dans le même cas, pour 2 de leurs indicateurs de stress. On peut leur appliquer le même raisonnement que pour le poisson n° 20. Ces 3 poissons peuvent donc, par leur état de stress exceptionnel, être exclus de la suite des traitements statistiques.

Deux listaos, un témoin et un anesthésié, présentent des valeurs très particulières. Ils ont un taux de cortisol particulièrement élevé, alors que les autres indicateurs reflètent la tendance générale. Ces poissons ne sont pas notés sur la « boîte à moustaches » du cortisol car le diagramme n'aurait plus été lisible. Les valeurs des concentrations de leurs différents indicateurs de stress sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 - Valeurs des concentrations des différents indicateurs de stress.

	Listao témoin		Listao anesthésié	
	Observé	Moyenne	Observé	Moyenne
Chlorure (mmol/l)	160	166,86	163	178,88
Cortisol (ng/l)	2 255	86,17	1 448	119,97
Glucose (mmol/l)	6	7,28	9,3	8,44
Lactate (mmol/l)	16,1	12,3	15,2	13,33

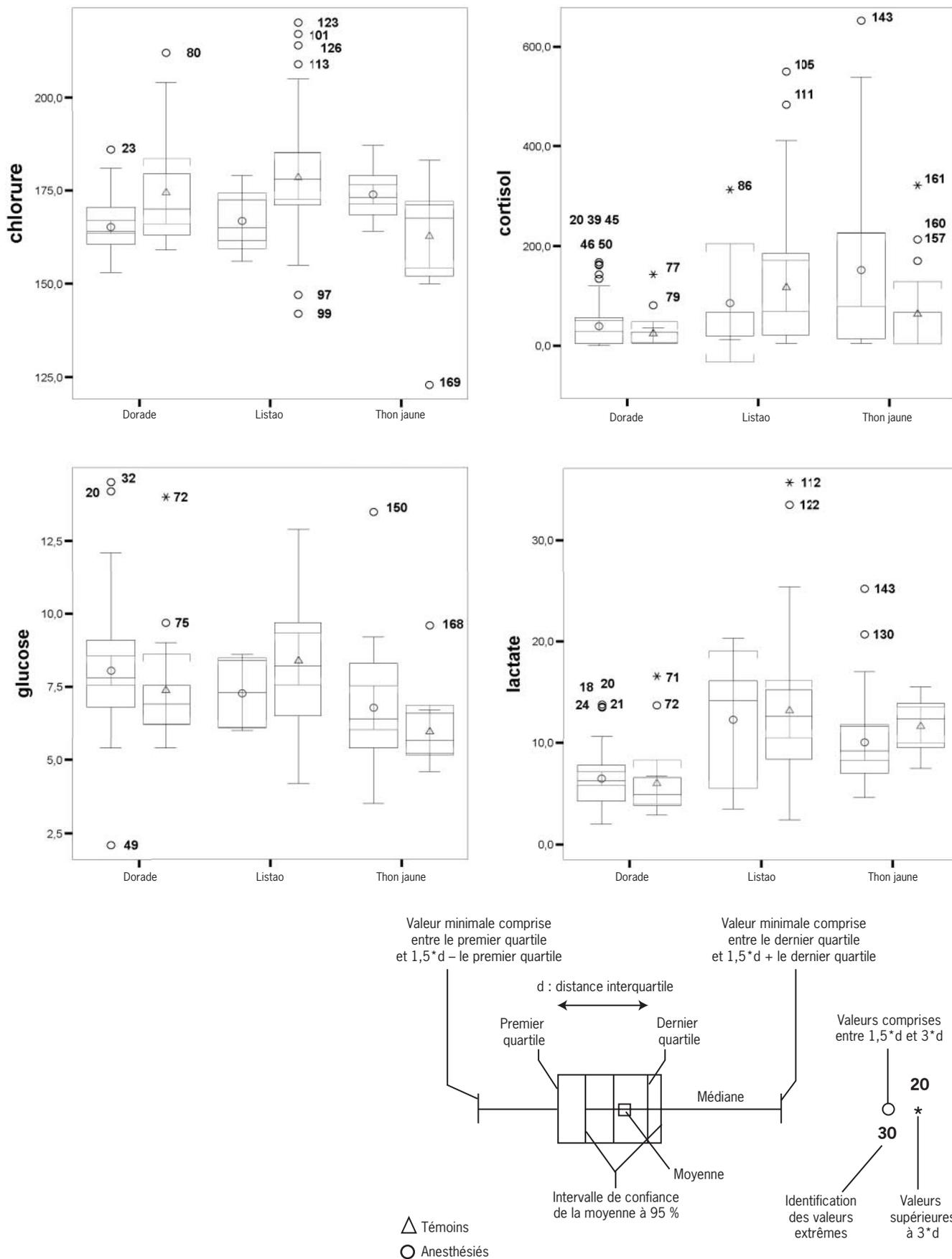


Figure 5 - Représentation des valeurs extrêmes des indicateurs de stress pour chaque échantillon.

Comme les valeurs de cortisol sont très élevées, elles risquent d'influer de façon importante sur la moyenne et ainsi de fausser la tendance centrale de l'échantillon. Ces deux valeurs seront donc omises pour la suite des traitements statistiques, mais seulement en ce qui concerne le cortisol. Comme les valeurs des autres indicateurs de stress sont cohérentes avec l'ensemble des prélèvements, elles seront considérées comme faisant partie de l'échantillon.

En ce qui concerne les autres valeurs extrêmes, aucune raison précise ne permet de les éliminer. L'observation des poissons lors de leur prise n'indique aucun état de stress particulier. En outre, la taille des échantillons n'est pas suffisante pour se permettre de la réduire.

Tests de normalité

Les valeurs de 'p' dans les résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov et de Shapiro-Wilk sont regroupées dans le tableau 2.

Les distributions sont considérées comme normales lorsque la valeur p est supérieure à 0,05 et que les 2 tests sont concordants. Ainsi, environ un tiers des échantillons traités (9/24) présente une distribution normale. Les taux de cortisol ne sont pas normaux, comme on pouvait le prévoir après examen des distributions (fig. 4).

L'observation de l'histogramme des taux de chlorure de l'échantillon témoin de dorade le fait paraître très proche de sa courbe gaussienne théorique, ce qui n'est pas du tout confirmé par les tests statistiques. En outre, les lots témoins de listao pour le lactate ou le glucose sont, eux, considérés comme normaux alors que leur distribu-

tion normale n'est pas évidente sur les histogrammes.

Comparaison des poissons anesthésiés par rapport aux poissons témoins

Le test de Mann-Whitney a été appliqué aux différents échantillons pour en comparer la tendance centrale. Les résultats sont regroupés dans le tableau 3.

- Les dorades ont des taux de cortisol et de lactate différents selon qu'elles sont anesthésiées ou non.
- En ce qui concerne les thons jaunes, ce sont le cortisol et le lactate qui varient.
- Le cas des listaos est très particulier. Le cortisol, le lactate et le glucose mettent en évidence une différence de l'état de stress entre lots témoins et anesthésiés. Cependant, au lieu de diminuer grâce à l'anesthésie, les concentrations de ces molécules augmentent, ce qui est contraire à toute attente. En effet, avec l'utilisation des hameçons injecteurs, les poissons devraient être moins stressés et moins fatigués.

Tableau 2 - Résultat des tests de normalité.

		Dorade			Listao			Thon jaune		
		n	KS	SW	n	KS	SW	n	KS	SW
Chlorure	Témoin	67	0	*	7	0,2	0,839	26	0,2	0,454
	Anesthésié	14	0,081	0,01	34	0,028	0,072	14	0,2	0,12
Cortisol	Témoin	68	0	*	6	0,003	0,01	26	0	0,01
	Anesthésié	14	0,001	0,01	33	0	0,01	13	0	0,01
Glucose	Témoin	66	0,076	*	6	0,2	0,255	28	0,145	0,025
	Anesthésié	14	0,033	0,074	33	0,2	0,262	12	0,116	0,015
Lactate	Témoin	67	0,2	*	6	0,195	0,405	28	0,2	0,029
	Anesthésié	14	0,001	0,01	33	0,002	0,01	12	0,2	0,481

■ Cas où l'échantillon est considéré comme normal.
 ■ Cas où un seul des 2 tests prouve la normalité des échantillons.
 n = taille de l'échantillon;
 KS = test de Kolmogorov-Smirnov;
 SW = test de Shapiro-Wilk;
 *n>50, d'où test de Shapiro-Wilk non valide.

Tableau 3 - Résultats des tests de comparaison entre poissons témoins et anesthésiés.

		Dorade				Listao				Thon			
		n	μ	σ	MW	n	μ	σ	MW	n	μ	Sigma	MW
Chlorure	Témoin	67	165,16	7,19	0,046	7	166,86	8,11	0,042	26	173,81	6,55	0,023
	Anesthésié	14	174	16,01		34	178,88	18,06		14	163,14	15,95	
Cortisol	Témoin	68	38,68	42,63	0,441	6	86,17	113,04	0,969	26	133,15	158,76	0,059
	Anesthésié	14	28,76	39,08		33	119,97	146,29		13	66,4	103,12	
Glucose	Témoin	66	7,96	1,97	0,034	6	7,28	1,14	0,276	28	6,8	2	0,215
	Anesthésié	14	6,95	1,21		33	8,44	2,49		12	6,01	1,34	
Lactate	Témoin	67	6,39	2,62	0,097	6	12,3	6,47	0,8	28	9,5	3,69	0,02
	Anesthésié	14	5,6	3,44		33	13,33	8		12	11,76	2,78	

■ Cas où le test de Mann-Whitney détecte une différence entre les témoins et les anesthésiés.
 ■ Sens de variation de la moyenne non conforme à ce qui était attendu.
 n = taille de l'échantillon;
 μ = moyenne de l'échantillon;
 σ = écart-type de l'échantillon;
 MW = valeur p déterminée par le test de Mann-Whitney.

Pour les taux de chlorure des dorades et de lactate chez les thons, bien que la différence entre les individus témoins et les anesthésiés ne soit pas significative, la variation des moyennes avec l'anesthésie est contraire à la théorie.

Les concentrations sanguines de chlorure ne permettent de détecter aucune différence significative entre les lots témoins et anesthésiés, quelle que soit l'espèce considérée. Par contre, le cortisol est significatif pour chacune des espèces (moins net pour les listaos).

Discussion

Étude de la distribution des échantillons

Taille des échantillons

L'échantillonnage est soumis à des contraintes particulières. Même si les techniques de pêche permettent de cibler les espèces, elles ne sont pas assez sélectives. De plus, la présence des poissons est aléatoire. La concentration et la proportion des différentes espèces autour des DCP varient chaque jour. On ne peut donc pas exercer une réelle sélection de l'espèce à capturer. Compte tenu de ces difficultés, la taille des échantillons est restée insuffisante pour la plupart des espèces étudiées.

Influence de l'anesthésie

Les distributions de fréquence mettent en évidence le fait que, chez les poissons anesthésiés, des groupes de valeurs se détachent de la tendance globale, vers des taux plus élevés. On peut voir dans ce phénomène l'effet de l'anesthésie.

- Le manipulateur, qui pourrait influencer l'état de stress des poissons par sa façon de prélever le sang, a été mis hors de cause. En effet, les valeurs supérieures à la normale regroupent des observations de 3 opérateurs différents.
- Une partie de la population testée peut être moins sensible à l'anesthésiant et/ou plus sensible au stress engendré par la ponction cardiaque. Ces individus seront donc plus stressés que l'ensemble de la population.
- À cela peut s'ajouter le fait suivant : certains facteurs (sexe, poids, âge...) peuvent ne pas influencer directement le métabolisme basal des poissons. La courbe de dis-

tribution obtenue aura donc un profil gaussien. Toutefois, ils peuvent définir des catégories dont la réponse à un traitement particulier est différente (par exemple, des rats obèses sont plus susceptibles de maigrir et de répondre positivement à un produit amaigrissant que des rats qui sont anorexiques...). Ainsi, l'anesthésie sépare deux sous-populations qui semblaient homogènes sans l'application du traitement. Plusieurs facteurs (sexe, poids, état de stress) ont été observés, mais ils ne permettent pas de mettre en évidence l'implication de l'un d'entre eux.

Il semble donc que ce soit bien l'anesthésie qui scinde la population, initialement homogène, en deux sous-populations. Il reste à déterminer quel peut être le facteur menant à cette différenciation.

Allure générale de la distribution

• Cas du cortisol

La courbe de distribution du cortisol est très caractéristique, pour toutes les espèces considérées. Son maximum est atteint pour les concentrations les plus faibles, puis les effectifs diminuent progressivement lorsque les concentrations plasmatiques augmentent. Cette courbe peut rappeler les distributions obtenues lors de dénombrements.

Le fait que le cortisol soit une hormone peut expliquer sa distribution particulière. En effet, les hormones se retrouvent dans le sang de façon très ponctuelle : temps de latence entre le stress et la réaction à ce même stress, flash de sécrétion et catabolisme très rapides. Il est donc rare de se trouver exactement au moment où la concentration sanguine est maximale. De plus, les variations sont très rapides, ce qui implique que les niveaux de sécrétion chez les différents poissons ne sont pas comparables. Il faudrait, par exemple, s'assurer que le pic de sécrétion est atteint.

• Cas des autres indicateurs de stress

Les autres indicateurs de stress suivent une distribution qui a, le plus souvent, l'allure d'une courbe normale, avec un maximum de concentration entouré d'une certaine marge de variation. En théorie, les concentrations des molécules plasmatiques suivent généralement une loi normale. Il est donc cohérent de retrouver cette forme.

Cependant, les tests statistiques ne montrent pas une relation très étroite entre les distributions expérimentale et théorique :

- d'une part, les prélèvements sont effectués alors que les indicateurs de stress n'ont pas encore atteint leur maximum (voir ci-dessous : Pertinence des indicateurs de stress). Les courbes de distribution sont donc établies à partir de valeurs qui sont susceptibles de varier et qui ne sont donc pas forcément comparables ;

- d'autre part, nous avons vu ci-dessus que la taille des échantillons était parfois insuffisante. Ceci est d'autant plus important que les facteurs qui peuvent influencer la réponse au stress et à la fatigue musculaire sont très nombreux : quantité d'anesthésiant absorbé, taille du poisson, sexe, stade de maturité sexuelle, état physiologique général. Aussi, le regroupement des données selon les espèces est un critère arbitraire qui n'est pas forcément suffisant pour décrire au mieux l'hétérogénéité des populations. Mais séparer les espèces en sous-catégories plus précises nécessite d'avoir des lots initiaux beaucoup plus grands, afin que les données scindées puissent rester exploitables.

Bien que des facteurs déforment la distribution des observations, on peut dire que l'allure générale des courbes est gaussienne. Toutefois, les résultats aux tests statistiques ne permettent pas de les exploiter comme étant normales.

Pertinence des indicateurs de stress

Cas des listaos

Le cas des listaos est considéré séparément. En effet, pour tous les indicateurs de stress, leurs concentrations chez les poissons anesthésiés sont supérieures à celles des témoins.

Nous avons déjà souligné les problèmes liés à la taille de l'échantillon des témoins. Le nombre d'observations est beaucoup trop faible pour que cet échantillon soit représentatif de la population.

Toutefois, il se peut que d'autres facteurs entrent en compte. En effet, il est remarquable que tous les indicateurs de stress soient concernés par le même sens de variation. Il se peut que ce soit le signe d'un état de stress global des poissons. Dans ce cas, nous serions face à un anesthésiant qui, au lieu de calmer le poisson, le stresserait. Il faut donc déterminer quel pourrait être ce facteur de stress.

• Le produit Aqui-S a une odeur très forte qui s'apparente à celle du clou de girofle. Il est donc envisageable que, lorsque le nuage d'anesthésiant se forme autour de sa tête, le poisson perçoive une forte stimulation olfactive inhabituelle qui entraînerait une réaction de stress. Pour vérifier cette hypothèse, il faudrait savoir si les listaos, plus que les autres espèces, sont sensibles à leur environnement olfactif. Aucune référence bibliographique n'ayant été trouvée à ce sujet, cette question reste en suspens.

• Il est prouvé que l'anesthésie joue un rôle sur la cortisolémie et la glycémie (Thomas & Robertson, 1991). En effet, une courte anesthésie, à une dose immobilisante de MS222, réduit le stress provoqué par une capture ou une manipulation. En revanche, une anesthésie de longue durée (15 à 30 min au minimum) peut à elle seule induire des élévations significatives du cortisol et du glucose plasmatiques. Schreck (1981) a suggéré que l'anesthésie à dose immobilisante, avant la capture ou la manipulation, permet de réduire le stress en éliminant la perception ou la détection de la condition stressante. D'un autre côté, l'hypercortisolémie constatée lors des anesthésies prolongées au MS222 peut s'expliquer par l'action asphyxiante de cet anesthésiant. Toutefois, la relation causale directe entre l'effet hypoxique et l'induction de la réaction de stress n'est pas clairement établie.

Dans notre cas, les listaos sont des poissons de taille réduite par rapport aux dorades et aux thons. Il se peut donc qu'une dose simplement immobilisante pour ces derniers plonge les listaos dans un état de sédation profond. Or, on sait que l'Aqui-S peut provoquer un arrêt de la ventilation branchiale pendant 5 minutes en cas d'anesthésie lourde. Il serait intéressant de vérifier cette hypothèse en connaissant précisément le mode d'action de l'Aqui-S. La question a été posée au fabricant mais aucune réponse n'a été communiquée en retour.

En conclusion, le cas des listaos est surprenant et mériterait d'être approfondi. Il reste à déterminer si seule la taille de l'échantillon témoin est en cause ou si l'anesthésiant lui-même interfère dans la réaction au stress de la capture.

Chlorure

Le dosage du chlorure ne permet d'établir aucune différence entre témoins et anesthésiés, quelle que soit l'espèce considérée. Normalement, on peut s'attendre à une hyperchlorurémie en eau salée. Elle avait été observée lors des précédents dosages.

Une recherche bibliographique plus précise a permis d'établir que le délai d'apparition des désordres osmotiques est assez variable : de 1 heure (Harrel & Moline, 1992) à 3-6 heures (Woodward & Strange, 1987). Ce délai est beaucoup plus long que la période qui sépare la capture du poisson du prélèvement sanguin (de l'ordre de quelques minutes) et explique parfaitement l'absence de résultat.

Nous pouvons donc conclure que les ions chlorures ne constituent pas un bon indicateur de stress à court terme, comme c'est notre cas. Leur dosage devrait donc être abandonné pour la suite de l'étude. C'était pourtant le seul indicateur qui reflétait uniquement la voie des catécholamines. Il serait donc intéressant d'en trouver un autre qui remplisse la même fonction, pour voir quelle est la part de chacune des voies dans la réponse au stress.

Cortisol

Il est clair, sur les distributions de fréquence, que l'anesthésie provoque une baisse du taux de cortisol dans le sang chez le thon et la dorade. De même, les tests statistiques confirment ce résultat.

Le cortisol constitue donc un bon indicateur de stress, dont le délai d'apparition correspond aux temps de prélèvement et dont les variations sont quantifiables. De plus, son amplitude de variation est proportionnelle à la fréquence et à l'intensité du facteur stressant. Ainsi, une manipulation stressante (en l'occurrence la sortie de l'eau du poisson pendant 30 secondes), répétée à intervalles de temps réguliers (3 heures), provoque une augmentation de l'amplitude de l'hypercortisolémie, proportionnelle au nombre de manipulations subies (Barton *et al.*, 1986).

Selon les espèces étudiées, le maximum d'amplitude du taux sanguin de cortisol est atteint entre 8 et 30 minutes (Comte, 1995). Les prélèvements ne sont donc pas effectués au moment optimal, d'où la distribution singulière du cortisol. Pour amé-

liorer ce dosage, il pourrait être souhaitable de ne pas remonter le poisson dès la capture, mais de le laisser entre 10 et 15 minutes dans l'eau. Ainsi, les prélèvements sanguins se feraient avec un même intervalle de temps, et cela permettrait aux différents paramètres sanguins d'apparaître ou de se stabiliser. Les résultats gagneraient ainsi en homogénéité.

Glucose

Chez de nombreuses espèces, on note une hyperglycémie consécutive à un stress, qui apparaît entre 15 minutes et 3 heures (Thomas & Robertson, 1991). Une proportionnalité entre, d'une part, l'intensité ou la répétition de l'agent stressant, et, d'autre part, l'amplitude de l'hyperglycémie a été mise en évidence comme pour le cortisol (Barton *et al.*, 1986).

Chez le thon, le dosage du glucose permet de mettre en évidence une différence entre les poissons témoins et les anesthésiés. Ce n'est pas vrai pour la dorade.

Un grand nombre de facteurs peut influencer la glycémie et donc la réponse des poissons au stress par cette voie :

- L'espèce joue un grand rôle sur la modulation de la glycémie. En effet, rien que des différences de souches induisent des changements de la glycémie chez la truite arc-en-ciel (Woodward & Strange, 1987). On peut donc supposer que les comportements sont variables selon les espèces. Dans ce contexte, les dorades ne subiraient que de très légères variations de leur taux de glucose sanguin.
- L'alimentation influence la glycémie basale. Ainsi, des différences de comportement alimentaire peuvent expliquer la différence observée entre les dorades et les thons. Par exemple, une espèce peut jeûner pendant une longue période et manger ponctuellement en grandes quantités, et une autre manger en petites quantités mais très régulièrement. La glycémie basale des 2 espèces sera ainsi différente et, alors que dans le 1^{er} cas la différence risque d'être flagrante, elle peut passer inaperçue dans le 2^e cas.
- La concentration en glucose subit les mêmes variations que le cortisol face à l'anesthésie. L'effet stressant de l'anesthésie peut donc atténuer, voire masquer, l'effet de l'anesthésiant à proprement parler.

Le glucose est donc une donnée difficile à exploiter avec précision car elle est influencée par de nombreux facteurs, qui ne sont pas sous contrôle dans les conditions expérimentales actuelles. Toutefois, il permet d'appuyer, éventuellement, les résultats obtenus par le dosage du cortisol.

Lactate

La hausse du lactate sanguin est principalement le reflet de l'hypoxie musculaire qui intervient lors de la réaction de stress. Il augmente instantanément et retrouve son niveau basal en 4 heures (Barton & Schreck, 1987).

Chez la dorade, le dosage du lactate permet de mettre en évidence une différence entre les individus témoins et anesthésiés. L'anesthésie réduit donc l'activité musculaire de cette espèce.

Par contre, cet indicateur ne semble pas majeur chez les thons jaunes. Au contraire, la concentration en lactate est plus élevée pour les thons jaunes anesthésiés que pour les témoins. Comme la différence entre les 2 moyennes n'est pas significative, on peut estimer qu'elle est due aux variations des observations et à la différence de l'allure des distributions.

Conclusions et perspectives

Cette étude permet de mettre en évidence que des résultats scientifiques corroborent ce qui avait été jusque-là seulement ressenti par les pêcheurs : le poisson est globalement « calmé » grâce à l'utilisation des hameçons injecteurs.

Pour comparer les poissons anesthésiés aux témoins, 4 indicateurs de stress ont été retenus : les ions chlorures, le cortisol, le glucose et le lactate. Les dosages effectués permettent de conclure que seulement 3 d'entre eux sont cohérents : le délai d'apparition de modifications de la chlorurémie est trop long (de l'ordre de 1 à 6 heures) pour que les ions chlorures constituent un bon indicateur de stress à court terme.

Chez la dorade et le thon jaune, 2 indicateurs sur 3 sont significatifs. Dans le 1^{er} cas, ce sont le cortisol et le lactate qui démontrent l'effet calmant de l'anesthésiant ; dans le 2^e, il s'agit du cortisol et du glucose. Pour améliorer la qualité des mesures, il serait souhaitable de prélever le sang au même moment, entre 10 et 15 minutes après la capture.

Le cas des listaos est particulier car les individus anesthésiés présentent plus de stress que les témoins. Ce phénomène peut s'expliquer soit par une hypersensibilité à l'environnement olfactif (l'Aqui-S dégage une forte odeur de clou de girofle), soit par une hypoxie provoquée par une dose d'anesthésiant trop forte.

Malgré ces résultats encourageants, quelques restrictions s'imposent. Nous avons mis en évidence qu'un grand nombre de facteurs influencent la réponse au stress et que le protocole expérimental actuel ne permet pas de les contrôler. Ceci affecte entre autres :

- la normalité des échantillons. L'étude statistique s'en trouve restreinte car les tests non paramétriques ne permettent pas d'étudier des échantillons avec autant de précision que les tests paramétriques ;
- la taille et l'homogénéité des échantillons. Les réponses au stress sont différentes entre des individus de la même catégorie. Les résultats sont donc plus difficilement exploitables.

Les résultats obtenus sont mitigés, mais ils constituent une base intéressante dans le cadre d'études ultérieures sur le sujet. Il ne faut pas oublier que le but de ces expériences était de déterminer si l'hameçon injecteur avait un effet sur le stress des poissons capturés. Or, la réponse est que l'on observe une diminution du stress chez 2 des 3 espèces étudiées. Ceci, ajouté à l'évaluation subjective des pêcheurs, est un point très positif qui permet d'appuyer ce projet et de nous conforter dans la poursuite de l'amélioration de ce système innovant. Il faut désormais définir quel axe doit prendre la suite de l'étude.

La première question à se poser est : est-ce que ces résultats sont satisfaisants, ou doit-on les préciser avant de continuer plus en avant ? Il semble que l'objectif ait été atteint : les observations nous ont montré qu'il y avait, même s'il n'est pas flagrant sur le plan des analyses, un effet déstressant dû à l'hameçon injecteur.

De plus, le cas du listao attire notre attention sur le fait que nous ne pouvons pas déterminer les doses d'anesthésiant à appliquer. À l'heure actuelle, l'approche est empirique. Le choix de 10 ml d'Aqui-S pour les marlins et de 2,5 ml pour les autres poissons est tout à fait arbitraire et ne repose que sur l'appréciation visuelle du comportement des poissons lors de la capture. Il

serait donc opportun de déterminer les doses optimales à appliquer en fonction des espèces mais surtout de leur taille afin que les poissons ne subissent pas le stress d'une anesthésie trop lourde. Ceci nécessite plusieurs pré-requis :

- il est nécessaire que les échantillons soient homogènes : même taille, même sexe, éventuellement même âge (taille). Ceci est possible sur des populations qui sont maintenues en élevage ;

- plusieurs dosages, à des quantités d'anesthésiant variables, sont à effectuer sur le même individu. Les poissons doivent donc être identifiés et la méthode de prélèvement ne doit pas être trop traumatisante ;

- il est nécessaire de visualiser le nuage formé par l'anesthésiant éjecté de l'hameçon et d'accéder à la quantité d'anesthésiant réellement absorbée. Ajouter un colorant et/ou des traceurs est envisageable pour recueillir cette information.

Pour réunir toutes ces conditions, il est nécessaire de disposer de grands bassins aquacoles à terre ou de cages offshore, ce qui n'est pas le cas de la station Ifremer actuellement. Une collaboration sur ce thème avec une structure aquacole, comme l'association réunionnaise de développement de l'aquaculture (ARDA), permettrait d'envisager la mise en œuvre de protocoles scientifiques innovants.

Dans le domaine scientifique, l'augmentation sensible de la survie des grands poissons pélagiques lors d'opérations de marquage lourd (marques électroniques) permettra à des équipes de chercheurs d'investir dans des sondes souvent onéreuses en limitant les pertes occasionnées par la mort rapide des poissons relâchés. Ces études comportementales, qui se développent déjà pour de nombreuses espèces, devraient se multiplier à l'avenir.

Dans le domaine halieutique, cette technique offre des perspectives intéressantes pour les pêcheurs. En effet, accéder au marché du sashimi leur assurerait des revenus supérieurs. Mais il faut garder en mémoire que ce procédé risque d'introduire dans notre consommation des molécules dont les effets à plus ou moins long terme restent méconnus. Il faudrait donc s'assurer de la non-toxicité de ce produit. Une étude spécifique sur la pharmacocinétique des anesthésiants serait indispensable avant tout développement de cette technique par les pêcheurs professionnels.

Références bibliographiques

- Barton B.A., Schreck C.B., 1987. Metabolic cost of acute physical stress in juvenile steelhead. *Trans. Amer. Fish. Soc.*, 116, 257-263.
- Barton B.A., Iwama G.K., 1991. Physiological changes in fish from stress in aquaculture with emphasis on the response. *Ann. Rev. Fish Diseases*, 3-26.
- Barton B.A., Schreck C.B., Sigismondi L.A., 1986. Multiple acute disturbances evoke cumulative physiological stress responses in juvenile chinook salmon. *Trans. Amer. Fish. Soc.*, 115, 257-263.
- Biais G., Taquet M., 1992. La pêche locale aux abords de La Réunion. *Repères Océan*, 2, 77 p.
- Block B.A., 1994. Thermogenesis in muscle. *Ann. Rev. Physiol.*, 56, 535-577.
- Comte S., 1995. Les indicateurs sanguins plasmatiques et cellulaires de stress à court terme chez les poissons. Thèse, université de Nantes, 167 p.
- Cramer J.L., Nakamura R.M., Dizon A.E., Ikehara W.N., 1981. Burnt tuna: conditions leading to rapid deterioration in the quality of raw tuna. *Mar. Fish. Rev.*, 43(6), 12-16.
- Davie P., Sparksman S., 1986. Burnt tuna : an ultrastructural study of post mortem changes in muscles of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) caught and southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) caught on handline or longline. *J. Food Science*, 5(51), 1122-1128.
- Dezier C., 1998. Contribution à l'amélioration de la qualité des poissons pélagiques pêchés à La Réunion : proposition d'un protocole diminuant le stress dès le ferrage. Thèse de docteur vétérinaire. ENV de Nantes, 141 p.
- Harrel R.M., Moline M.A., 1992. Comparative stress dynamics of brood stock striped bass *Morone saxatilis* associated with two capture techniques. *J. World Aquaculture Soc.*, 23, 58-63.
- Mazeau M.M., Mazeau F., 1981. Adrenergic response to stress in fish. *In: Stress and Fish*. Pickering A.D. (ed.), London and New York Academic Press, 49-68.
- Opic P., Conand F., Bourret P., 1994. Poissons commerciaux de sud-ouest de l'océan Indien. Éd. Orstom, 91 p.

- Poisson F., Tessier E., Roos D., Conand F., René F., 1994. Récent essor des pêcheries d'espadon (*Xiphias gladius*) aux abords de La Réunion (océan Indien S.O.). Int. Symp. on Pacific swordfish, CICESE, 20 p.
- Roos D., Tessier E., Guyomard D., 1998. Évolution du secteur halieutique à La Réunion de 1990 à 1996. Rapp. Sci. Tech. Drv/rh/rst, 98/14, 67 p.
- Roos D., Tessier E., Berthier P., Berthier L., 2000. Les métiers de la pêche à La Réunion : description et évolution des techniques de pêche sur les DCP. In: Pêche thonière et dispositifs de concentration de poissons. Le Gall J.-Y., Cayré P., Taquet M. (eds). Éd. Ifremer, Actes Colloq., 28, 333-345.
- Schreck C.B., 1981. Stress and compensation in teleostean fishes : response to social and physical factors. In: Stress and Fish. Pickering A.D. (ed.), London and New York Academic Press, 295-322.
- Sinclivier M., Soudan F., 1983. L'industrie alimentaire halieutique. Le poisson matière première. Bull. Sci. Tech., ENSA Rennes, 1, 132-160.
- Tessier E., Poisson F., 1997. Bilan de la mise en place d'un système de récolte des données sur la pêche autour des DCP. Série des documents scientifiques de l'Association Thonière, 34.
- Thomas P., Robertson L., 1991. Plasma cortisol and glucose stress response of red drum (*Sciaenops ocellatus*) to handling and shallow water stressors and anesthesia with MS222, quinaldine sulfate and metomidate. Aquaculture, 96, 69-86.
- Watson C., Bourke R.E., Brill R.W., 1988. A comprehensive theory on the etiology of burnt tuna. Fish. Bull., 86(2).
- Williams S.C., 1986. Marketing tuna in Japan. Queensland Fishing Industry Training Committee, 60 p.
- Woodward C.C., Strange R.J., 1987. Physiological stress response in wild and hatchery-reared rainbow trout. Trans. Amer. Fish. Soc., 116, 574-579.

Évaluation du phénomène de déprédation dû aux mammifères marins

François Poisson, Corentin Marjolet, Kim Mété, Marc Vanpouille

Ifremer, laboratoire Ressources halieutiques, rue Jean Bertho, BP 60, 97822 Le Port Cédex, La Réunion, France

Introduction

Les interactions entre les activités halieutiques et les populations de mammifères marins peuvent être directes ou indirectes. Les interactions indirectes concernent tous les phénomènes de prédation naturelle qui constituent une concurrence importante avec les pêcheries ciblant des espèces entrant dans le régime alimentaire des populations de cétacés. Les instituts de recherche japonais ont ainsi estimé que la consommation des populations de grands cétacés pouvaient être de 3 à 5 fois supérieure à celle de l'exploitation halieutique mondiale (Tamura & Oshumi, 1999).

Les interactions directes sont généralement de deux types. Le premier concerne les problèmes de captures accidentelles ou de blessures de mammifères marins causées par les engins de pêche. L'exemple le plus connu est celui des captures de dauphins par des filets maillants en Atlantique Nord (Goujon *et al.*, 1993). Ces captures engendrent la mort de plusieurs milliers de cétacés par an.

Le second type d'interaction est lié à la prédation, par des cétacés ou des pinnipèdes, de poissons capturés sur des engins de pêche ou élevés en structures aquacoles. Mate *et al.* (1986) ont évalué les dégâts causés par les populations de phoques s'attaquant à la fois au filet maillant, destiné à capturer les saumons, et aux structures aquacoles marines.

Depuis plusieurs années, les pêcheurs professionnels réunionnais voient leurs captures partiellement détruites par différents prédateurs. L'objectif de ce document est d'étudier les interactions entre la pêcherie palangrière locale et les espèces responsables de ces pertes. Le phénomène de « déprédation¹ » est abordé tout d'abord à travers une synthèse bibliographique sur le sujet. Un bilan sur les moyens utilisés pour limiter les interactions est ensuite dressé.

Des éléments sur la biologie de certaines espèces sont exposés. Les enquêtes mises en place sur le terrain pour identifier les espèces de mammifères marins incriminées et déterminer les pertes pour l'ensemble de la pêcherie sont présentées. Les produits répulsifs disponibles sur le marché ainsi que leurs principes de fonctionnement sont décrits. Les résultats d'essais de répulsifs à l'échelle expérimentale seront présentés et discutés.

Le phénomène de déprédation

Il existe peu de documents décrivant le phénomène de déprédation par les mammifères marins sur les poissons pris par les pêcheurs. Les premières attaques de ce type, répertoriées par les palangriers japonais dans la littérature scientifique, datent du début des années 1910. Klinowska (1991) indique une augmentation de leurs fréquences jusqu'au début des années soixante. Certaines années, les pertes ont été estimées à 5 % des prises, soit 25 à 30 millions de dollars (américains) dans l'océan Pacifique (Anonyme, 1980). Par ailleurs, les auteurs ajoutent que le phénomène peut disparaître pendant deux ou trois ans.

Sivasubramanian (1964) estimait dans une étude analogue que les orques (*Orcina orca*) et requins étaient responsables de la perte de 4 % des prises de palangriers de l'océan Indien.

Leatherwood *et al.* (1987) estiment que, à la suite d'attaques de mammifères marins sur les palangres, 55 à 100 % des prises peuvent être perdues et que, sur 80 000 tonnes de thons et autres espèces pélagiques pêchées, 4 % sont perdus à cause des requins et des orques dans l'océan Indien. Les dernières estimations produites du taux de prédation pour l'océan Indien par le groupe experts thoniers de l'océan Indien sont de 17 % pour 2000 (Anonyme, 2001).

1. Du latin *praeda*, proie : vol, pillage accompagné de destruction (le petit Larousse illustré, Larousse Bordas, 1998). Le terme de déprédation est utilisé pour indiquer une perte provoquée par des animaux sur une activité anthropique.

Deux travaux importants ont été réalisés sur la déprédation occasionnée par plusieurs groupes d'orques (*Orcinus orca*) sur une flottille de palangriers ciblant les poissons de fond sur un site très localisé dans la mer de Béring en Alaska (Yano & Dahlheim, 1995a, b).

Les ravages qu'elles occasionnent sur les captures des palangriers ciblant la légine (*Dissostichus* sp.) dans les ZEE des Terres australes et antarctiques françaises vont croissants (Berlivet, com. pers.).

Secchi & Vaske (1998) décrivent les interactions entre la pêcherie palangrière ciblant l'espadon et le thon sur la côte sud du Brésil (entre 30° et 35° S) et des groupes d'orques. Cette espèce, bien qu'observée aux abords de La Réunion, n'a pour l'instant pas été identifiée comme prédatrice pour les palangriers opérant dans la zone sud-ouest de l'océan Indien. Les résultats présentés dans ces documents mettent en évidence des comportements typiques des mammifères marins :

- Les orques semblent effectuer un « choix » suivant l'espèce et la taille parmi les différents poissons capturés sur la ligne. Yano & Dahlheim (1995a, b) ont essayé d'estimer les pertes dues aux attaques de ces cétacés en étudiant le nombre et la taille des poissons endommagés (têtes, branchies et mâchoires) ainsi que leur taille par rapport aux poissons pêchés intacts. Parallèlement, toutes les observations d'orques ainsi que leur activité ont été notées. Ces auteurs ont mis en évidence que ces mammifères marins ciblaient préférentiellement les individus de grande taille appartenant à une ou plusieurs espèces. Secchi & Vaske (1998) soulignent que les cétacés s'attaquent de préférence aux espadons.

- Les orques semblent associer très rapidement la présence des bateaux à la possibilité de trouver du poisson en quantité. En observant les déplacements des orques par rapport aux bateaux de pêche, Yano et Dahlheim (1995a, b) ont supposé que ces cétacés sont capables de repérer les bateaux lors de la phase de récupération de la ligne grâce aux bruits et aux vibrations des moteurs. Le temps moyen qui s'est écoulé entre le début du virage et les premières observations d'orques autour du bateau était de 106 minutes. Les orques sont restées à proximité du bateau pendant 62 à 331 minutes. Au début des opérations, les

orques étaient aperçues à plus de 500 m mais, au cours du temps, elles se sont approchées de plus en plus près (10-100 m). Par contre, elles attaquent toujours leurs proies à une profondeur comprise entre 200 et 300 mètres. Ce phénomène d'apprentissage est évoqué par Leatherwood *et al.* (1987) qui précisent que, dans l'océan Indien, les fréquences d'observation de cétacés au voisinage de navires de pêche ont augmenté de 0,4 % en 1955 à 9,6 % en 1963 (ces pourcentages étant calculés par rapport au nombre de campagnes de pêche). Cette différence ne peut pas être imputée seulement à l'augmentation de la flottille. Thomas & Turl (1990) supposent, d'après leurs études menées sur les pseudorques (*Pseudorca crassidens*), que ces animaux ont des facultés d'écholocation qui sont fonction de leurs expériences individuelles.

- Les pertes occasionnées sont corrélées avec la présence d'orques autour des navires. Des études statistiques sur une période de 10 ans ont montré que les prises sont inférieures lorsque la présence d'orques autour du bateau est signalée (Yano, 1989; Sasaki & Yano; 1990; Yano, 1990). La déprédation a été estimée dans la région de Prince William Sound à 25 % des prises en 1985 (Matkin, 1986) et à 20 % des prises en 1988 (Dahlheim, 1988) en mer de Béring sur l'exploitation de poissons de fonds (*Anoploma fimbria*).

Les moyens courants utilisés pour limiter les interactions

Les moyens courants

Les moyens classiques de répulsion des mammifères marins consistent à utiliser des explosifs ou des armes à feu. Ces différentes méthodes ont été utilisées, dans un premier temps, par les pêcheurs pour repousser les populations de phoques des bateaux et des filets de pêche (Mate *et al.*, 1986).

Des produits spécifiques ont même été créés à cet effet. Les *seal bomb*, par exemple, sont de petites charges capables de produire un son d'une fréquence inférieure à 2 kHz à 190 décibels. L'explosion se produit de 2 à 3 mètres sous la surface et est accompagnée d'un éclat lumineux. Autre produit, les *cracker shells* sont de petits explosifs tirés au fusil à proximité des groupes de pinnipèdes qui explosent, en l'air ou à la surface.

Ces produits ont eu des résultats décevants et n'ont fonctionné que dans le court terme. Les populations de pinnipèdes ont tendance à fuir les zones de pêche dans un premier temps, puis à revenir rapidement, s'habituant très vite à ces nouveaux sons. De même, l'utilisation d'armes à feu, destinées à blesser ou tuer les animaux, a eu également peu d'effet (Secchi & Vaske, 1998). D'après les observations faites sur les bateaux de pêche, les mammifères marins, pinnipèdes ou cétacés, comprennent que ces armes ont une action limitée et se mettent rapidement hors de portée.

Ces méthodes ont donc été rapidement abandonnées et ne sont utilisées qu'à titre exceptionnel. L'utilisation d'explosifs est souvent dangereuse pour les manipulateurs et l'équipage. De plus, il semble que ces méthodes aient également des effets de répulsion sur les bancs de poissons ciblés (Richardson *et al.*, 1995).

Les répulsifs acoustiques

L'utilisation de dispositifs acoustiques est apparue comme un système prometteur pour lutter contre les interactions entre les mammifères marins et les activités de pêche. Les mammifères marins ont généralement une excellente audition et le milieu aquatique permet une bonne propagation des ondes acoustiques. La propagation des sons varie en fonction des conditions physico-chimiques du milieu et peut être altérée par tous les phénomènes générant des bruits dans le milieu : phénomènes météorologiques, activités humaines maritimes ou terrestres, etc. (Mate *et al.*, 1986).

Principe

Le niveau de perfectionnement des appareils acoustiques est très large. Les dispositifs vont du simple bruiteur mécanique sous-marin à l'émetteur électronique programmable. Ce sont ces derniers qui ont été les plus utilisés dans les zones aquacoles marines, sur les bateaux et sur les engins de pêche.

On distingue généralement deux types de dispositifs acoustiques :

- les dispositifs acoustiques de répulsion (Acoustic deterrent device, ADD);
- les dispositifs acoustiques de harcèlement (Acoustic harassment device, AHD).

Les répulsifs de type ADD ont été créés pour mettre en place des zones d'exclusion temporaire autour des engins de pêche. Ils sont destinés à limiter les captures accidentelles. Ce sont généralement des émetteurs de faible puissance destinés surtout à « alerter » les mammifères marins de la présence des filets.

Les AHD, au contraire, sont des appareils de plus forte puissance, destinés à générer des zones d'exclusion permanente autour des installations aquacoles et des zones de pêche. Il s'agit d'associer une menace (stimulus de conditionnement) à un danger réel (stimulus négatif) afin d'altérer le comportement des mammifères marins à proximité de ces sites (Pryor, 1986). Ils sont censés provoquer la peur ou la douleur sur les individus qui s'en approchent (Jefferson & Curry, 1994).

Matériel répulsif existant

Les premiers répulsifs acoustiques destinés à repousser les populations de cétacés ont été développés pour diminuer les pêches accidentelles de petits marsouins (*Phocoena phocoena*) par les filets maillants dérivants, sur les côtes du nord de l'Europe. Cette première génération de dispositifs acoustiques était basée sur l'émission d'ondes sonores correspondant aux signaux d'alarme des baleines des côtes de Terre-Neuve (de 2 à 3,5 kHz). Les dispositifs suivants ont utilisé des sons de fréquence plus haute, de l'ordre de 10 kHz, qui donnaient de meilleurs résultats au niveau des comportements de fuite des cétacés (Goodson *et al.*, 1997a).

Par la suite, l'université de Loughborough a décidé, en 1994, de mettre en place une étude moins empirique, en relation avec la biologie de *Phocoena phocoena*, pour mettre au point un dispositif plus efficace que les précédents. Basée sur l'observation des comportements de marsouins en captivité et en milieu naturel, cette étude a démontré l'efficacité des fréquences plus hautes, de 20 à 160 kHz, et a permis la création du produit dénommé « Porpoise incidental catch eliminator » ou PICE, commercialisé aujourd'hui par le groupe PDM (Goodson *et al.*, 1997b).

Le répulsif a été conçu, d'après le constructeur : « selon un cahier des charges précis afin d'éviter la répulsion des espèces ciblées, de limiter au maximum les phénomènes d'habituation, de permettre une période d'utilisation longue et un entretien minimum, de concevoir un support robuste sans travail supplémentaire pour les pêcheurs et enfin d'offrir un faible coût par unité ».

L'originalité des répulsifs PICE réside dans l'émission de plus de 8 ondes acoustiques dont les fréquences varient de 20 à 160 kilohertz. Chaque onde est émise pendant 200-300 millisecondes (ms) et l'intervalle entre deux ondes correspond à une durée pseudo-aléatoire qui varie entre 4 et 30 secondes. La mise en tension du PICE est déclenchée lorsque l'appareil est immergé. Sa durée de fonctionnement est estimée, selon ses concepteurs, de 6 mois à un an suivant son utilisation. Lorsque le voltage de la batterie est faible, le signal change en une double émission facilement détectable par un échosondeur présent sur le bateau. La partie émettrice de l'appareil est constituée d'un microcircuit et d'un transducteur. L'alimentation est assurée par une pile alcaline classique de type D. Les électrodes situées à une des extrémités permettent la mise en tension lors de l'immersion. La partie électronique est contenue dans une enveloppe cylindrique de polyuréthane. Celle-ci ne s'ouvre pas et ne permet donc pas le remplacement de la pile.

L'utilisation de répulsifs adaptés aux structures aquacoles a démontré que ceux-ci avaient une action répulsive sur les populations de cétacés. L'effet était tel que ces dispositifs ont été interdits en Colombie Britannique par le gouvernement canadien.

Ces systèmes sont généralement interactifs et se déclenchent après détection des individus à proximité des structures. Les fréquences des ondes acoustiques varient de la même manière que pour les PICE et les intervalles sont des périodes aléatoires de l'ordre de plusieurs secondes.

Ces appareils sont plus puissants mais plus volumineux. Dans le cadre de la pêche palangrière, ils ne peuvent donc être installés que sur les bateaux. Ces appareils sont alimentés par des batteries marines de 12 volts.

Les principales espèces incriminées

L'observation de certaines photographies de mammifères marins (capturés accidentellement ou présents autour du navire) ainsi que d'images vidéos prises par les équipages des palangriers ou par les scientifiques embarqués ont permis d'identifier avec certitude les quatre espèces suivantes : (1) la fausse orque (*Pseudorca crassidens*), (2) le globicéphale tropical (*Globicephala macrorhynchus*), (3) l'orque (*Orcinus orca*) et (4) le dauphin de Risso (*Grampus griseus*). Une collecte de ce type de documents se poursuit. Seules les deux premières espèces sont, avec certitude, identifiées comme responsables de ces attaques. Le dauphin de Risso (*Grampus griseus*) a quelques fois été aperçu par les équipages et une capture accidentelle d'un spécimen a été rapportée par un capitaine. *A priori*, les interactions avec cette dernière espèce sont anecdotiques. Les travaux de Sivasubramanian (1964), de Secchi & Vaske (1998) et de Nishida & Tanio (2001) incluent l'orque (*Orcinus orca*) dans les espèces responsables de ces attaques. Aucun élément ne nous permet à l'heure actuelle de confirmer ce fait.

Les principales caractéristiques biologiques de ces quatre espèces observées dans le sud-ouest de l'océan Indien sont tirées des ouvrages de Leatherwood *et al.* (1982), Leatherwood & Reeves (1983) et de Klinowska (1991).

Le pseudorque (*Pseudorca crassidens*)

Classification

Pseudorca crassidens (Owen, 1846 ; pseudorque, faux orque ou fausse orque - False killer whale)

Description

La longueur peut atteindre 5 à 6 m pour les mâles, et 4 à 5,4 m pour les femelles. Les nouveaux nés mesurent environ 1,5 mètres. Les adultes peuvent peser un peu plus de 2,2 tonnes (max : 2,5 t) pour les mâles et 1,1 tonne (max : 1,25 t) pour les femelles. Les petits à la naissance pèsent environ 80 kilogrammes.

Le pseudorque est uniformément gris foncé ou noir, à l'exception d'une tache gris clair sur le ventre (fig. 1). Cette marque est en forme d'ancre, similaire à celle des globicéphales, mais plus petite et plus discrète. Il semble que cela soit plus marqué chez les animaux du Pacifique. Les petits sont plus clairs avec une large tache sur le ventre.



Figure 1 - Fausse orque (*Pseudorca crassidens*) observée aux abords de La Réunion. Copyright F. Poisson/lfremer.

Distribution

Les pseudorques se répartissent aussi bien dans les mers tropicales que tempérées. Ils sont quelques fois aperçus près des côtes dans les eaux froides mais, la plupart du temps, ils sont océaniques. Ils évoluent en grand nombre pour les migrations locales, pour se nourrir et se reproduire. Les pseudorques peuvent certainement migrer d'un hémisphère à l'autre.

Identification et comportement

L'identification d'animaux morts est généralement facile. Même si les caractères morphologiques sont altérés par une décomposition avancée, les dents sont caractéristiques. Elles sont larges et solides, circulaires (alors que les orques ont des dents de section ovales) et peuvent atteindre 25 mm de diamètre.

Les pseudorques n'hésitent pas à venir autour des embarcations et peuvent sauter au-dessus de l'eau. Des comportements semblables chez les cétacés sont souvent suffisants pour les identifier. Quand ils ne sont pas dérangés par la navigation, les pseudorques évoluent en groupes coordon-

nés en soufflant une fois tous les 15 à 20 secondes, ou deux fois chez les jeunes. Lorsqu'ils respirent, ils tendent à se montrer un peu plus que les globicéphales en sortant hors de l'eau la tête, le dos, la nageoire dorsale et une partie des flancs. À chaque fois que des scientifiques ont pu s'approcher d'un groupe, ils ont détecté des cris perçants à une distance de 200 m, quelques fois ces cris dépassaient le bruit des moteurs de l'embarcation.

Les observations sont souvent furtives et il existe des possibilités de confusion avec plusieurs autres espèces : le globicéphale (*Globicephala macrorhynchus*), l'orque pygmée (*Feresa attenuata*). Tous sont sombres, possèdent des nageoires proéminentes et n'ont pas de bec mais, avec une observation plus précise, des caractères spécifiques apparaissent.

Des pseudorques ont pu être observés avec des dauphins gris (*Grampus griseus*), mais il n'y a pas de confusion possible entre ces espèces.

Biologie

Les pseudorques se nourrissent en partie d'encornets mais peuvent, avec leurs puissantes dents, attraper des poissons de taille importante telles les bonites (*Sarda* sp.), thons (*Thunnus* sp.) et dorades coryphènes (*Coryphaena* sp.). Ces prédateurs doivent donc être capables de se déplacer très rapidement. Ils atteignent la maturité entre 8 et 12 ans et peuvent s'accoupler apparemment tout au long de l'année. La gestation dépasse légèrement 15 mois.

Thomas *et al.* (1988) signalent, dans leur étude sur les caractéristiques du système d'écholocation et du seuil de détection du pseudorque, que cet animal en captivité détecte des signaux sonores dans une gamme de fréquences comprise entre 8 et 105 kHz avec une sensibilité plus élevée entre 16 et 64 kilohertz. Ils constatent que les performances de détection au-delà de 90 m sont très variables mais n'excluent pas que certains paramètres tels que conditions océanographiques, courants, bancs de poissons, mouvements des proies peuvent avoir une incidence sur ces seuils de détection et concluent sur une probable adaptation des facultés d'écholocation en fonction de leurs expériences individuelles.

Akamatsu *et al.*, (1993) ont étudié le comportement de deux fausses orques en réponse à des sons variés émis sous l'eau,

dans un bassin fermé. Ils ont observé que, très rapidement, les sons qui provoquaient la fuite instantanée des animaux, n'avaient plus aucun effet.

Le globicéphale tropical (*Globicephala macrorhynchus*)

Classification

Globicephala macrorhynchus (Gray, 1846; globicéphale de Siebold - Shortfin pilot whale)

Description

La longueur moyenne est de 5,5 m pour les mâles qui peuvent atteindre 6,75 m et de 4,25 m pour les femelles avec une taille maximale de 5 mètres. Les petits à la naissance mesurent environ 1,4 mètre. Les adultes peuvent peser jusqu'à 3 tonnes (max : 3,3 t) pour les mâles et 1,5 tonne pour les femelles (max : 1,6 t); les petits pèsent environ 60 kg à la naissance.

G. macrorhynchus possède des nageoires pectorales falciformes, courtes (de 15 à 17 % de la longueur totale du corps). Les mâles adultes ont une tête bombée formant le melon, proéminent et qui peut dépasser l'avant de la bouche d'environ 10 centimètres. La nageoire dorsale très incurvée, avec une base large, est située nettement dans la moitié antérieure. La couleur de la tache ventrale est grise. La plupart des individus semblent être complètement noirs. Une tache en forme de collier derrière la nageoire dorsale est présente.

G. macrorhynchus se trouve souvent en compagnie de dauphins (*Tursiops truncatus* et *Lagenorhynchus obliquidens*).

Distribution

À part quelques individus observés en Alaska, cette espèce semble fréquenter seulement les eaux tropicales et subtropicales, dans les océans Atlantique, Pacifique et Indien. Il existe des relations évidentes entre les migrations locales et l'abondance des encornets.

Il n'y a pas de raison de supposer que les populations des hémisphères nord et sud soient distinctes.

Identification et comportement

Les globicéphales sont simples à identifier jusqu'au genre ancien *Globicephalidae*, mais il en est autrement pour les espèces citées. Les nageoires pectorales et les dents peuvent être une bonne clé de détermination. *G. macrorhynchus* migre en grands groupes à

la vitesse d'environ 8 kilomètre par heure. Les adultes remontent souvent à la surface pour respirer, en montrant d'abord le haut de la tête et en produisant un fort soufflement. Lors de leur remontée en surface, la bouche n'est jamais visible. Les jeunes plongent à côté de leur mère, sortant leur tête hors de l'eau.

Cette espèce est généralement indifférente aux embarcations. Quand des navires s'en approchent sans précaution, ils plongent puis reviennent à la surface derrière eux. Sous les tropiques, les groupes de *G. macrorhynchus* de 40 individus sont fréquents.

Ressemblance

Dans les eaux chaudes, il est possible de les confondre avec les pseudorques (*Pseudorca crassidens*). Ces deux espèces sont sombres dans l'eau avec une nageoire dorsale proéminente. Les pseudorques sautent souvent hors de l'eau dans le sillage des bateaux alors que le globicéphale le fait rarement. Le pseudorque se distingue aussi par une tête effilée et par la forme de la nageoire dorsale, plus étroite. *G. macrorhynchus* montre une ressemblance superficielle avec l'orque naine (*Feresa attenuata*), mais cette espèce est plus petite et possède une nageoire dorsale plus pointue.

Biologie

G. macrorhynchus se nourrit généralement pendant une bonne partie de la nuit, surtout d'encornets, avec une préférence pour le calmar opalescent (*Loligo opalescens*) dans les eaux du Pacifique. Un adulte peut avaler plus de 45 kg d'encornets par jour.

Un groupe comprend de 10 à plusieurs centaines d'individus. Les femelles *G. macrorhynchus* atteignent la maturité sexuelle à l'âge de 6 ans et les mâles à 10 ou 11 ans. La gestation dure entre 15 et 16 mois et le cycle de reproduction dure 3 ans.

L'orque (*Orcinus orca*)

Classification

Orcinus orca (Linnaeus, 1758; orque ou épaulard - Killer whale).

Description

Du point de vue de la description morphologique, cette espèce possède des caractéristiques faciles à identifier.

Les mâles peuvent mesurer jusqu'à 7 m et peser de 4 à 4,5 tonnes. Les femelles peuvent atteindre 6,5 m et peser 3 tonnes.

La peau est noire sur le dos et les côtés. Le ventre est blanc, avec des lobes de même couleur sur les flancs et une macule blanche derrière les yeux. Une selle grisâtre est présente derrière l'aileton. Les nageoires en palettes sont arrondies et l'aileton dorsal est médian. La nageoire dorsale est falciforme chez les femelles et les jeunes, haute (jusqu'à 2 m) et droite chez les mâles. La tête est large, arrondie et le corps fusiforme.

Répartition

Les orques se répartissent dans tous les océans.

Le dauphin de Risso (*Grampus griseus*)

Classification

Grampus griseus (G. Cuvier, 1812; ou dauphin gris - Risso's dolphin)

Cette espèce reste très peu connue car elle a été peu étudiée à ce jour.

Description

La différence de taille entre les mâles et les femelles n'est pas aussi évidente que pour les autres espèces. La longueur du mâle peut atteindre 4 mètres. La femelle est légèrement plus petite (3,5 m) et peut peser 350 kilogramme. Le mâle atteint sa maturité sexuelle entre 2,6 et 3 m et la femelle entre 2,6 et 2,8 mètres. Les petits à la naissance, de couleur gris clair, mesurent entre 1,35 et 1,66 mètres. Les cicatrices sont nombreuses sur les flancs des adultes. Ces cicatrices sont attribuées à des agressions entre individus ou à des morsures et traces de ventouses d'encornets. La tache blanche ventrale déborde en une tache ovale de la gorge au menton. Les nageoires sont longues, pointues et noires. L'aileton est médian, falciforme (plus grand et plus droit chez les adultes). Il peut atteindre 38 cm de hauteur. La tête a une forme particulière, le museau est obtus, arrondi, avec un melon faible. Il n'y a pas de bec. Le corps est fusiforme, s'atténuant après l'aileton pour devenir étroit à la base de la queue.

Ils ont souvent été aperçus en compagnie de *Globicephala macrorhynchus* et *Lissodelphis borealis*.

Distribution

Le dauphin de Risso se répartit aussi bien dans les eaux tropicales que tempérées et généralement dans les eaux dont la profondeur atteint 1 000 mètres.

Biologie

Il a été noté que les dauphins de Risso pouvaient se rassembler en groupes de plusieurs centaines d'individus (jusqu'à 150 dans l'océan Indien; Leatherwood & Reeves, 1983). Mais les groupes inférieurs à 12 individus sont plus communs. Les proies habituelles de ces cétacés sont généralement des céphalopodes mais ils peuvent aussi se nourrir de poissons.

Connaissance sur les sons émis par les mammifères marins concernés

Les mammifères marins émettent des sons pour communiquer la présence de danger, d'aliments, d'un autre animal mais aussi leur position ainsi que leur territoire ou leur état physiologique (reproduction). Leur registre de sons va d'une série de cliquetis de 0,25 kHz à des sons purs ou à des sifflements modulés. Bien que l'on ait isolé différents sifflements, associés à un comportement, on ne peut pas parler d'un langage avec une syntaxe. Les hautes fréquences sont utilisées pour l'écholocation : les odontocètes, qui pourchassent les poissons et les céphalopodes, les repèrent avec un système de sonar. Ils émettent des cliquetis sonores de fréquences variées (jusqu'à 1 000 par seconde). Ces ondes à hautes fréquences se réfléchissent sur les obstacles et, à partir de l'écho, l'animal peut avoir une idée de son environnement et déduire, par exemple, la distance et la taille de la proie.

Matériel et méthode

La présente étude porte sur deux aspects du problème de déprédation. Dans un premier temps, nous avons évalué l'importance de cette déprédation dans la zone d'activité des palangriers réunionnais. Puis, dans un deuxième temps, nous avons testé l'efficacité potentielle de répulsifs installés sur les palangres.

Carnet de pêche et estimation des pertes

Les carnets de pêche mis à la disposition des capitaines ont été présentés (voir p. 9). Une rubrique supplémentaire, dédiée à la prédation, a été ajoutée dès 1995 sur ces fiches journalières pour spécifier les prédatations totales ou partielles dues aux mammifères marins et aux requins. Afin de faciliter la reconnaissance des mammifères marins rencontrés, des fiches d'identification ont

été jointes aux carnets de pêche car, sous le nom générique de « globicéphales », plusieurs espèces peuvent être identifiées.

Les estimations sont effectuées en tenant compte de la taille du navire; ainsi, nous distinguerons les unités d'une taille inférieure ou égale à 16 mètres (segment 1) des navires de plus grande capacité qui peuvent explorer des zones situées au-delà des 200 milles (segment 2). Par ailleurs, les taux mensuels de couverture sont calculés d'après la formule suivante définie (voir p. 13) :

$$\text{Taux de couverture} = \frac{\text{NI}}{\text{NA}} \times 100$$

NI = nombre d'opérations de pêche archivées dans la base de données de l'Ifremer

NA = nombre total d'opérations de pêche déclarées archivées dans la base de données de la DDAM.

Les cas de prédation partielle sont difficiles à établir en l'absence d'observations directes de mammifères marins au voisinage du bateau car les restes des poissons attaqués peuvent aisément se décrocher de l'hameçon. La quantité d'individus attaqués (observés) et le faible nombre d'individus intacts permettent au capitaine de mesurer l'importance des dégâts. Aussi, les estimations de ces pertes se font uniquement à partir des filages pour lesquels au moins 80 % des captures ont été détruites. Les chiffres présentés sont donc sûrement inférieurs à la réalité.

D'abord, pour chacun des segments, le nombre d'attaques totales ainsi que le nombre total d'espadons capturés sont décomptés à l'échelle mensuelle. Le poids total d'espadon capturé est ensuite calculé (en considérant un poids vif moyen annuel des espadons débarqués à La Réunion de 50 kg). L'estimation de la quantité mensuelle détruite pour chaque segment est finalement extrapolée à l'aide des taux de couverture mensuels respectifs. En sommant les différents résultats, on peut ainsi établir les pertes totales annuelles pour l'ensemble de la flottille.

L'estimation des pertes dues aux requins est calculée suivant le même principe pour chaque segment mais en sommant au préalable le nombre d'espadons attaqués par ces prédateurs.

Enquêtes et observations

L'identification des mammifères marins peut être réalisée de plusieurs manières :

- soit par observation directe ;
- soit par photo-identification (identification d'après photographies ou supports vidéos) ;
- soit indirectement : la forme des morsures infligées aux captures ainsi que le nombre d'individus abîmés à l'issue de l'opération de pêche permettent généralement de savoir s'il s'agit de requins ou de mammifères marins.

Les pêcheurs attribuent les pertes aux mammifères dès lors qu'ils remontent à bord seulement une partie du poisson (tête, branchies, moitié antérieure déchiquetée) sur un nombre assez important de prises (fig. 2). Les morsures bien nettes et semi-circulaires sont attribuées aux requins (fig. 3, 4), bien que certains sélaciens peuvent aussi déchiqueter leurs proies. Par ailleurs, le nombre d'individus atteints constitue un indice pour déterminer le type de prédateur. Les attaques par les requins sont le fait d'individus isolés, contrairement aux mammifères marins qui se déplacent en groupe, occasionnant des pertes plus importantes, voire totales.



Figure 2 - Restes d'un espadon attaqué probablement par un mammifère marin. Copyright Kim Mété/Ifremer.



Figure 3 - Restes d'espadon attaqué par un requin.
Copyright Kim Mété/Ifremer.



Figure 4 - Restes d'un thon attaqué par un requin.
Copyright François Poisson/Ifremer.

Essais de matériel répulsif à bord des palangriers réunionnais

Cinquante répulsifs de type AQUAmark 100 acoustic porpoise deterrent ont été utilisés pour l'expérimentation. Les caractéristiques de ce répulsif sont présentées dans le tableau 1.

Conformément aux recommandations d'utilisation données par le constructeur, les appareils ont été répartis sur la ligne tous les 200 mètres. Ainsi, suivant les caractéristiques de la ligne (soit le nombre d'hameçons mouillés entre deux bouées), entre 150 et 180 hameçons peuvent être couverts par ces instruments. La totalité des répulsifs est placée sur une seule portion de ligne.

Tableau 1 - Caractéristiques des répulsifs de type AQUAmark 100 acoustic porpoise deterrent employés pendant les expérimentations.

Dimensions	Longueur : 140 mm Diamètre maximal : 56 mm
Masse	370 g dans l'air 120 g dans l'eau
Profondeur maximale	200 m
Espacement recommandé entre deux instruments	200 m
Équipement	Équipé d'une agrafe rapide pour fixation sur la ligne mère
Durée de vie	Instruments : 4 ans Batteries : 1 à 2 ans en immersion continue L'instrument est éteint hors eau
Coût unitaire	700 FF

Deux types d'opérations ont été menés. D'abord, un agent de l'Ifremer a embarqué à bord des palangriers pour mettre en place ces instruments sur la ligne et relever les informations. Puis, les répulsifs ont été mis à disposition des équipages désireux de tester ce matériel tout en conservant le protocole statistique établi.

En cas de déprédation, la totalité des captures par espèce ainsi que le nombre d'individus attaqués sont notés (en nombre d'individus), en distinguant le type de déprédation (requin ou mammifère). Ces observations sont relevées à la fois sur la partie de la ligne instrumentée comme sur la partie non instrumentée. Il est recommandé de prendre des photographies des mammifères marins s'approchant du navire.

Résultats

Bilan des enquêtes

Attaques répertoriées

L'ensemble des attaques pour lesquelles la déprédation a été totale à des latitudes comprises entre 10° et 30° S (entre le 1^{er} janvier 1997 et le 31 décembre 2000) a été comptabilisé. Les observations transmises par les navires travaillant au nord de cette zone (eaux seychelloises) ont délibérément été écartées de cette analyse car les conditions d'exploitation y sont très différentes. Ces données devront être agrégées avec celles des palangriers seychellois.

Les pourcentages mensuels de ces attaques ont été établis à partir des informations disponibles et non extrapolées à l'ensemble de la flottille (fig. 5).

Les cas de prédation totale ne s'observent pas tous les mois de l'année. Le pourcentage le plus fort a été enregistré en décembre 1998 où 17 % de filages recensés ont été entièrement dévastés. Les autres années, les valeurs maximales sont de l'ordre de 10 %.

La représentation cumulée du nombre d'attaques par mois, sur la même période (fig. 6), met en évidence la saisonnalité du phénomène qui s'intensifie entre octobre et janvier, soit globalement pendant l'été austral. Ces premiers résultats ont permis de déterminer la période la plus propice aux essais de répulsifs.

Bilan annuel des pertes et des interactions

Le globicéphale tropical et la fausse orque semblent particulièrement attirés par la chair de l'espadon, dont ils ne laissent généralement que la tête après leur passage. D'après les carnets de pêche, ceux-ci peuvent s'attaquer aux prises plusieurs jours de suite, le seul palliatif étant le changement de zone. L'examen du tableau 2, où figurent les estimations des pertes en poids vif (extrapolées à l'ensemble de la flottille) et les pourcentages des pertes par rapport aux prises annuelles, montre que le phénomène a atteint un pic en 1998 avec 114 tonnes (minimum) d'espadon détruites par les mammifères marins. Globalement, le pourcentage de perte est voisin de 4 % et toujours supérieur aux pertes occasionnées par les requins, plus proches de 3 %.

À cette perte, il faut ajouter celles dues au phénomène de déprédation sur les appâts. Au cours de nos campagnes en mer, la présence de dauphins du genre *Tursiops* autour du navire était souvent corrélée avec la remontée d'hameçons sans appât. Par ailleurs, au cours des campagnes réalisées dans le cadre de l'étude du comportement des principales espèces pélagiques captu-

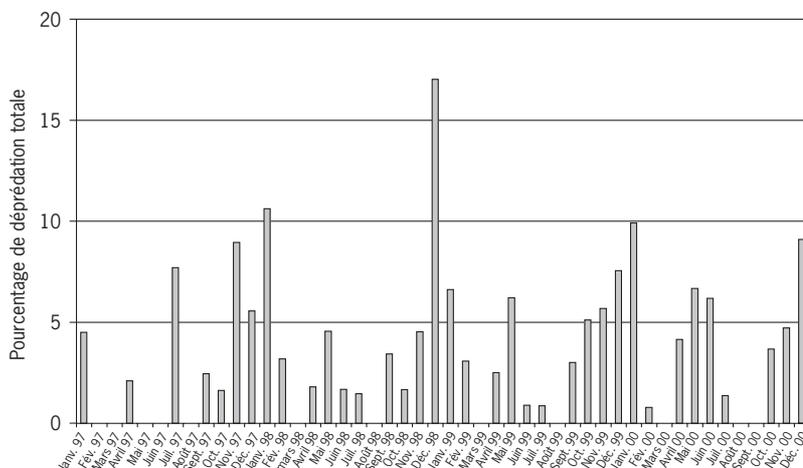


Figure 5 - Évolution des pourcentages mensuels des déprédations entre le 1^{er} janvier 1997 et le 31 décembre 2000 dans une zone située entre 10 et 32° Sud.

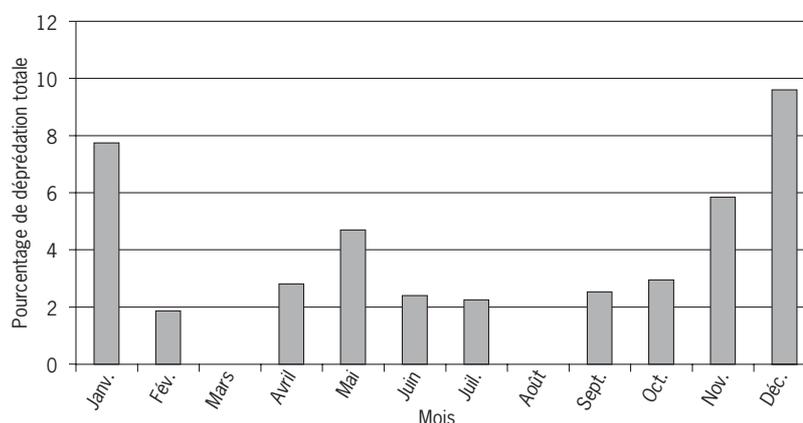


Figure 6 - Évolution des pourcentages des déprédations totales cumulées par mois entre le 1^{er} janvier 1997 et le 31 décembre 2000 dans une zone située entre 10 et 30° Sud.

rées par la pêcherie réunionnaise (voir p. 79), nous avons pu mettre clairement en évidence, grâce aux horloges d'hameçons, que les fausses orques (*Pseudorca crassidens*) pouvaient adopter ce comportement. Cette diminution induite de l'efficacité de l'engin n'a pu être estimée mais semble loin d'être négligeable.

Tableau 2 - Estimation des pertes annuelles d'espadons (en tonnes de poids vif) dues aux requins et aux mammifères marins entre 1997 et 2000.

An	Pertes dues aux mammifères marins (tonne)	Pourcentage des pertes	Pertes dues aux requins (tonne)	Pourcentage des pertes	Total	Pourcentage des pertes
1997	64	4,11	47	3,02	111	7,13
1998	114	5,49	71	3,42	185	8,91
1999	79	4,10	68	3,53	147	7,63
2000	64	3,68	54	3,10	118	6,78

Néanmoins, malgré la présence régulière de mammifères marins dans les zones exploitées par la flottille, peu de cas de captures accidentelles de cétacés ont été enregistrés. Trois fausses orques et un dauphin de Risso ont été pris, tous emmêlés dans la ligne. Dans tous les cas, il s'agissait de juvéniles.

Bilan des essais des répulsifs

Les tableaux suivants présentent les caractéristiques des deux types de campagnes au cours desquelles les répulsifs ont été testés. Les quatre premières marées ont été suivies par un observateur de l'Ifremer. Les essais suivants ont été directement effectués par les équipages.

Au total, 23 filages ont été suivis par un observateur de l'Ifremer au cours des quatre marées expérimentales. Le tableau 3 révèle que les protocoles n'ont pas toujours été respectés. Ceci traduit un comportement différent des capitaines vis-à-vis de l'expérimentation. Au cours de la seconde campagne, devant les rendements faibles des premiers jours, le capitaine a préféré ne pas utiliser les répulsifs les deux derniers jours, attribuant les faibles résultats de pêche à la mise en place des instruments.

Au contraire, lors de la troisième marée, le capitaine a demandé à pouvoir augmenter la distance entre deux répulsifs de manière à protéger un plus grand nombre d'hameçons.

Le retour partiel d'informations pour les marées sans participation d'un agent de l'Ifremer traduit les contraintes dues au respect du protocole et au report d'informations (tab. 4). Ainsi, la mise en place des appareils nécessite la mobilisation d'une personne pour cette tâche. D'une manière générale, tant qu'une attaque n'est pas à déplorer, les patrons ne pensent pas à disposer les répulsifs. La décision de les utiliser intervient dès que des pertes sont enregistrées. Les capitaines ont aussi constaté que, sous l'effet du poids des répulsifs, la ligne coulait davantage, les obligeant à placer des bouées supplémentaires pour conserver les paramètres qu'ils s'étaient fixés.

Il est apparu qu'il est difficile de suivre strictement les protocoles établis sur les bateaux professionnels. L'attitude des capitaines vis-à-vis des répulsifs est très variable et peut évoluer dans le temps. Certains choisissent de prendre le risque de subir des attaques de mammifères marins plutôt que de perdre du temps dans cette opération tant que l'efficacité de ce matériel n'est pas prouvée.

La faible quantité de données recueillies ne permet donc pas d'envisager des analyses poussées.

Ces données sont d'autant plus difficiles à obtenir qu'il faut se placer dans des conditions telles que le matériel puisse prouver

Tableau 3 - Bilan des essais de répulsifs acoustiques lors des campagnes avec un observateur de l'Ifremer à bord.

Code marée	Date début de marée	Nombre de filages	Date fin de marée	Nombre de filages non instrumentés	Nombre d'hameçons couverts	Nombre d'hameçons non couverts
1	13/10/00	6	19/10/00	0	1 050	4 605
2	26/10/00	7	02/11/00	2	875	6 295
3	24/11/00	6	2/12/00	0	1 820*	3 595
4	17/01/01	6	23/01/01	0	700	5 075

* Lors de cette marée, un seul répulsif était positionné par segment (7 hameçons).

Tableau 4 - Bilan des essais de répulsifs acoustiques lors des campagnes sans observateur de l'Ifremer à bord.

Code marée	Date début	Nombre de filages	Date fin	Nombre de filages non instrumentés	Nombre d'hameçons couverts	Nombre d'hameçons non couverts
5	5/11/00	4	8/11/00	1	700	?
6	16/11/00	6	22/11/00	1	700	?
7	?	>10	?	?	350	?
8	15/03/01	9	27/03/01	7	350	7 700
9	05/04/01	9	16/04/01	9	0	9 100
10	23/05/01	27	06/07/01	23	700	?

son efficacité, c'est-à-dire que l'on puisse constater une attaque réelle sur l'engin de pêche. Ainsi, au cours des quatre premières marées (tab. 5, 6), seule une attaque a pu être observée. Lors de ce filage particulier, sur la portion non instrumentée, 4 espadons sur 9 capturés et 5 autres poissons ont été attaqués alors que, sur la portion instrumentée, les trois poissons (dont 1 espadon) pris étaient intacts. Les rendements moyens en espadon sur les portions de ligne instrumentées et non instrumentées au cours des 23 filages étaient respectivement de 11,25 et 10,07 individus pour 1 000 hameçons. La prédation par les requins a d'ailleurs été observée pour les deux types de ligne. Devant le peu de données, il est impossible de savoir si les répulsifs sont significativement neutres vis-à-vis des captures des individus d'autres espèces.

Discussion

Limites et contraintes d'utilisation des répulsifs

Dans le cas des captures accessoires de petits marsouins, les premières théories sur ce phénomène portaient du principe que les engins de pêche, en l'occurrence les filets maillants, étaient mal détectés par ces animaux. Les premières expérimentations étaient donc basées sur des méthodes acoustiques passives. Les filets étaient équipés de différents matériaux réfléchissant les ondes acoustiques, destinés à rendre ces engins de pêche plus « visibles » par les cétacés. Des expérimentations complémentaires ont démontré par la suite que ces cétacés étaient réellement capables de discerner les différents éléments des filets (Kastelein *et al.*, 1997). Des méthodes acoustiques actives ont ensuite été mises en place, à l'aide de matériel électronique. Cette fois, les émetteurs ont eu des résultats modérément encourageants car, dans certains cas, le taux de captures accessoires des cétacés est revenu à son niveau initial après avoir baissé lors des premiers tests. Là encore, le phénomène d'habituation paraît être la cause de la réduction de l'efficacité à long terme de ces appareils.

Dans les années quatre-vingt, des tests ont été effectués en associant des émetteurs acoustiques (stimulus de conditionnement) et des poissons-appâts remplis de chlorure de lithium² (stimulus négatif). Malheureusement, ce type de protocole ne s'adapte qu'à un nombre restreint d'individus puisqu'il consiste à « enseigner » à ces animaux la relation entre l'émetteur et les désagréments provoqués par le chlorure de lithium (Mate *et al.*, 1986). Ce type d'association justifie la relative réussite des ADD puisque c'est la présence du filet maillant qui constitue le véritable danger pour les petits marsouins.

Entre 1980 et 1990, les répulsifs de type AHD ont surtout été utilisés pour lutter contre les populations de phoques et d'otaries qui s'attaquaient aux engins de pêche et aux structures aquacoles marines. Au départ, les effets de ces répulsifs ont été assez positifs. Dans la plupart des cas, la mise à l'eau des appareils provoquait un mouvement de fuite ou un arrêt des attaques par les populations de mammifères marins incriminées. Par la suite, l'effet répulsif des appareils a rapidement diminué au cours des semaines suivant les tests. Dans la majorité des cas, des observations faites sur les différents sites montraient que les pinnipèdes devenaient progressivement insensibles et avaient des signes rapides d'habituation. Dans certains cas, l'effet des différents « appareils » s'est même inversé, les émetteurs devenant des indicateurs de zones de nourriture pour les mammifères marins, c'est l'effet « *dinner bell*³ » (Richardson *et al.*, 1995). Des observations similaires ont été faites sur les populations d'orques s'attaquant aux pêcheries palangrières dans la mer de Béring (Jefferson & Curry, 1994).

Les AHD de nouvelle génération ont été créés par la suite. Ce sont des dispositifs de plus forte puissance, de l'ordre de 200 dB, qui causeraient une douleur à faible distance. Aux dires des constructeurs, l'utilisation de ces dispositifs permettrait d'obtenir de bons résultats durant 2 à 3 ans avant tout signe d'habituation (Reeves *et al.*, 1996).

2. Le chlorure de lithium (CLi) provoque un dégoût et une sensation de nausée passagère.

3. Littéralement « sonnerie du dîner », en référence aux expériences de Pavlov.

Tableau 5 - Bilan des captures et du nombre de poissons attaqués par les mammifères marins et les requins sur la portion de ligne non instrumentée lors des quatre premières marées.

Portion de palangre non instrumentée							
Filage	Espadon			Toutes espèces confondues (sauf espadon)			
	Nbre d'hameçons	Nbre d'espadons capturés	Nbre d'attaques par les cétacés	Nbre d'attaques par requins	Nbre total de poissons capturés	Nbre d'attaques par les cétacés	Nbre d'attaques par requins
1	765	10	0	0	45	0	0
2	765	7	0	0	21	0	0
3	765	11	0	1	14	0	1
4	770	14	0	0	37	0	0
5	770	15	0	1	23	0	1
6	770	9	0	0	29	0	0
7	905	4	0	0	14	0	0
8	905	12	0	0	24	0	0
9	875	6	0	0	17	0	0
10	875	4	0	0	10	0	0
11	805	6	0	0	27	0	1
12	980	7	0	1	27	0	2
13	950	6	0	1	32	0	2
14	685	9	4	0	16	5	0
15	595	4	0	0	10	0	0
16	625	12	0	0	19	0	1
17	590	7	0	1	15	0	1
18	550	6	0	1	11	0	1
19	550	8	0	0	18	0	1
20	800	12	0	0	22	0	0
21	940	7	0	0	21	0	0
22	805	6	0	0	12	0	0
23	800	4	0	0	11	0	0
24	800	4	0	0	10	0	0
25	930	7	0	0	9	0	0
Total	19 570	197	4	6	494	5	11

Tableau 6 - Bilan des captures et du nombre de poissons attaqués par les mammifères marins et les requins sur la portion de ligne instrumentée lors des quatre premières marées.

Portion de palangre instrumentée							
Filage	Espadon			Toutes espèces confondues (sauf espadon)			
	Nbre d'hameçons	Nbre d'espadons capturés	Nbre d'attaques par les cétacés	Nbre d'attaques par requins	Nbre total de poissons capturés	Nbre d'attaques par les cétacés	Nbre d'attaques par requins
1	175	1	0	0	1	0	0
2	175	0	0	0	0	0	0
3	175	0	0	0	0	0	0
4	175	0	0	0	0	0	0
5	175	0	0	0	0	0	0
6	175	0	0	0	0	0	0
7	175	3	0	0	4	0	0
8	175	1	0	0	4	0	0
9	175	1	0	0	7	0	0
10	175	1	0	0	3	0	0
11	175	2	0	0	3	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0
14	175	1	0	0	2	0	0
15	315	4	0	1	9	0	1
16	315	7	0	1	11	0	4
17	315	4	0	0	9	0	0
18	350	8	0	0	11	0	0
19	350	10	0	0	19	0	0
20	140	1	0	0	5	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0
22	140	0	0	0	2	0	0
23	140	3	0	0	4	0	0
24	140	3	0	0	5	0	0
25	140	0	0	0	2	0	0
Total	4 445	50	0	2	101	0	5

Les répulsifs testés à La Réunion ont été utilisés expérimentalement par une organisation professionnelle de pêcheurs du Danemark. Le protocole était basé sur l'utilisation de filets dérivants équipés ou non de répulsifs. Ceux-ci pouvaient être actifs ou inactifs. Le nombre de prises accidentelles de marsouins (*Phocoena phocoena*) suivant le type de filet a démontré que les répulsifs actifs avaient eu une incidence significative sur la réduction de celles-ci (Larsen, 1998). Les auteurs n'excluent pas un effet indirect des répulsifs sur les proies habituelles des marsouins mais soulignent que les résultats obtenus sont conformes aux observations faites sur les animaux captifs et en milieu naturel. Ces observations ont montré que les répulsifs avaient une action sur une zone de plus de 600 mètres (Goodson *et al.*, 1997a).

L'utilisation de ce matériel, aux dires de ses concepteurs, n'offre qu'une réponse temporaire, sur une durée encore non définie, aux problèmes de captures accidentelles ou de déprédation sur les palangres dérivantes. Quel que soit le système, il aboutit toujours à un phénomène d'habituation. Les concepteurs cherchent maintenant à passer d'un système de fonctionnement de type balise à un fonctionnement interactif. Les composants restent quasiment les mêmes, mais l'émission des ondes est provoquée, cette fois, par la détection des cétacés grâce au phénomène d'écholocation. Lorsque l'animal s'éloigne suffisamment, l'émission est stoppée. Ce principe nouveau permettrait de réduire la consommation énergétique et les phénomènes d'habituation des cétacés, et d'augmenter leur durée de vie. Une autre piste de développement passe également par l'interaction entre les répulsifs, le déclenchement d'un des appareils provoquant l'activation du répulsif le plus proche, jusqu'à la protection totale de toute la ligne. Malgré ces améliorations possibles, il reste aussi à déterminer si ces dispositifs ont une action directe sur les cétacés et/ou une action sur les espèces ciblées par le pêcheur.

Avant nos expérimentations, deux armements privés (réunionnais et seychellois) ont procédé à des essais avec la première génération de répulsifs produits par la même société. Dans les deux cas, les résultats n'ont pas été significatifs.

Pour couvrir l'ensemble de la ligne, un palangrier de 13 mètres mettant à l'eau 1 100 hameçons par filage devrait se doter d'environ 330 répulsifs. L'achat de ce matériel se monterait à 231 000 francs. Cette somme correspond à la capture de 10,5 tonnes d'espadon (sous forme vidée et étêtée). Même si leur efficacité était garantie, le coût actuel de ces appareils, leur temps de vie limité et la difficulté de mise en place ne justifient pas nécessairement un tel investissement.

Des réflexions pour l'avenir

Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires pour bien comprendre les différents mécanismes des interactions entre les activités halieutiques et les mammifères marins, que ce soit au niveau des captures accidentelles ou de la prédation. La plupart des chercheurs ayant travaillé dans ce domaine estiment qu'il faut multiplier les observations du comportement des cétacés et des pinnipèdes à proximité immédiate des engins de pêche et des structures aquacoles, en présence ou en l'absence de répulsifs afin d'en identifier les effets de manière plus précise (Jefferson & Curry, 1994).

À La Réunion, on connaît encore mal les différents éléments et stimuli qui permettent à ces animaux de repérer les palangres afin de s'attaquer aux appâts ou aux poissons capturés. Compte tenu des particularités de la pêche à la palangre, on peut émettre l'hypothèse que ceux-ci s'aident principalement des sons émis par les bateaux.

Dans ce cadre et afin de mieux cerner le problème, il est nécessaire de poursuivre l'étude de l'audition de mammifères marins et de bien comprendre leur utilisation des ondes acoustiques dans le milieu (écholocation). De plus, il y a, dans l'océan Indien, un manque de connaissances sur l'état des populations et les schémas de migration des espèces impliquées.

La plupart des travaux concernant les répulsifs acoustiques montrent que ces appareils ne peuvent répondre seuls aux problèmes des interactions. Il conviendra d'explorer d'autres pistes, comme le changement des paramètres de pêche (heure de mise à l'eau, durées de filage et de virage, etc.) ou la détermination des zones de pêche les plus « risquées ». La connaissance de la répartition spatio-temporelle de ces espèces pourrait par ailleurs minimiser ces interactions.

Conclusion

Nos observations ont permis d'arriver aux mêmes hypothèses que celles avancées par Yano & Dahleim (1995a, b) et par Secchi & Vaske (1998) qui ont étudié le comportement des orques. Ces travaux mettent en évidence les facultés d'adaptation des mammifères marins. Les espèces incriminées semblent rapidement associer la présence de palangriers à la possibilité de trouver de l'espadon, espèce la plus attaquée alors que celle-ci n'entre pas forcément dans le régime alimentaire classiquement identifié par les cétoles.

Malgré la dimension mondiale du phénomène (Nishida & Tanio, 2001), la gamme de produits disponibles actuellement sur le marché est très réduite. Les essais effectués n'ont pas permis à l'heure actuelle de prouver l'efficacité des répulsifs choisis. L'échec relatif de ces expérimentations vient, d'une part, des contraintes de mise en place à bord de bateaux de pêche et, d'autre part, du choix de la prise de risque par les professionnels. Par ailleurs, si ce produit est très solide, sa durée de vie est malgré tout limitée. Les frais qu'implique un acheminement au constructeur pour le renouvellement des batteries augmentent considérablement le coût de cet appareil. Le fait de ne pas pouvoir vérifier son bon fonctionnement à tout moment est aussi regrettable, compte tenu des contraintes liées à leur mise en place. Le prix unitaire reste élevé dans les conditions actuelles de mise en œuvre. Tant que l'efficacité de l'instrument vis-à-vis des espèces incriminées ainsi que la neutralité vis-à-vis des espèces ciblées ne sont pas prouvées, des essais en grandeur nature ne sont pas envisageables sur des palangriers professionnels.

La méconnaissance des schémas migratoires ne nous permet pas d'exclure le fait que ces animaux puissent se « sédentariser » après association de l'activité de pêche à la possibilité de trouver de la nourriture facilement. Ce phénomène a déjà été décrit par Yano & Dahleim (1995a, b) dans le cas de la pêche de la mer de Béring.

Le phénomène de prédation à La Réunion semble plutôt stable au cours des dernières années. Les estimations de prédation occasionnée par les mammifères marins et les requins sont de l'ordre de

7,5 %, uniquement pour l'espadon. Ces valeurs sont pourtant supérieures à celles annoncées par Sivasubramanian en 1964 et Leatherwood *et al.* en 1987 qui étaient de 4 % pour l'ensemble des prises des palangriers dans l'océan Indien.

Cette différence peut être attribuée soit aux méthodes d'estimation, soit à une intensification du phénomène. Pour ces deux raisons, il est important de standardiser les protocoles d'évaluation du phénomène. Cette démarche a été initiée au niveau de la CTOI⁴, sous l'impulsion des représentants scientifiques japonais qui se proposent d'agréger toutes les informations sur le sujet et de les traiter de façon globale au cours de sessions spéciales. Un formulaire type est disponible sur le site de la CTOI. Nos estimations ont été établies uniquement sur les pertes d'espadon, aussi la poursuite de la participation des professionnels à ce programme est-elle indispensable. Des aménagements des carnets de pêche devront être effectués afin de pouvoir fournir les données attendues et de prendre en compte l'ensemble des espèces commerciales.

Références bibliographiques

- Akamatsu T., Hataketama Y., Takatsu N., 1993. Effects of pulse sound on escape behaviour of false killer whales. *Nat. Res. Inst. Fish. Engin.* (ed.), 1297-1303.
- Anonyme, 1980. Report of the subcommittee on small cetaceans. *Rep. Int. Whale Comm.*, 30, 114-115.
- Anonyme, 2001. Report of the third session of the IOTC working party on tropical Tunas. Victoria, Seychelles, 19-27 June 2001, 37 p.
- Dahleim M.E., 1988. Killer whale (*Orcinus orca*) depredation on longline catches of sablefish (*Anoplopoma fimbria*) in Alaskan waters. *NWAFRC Processed Rep.*, 88(4), 1-31.
- Goodson A.D., Newborough D., Woodward B., 1997a. Set gillnet acoustic deterrents for harbour porpoises, *Phocoena phocoena*: improving the technology. Theme session (Q) By-catch of marine mammals. ICES, Baltimore, September 1997, 5 p.

4. <http://www.seychelles.net/iotc/French/TechInfo/FPredSurvey.htm>

- Goodson A.D., Amundi M., Mayo R.H., Newborough D., Lepper P.A., Lockyer C., Larsen F., Blomqvist C. 1997b. Aversive sounds and sound pressure levels for the harbour porpoise (*Phocoena phocoena*): an initial field study. Theme session (Q) By-catch of marine mammals. ICES, Baltimore, September 1997, 5 p.
- Goujon M., Antoine L., Collet A., Fifas S., 1993. Approche de l'impact écologique de la pêche thonière au filet dérivant en Atlantique Nord-Est. Rapp. int. Drv, Ifremer, 93/034, 47 p.
- Jefferson T.A., Curry B., 1994. Review and evaluation of potential acoustic methods of reducing or eliminating marine mammal-fishery interactions. US Marine Mammal Commission, La Jolla, 59 p.
- Kastelein R.A, Wim C., Verboom, De Haan D., 1997. The effects of different sounds on the behaviour of harbour porpoises. ICES CM 1997/Q: 07 (ed.).
- Klinowska M., 1991. Dolphins, porpoises and whales of the world. The IUCN red data book (ed.), 429 p.
- Larsen F., 1998. The effect of acoustic alarms on the by-catch of harbour porpoises in bottom set gill nets. Danish institute for fisheries research, Report, 44-97, 9 p.
- Leatherwood S, Reeves R.R., Perrin W.F., Evans W.E., 1982. Whales, dolphins, and porpoises of the Eastern North Pacific and adjacent Arctic waters. A guide to their identification. NOAA Technical Report/NMFS Circular 444, 245 p.
- Leatherwood S, Reeves R.R., 1983. The Sierra Club handbook of whales and dolphins. Sierra Club Books, San Francisco, 302 p.
- Leatherwood S., Prematunga W.P., MCBrearty D., Ilangakoon A., McDonald D., 1987. Records of the "Blackfish" in the Indian Ocean Cetacean Sanctuary, 1772-1986. IWC/SC/39/SM 4.
- Mate B.R., Brown R.F., Greenlaw C.F., Harvey J.T., Temte J., 1986. An acoustic harassment technique to reduce seal predation on salmon. *In*: Acoustical deterrents in marine mammal conflicts with fisheries. Mate R.M. & Harvey J.T. (ed.). Oregon Sea Grant, Newport, 23-36.
- Matkin C.O., 1986. Killer whale interactions with the sablefish longline fishery in Prince William Sound, Alaska, 1985, with comments on the Bering Sea. Rep. to the NMML, Nat. Mar. Fish. Serv., NOAA, Seattle, WA. Unpubl. Manuscr., Contract 40-HANF-6-0068, 10 p.
- Nishida T., Tanio M., 2001. Report of the survey by the Japanese commercial tuna longline fisheries (September-October, 2000). Third working party on the tropical tuna meeting, CTOI. June 19-27, 2001, Victoria, Seychelles.
- Pryor K., 1986. Behavioural conditioning. *In*: Acoustical deterrents in marine mammal conflicts with fisheries. Mate R.M. & Harvey J.T. (eds). Oregon Sea Grant, Newport, 105-114.
- Reeves R.R., Hofman R.J., Silber G.K. Wilkinson D., 1996. Acoustic deterrence of harmful marine mammal-fishery interactions. *In*: Proceedings of a work shop held in Seattle, Washington, 20-22 March 1996. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-10 (ed.), 68 p.
- Richardson W.J., Greene C.R., Malme C.I., Thomson D.H., 1995, Marine mammal and noise. Academic Press, San Diego, 576 p.
- Sasaki T., Yano K., 1990. Report on Japan-US joint longline survey by *Tomi Maru* n° 88 in the eastern Bering Sea, Aleutian Region, and Gulf of Alaska, 1988. National Research Institute of Far Seas Fisheries (Shimizu), Japan, 163 p.

- Secchi E., Vaske T., 1998. Killer whale (*Orcinus orca*) sightings and depredation on tuna and swordfish longline catches in Southern Brazil. *Aquatic Mammals*, 24(2), 117-122.
- Sivasubramanian K., 1964. Predation of tuna longline catches in the Indian Ocean, by killer whales and sharks. *Bull. Fish. Res. St., Ceylon*. 17(2), 221-236.
- Tamura T., Oshumi S., 1999. Estimation of total food consumption by cetaceans in the world's oceans. *Institute Cetacean Research* (ed.), Tokyo, Japan, 16 p.
- Thomas J.A., Turl C.W., 1990. Echolocation characteristics and range detection threshold of a false killer whale (*Pseudorca crassidens*). *In: Sensory abilities of cetacens*. Thomas J. & Kastelein R. (eds), 321-334.
- Thomas J., Chun N., AU W., Pugh K., 1988. Underwater audiogram of false killer whale (*Pseudorca crassidens*). *J. acoust. Soc. Am.*, 83(3), 936-960.
- Yano K., 1989. Japan-US joint survey for stock assement of sablefish and Pacific cod resources in 1988. Report of the northern groundfish section, Japan scientific council on the fisheries resources (GSK). *Tohoku National Fisheries Research Institute, Aomori, Japan*, 22, 145-173 (in japanese).
- Yano K., 1990. Report on sablefish and Pacific cod ressource developmental survey, 1988. *Japan Marine Fishery Ressources Research Center, Tokyo, Japan, JAMARC Rep. S63/11*, 195 p. (in japanese).
- Yano K., Dahlheim M.E., 1995a. Behaviour of killer whales *Orcinus orca* during longline fishery interaction in southeastern Bering sea and adjacent waters. *Fisheries Science* (ed.), 584-589.
- Yano K., Dahlheim M.E., 1995b. Killer whale, *Orcinus orca*, depredation on longline catches of bottomfish in southeastern Bering sea and adjacent waters. *Fish. Bull.*, 355-372.

Réalisation, mise en page : XLC (02 98 30 50 07)

Achevé d'imprimer sur les presses de Reprographica

Dépôt légal 4^e trimestre 2001

© 2001, Ifremer. Tous droits de reproduction, même partielle, par quelque procédé que ce soit, sont réservés pour tous pays.