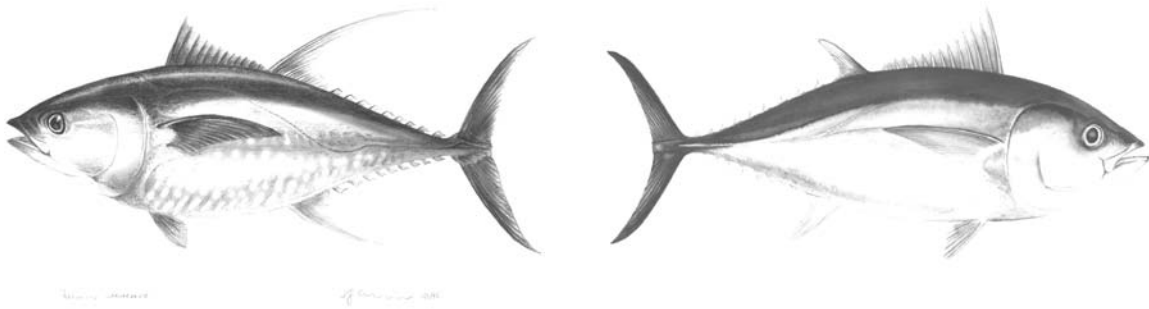


ZoNéCo

PROGRAMME D'ÉVALUATION DES RESSOURCES MARINES
DE LA ZONE ÉCONOMIQUE DE NOUVELLE-CALÉDONIE

Effets des variabilités climatiques saisonnières et interannuelles sur l'habitat et les captures de thons dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie



Rapport final

BRIAND Karine
Chargée de recherche pour le programme Zonéco



Remerciements

L'ensemble du travail s'est effectué au sein de la CPS (Secrétariat de la Communauté du Pacifique) et a été réalisé dans le cadre du programme Zonéco, financé par l'ADECAL (Agence de Développement Economique de la Nouvelle Calédonie).

Avant tout, je tiens à témoigner une sincère gratitude envers Christophe Fonfreyde et Régis Etaix Bonnin du Service Territoriale de la Marine Marchande et des Affaires Maritimes pour m'avoir proposé ce projet et m'avoir accordé leur confiance durant ces dix mois.

Je réserve ensuite une grande part de remerciements à Patrick Lehodey pour avoir consacré une partie de ses derniers instants sur le Caillou à superviser l'ensemble de mon travail. Je tiens à souligner sa disponibilité et sa compétence dans le domaine de l'écologie des thons et de la modélisation, qui m'ont permis de mener à bien cette étude.

Au sein de l'équipe de pêche hauturière de la CPS, je tiens tout particulièrement à remercier Emmanuel Schneiter et Peter Williams pour leur gentillesse et le temps qu'ils m'ont consacré dans l'élaboration d'une base de données exploitable. Je suis également très reconnaissante à Adam Langley, Gwenhael Allain et Brett Molony de m'avoir guidé dans mes analyses statistiques sous le logiciel R. Milles remerciements à David Kirby pour m'avoir permis d'accéder aux données satellites SeaWiFS. N'oublions pas non plus Bruno Leroy qui a su éclaircir ma vision sur la pêche palangrière par son expérience de terrain et Valérie Allain, qui m'a aidé à comprendre le comportement alimentaire des thons.

Un grand merci également à Fabrice Bouyé pour le temps qu'il a fourni à améliorer l'interface du logiciel Seapodym et à Franck Magron pour m'avoir montré comment télécharger des bases de données volumineuses à grande vitesse.

Je souhaite également exprimer mes sincères remerciements à Pablo Chavance, pour son enthousiasme communicatif, ses informations sur les armements locaux et pour l'ensemble de ses travaux qui ont servi de complément à cette étude. En tant qu'ingénieur halieute, je tiens tout particulièrement à souligner l'importance de l'échange entre acteurs dans le but d'améliorer la connaissance de chacun et donc à encourager tous les anciens collègues de l'ENSAR du territoire (dont Nathaniel Cornuet) à continuer leur précieux travail de communication. Je remercie également les différents patrons pêcheurs et représentants des Provinces qui étaient présents à la restitution de mes travaux.

Enfin, je tenais à saluer l'ensemble du personnel de la CPS et de l'ADECAL, tout particulièrement Caroline Païdjo, Kay Parry et Adrien Rivaton pour leur accueil et leur soutien logistique.

Table des matières

Remerciements.....	i
Table des matières.....	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux.....	vi
RESUME	1
INTRODUCTION	2
Partie I - Présentation de la pêcherie thonière calédonienne et de son évolution.....	4
I. Contexte général de la pêcherie thonière dans l’Océan Pacifique Centre-Ouest....	4
A. Situation	4
B. Historique des captures et états actuels des stocks	5
C. Distribution spatiale des captures	6
II. La pêche thonière dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie	7
A. Historique.....	7
B. Source de données.....	8
C. Composition spécifique	8
D. Effort de pêche.....	11
E. Rendements de pêche.....	14
Partie II - Conditions environnementales dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie	19
I. Contexte général	19
II. Variations saisonnières	21
A. Courants	21
B. Températures.....	22
C. Oxygène	24
D. Chlorophylle	25
E. Proies.....	26
III. Variations interannuelles	29
A. Courants	29
B. Températures.....	31
C. Chlorophylle	34
D. Proies.....	35
IV. Conclusion Partie II	38
Partie III- Etude des relations thons/environnement dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie	40
I. Relations entre les PUE observées et les variables environnementales prédites par le modèle SEAPODYM.....	40
A. Méthodologie	40
B. Effet spatio-temporel	41
C. Effet des variables environnementales.....	47
II. Exemple de simulation : mise en évidence de l’influence de l’environnement sur les PUE de thon blanc	54
A. Cartes mensuelles de capturabilité.....	54
B. Mise en évidence de l’effet ENSO.....	57
CONCLUSION.....	63
Références bibliographiques.....	65

Liste des figures

Figure 1. Limites géographiques du Pacifique centre-ouest (PCO).	4
Figure 2. Prises annuelles par engin de pêche dans la WCPO sur la période 1970-2003 ..	5
Figure 3. Prises annuelles par espèce dans la WCPO sur la période 1970-2003.....	6
Figure 4. Distribution des captures thonières/ espèces (en tonnes) dans les différentes ZEE de la région du Pacifique centre ouest en 2003: a) tout engins confondus b) palangre uniquement.....	7
Figure 5. Evolution de la composition spécifique des captures en poids (tonnes) des palangriers pêchant dans la ZEE de Nouvelle Calédonie entre 1983 et 2004.	9
Figure 6. Evolution de la composition spécifique des prises de thonidés en poids (tonnes) des palangriers pêchant dans la ZEE de Nouvelle Calédonie.....	10
Figure 7. Evolution du nombre de bateaux utilisés par les flottilles calédoniennes et japonaises et du nombre de jours de pêche correspondant à l'intérieur de la ZEE de Nouvelle-Calédonie (1983-2004).	11
Figure 8. Evolution du nombre d'hameçons des palangriers calédoniens et japonais dans la ZEE de Nouvelle Calédonie (1983-2004).....	12
Figure 9. Evolution mensuelle du nombre d'hameçons utilisés par les pêcheurs palangriers sur la période 1983-2004.....	13
Figure 10. Evolution annuelle des prises par unités d'effort (kg/100 hameçons) de thonidés pêchés dans la ZEE de Nouvelle Calédonie par espèce et par flottille.	15
Figure 11. Prises par unité d'effort (kg/100 hameçons) mensuelles par espèces et par pays des palangriers ayant pêché dans la ZEE de Nouvelle Calédonie entre 1983 et 2004.	16
Figure 12. Distribution des captures totales et des PUE totales pêchées par l'ensemble des flottille sur la période 1983-2004.....	18
Figure 13. Emplacement des 3 zones choisies pour l'étude des paramètres environnementaux.....	20
Figure 14. Variations saisonnières de température dans les différentes couches de profondeur de la ZEE de Nouvelle Calédonie	23
Figure 15. Variations trimestrielles du taux d'oxygène (ml/l) dans les différentes couches de profondeur et les différentes zones de la ZEE.	24

Figure 16. Données mensuelles de concentration en chlorophylle (mg/m^3) obtenues par satellite (données SeaWiFS) sur la période 1998-2003 et données mensuelles de production primaire ($\text{mmolC}/\text{m}^2/\text{j}$) prédites par le modèle ESSIC.....	26
Figure 17. Biomasses mensuelles de proies (g/m^2) estimées de jour et de nuit dans les différentes couches d'eau pour chacune des zones étudiées.....	28
Figure 18. Evolution de de l'indice SOI et de la composante zonale u dans la ZEE à différentes profondeurs sur la période 1980-2004.....	29
Figure 19. Evolution de de l'indice SOI et de la composante méridionale v dans la ZEE à différentes profondeurs sur la période 1980-2004.....	30
Figure 20. Evolution annuelle de l'index SOI et des anomalies de températures de surface a) dans la ZEE et b) dans les 3 zones sur la période 1982-2000.....	32
Figure 21. Anomalies de températures estimées par le modèle pour la période 1980-2004 pour les différentes couches d'eau.....	33
Figure 22. Taux de chlorophylle observé et production primaire prédite sur la période 1998-2003 dans les différentes zones de la ZEE de Nouvelle-Calédonie.....	34
Figure 23. Evolution de la Soi et de la production primaire sur la période 1980-2004 pour les différentes zones.....	35
Figure 24. Biomasses de proies estimées (g/m^2) de jour et de nuit dans les différentes couches épi-pélagique, méso-pélagique et bathy-pélagique et pour chacune des zones étudiées.....	37
Figure 25. Résultats de la régression GAM indiquant les effets de (a) la longitude et de (b) la latitude sur le log des PUE de thon germon et localisation de la zone où les rendements sont supérieurs à la moyenne.....	42
Figure 26. Résultats de la régression GAM indiquant les effets de (a) l'année et (b) la période de 10 jours sur le log des rendements de thon germon effectués sur la période 1983-2004.....	43
Figure 27. Résultats de la régression GAM indiquant les effets de (a) la longitude et (b) de la latitude sur le log des PUE de thon jaune et la localisation des zones où les rendements sont supérieurs à la moyenne.....	44
Figure 28. Résultats de la régression GAM indiquant les effets de (a) l'année et (b) de la période de 10 jours sur le log des rendements de thon jaune effectués sur la période 1983-2004.....	45

Figure 29. Résultats de la régression GAM indiquant les effets de (a) la longitude (b) de la latitude sur le log des PUE de thon obèse et localisation de la zone où les rendements sont supérieurs à la moyenne.	46
Figure 30. Résultats de la régression GAM indiquant les effets de (a) l'année et (b) de la période de 10 jours sur le log des rendements de thon obèse effectués sur la période 1983-2004.....	47
Figure 31. Résultats de la régression GAM indiquant les effets (a) du courant est-ouest entre 0-100 m (b) des proies épipélagiques de nuit et (c) des proies mésopélagiques de jour sur le log des rendements de thon germon.	50
Figure 32. Résultats de la régression GAM indiquant les effets (a) de la température entre 100-400 m (b) des proies épipélagiques de nuit (c) des proies mésopélagique de jour et (d) de la production primaire sur le log des rendements de thon jaune	52
Figure 33. Résultats de la régression GAM indiquant les effets (a) de la production primaire sur le log des rendements de thon obèse.	53
Figure 34. Distribution des rendements en thon blanc en fonction de l'indice de capturabilité et des courants dans la ZEE.	55
Figure 35. Distribution des rendements de thon blanc en fonction de la capturabilité et des courants en période El Niño	58
Figure 36. Distribution des rendements de thon blanc en fonction de la capturabilité et des courants en période La Niña.....	61

Liste des tableaux

Tableau 1. Coefficients de corrélation et lags entre la SOI et la composante U a) par couches de profondeur et b) par zones sur la couche 0-100 m	30
Tableau 2. Coefficients de corrélation entre la SOI et la composante V a) par couches de profondeur et b) par zones sur la couche 100-400m.....	31
Tableau 3. Coefficients de corrélation et lags entre la SOI et les anomalies de températures de surface par zone	32
Tableau 4. Coefficients de corrélations et lags entre la SOI et les anomalies de températures du modèle calculées a) pour différentes couches de profondeurs et b) pour les différentes zones sur la couche 100-400 m.	33
Tableau 5. Coefficients de corrélations et lags entre la SOI et la production primaire pour les différentes zones.....	35
Tableau 6. Coefficients de corrélation et lag entre la SOI et les biomasses de proies prédites dans les différentes couches et les pour différentes zones étudiées a) de jour et b) de nuit.....	36
Tableau 7. Coefficients de régression ajustés et pourcentages de déviance obtenus pour les différents modèles GAM.	41
Tableau 8. Importance explicative des différents paramètres spatio-temporels sur le log des rendements de thon germon effectués par les palangriers de la ZEE de Nouvelle-Calédonie.	42
Tableau 9. Importance explicative des différents paramètres spatio-temporels sur le log des rendements de thon jaune effectués par les palangriers de la ZEE	44
Tableau 10. Importance explicative des différents paramètres spatio-temporels sur le log des rendements de thon obèse effectués par les palangriers de la ZEE.....	46
Tableau 11. Résumé des différentes variables testées et de leur influence sur le log des rendements de chaque espèce..	48
Tableau 12. Importance explicative des différents paramètres environnementaux sur le log des rendements de thon.....	49
Tableau 13. Importance explicative des différents paramètres environnementaux sur le log des rendements de thon jaune..	51
Tableau 14. Importance explicative des différents paramètres environnementaux sur le log des rendements de thon obèse.....	53

RESUME

Cette étude retrace l'évolution de l'ensemble de la pêcherie thonière en Nouvelle-Calédonie depuis la création de la ZEE jusqu'à nos jours et tente d'expliquer une partie de ses variations par les conditions du milieu. Les données historiques de pêche palangrière sont basées sur les fiches de pêches fournies par le Service Territorial de la Marine Marchande et des Pêches Maritimes. Les données environnementales proviennent quant à elles de modèles océanographiques et écosystémiques. Les variations spatio-temporelles de l'effort et des prises par unités d'effort (PUE) ont été examinées sur la période 1983-2004 pour les trois espèces commerciales de thon. De la même façon, l'évolution de la température, des courants, de la production primaire et des proies dans la ZEE ont ensuite été simulées par modélisation en détaillant l'étude d'un point de vue zonal et vertical. Il en ressort qu'une grande partie de la variabilité des rendements peut s'expliquer par les variations saisonnières, inter-annuelles et spatiales de l'environnement. Les rendements par espèces et l'ensemble des facteurs écologiques ont ensuite été testés par une analyse statistique non linéaire à l'aide de modèles additifs généralisés (GAM) afin de déterminer quel paramètre environnemental pouvait expliquer la plus grande part de variabilité dans les PUE observées. Il en ressort des résultats différents selon les espèces de thon. Pour le thon blanc, les facteurs explicatifs les plus importants sont la composante du courant est-ouest dans la couche 0-100 m et la présence de proies dans la couche mésopélagique de jour et épipélagique de nuit. Pour le thon jaune, les variables influentes sont la température dans la couche 100-400 puis la présence de proies dans les couches de surface et intermédiaire. Pour le thon obèse, seule la production primaire semble influencer sur les rendements. Les conclusions de cette étude permettent une meilleure compréhension de la relation thon environnement à l'intérieur de la ZEE de Nouvelle-Calédonie et pourrait contribuer à l'amélioration du ciblage des espèces et à une gestion optimisée des stocks.

Mots-clé : Thons, pêche palangrière, zone économique exclusive, Nouvelle-Calédonie, environnement, variabilité spatio-temporelle, modélisation, GAM.

INTRODUCTION

La pêche au thon en Nouvelle-Calédonie représente une part importante de l'économie locale et s'est largement développée depuis ces dernières années. Avant la mise en place de la ZEE par la convention de Montego Bay en 1982, de nombreux pays pour la plupart asiatiques venaient pêcher au large de la Nouvelle-Calédonie. Dorénavant, la pêcherie est réglementée et depuis 1997, seule la flottille palangrière calédonienne exploite les eaux de la ZEE. Le thon germon est l'espèce la plus abondante dans la zone et représente environ 50 % des captures. Le thon jaune et le thon obèse (bacchi) sont également ciblés pour leur valeur marchande, et les thons de meilleure qualité sont exportés au Japon sur le marché du sashimi.

La variabilité saisonnière et inter-annuelle dans les captures des palangriers calédoniens est une problématique importante car elle fait intervenir des enjeux économiques et sociaux. De nombreuses études ont montré que la variabilité dans l'abondance et la distribution de certains stocks de poissons exploités était due à des changements dans les écosystèmes induits par des fluctuations naturelles du climat (McGowan *et al.*, 1998; Hare et Mantua, 2000; Stenseth *et al.*, 2002). L'impact de l'environnement sur les pêcheries est donc un phénomène largement étudié mais les processus par lesquels il agit sont complexes et encore peu connus (Stenseth *et al.*, 2003). Il est prouvé que les stocks de thonidés réagissent aux variations climatiques de grande échelle et les réponses observées sur les rendements peuvent être directes ou indirectes, immédiates ou différées (Lehodey *et al.*, 1997; Marsac et Leblanc, 1998 ; Lehodey, 2000). De nombreux paramètres environnementaux interviennent de manière non linéaire sur les prises par unités d'effort (PUE) et il est important de tenir compte de l'échelle spatio-temporelle à laquelle on observe ces relations (Maury, 2001).

L'abondance d'une espèce de thon dans une zone de pêche va en grande partie dépendre de son adaptation spatio-temporelle à l'environnement. Or, les caractères écologiques et biologiques (préférendum thermique ou bathymétrique, alimentation, reproduction...) gouvernant la distribution et la survie des thons varient d'une espèce à l'autre (Bailey, 1980). Au cours de la journée, la température de l'eau joue un rôle clé dans la distribution verticale des thons. Ainsi le thon jaune qui aime les eaux chaudes (20 à 28°) se répartira préférentiellement en surface dans la couche 0-100 m où la température est plus élevée. Le thon germon qui est une espèce sub-tempérée (14 à 25°) se répartira plutôt dans la couche intermédiaire entre 100 et 400m. Le thon obèse qui possède le système de thermorégulation le plus perfectionné se répartit sur une gamme de température plus importante (entre 13 et 29 °C) et se retrouve à des profondeurs comprises entre 400 et 1000 m (Lehodey, 2004). Cette différence de préférence fait que les thons ne sont pas accessibles à la pêcherie de la même manière.

D'autres facteurs environnementaux peuvent également interagir sur la distribution des thons à différentes échelles. L'oxygène peut devenir un facteur limitant de distribution si le taux d'oxygène dissous est inférieur à 2ml/l (Bailey, 1980). Les courants peuvent aussi avoir un impact sur la distribution horizontale des thons par le biais de déplacement d'isothermes ou de formations de zone favorables à l'accumulation

de production primaire et secondaire (fronts, cellules tourbillonnaires). La concentration en chlorophylle *a* est importante car elle est le premier maillon par lequel le réseau trophique se met en place. Toutefois, c'est probablement la répartition des proies dans les différentes couches de jour et de nuit qui est la plus déterminante pour expliquer la distribution horizontale et verticale des thons (Bertrand, 2002 ; Lehodey, 2005).

L'ensemble de ces facteurs environnementaux peuvent être modulés par des changements saisonniers et inter-annuels. En effet, il existe une saisonnalité marquée par des régimes de vents particuliers pouvant agir sur la force et la direction des courants ainsi que les températures de surface. De plus, la Nouvelle-Calédonie peut également être sujette certaines années à l'influence de l'oscillation australe El Niño (Delcroix et Lenormand, 1997). El Niño a été rattaché à l'oscillation australe (SO) sous l'appellation d'ENSO et défini comme un réchauffement global des températures de surface au niveau du Pacifique équatorial, provoqué par des échanges d'air centrés sur les latitudes tropicales et subtropicales. Le pôle des basses pressions de la SO est situé à Darwin (nord de l'Australie) et le pôle des hautes pressions est situé à Tahiti (Pacifique sud) impliquant une circulation des vents de surface (alizés) dans le sens est-ouest. Une baisse de la différence de pression entre les deux pôles provoque une diminution des alizés (allant parfois jusqu'à une inversion du vent dans le sens ouest-est) et une augmentation de la température des eaux de surface dans le Pacifique équatorial. Ce phénomène est associé à El Niño et défini comme une phase chaude d'ENSO. A l'opposé, une augmentation de la différence de pression est associée à une période froide d'ENSO appelé La Niña (Rasmusson et Wallace, 1983; Larkin et Harrison, 2002). En revanche, dans la région du Pacifique sud-est dans lequel se trouve la Nouvelle-Calédonie, les effets hydroclimatiques sont inversés, ce qui signifie des vents plus forts et des températures plus froides que la moyenne durant les épisodes El Niño et inversement durant les phénomènes La Niña (Lenormand, 1995). L'ensemble de ces changements environnementaux vont avoir un impact important sur les rendements de thon, mais il est difficile de distinguer quelle variable a le plus d'influence sur les captures, et s'il existe des différences significatives entre les espèces.

La modélisation est dorénavant une méthode couramment utilisée permettant de mieux décrire la variabilité spatio-temporelle de l'environnement. Il existe des modèles de différents types, essentiellement basés sur des données observées de vents, qui peuvent fournir sur de grandes échelles des simulations de courants, températures, production primaire mais aussi de biomasses de proies dans les différentes couches.

Afin d'analyser en détail l'impact saisonnier et inter-annuel de la variabilité spatio-temporelle de l'environnement sur les pêcheries calédoniennes, nous avons tout d'abord examiné l'évolution de la pêche palangrière en terme d'effort, de captures et de distribution des flottilles sur la période 1983-2004. Puis, nous avons décrit les fluctuations des paramètres environnementaux pouvant influencer les captures, en examinant les différences spatiales, la variabilité saisonnière puis inter-annuelle en testant pour chaque variable l'impact des phénomènes ENSO. Enfin, nous avons tenté de mettre en évidence les liens entre l'environnement et les PUE des palangriers à l'aide d'analyses statistiques et d'outil visuels.

Partie I - Présentation de la pêche thonière calédonienne et de son évolution

I. Contexte général de la pêche thonière dans l'Océan Pacifique Centre-Ouest

A. Situation

Les captures de thons dans la région du pacifique centre ouest (PCO) représentent 77 % des captures annuelles de l'ensemble du Pacifique et 50 % de la capture mondiale. L'exploitation des thons dans cette région est très diversifiée, allant de simples pêcheries artisanales dans les eaux côtières aux pêcheries industrielles exploitant les zones économiques exclusives (ZEE) et la haute mer. L'exploitation des thonidés a débuté dans les années 1920, mais ne s'est réellement développée qu'à partir des années 1950-60. Historiquement, la zone PCO a d'abord connu une exploitation par les pays asiatiques (Japon, Corée et Taïwan), essentiellement des palangriers et des canneurs. Puis avec la mise en place des zones économiques en 1976, l'ensemble des pays du Pacifique ouest ont pu développer leur propre flottille et exploiter l'espace maritime qui leur a été légalement attribué. Dans le même temps se développait l'usage de la senne tournante.

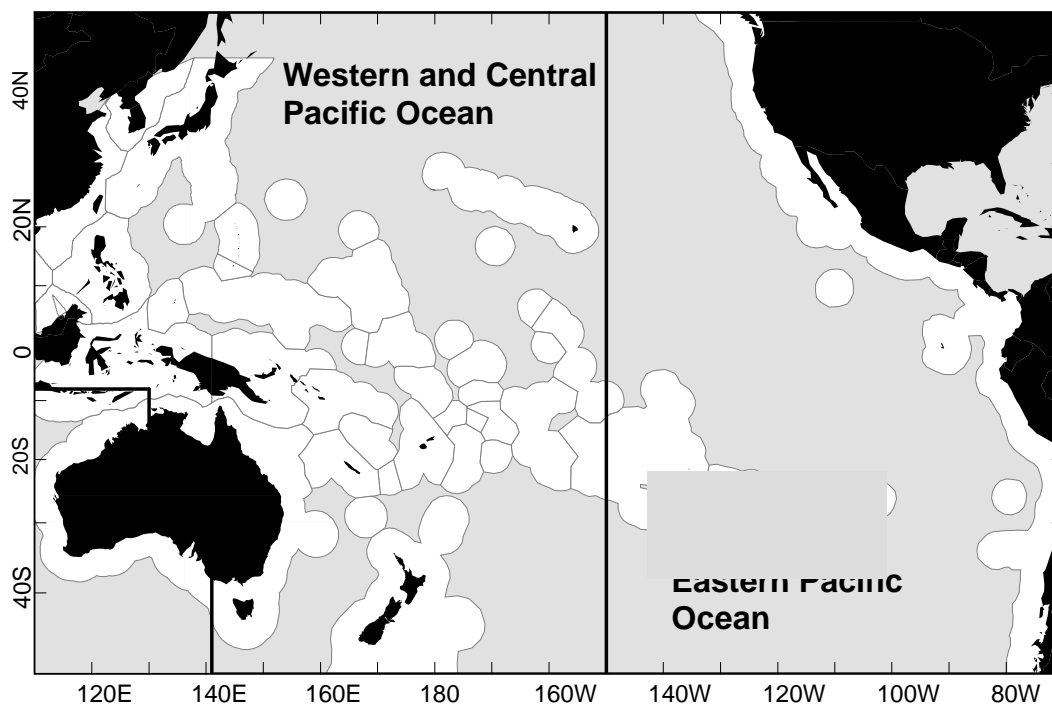


Figure 1. Limites géographiques du Pacifique centre-ouest (PCO).

B. Historique des captures et états actuels des stocks

Les moyens et les techniques de pêche mis en place pour l'exploitation du thon ont beaucoup évolué au cours du temps afin de répondre à la demande croissante des marchés locaux et internationaux. La pêche à la palangre et la pêche à la canne ont été les premières techniques utilisées pour l'exploitation industrielle de thon. Les quantités débarquées par ces pêcheries ont relativement peu évolué au cours du temps. En revanche, à partir des années 1980, la pêche à la senne s'est implantée dans la zone et a pris une proportion croissante dans les captures globales pour finalement s'imposer en tonnage sur tous les autres engins de pêches.

Ainsi en 2003, la pêche à la senne représentait environ 61 % du total des prises (1 195 021 t), celle à la canne 15 % (295 753 t), et celle à la palangre 11 % (222 810 t) (Fig. 2). Le reste des prises englobe la pêche à la traîne et divers autres types de pêches artisanales utilisés en grande partie dans l'est de l'Indonésie et dans les Philippines (Langley *et al.*, 2005).

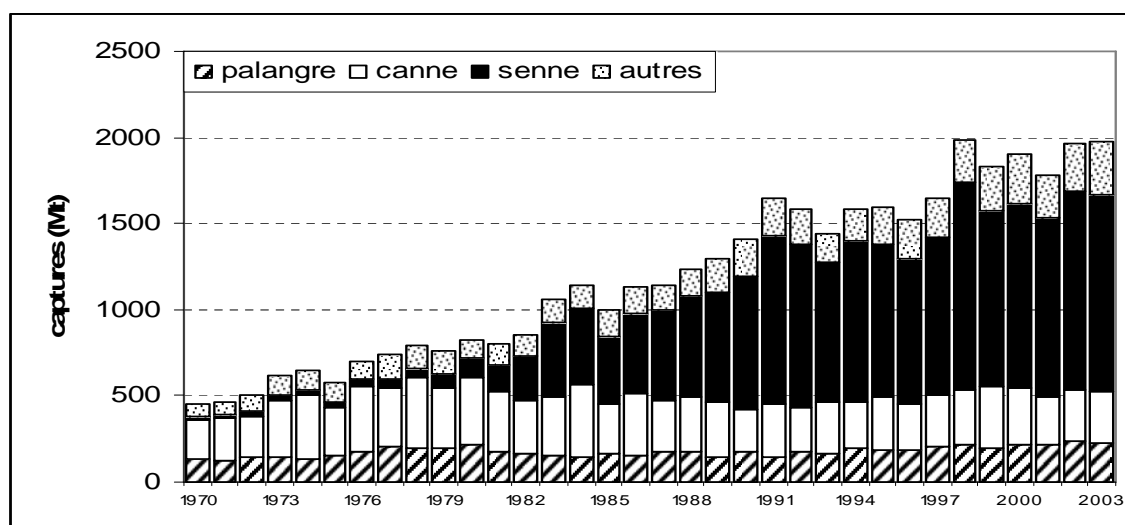


Figure 2. Prises annuelles par engin de pêche dans la WCPO sur la période 1970-2003

Les espèces principales ciblées par ces pêcheries sont le listao ou bonite (*Katsuwonus pelamis*), le thon jaune (*Thunnus albacares*), le thon obèse (*Thunnus obesus*) et le thon germon ou thon blanc (*Thunnus alalunga*). Parmi ces thonidés, le listao est l'espèce la plus pêchée dans la WCPO avec des captures atteignant 1 271 292 t en 2003 et représentant 64% des captures totales. Suivent ensuite l'albacore (464 510 t; 24 %), le germon (134 003 t; 7 %) et le thon obèse (103 833 t; 5 %) (Fig.3).

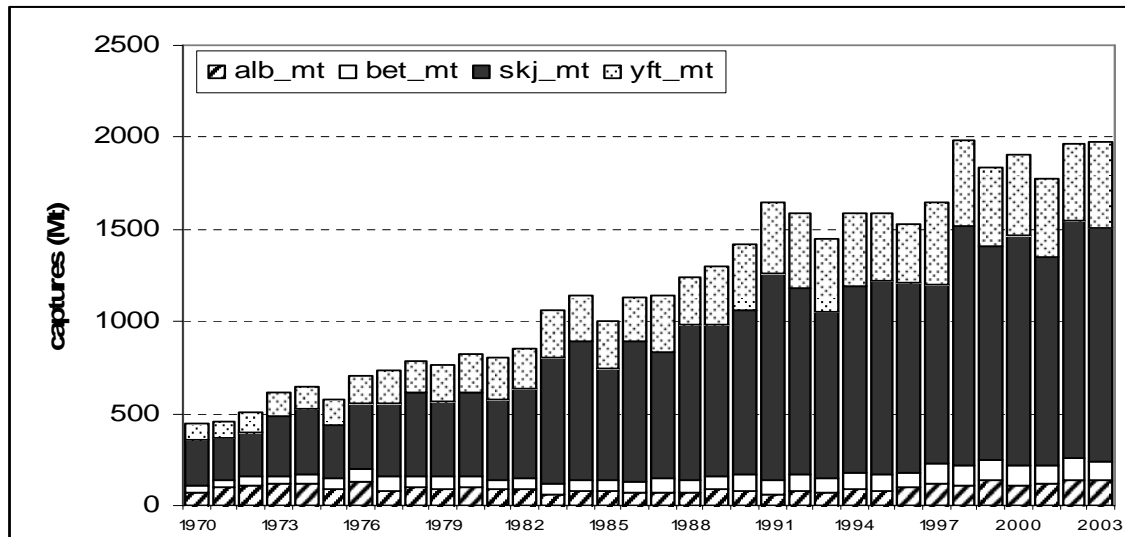


Figure 3. Prises annuelles par espèce dans la WCPO sur la période 1970-2003.

Avec un effort de pêche qui s'est accru au fil des années, les stocks de thon jaune et thon obèse sont arrivés à un niveau de pleine exploitation et une augmentation de l'effort de pêche pourrait à long terme empêcher le renouvellement des stocks et la viabilité de l'exploitation. En revanche, les stocks de listao et de germon (malgré des variations interannuelles relativement fortes) ne semblent pas être touchés par les taux d'exploitation actuels (Langley *et al.*, 2005).

C. Distribution spatiale des captures

Une vision générale de la distribution géographique des captures dans le Pacifique centre ouest (Fig. 4) montre que l'exploitation de thons s'effectue majoritairement dans la bande équatoriale 10°N-10°S ; l'essentiel des captures provenant des pêches de surface exploitant bonites et jeunes thons jaunes destinés aux conserveries. Le volume des captures provenant de l'exploitation à la palangre est bien plus faible, mais la valeur marchande des poissons pêchés en profondeurs, thons jaunes et obèses adultes, bien plus grande. Au final, sur l'ensemble du Pacifique, les deux types d'exploitation ont une valeur économique équivalente.

La ZEE de Nouvelle Calédonie (approximativement entre les latitudes 15°-25°S et les longitudes 158-174°E) est située dans une zone du PCO qui n'est pas concernée par l'exploitation intensive des stocks de surface restreinte à la bande équatoriale 10°N-10°S. (Fig.4a) Cette région supporte une forte productivité des stock de thons tropicaux (bonites et thons jaunes) grâce à des températures élevées et des sources de productivité primaire et secondaire importantes liées à l'upwelling équatorial du Pacifique central et aux mers archipélagiques de l'ouest (arc Philippines-Indonésie-Papouasie-Salomon).

Alors que la zone équatoriale apparaît favorable à la fois aux deux types de pêcheries, surface et palangre, la ZEE de Nouvelle Calédonie, en région subtropicale, n'est concernée que par l'exploitation des thons de profondeurs (germon, thon jaune et thon obèse), le germon étant l'espèce la plus fréquemment capturée par les principales pêcheries rencontrées dans cette zone. Cette activité par rapport à l'ensemble du centre ouest pacifique demeure encore relativement modeste, mais est en pleine expansion.

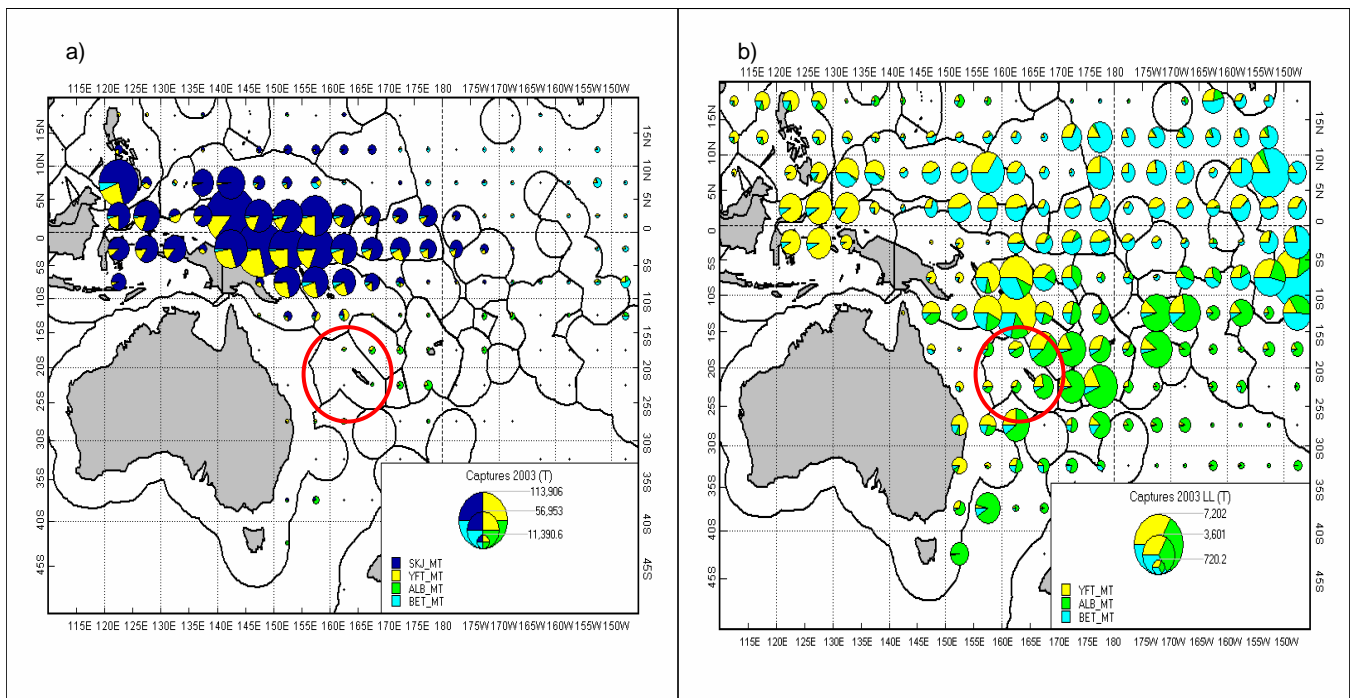


Figure 4. Distribution des captures thonières/ espèces (en tonnes) dans les différentes ZEE de la région du Pacifique centre ouest en 2003: a) tout engins confondus b) palangre uniquement. La ZEE de Nouvelle Calédonie est localisée par un cercle rouge. SKJ : skipjack ; YFT : thon jaune ; ALB : thon blanc ; BET : thon obèse.

II. La pêche thonière dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie

A. Historique

Les Zones Economiques Exclusives (ZEE) ont été adoptées lors de la troisième conférence de l'ONU sur le droit de la mer le 10 décembre 1982 (convention de Montego Bay). Dans chaque ZEE, l'état exerce des droits souverains en matière d'exploration et d'exploitation des ressources naturelles, biologiques et non biologiques du fond de la mer, de son sous-sol et des eaux de l'océan. Chaque zone ne peut s'étendre à plus de 200 milles

marins des lignes de base à partir desquelles est déterminée la mer territoriale. Suite à la loi n°76-655 du 16 juillet 1976, la France avait déjà délimitée en Nouvelle Calédonie une zone économique large de 188 milles nautiques s'étendant à partir de la mer territoriale de largeur fixée à 12 milles. Les limites de la zone économique de la Nouvelle-Calédonie ont ensuite réellement été instituées par le décret n° 78-142 du 3 février 1978 pour une superficie totale de 1 740 000 km².

Dès la mise en place de cette limite, un premier accord de pêche fut établi en 1979 entre la France et le Japon. En revanche, aucun accord ne fut signé avec Taïwan et la Corée qui pourtant exploitèrent une partie de la zone, bien longtemps après la mise en place de la ZEE. Les accords de pêche prévoient la hauteur des quotas, les redevances, le nombre maximum de navires autorisés, la fourniture de données statistiques ainsi que les embarquements d'observateur. A partir de 1997, les japonais n'ont plus renouvelé leurs accords de pêche laissant l'entière exploitation à la flottille locale.

Des essais de pêche à la canne ont été réalisés au début des années 80 par les japonais et les pêcheurs locaux, mais cette technique a dorénavant été abandonnée du fait des faibles tonnages réalisés. De la même façon des essais de senne ont été tentés par les Etats-Unis en 1991 mais n'ont pas été renouvelés. De nos jours, la principale pêcherie en activité est la pêcherie palangrière. Un récapitulatif de l'ensemble des données thonnières de la ZEE de Nouvelle-Calédonie pour les années 1956-1994 est disponible dans Virly (1996).

B. Source de données

Dans cette étude, l'analyse des données d'effort et de captures est basée sur les données originales de fiches de pêche fournies au Secrétariat de la Communauté du Pacifique (CPS) par le Service Territorial de la Marine Marchande et des Pêches Maritimes (STMMPM). Nous ne prendrons en compte que la pêcherie palangrière à partir de 1983. Cette date marque en effet le cinquième accord de pêche franco-japonais et la mise en place des fiches de pêche journalières fiables et détaillées pour la pêcherie japonaise. Elle marque également le début de la pêche industrielle palangrière calédonienne.

Les données japonaises sont disponibles pour les périodes 1983-1992 et 1994-1997 et les données calédoniennes couvrent la période 1983-2004. Les résultats de cette étude ne prennent pas en compte les activités de pêches illégales provenant à la fois de sous estimation de captures et de la pêche illégale dans la ZEE, qui sont des facteurs difficilement contrôlables.

C. Composition spécifique

La composition spécifique des captures par groupe d'espèce (toutes nationalités confondues) a évolué au cours du temps dans la ZEE de Nouvelle Calédonie (Fig. 5). La part des thonidés (germon, thon jaune et thon obèse) n'a pas cessé d'augmenter au

détriment des poissons à rostre (marlin, espadon et voilier). Alors que la part de thonidés s'élevait à moins de 50 % en 1983, elle s'élève dorénavant à plus de 80 %.

En revanche, les poissons à rostre qui représentaient environ 60 % des captures en 1983, ne dépassent pas plus de 10 % ces dernières années. Cette différence semble provenir d'une évolution dans la technique de pêche et d'un changement de ciblage d'espèces, plus probable qu'une diminution de biomasse.

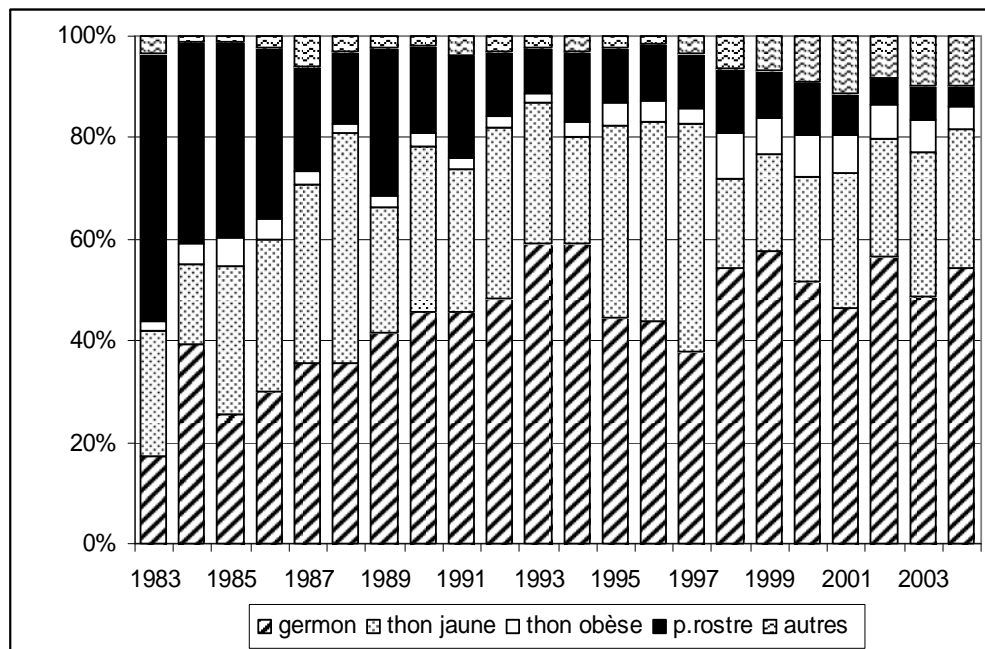


Figure 5. Evolution de la composition spécifique des captures en poids (tonnes) des palangriers pêchant dans la ZEE de Nouvelle Calédonie entre 1983 et 2004.

Parmi les thonidés, l'espèce principalement pêchée est le germon qui depuis 1989 occupe plus de 40 % des prises totales et + de 50 % des prises de thonidés (Fig. 5 et 6).

La seconde espèce de thons dominante dans les prises est le thon jaune. La part relative de thon jaune dans les captures peut être plus ou moins importante selon les années. Depuis 1998, elle a fortement diminuée et demeure à un niveau relativement faible dans les années récentes.

Le pourcentage de thon obèse reste quand à lui relativement négligeable dans les captures. Si sa part relative ne dépasse pas plus de 10 %, elle a augmenté ces dernières années, et constitue une part non négligeable du fait de sa grande valeur commerciale sur le marché du sashimi au Japon.

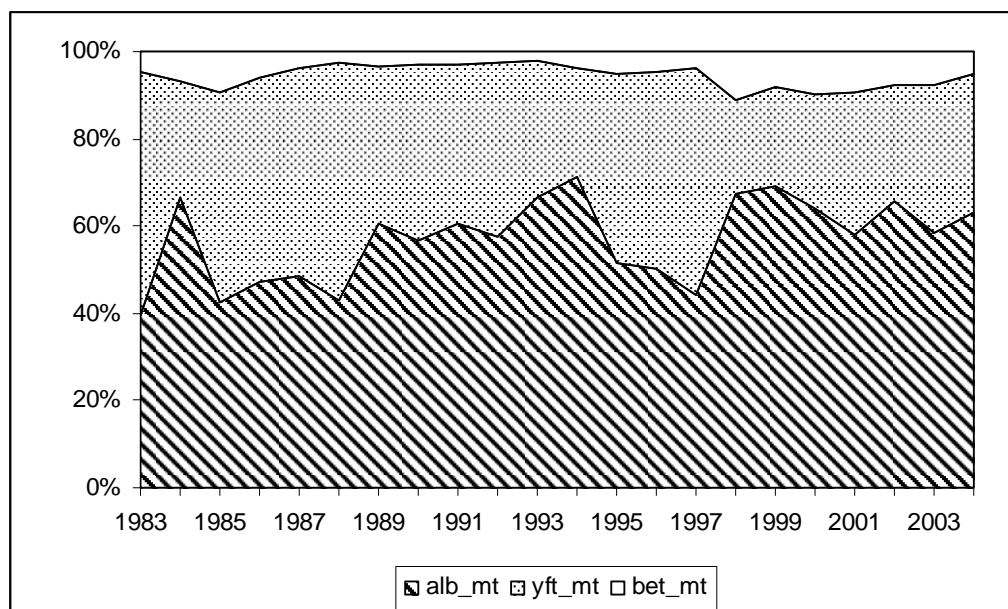


Figure 6. Evolution de la composition spécifique des prises de thonidés en poids (tonnes) des palangriers pêchant dans la ZEE de Nouvelle Calédonie.

L'évolution de la composition spécifique est en partie reliée aux lois du marché extérieur principalement gouverné par le Japon. Au début des années 80, le marché visé par les palangriers japonais et locaux était le sashimi et les espèces ciblées étaient majoritairement le marlin rayé et l'espadon (Hallier, 84). Au fur et à mesure, le marché du sashimi s'est tourné vers les thonidés, ciblant préférentiellement le thon jaune et le thon obèse, même si l'espèce la plus fréquemment capturée en Nouvelle-Calédonie reste le germon du fait de sa forte abondance dans la zone.

De nos jours, la vente de produits sashimi sur le marché japonais devient de moins en moins évidente en raison de crises économiques (baisse du cours du yen) et de la compétition avec les autres pays. En 2002, Les exportations de thons en Nouvelle-Calédonie ont diminué de moitié, même s'il reste encore quelques opportunités sur le marché pour les thons et les marlins rayés de très bonne qualité. Dorénavant, les deux tiers des exportations sont envoyés dans des conserveries du Pacifique (îles Fidji et Samoa). L'essentiel de ces exportations concerne le germon et les thons qui ne peuvent être vendus sur le marché japonais ou même localement. Du fait que le germon représente + de 50 % des captures totales et que sa part dans les captures tend à augmenter, une nouvelle stratégie semble être adoptée par les armements locaux consistant à viser un marché d'exportation européen afin de valoriser leur produits, notamment sous forme de longes de thons congelées (Etaix-Bonnin, 2003).

D. Effort de pêche

1. Evolution pluri-annuelle

L'effort de pêche des palangriers opérant dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie, tous armements confondus, s'est globalement accru sur l'ensemble de la période étudiée (1983-2004) que ce soit en terme de nombre d'hameçons ou de jours de pêche (Fig. 5 et 6). En règle générale, les Japonais lorsqu'ils sont présents exploitent la zone avec un nombre supérieur de bateaux à ceux de la flottille locale sauf en 1992 et 1997. Cependant, le nombre de jours de pêche et d'hameçons utilisés sur une année est globalement du même ordre de grandeur pour les deux flottilles. En effet, les pêcheurs calédoniens qui pêchent exclusivement dans la ZEE cumulent plus de jours de mer par des campagnes assez courtes que les Japonais qui pêchent sur l'ensemble du Pacifique.

En 1997, les japonais ont interrompu leurs activités de pêche dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie. Au même moment, l'effort de pêche de la flottille calédonienne a connu une grande expansion allant jusqu'à quadrupler le nombre de jours de pêche et le nombre d'hameçons utilisés.

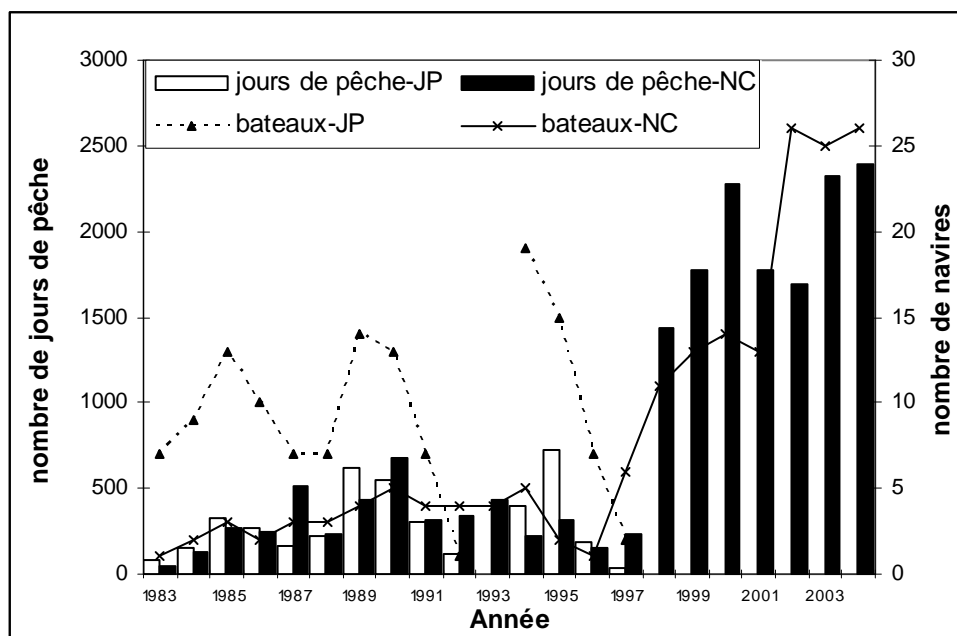


Figure 7. Evolution du nombre de bateaux utilisés par les flottilles calédoniennes et japonaises et du nombre de jours de pêche correspondant à l'intérieur de la ZEE de Nouvelle-Calédonie (1983-2004).

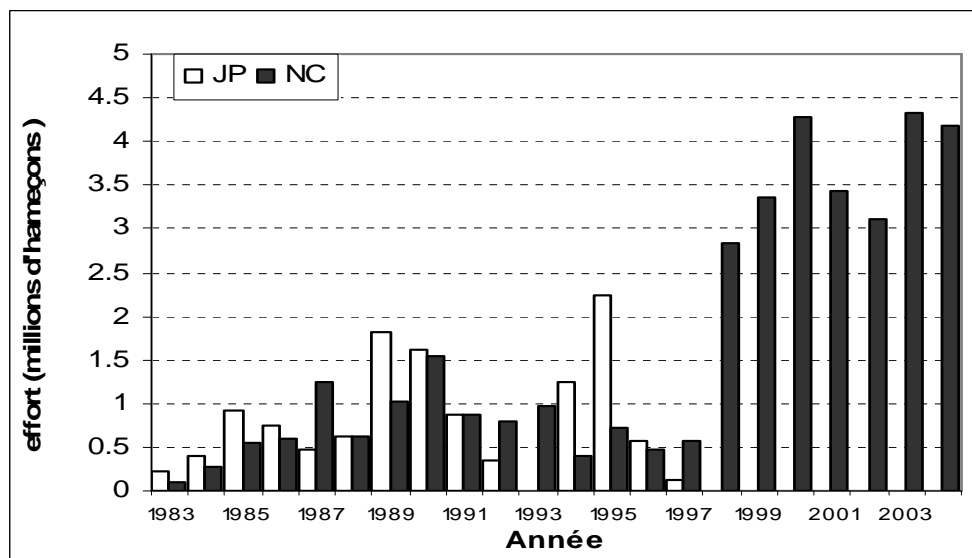


Figure 8. Evolution du nombre d’hameçons des palangriers calédoniens et japonais dans la ZEE de Nouvelle Calédonie (1983-2004).

Ce changement est dû en grande partie au développement récent de la flottille calédonienne marqué par une succession d’acquisitions par les armements locaux. En 1998, l’armement “Navimon” a acquis successivement 4 bateaux puis 4 autres en 1999. Plus tard, les deux autres principaux armements “PNC” et “Pescana” ont également fait l’acquisition de plusieurs bateaux, comptabilisant à eux deux 16 navires supplémentaires entre 2001 et 2002. Durant ces mêmes années, des petits armements tels que “Tuna pêche” (1 navire), “Albacore” (2 navires), “Sea Horse” (1 navire) et “Mourin” (1 navire) ont vu le jour et ont également contribué à l’augmentation de la flottille (Chavance, comm. pers.). Aujourd’hui, la flottille calédonienne comptabilise au total plus de 27 bateaux contre 6 en 1997. Cependant, ces bateaux ne sont pas tous en activité pour des raisons de pénurie de personnels qualifiés et expérimentés, de mécanique, de navigation ou de trésorerie. En 2004, seul un tiers des navires licenciés ont débarqués régulièrement du poisson à Nouméa ou à Koumac. Cependant il est déjà prévu une augmentation de 3 bateaux à la flotte actuelle d’ici 2006 (projet ARAFURA...).

2. Evolution saisonnière

La représentation de l’effort moyen mensuel montre une différence de stratégie entre les deux flottilles japonaise et calédonienne (Fig. 9). Pour les pêcheurs locaux, l’effort est constant tout au long de l’année, d’une moyenne de 3 millions d’hameçons par mois sur la période 1983-2004. Pour les japonais, l’effort est plus faible et concentré sur la période d’août à septembre. La ZEE ne représente en fait pour les japonais qu’une zone de passage occasionnelle lorsqu’ils transitent entre le Japon et les zones de pêche au thon rouge du sud (côtes australiennes). Le temps de passage des Japonais dans la zone est donc relativement court et irrégulier tandis que les pêcheurs calédoniens optimisent le temps d’utilisation de leurs navires tout au long de l’année (Virly, 1996).

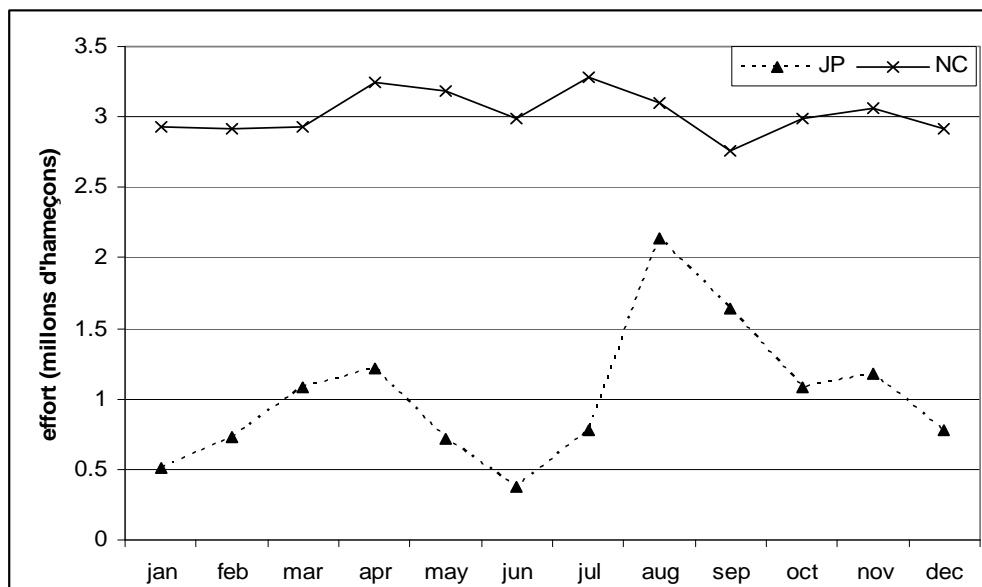


Figure 9. Evolution mensuelle du nombre d’hameçons utilisés par les pêcheurs palangriers sur la période 1983-2004.

3. Distribution pluri-annuelle

La répartition annuelle des efforts de pêche montre bien le côté irrégulier de la présence des pêcheurs japonais dans la zone (Annexe 1). En 1989, 1990, 1994 et 1995, les japonais ont déployés des efforts de pêches conséquents sur l’ensemble de la ZEE. D’autres années, les efforts ont été très faibles (1992, 1997), voire inexistant (1993). Durant les périodes où les efforts de pêche étaient importants, les zones prospectées n’étaient pas les mêmes. En 1989-90, les zones pêchées se situaient plus au sud, sud-ouest de la ZEE, tandis que durant la période 1994-1995, les zones pêchées étaient plutôt au nord.

La répartition annuelle des efforts de pêche calédoniens (Annexe 2) indique que les bateaux ont d’abord été déployés au large et à l’ouest de la ZEE de Nouvelle-Calédonie pour s’étendre peu à peu à l’ensemble la zone, avec des maxima d’effort situés à différents emplacements selon les années. A partir de 1998, avec la venue des nouveaux bateaux dans la pêcherie, les efforts se sont intensifiés et se sont concentrés principalement près des côtes à l’est et à l’ouest de la grande terre. Cette configuration est restée stable jusqu’en 2004, avec une expansion de l’effort dans l’ouest de la ZEE en 2003 et 2004.

Une comparaison de la répartition annuelle des efforts déployés par pays ne montre pas de réelle tendance pouvant suggérer un endroit préférentiellement choisi par les pêcheurs. La répartition des efforts est très hétérogène en fonction des années. Dans l’ensemble, toute la zone est prospectée à part la zone sud-est de la ZEE qui semble beaucoup moins pêchée.

4. Distribution saisonnière

La distribution moyenne mensuelle des efforts de pêche à l'intérieur de la ZEE montre les différences de stratégies de captures utilisées par le Japon et la Nouvelle Calédonie sur l'ensemble de la période étudiée (Annexes 3 et 4).

La distribution géographique des efforts de pêche japonais est irrégulière et varie en fonction des mois. On retrouve quelques tendances générales déjà signalées par Virly (1996). De mars à mai les efforts sont plutôt concentrés à l'est du méridien 162°, et plus particulièrement au sud de la Nouvelle Calédonie, au niveau de l'île des pins et des monts sous marins en mars et avril. A partir de juillet, jusqu'à décembre, il y a un changement dans la distribution des efforts et on retrouve les efforts principalement concentrés à l'ouest de la ZEE avec des efforts particulièrement importants en aout, septembre et octobre, au sud ouest de la ZEE au niveau du banc de Capel. En décembre et janvier, la couverture spatiale est faible et principalement concentrée à l'ouest de la ZEE.

Les tendances dans la répartition mensuelle des efforts de la flottille locale sont beaucoup plus difficiles à détecter du fait de la superposition des prises sur une plus grande période de temps (1983-2004). En revanche, il ne semble pas exister de tendance saisonnière marquée dans la distribution de l'effort. Dans l'ensemble les pêcheurs concentrent leurs efforts relativement près des côtes autour de la Nouvelle Calédonie et des îles Loyauté, au niveau du bassin ouest-calédonien et du bassin des Loyauté. Le nord ouest de la ZEE (plateau Chesterfield) est également largement prospecté notamment à la saison chaude (octobre, novembre, décembre, janvier).

E. Rendements de pêche

1. Evolution pluri-annuelle

Les rendements de pêche ou prises par unités d'effort (PUE) de chaque espèce de thon ont été calculé pour chacune des flottes entre 1983 et 2004 (Fig.10).

Les PUE de thon germon varient autour d'une moyenne de 30 kg/100 hameçons pour la flottille calédonienne et 20 kg/100 hameçons pour la flottille japonaise. Les maxima ont été atteints en 1988 et 1993 avec 53 kg /100 hameçons pour la flotte calédonienne. Le maximum pour la flotte japonaise se monte à 48 kg/100 hameçons en 1994. A partir de 1994, les rendements des deux flottilles diminuent pour ne plus dépasser les 30 kg/100 hameçons.

Les PUE de thon jaune ont été très variables selon les années avec un pic à 50 kg/100 hameçons en 1988 puis des valeurs fluctuant entre 5 et 35 kg/100 hameçons selon les années. Les PUE des flottilles japonaises et calédoniennes sont à peu près du même ordre de grandeur dans les années 80 et suivent les mêmes tendances.

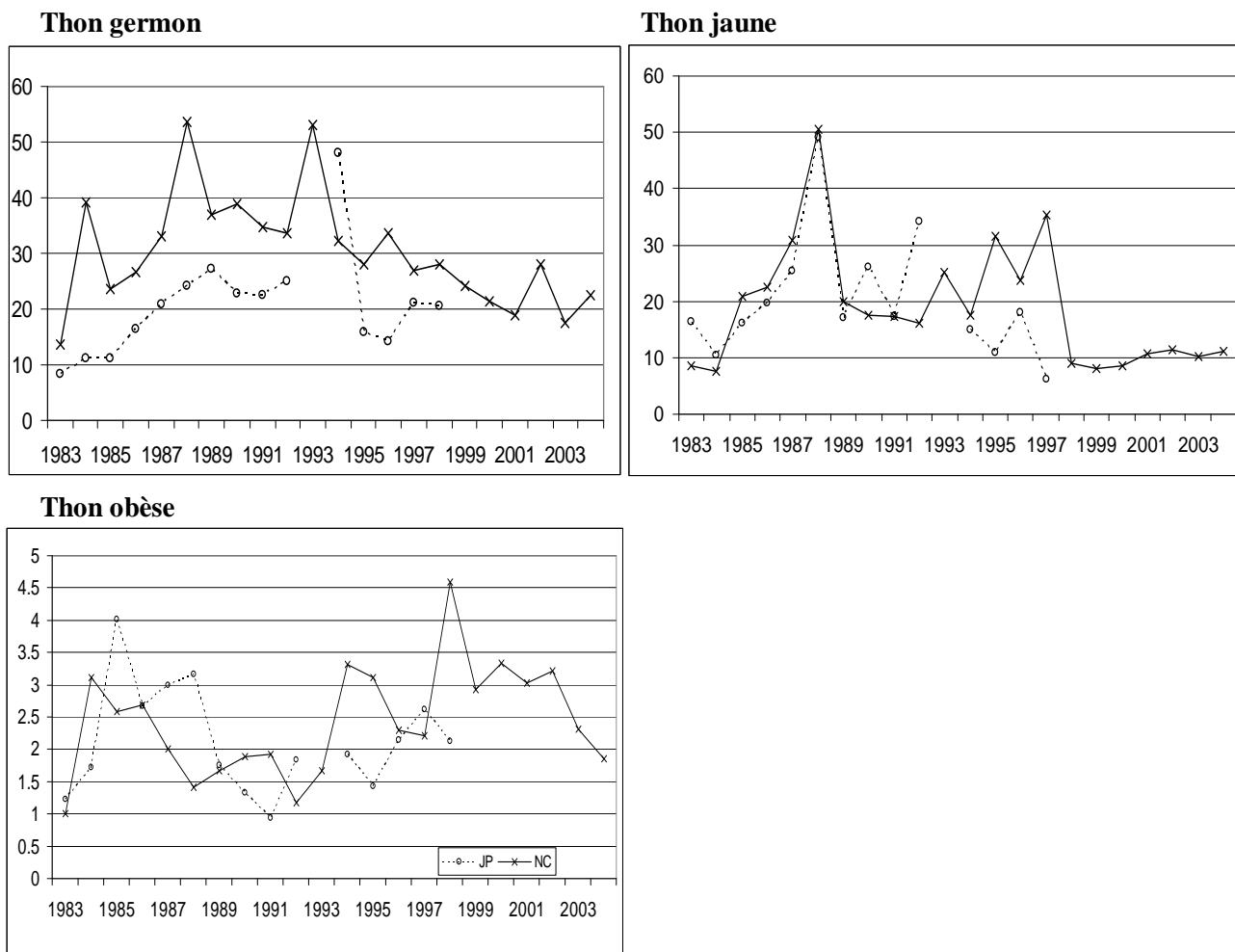


Figure 10. Evolution annuelle des prises par unités d'effort (kg/100 hameçons) de thonidés pêchés dans la ZEE de Nouvelle Calédonie par espèce et par flottille.

Les PUE japonaises ont parfois été supérieures à celles de la flottille locale (en 1983, 1990 et 1992). A partir de 1993, les rendements locaux se détachent de ceux des japonais et sont en moyenne de 25 kg/100 ham. En 1998, on constate une diminution extrêmement marquée des PUE de la flottille calédonienne. Ces rendements sont depuis lors restés à un faible niveau, fluctuant de part et d'autre des 10 kg/100 ham.

Les rendements de thon obèse sont beaucoup moins élevés que ceux obtenus pour les deux autres espèces et varient en moyenne dans une fourchette de 2 à 2.5 kg/hameçons sur l'ensemble de la période étudiée. Les PUE des deux flottilles sont du même ordre de grandeur avec toutefois des PUE japonaises généralement supérieures dans les années 80.

Les différences de rendements que l'on observe entre les deux flottilles peuvent s'expliquer par la distribution des efforts de pêches qui sont variables selon les mois et

les années en fonction des stratégies de pêche. Elles peuvent également provenir d'une différence dans l'utilisation des engins de pêche.

2. Evolution saisonnière

La représentation des PUE moyennes par mois indique qu'il existe une grande variabilité saisonnière dans les rendements de thons selon les espèces (Fig.11).

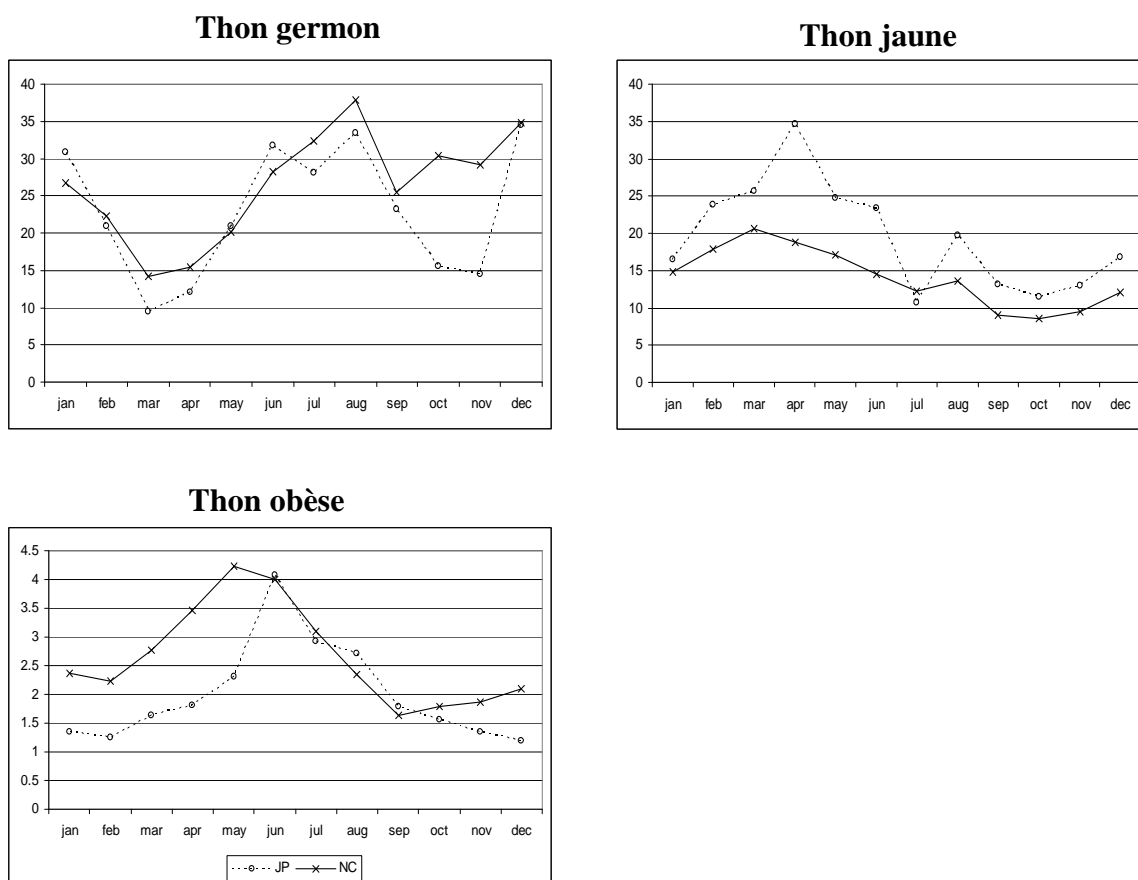


Figure 11. Prises par unité d'effort (kg/100 hameçons) mensuelles par espèces et par pays des palangriers ayant pêché dans la ZEE de Nouvelle Calédonie entre 1983 et 2004.

Les PUE de thon germon montrent une forte saisonnalité avec un maximum atteint durant les mois de juillet et août avec des prises supérieures à 35 kg/100 hameçons. Un second pic est atteint autour de décembre-janvier avec des PUE atteignant 35 kg/100 hameçons en décembre. Entre septembre et novembre, les PUE des deux flottilles ne montrent pas les mêmes tendances. En effet, les PUE calédoniennes se maintiennent à un niveau au dessus de 25 kg/100 hameçons alors que les PUE japonaises chutent à 15 kg/100 hameçons. Les rendements minimum enregistrés pour cette espèce sont obtenus en mars-avril où ils oscillent entre 10 et 15 kg/100 hameçons.

Les PUE de thon jaune suivent une configuration différente. Les rendements maximums sont observés en début d'année de février à juin. Les PUE maximales se situent en avril pour la flotte japonaise (35 kg/100 hameçons) et en mars pour la flotte néo-calédonienne (20 kg/100 hameçons). Les rendements diminuent ensuite au fur et à mesure malgré une légère hausse en août. D'octobre à novembre les rendements atteignent leur minima : de 9 à 10 kg/100hameçons.

Les rendements pour le thon obèse sont bien plus faibles et présentent également une variabilité saisonnière dans les PUE. Le maximum des PUE est atteint au début de la saison fraîche en mai-juin pour la flotte calédonienne et en juin pour la flotte japonaise avec des rendements autour de 4 kg/100 hameçons. Les rendements les plus bas (de 1 à 2 kg/100 hameçons) s'observent au cours de la saison chaude (septembre-février).

3. Distribution spatiale moyenne

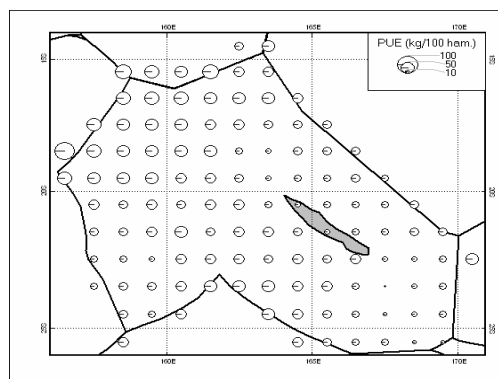
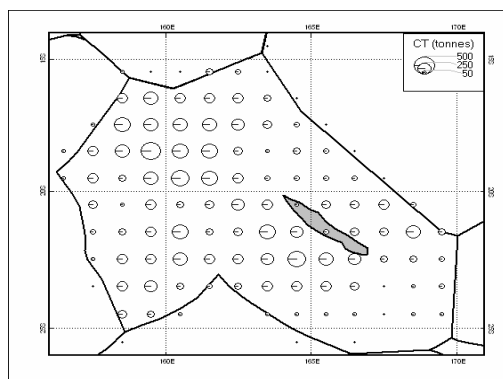
Les rendements et les captures totales par espèce toutes flottilles confondues sont regroupés géographiquement sur l'ensemble de la période de temps étudiée et représentés par carré de 1° de longitude et latitude (Fig. 12).

Pour le thon germon, les captures et les rendements les plus forts sont observés dans la moitié nord et à l'ouest de la ZEE au niveau du bassin de Lord Howe, des plateaux Chesterfield et des plateaux du Lansdowne. On observe également des captures élevées en dépit de rendement plutôt faibles, et qui s'expliquent par un effort de pêche important dans les zones les plus proches des ports d'attache. D'une manière générale les rendements sont meilleurs à l'ouest qu'à l'est de la Grande Terre. Les rendements les moins élevés sont observés au sud de la ZEE.

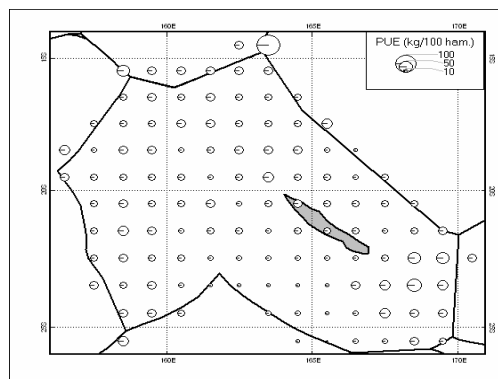
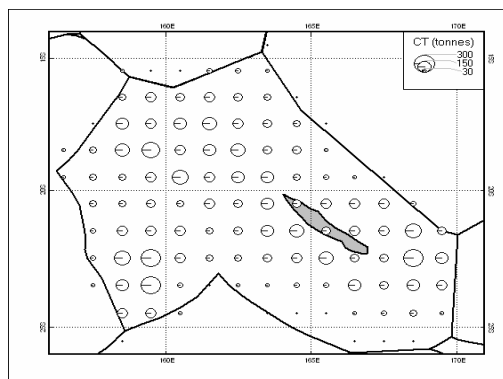
Pour le thon jaune, au contraire les rendements et les captures les plus élevées se retrouvent au sud est de la Nouvelle Calédonie dans une zone riche en monts sous-marins. A l'ouest, des rendements plus faibles mais un effort de pêche important permettent des captures relativement élevées.. A l'extrême nord de la ZEE, la forte valeur de PUE observée résulte vraisemblablement d'une prise exceptionnelle dans cette zone.

Pour le thon obèse, les plus fortes prises sont observées près des côtes, à l'est et au sud-ouest de la Grande Terre. Les plus forts rendements se situent plus à l'est au niveau du bassin des Loyautés.

Thon germon



Thon jaune



Thon obèse

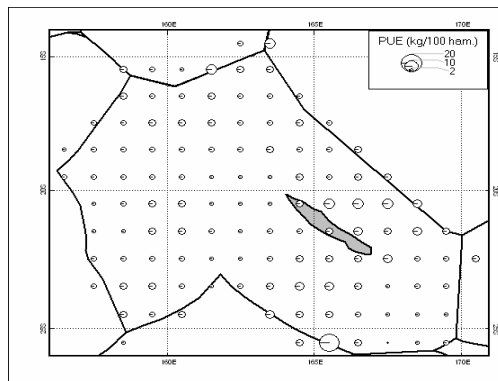
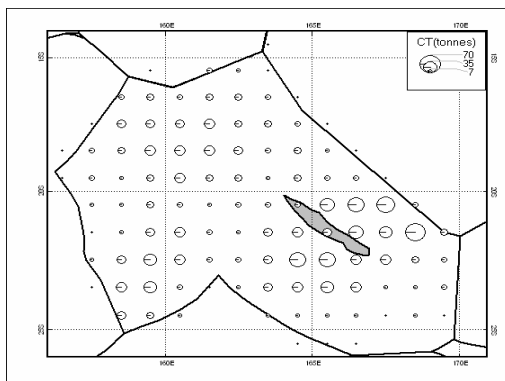


Figure 12. Distribution des captures totales (gauche) et des PUE totales (droite) pêchées par l'ensemble des flottille sur la période 1983-2004.

Partie II - Conditions environnementales dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie

I. Contexte général

L'étude de l'environnement est essentielle pour comprendre les mécanismes responsables de la présence ou non de ressources dans une zone et ce quelque soit l'échelle spatio-temporelle observée. Les données hydroclimatiques existent sous forme d'observations *in situ* obtenues par des campagnes d'échantillonnage et de données satellites. Il existe également aujourd'hui des modèles numériques reproduisant les conditions hydrologiques ou écologiques (production primaires, proies), certains de ces modèles assimilant les observations pour prédire au mieux la réalité. L'intérêt de ces produits de modélisation est qu'ils offrent une couverture spatio-temporelle complète.

Dans la région sud-ouest pacifique (10°S-40°S; 160°E-150°W) englobant la Nouvelle-Calédonie, on distingue deux saisons principales en fonction des déplacements des masses d'air: la saison chaude s'étend de mi novembre à mi mai et est caractérisée par des dépressions ou cyclones tropicaux. Le régime général des vents soufflent de sud-est à est. La saison fraîche s'étend de mi-mai à mi-novembre avec des vents dominants soufflant des secteurs est à sud-est et parfois un régime de vents d'ouest violents alternant avec des périodes calmes. A partir de septembre, les alizés se renforcent et soufflent en quasi permanence. Le régime des alizés ainsi que les différences de densités entre les masses d'eaux qui se rencontrent crée une circulation océanique complexe avec des propriétés changeantes au cours du temps. Une description générale de la circulation générale et de l'hydroclimat obtenue à partir d'observations en mer de Corail et de Tasman qui bordent cette région est donnée par Donguy et Hénin, 1981.

La Nouvelle-Calédonie est également située juste en dessous de la position moyenne de la zone de convergence du Pacifique sud (ZCPS) qui est sous l'influence de l'oscillation australe El Niño. Mais contrairement à de nombreuses régions du globe, les effets hydroclimatiques ressentis en Nouvelle-Calédonie sont inversés. Ainsi les températures de l'air et de la surface de la mer présentent des anomalies froides durant les épisodes chauds d'El Niño et des anomalies chaudes durant les épisodes froids La Niña. (Lenormand, 1995).

La variabilité spatio-temporelle des paramètres environnementaux autour de la Nouvelle-Calédonie a été examinée en détail afin de comprendre leurs effets avec la ressource. Pour cela la ZEE de Nouvelle-Calédonie a été préalablement stratifiée en 3 zones distinctes définies principalement en fonction de la distribution des prises par unité d'effort de chaque espèce (Figure 13).

L'environnement de chacune des zones a été décrit sur la base d'observations et également de variables prédites par le modèle couplé physique-biogéochimique développé par le laboratoire du ESSIC (Earth System Science Interdisciplinary Center, université du

Maryland, USA) et qui sont utilisées en entrée par le modèle SEAPODYM. Ce dernier est développé à la CPS pour prédire la dynamique spatio-temporelle des populations de thons en fonction des contraintes environnementales. Sur de grandes échelles, les prédictions de ce modèle comparées à des données réelles donnent de bons résultats (Christian *et al.*, 2002). Mais à des échelles plus restreintes ($<0.5^\circ$) le modèle est moins précis.

Nous l'avons utilisé quand c'était possible pour décrire la variabilité dans la ZEE de certains paramètres importants dans la distribution des thons. Nous avons comparé ensuite ces paramètres à des données satellites observées afin de valider nos affirmations.

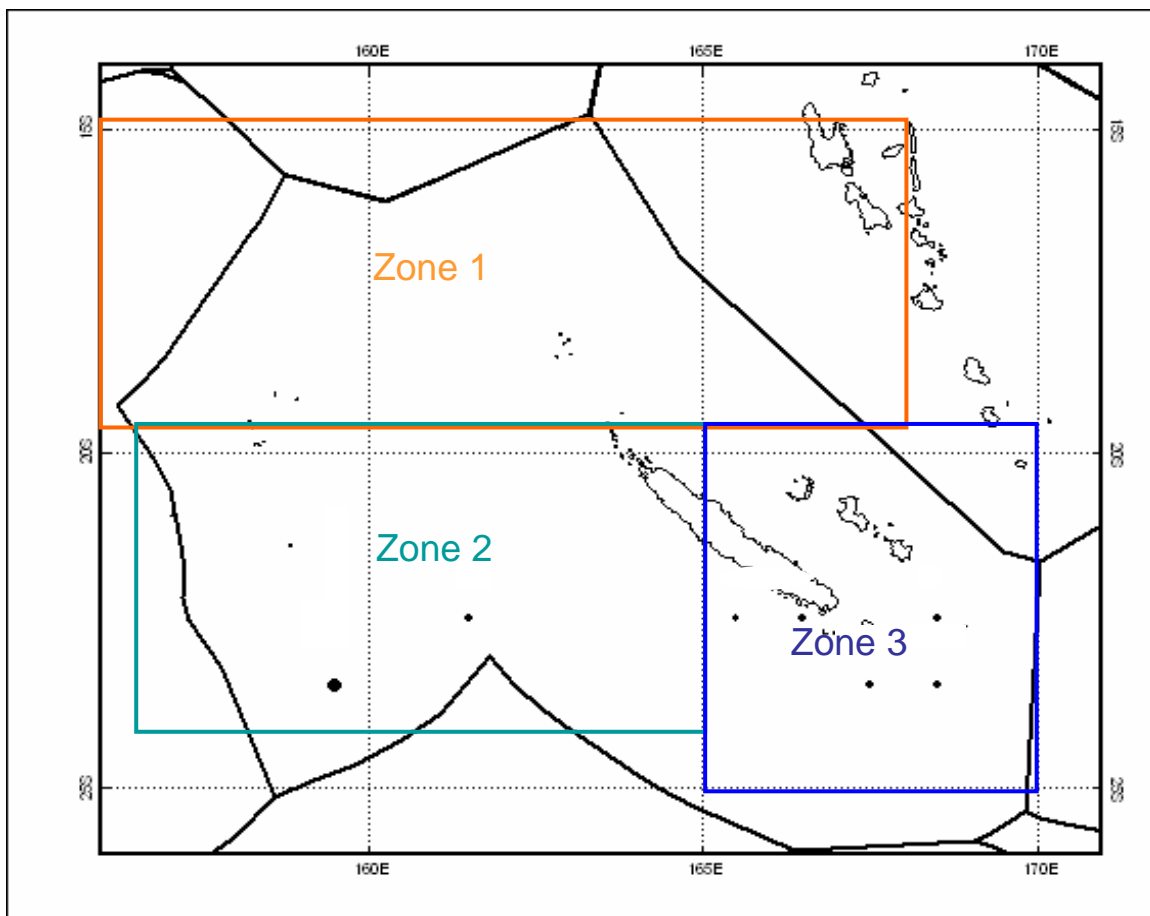


Figure 13. Emplacement des 3 zones choisies pour l'étude des paramètres environnementaux.

II. Variations saisonnières

A. Courants

Les courants superficiels autour de la Nouvelle-Calédonie sont le résultat à la fois de l'action de la circulation permanente géostrophique (lié à la salinité des couches d'eaux) dirigé vers le sud-est (Hénin, 1984) et de la dérive due aux vents, dirigés vers l'ouest et le nord-ouest en régime d'alizés du sud-est.

Bien qu'il existe une variabilité saisonnière des courants due aux régimes des vents, nous n'avons pas pu la définir clairement dans cette étude pour deux raisons principales : D'une part, les prédictions du modèle ESSIC utilisé dans SEAPODYM sont à une trop faible résolution ($1/2^\circ$) pour pouvoir décrire avec précision la circulation du courant à l'intérieur de la ZEE. D'autre part il existe très peu d'observations disponibles autour de la Nouvelle-Calédonie pour une véritable comparaison spatio-temporelle.

De plus il est reconnu que la circulation autour de la Nouvelle-Calédonie est complexe du fait des caractéristiques bathymétriques et météorologiques de la région. En effet les nombreuses îles, récifs et bancs qui composent la ZEE posent des obstacles majeurs à la circulation de l'eau et induisent une variabilité spatio-temporelle difficile à définir (Lehodey, 1994). Cependant il est tout de même possible de distinguer deux flux principaux autour de la Nouvelle Calédonie. D'une part, il existe un courant de surface entretenu par les alizés au large de la côte ouest de la Nouvelle Calédonie qui s'écoule vers le nord-ouest parallèlement à la côte, défini par Rougerie (1986) comme le courant tropical sud. Sa vitesse n'est pas supérieure à 1 noeud mais les coups de vent d'ouest associés aux dépressions tropicales peuvent s'opposer à son écoulement normal et provoquer des inversions de flux en été austral (octobre à mars).

D'autre part, le long de la côte est calédonienne il existe également un flux permanent qui porte au sud-est, c'est-à-dire contre les alizés dominants: la présence de cette dérive est appelée courant des Loyautés (ou courant de Vauban). Le flux est maximal en période d'alizés bien établis, généralement en fin d'hiver austral (avril à septembre). Le courant des Loyauté transporte vers le sud-est une importante quantité de chaleur en provenance du centre de la mer de Corail.

Les eaux chaudes et dessalées du courant des Loyauté entrent en contact avec le courant tropical refroidi par induction de l'atmosphère dans le sud de l'Ile des Pins. A ce niveau, il est possible d'observer des fronts thermiques horizontaux actifs qui se réarrangent de façon permanente en fonction des pulsations relatives des deux courants (Hénin, 1984). Il existe une corrélation très étroite entre la puissance et la position des fronts thermiques et le régime des courants de surface. Il semblerait que le sud de l'Ile des Pins (zone 3) soit en hiver austral une zone de forte discontinuité thermohaline, qui constitue un élément très favorable à la concentration des grands pélagiques et des mammifères marins (Rougerie, 1986).

Un modèle à plus forte résolution spatio-temporelle serait utile pour nous permettre de distinguer des structures de méso-échelles telle que la formation de fronts ou de cellules tourbillonnaires, qui peuvent être des phénomènes importants dans la distribution et l'abondance des thons.

Sur une grande échelle, nous avons fourni plus loin dans ce rapport les tendances globales de la distribution saisonnière des courants prédites par Seapodym pour la couche 0-100 m (cf partie III, paragraphe II-A).

B. Températures

Les températures moyennes mensuelles ont été représentées dans chacune des zones en fonction des données d'observations satellites et des données prédites par le modèle ESSIC. La variabilité saisonnière a été examinée pour chacun des jeux de données dans trois couches de profondeur définies par Lehodey (2005) en fonction de l'habitat des thons et de leur proies: 0-100 m, 100-400 m, 400-1000 m (Figure 14).

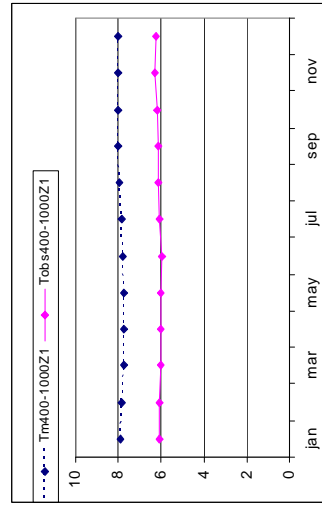
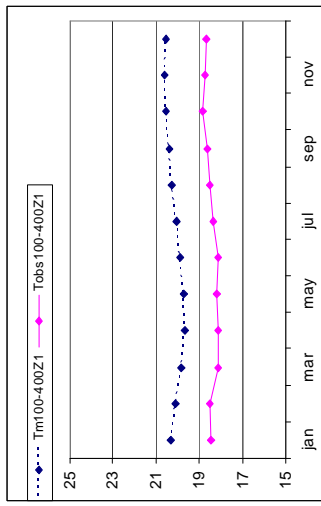
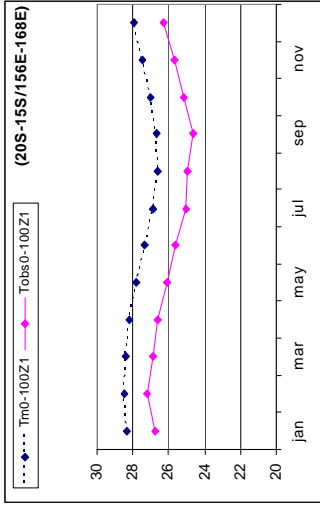
Sur l'ensemble des résultats, on observe une surestimation systématique de la température par le modèle physique ESSIC dans la ZEE. Cependant les variations saisonnières et bathymétriques sont relativement bien décrites par le modèle, malgré une amplitude thermique sous-estimée dans la zone 2 et 3.

D'après Rougerie (1986) les températures de surface à l'intérieur de la ZEE évoluent en fonction des saisons selon un gradient nord-sud avec un isotherme de 27° occupant la position médiane. Dans nos résultats, on observe effectivement une différence thermique en fonction de la latitude. Au nord de la ZEE (Zone 1) les températures de la couche de surface (0-100m) varient sur l'année entre 24.5° et 27°. Au sud (zones 2 et 3), les températures sont plus faibles et l'écart thermique entre les saisons est plus important. On trouve des températures variant entre 25.5° au plus fort de l'été et 22° en hiver.

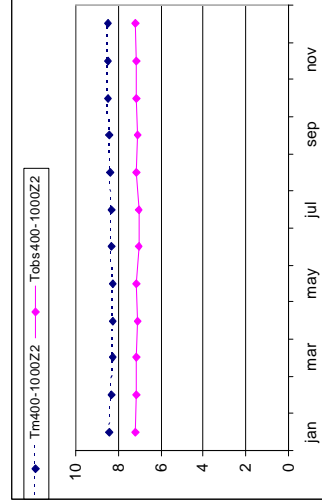
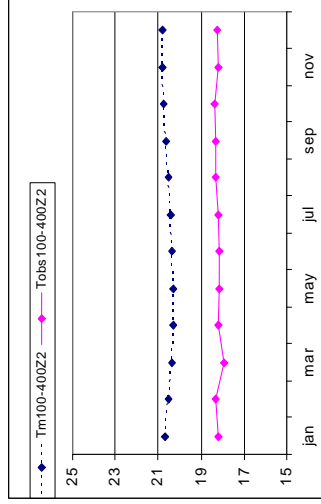
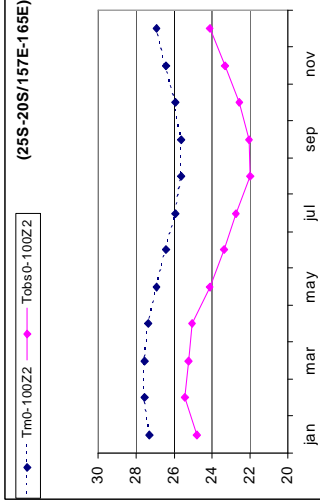
Dans la couche intermédiaire (100-400m), la variabilité saisonnière est plus faible et les températures rencontrées sont plus basses (autour de 18-19°). Il est à noter que dans la zone 1, le cycle saisonnier est inversé par rapport à la couche de surface avec des températures plus faibles en été qu'en hiver. Dans la zone 2 et 3, cette tendance est nettement moins visible et les températures restent quasiment stables tout au long de l'année.

Dans la couche profonde (400-1000m), les températures moyennes tournent autour de 6 à 7° tout au long de l'année et sont plus froides dans la zone nord que dans les zones sud. La variation saisonnière dans cette couche est quasiment nulle.

Zone 1



Zone 2



Zone 3

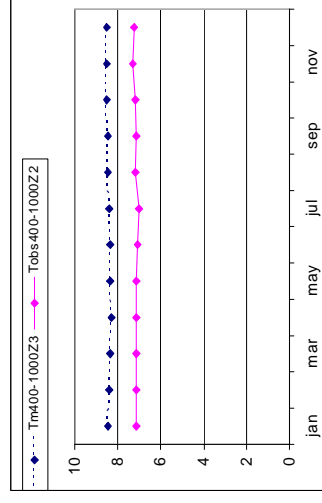
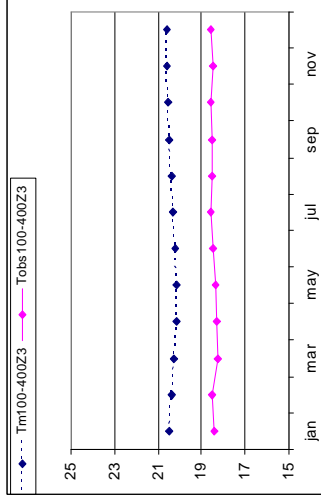
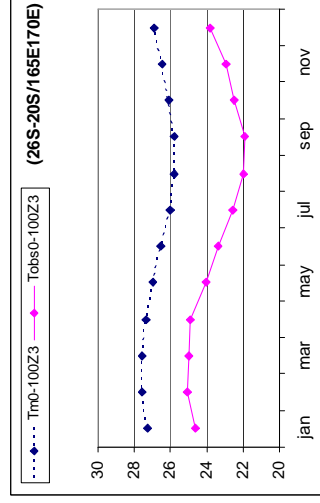


Figure 14. Variations saisonnières de température dans les différentes couches de profondeur de la ZEE de Nouvelle Calédonie (Tm=Température du modèle ESSIC ; Tobs=températures WOA).

C. Oxygène

Le taux d'oxygène a été calculé par trimestre dans chacune des 3 zones grâce à d'après les données de l'Atlas Levitus et a été comparé dans les différentes couches de profondeur moyenne 0-100, 100-400 et 400-1000 m (Fig.15).

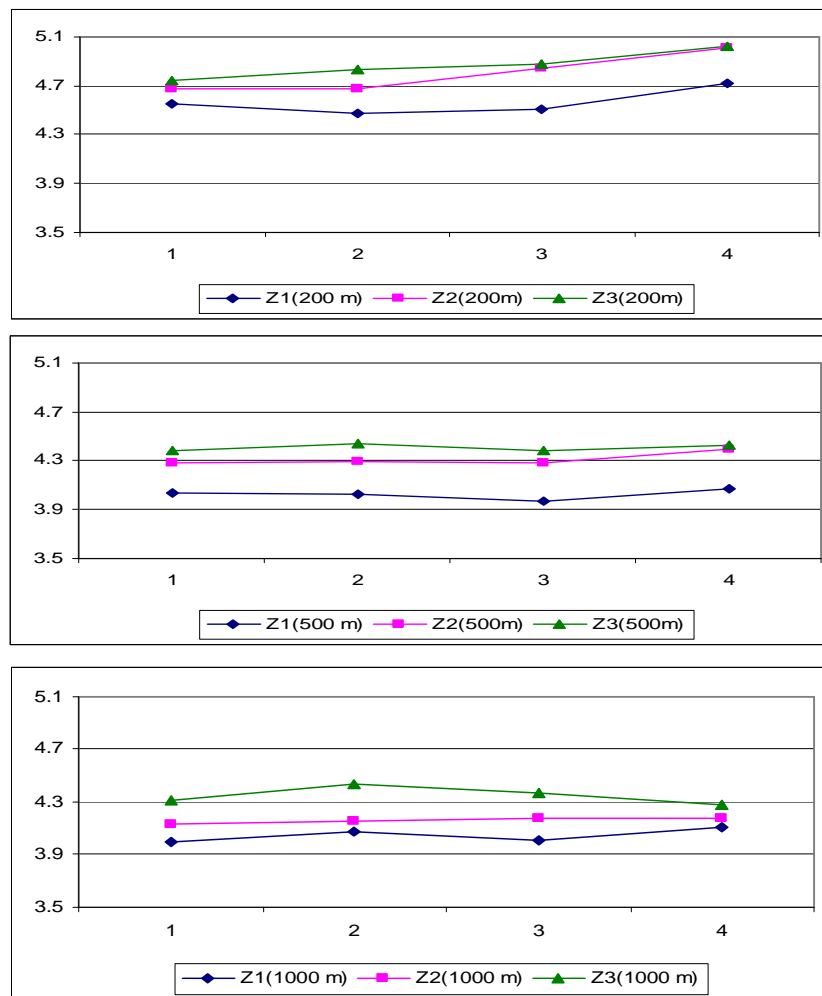


Figure 15. Variations trimestrielles (abscisses) du taux d'oxygène (ml/l) dans les différentes couches de profondeur et les différentes zones (Z1 à Z3) de la ZEE.

D'une manière générale, la teneur en oxygène dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie varie entre 4 et 5 ml/l d'eau. D'après cette climatologie relativement grossière il existe très peu de variations de l'oxygène au cours du temps et la différence de concentration d'oxygène entre les différentes zones est très faible (0.4 ml/l). Il existe cependant un gradient, la zone 3 au sud est étant la plus oxygénée et la zone 1 au nord la moins oxygénée. Le taux d'oxygène diminue aussi légèrement avec la profondeur, mais reste supérieur à 3.9 ml/l.

D. Chlorophylle

La teneur en chlorophylle dans le milieu marin est un indice important pour déterminer la productivité du milieu. Le Pacifique tropical sud est considéré comme une zone oligotrophe (pauvre en éléments nutritifs), mais des études ont cependant montré que l'archipel de Nouvelle-Calédonie révélait des enrichissements saisonniers importants avec une hétérogénéité spatiale et temporelle particulière (Dupouy, 1990).

Afin de visualiser les tendances saisonnières dans l'apport de chlorophylle autour de la Nouvelle-Calédonie, des cartes de distribution de chlorophylle (zone 14-26°S/156°-170°E) ont été représentées durant les mois de février (maximum de l'été) et d'août (maximum de l'hiver) pour les années 1998 à 2004 (annexe 5). D'une manière générale, on remarque l'existence d'un apport continu en chlorophylle à l'intérieur du lagon de la Grande Terre et des îles Loyautés. C'est à ce niveau que les concentrations en chlorophylle sont les plus fortes car les apports en éléments nutritifs venant de la terre sont importants et restent emprisonnés dans le lagon. On remarque aussi des fortes concentrations de chlorophylle au niveau des bancs Surprise au nord de la Grande Terre et au niveau du plateau des Chesterfield (au dessus des bancs Bampton, Bellona et Nova) et du plateau de Lansdowne à l'ouest. En effet, pour ces localités la faible profondeur et le relief sous marin sont à l'origine de structures tourbillonnaires qui permettent un apport régulier en substances nutritives à la surface.

En ce qui concerne le reste de la zone, les distributions et les concentrations en chlorophylle sont variables entre les mois et d'une année à l'autre. Cependant il est possible de distinguer des tendances saisonnières notables. En février, les concentrations en chlorophylle sont plus importantes au nord et l'est de la Grande Terre avec parfois des blooms très concentrés. En août, les concentrations en chlorophylle sont plus diffuses et plus marquées au sud et à l'ouest de la Grande Terre. Il est également notable que la zone au sud est de la Grande Terre (zone 3) reste une zone à forte concentration de chlorophylle quelque soient les années ou les mois.

Pour synthétiser la variation saisonnière de chlorophylle dans les différentes zones, des données moyennes de chlorophylle obtenues par satellite (SeaWiFS) ont été calculées par mois sur la période 1998-2003. Elles ont ensuite été comparées à des données mensuelles de production primaire prédites par le modèle biogéochimique ESSIC (Fig. 16) sur la même période. La production primaire est définie par la quantité de phytoplancton qui se développe dans le milieu. Dans le modèle, la production primaire est exprimée en micromoles de carbone produites par m² et par jour. Elle a été intégrée sur la couche 0-400 mètres.

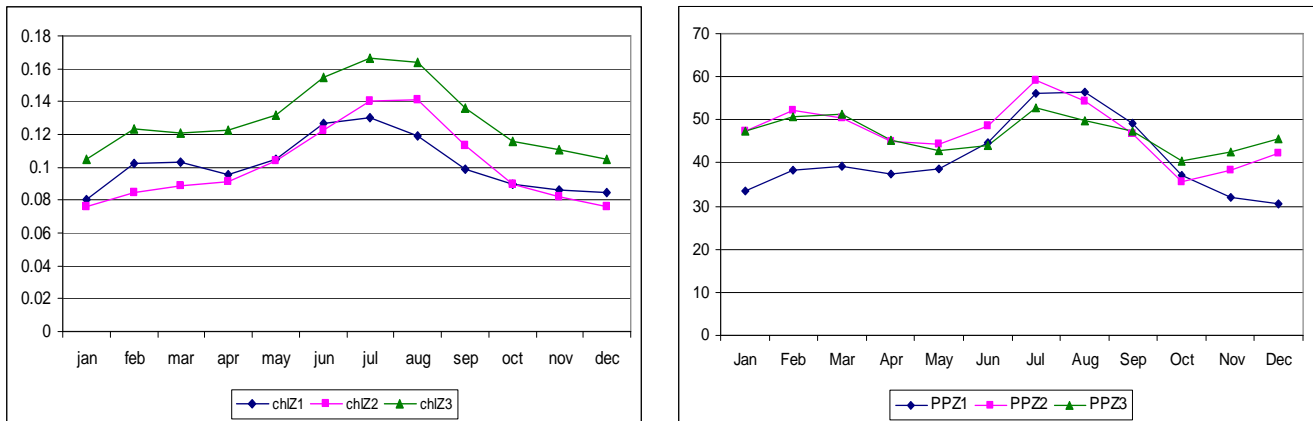


Figure 16. Données mensuelles de concentration en chlorophylle (mg/m^3) obtenues par satellite (données SeaWiFS) sur la période 1998-2003 et données mensuelles de production primaire ($\text{mmolC}/\text{m}^2/\text{j}$) prédites par le modèle ESSIC.

Les données satellites de chlorophylle montrent un pic saisonnier pour les trois zones sur la période hivernale entre juin et août. La zone 3 au sud reste la zone la plus productive tout au long de l'année avec un pic autour de $0.16 \text{ mg}/\text{m}^3$. La zone 2 atteint un maximum de chlorophylle en juillet-août autour de $0.14 \text{ mg}/\text{m}^3$. La zone 1 au nord connaît un pic saisonnier de $0.13 \text{ mg}/\text{m}^3$ en juin. D'après ces résultats et les cartes de distributions (annexe 5) la zone 3 et la zone 1 peuvent connaître des enrichissements de chlorophylle également en début d'année (février-mars) durant l'été.

Les données mensuelles de production primaire du modèle ESSIC reproduisent bien le pic hivernal de juin à août ainsi que les enrichissements estivaux dans les différentes zones. En revanche, les résultats par zones et les proportions ne sont pas les mêmes. Ces différences peuvent toutefois difficilement être analysées car il est difficile de comparer d'un point de vue quantitatif des données de chlorophylle de surface à des données intégrées sur 400 m de profondeur. De plus, le modèle ESSIC est un modèle à grande échelle. Il ne peut donc pas être précis d'un point de vue spatial sur la grandeur des zones considérées. Cependant d'un point de vue temporel, les variations saisonnières sont bien reproduites.

E. Proies

Les thons se nourrissent majoritairement de macrozooplancton et de micronecton (poissons, crustacés, mollusques céphalopodes). Bien que la majorité du régime alimentaire des thons dans la ZEE de Nouvelle Calédonie soit composé de poissons, les différentes classes de proies ingérées varient en fonction des espèces (cf annexe 6). Ainsi, on retrouve par exemple chez le thon germon une proportion plus élevée de crustacés dans son alimentation que chez les autres thons. Le thon jaune lui mange environ 80 % de poissons et le thon obèse se nourrit majoritairement de poissons et de mollusques céphalopodes.

La distribution et l'abondance de ces proies dans la colonne d'eau dépendent beaucoup de la production primaire et des conditions du milieu. La majeure partie des proies se retrouve durant la nuit dans la couche supérieure entre 0-500 m avec 50 % de la biomasse totale concentrée entre 0-100 m. Cependant seulement 10 % environ de cette biomasse reste dans la couche de surface durant la journée. On distingue ainsi parmi le micronecton, des populations dites migrantes qui effectuent des migrations verticales dans la colonne d'eau en fonction de la luminosité et des populations non migrantes qui restent dans la même couche tout au long de la journée (Lehodey, 2004).

Un classement des différents types de populations de proies rencontrées dans la colonne d'eau a été effectué afin de mieux décrire le lien avec la distribution verticale de leur prédateur. La biomasse de proies trouvée dans chacune des couches verticales a été prédite par le modèle SEAPODYM dans les trois zones. Le modèle calcule séparément la biomasse mensuelle de proies en g/m^2 dans la couche épipélagique (0-100 m), la couche mésopélagique (100-400 m) et la couche bathypélagique (400-1000 m) de jour et de nuit (Figure 17).

Nos résultats montrent bien une différence jour/nuit dans les différentes couches et principalement dans la couche épipélagique et dans la couche bathypélagique où la biomasse augmente et diminue respectivement, entre le jour et la nuit. On remarque des variations saisonnières dans la couche épipélagique et la couche mésopélagique en journée. En effet ces couches contiennent principalement des petites espèces (épipélagos, mésopélagos migrants) à faible durée de vie et à développement rapide en relation avec des températures environnantes élevées dans la couche de surface. Le turn-over est rapide et la biomasse s'épuise dès que les conditions du milieu, en particulier la production primaire, ne sont plus favorables. On remarque que suite au pic de production primaire en juillet, la biomasse de proies dans ces couches augmente et présente un maximum décalé de 2 à 3 mois en septembre-octobre. Dans la couche bathypélagique, aucune variation saisonnière n'est observée, car les espèces ont un turn over beaucoup plus lent, et de faibles variations peu détectables sur une année.

Quelles que soient les couches observées, la biomasse de proies reste toujours plus faible dans la zone 1. Dans la couche épipélagique, la zone 2 est la zone où la concentration en proies est la plus forte, notamment la nuit. En revanche pour les couches plus profondes (<100 m), c'est la zone 3 qui est la plus riche en proies.

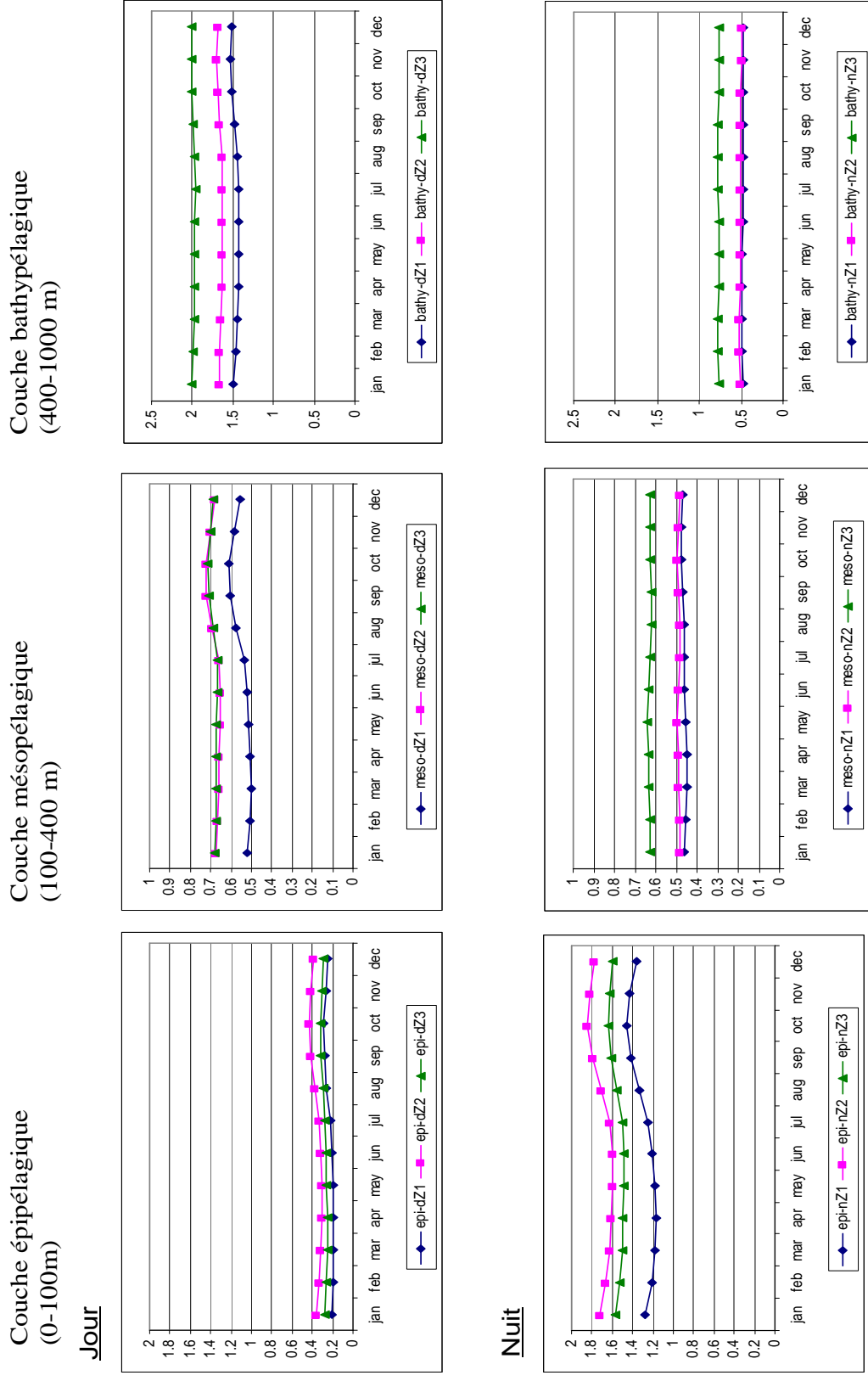


Figure 17. Biomasses mensuelles de proies (g/m²) estimées de jour et de nuit dans les différentes couches d'eau pour chacune des zones étudiées.

III. Variations interannuelles

A. Courants

Les anomalies climatiques créées par ENSO ont un impact sur la force et la direction du vent mais également sur les courants. Nous avons effectué une analyse interannuelle à la fois verticale et horizontale des courants grâce aux données du modèle afin de voir si les oscillations ENSO représentées par l'indice SOI ont un impact dans la zone étudiée.

1. Composante zonale u

La composante zonale u représente la direction est-ouest des courants. Nous avons examiné l'évolution de cette composante à l'intérieur de la ZEE sur la période 1980-2004 pour différentes couches de profondeur : 0-100 m, 100-400 m, 400-1000 m (Figure 18). Il en ressort plusieurs tendances. D'une manière générale les courants à l'intérieur de la ZEE sont toujours dirigés vers l'ouest puisque les valeurs de u sont toujours négatives et ce quelles que soient les couches. De plus la force de la composante u a tendance à suivre l'évolution de l'indice SOI avec des indices de corrélation positifs (Tableau 1a). Ce résultat indique qu'un événement El Niño aura tendance à faire augmenter la composante u et inversement lors d'un événement La Niña. La corrélation est très forte dans les couches 0-100 m et 100-400 m (avec des indices supérieurs à 0,70) ; elle diminue à de plus grandes profondeurs. Le maximum de corrélation est obtenu pour des délais de 6 à 7 mois après un événement ENSO. Une analyse supplémentaire effectuée sur la couche de surface 0-100 m montre que la corrélation n'est cependant pas la même en fonction des zones (Tableau 1b).

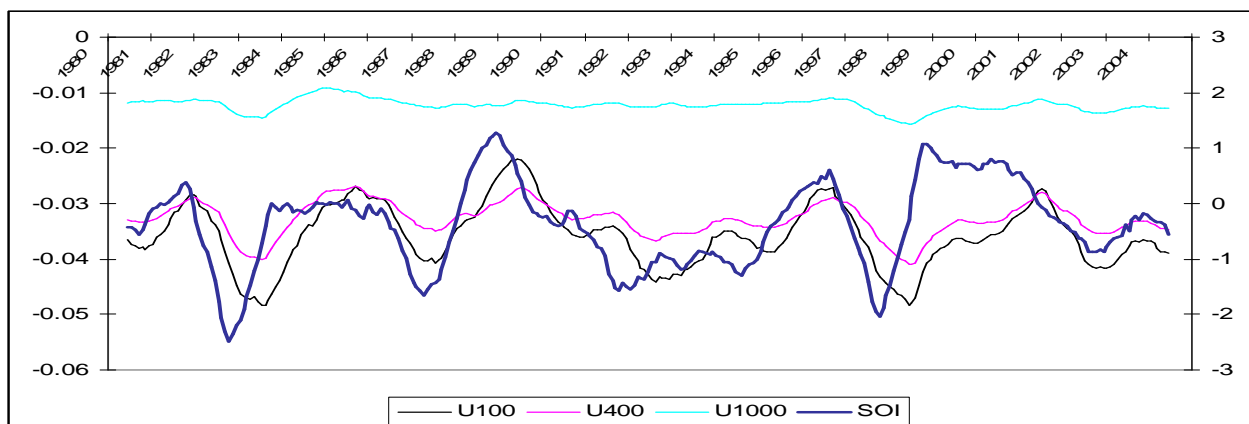


Figure 18. Evolution de de l'indice SOI et de la composante zonale u dans la ZEE à différentes profondeurs sur la période 1980-2004.

Tableau 1. Coefficients de corrélation et lags entre la SOI et la composante U a) par couches de profondeur et b) par zones sur la couche 0-100m

a)	U100	U400	U1000	b)	U100Z1	U100Z2	U100Z3
SOI	0,759	0,733	0,446	SOI	0,701		-0,223
signif.	*	*		signif.	*	n.s.	*
lag (mois)	6	7	6	lag (mois)	5		0

La corrélation est en effet très forte dans la zone 1 avec un coefficient de corrélation de 0,70 ; en revanche elle est inexistante dans la zone 2 et même négative dans la zone 3 même si le coefficient de corrélation n'est pas élevé. L'impact d'El Niño sur la composante u s'effectue donc avec un retard de 6-7 mois et est donc beaucoup plus élevé au nord, conformément aux travaux de Lenormand (1995) qui montrent une activité plus intense des vents au nord avec un retard de 3 mois sur la SOI.

2. Composante méridionale v

Un examen de la composante méridionale (nord-sud) des courants prédits sur la période 1980-2004 sur les différentes couches de la ZEE montre que les directions empruntées par les masses d'eau ne sont pas les mêmes au sein des différentes couches (Figure 19). Dans la couche 0-100 m les courants sont continuellement orientés vers le sud (v toujours négatif) avec de fortes amplitudes dans leur intensité. Dans les couches inférieures 100-400 et 400-1000 m, les courants sont au contraire continuellement orientés vers le nord (v toujours positif) avec des variations plus faibles. L'analyse de corrélation de la composante v avec la SOI montre qu'il existe une relation significative et négative entre les deux variables pour les couches au-delà de 100 m (Tableau 2a). Dans ce cas, un phénomène El Niño aura également un effet de renforcements des courants dans les couches intermédiaires et profondes et inversement lors des périodes La Niña. Dans la couche 0-100m en revanche aucune corrélation significative n'a été trouvée avec la SOI. Le maximum des corrélations pour les couches 100-400 et 400-1000 m s'observe pour un lag entre 8 à 9 mois.

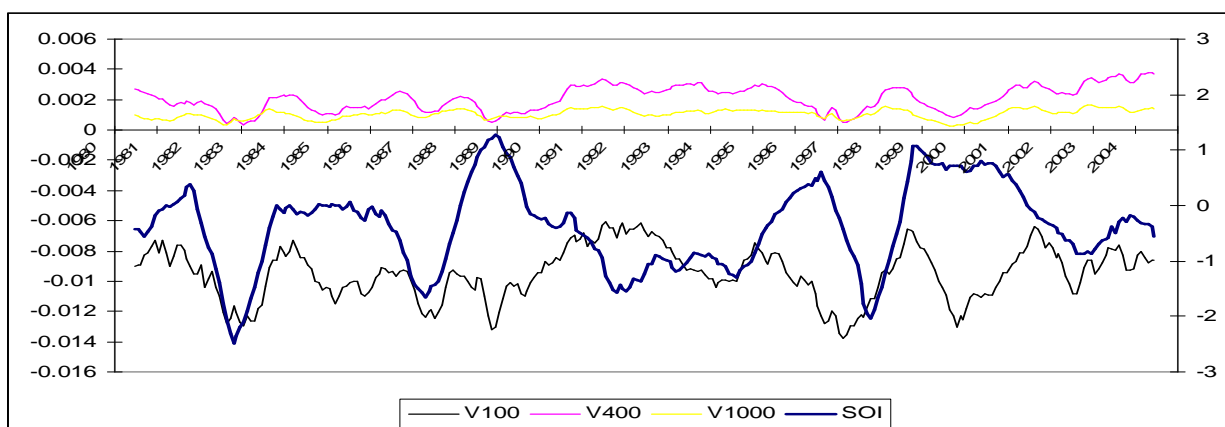


Figure 19. Evolution de de l'indice SOI et de la composante méridionale v dans la ZEE à différentes profondeurs sur la période 1980-2004

Tableau 2. Coefficients de corrélation entre la SOI et la composante V a) par couches de profondeur et b) par zones sur la couche 100-400m

	V100	V400	V1000		V400Z1	V400Z2	V400Z3
SOI		-0,355	-0,416	SOI	-0,362		0,281
signif	n.s	*	*	signif.	*	n.s	
lag(mois)		9	8	lag(mois)	5		5

Dans la couche 100-400 m où la corrélation est significative, on observe que la corrélation n'est pas la même en fonction des zones (Tableau 2b). En effet, la corrélation est plus forte et négative dans la zone 1, alors qu'elle est nulle ou positive dans la zone 2 et 3. On retrouve donc également pour la composante méridienne des tendances inverses entre les zones nord et sud.

Ces résultats montrent qu'il existe une relation significative entre l'oscillation australe El Niño et les courants à l'intérieur de la ZEE. Lors d'une période El Niño il y a renforcement des courants vers l'ouest sur l'ensemble des couches de la ZEE, ainsi que vers le nord dans les couches intermédiaires et profondes et inversement lors des périodes La Niña. Ce phénomène est plus marqué dans le nord de la ZEE et comporte un délai de 6 à 9 mois après établissement de l'anomalie climatique.

B. Températures

La relation entre les anomalies climatiques créées par ENSO et les anomalies de températures de surface aux alentours de la Nouvelle-Calédonie a déjà été traitée par les travaux de Lenormand (1995) et Delcroix et Lenormand (1997). De la même façon, nous avons examinés la variabilité interannuelle des températures de surface obtenues grâce à des données satellites (NCAR) sur l'ensemble de la ZEE puis pour chaque zone (Figure 20).

Les résultats montrent que les anomalies de températures de surface trouvées sur l'ensemble de la ZEE sont positivement corrélées avec l'indice SOI avec un coefficient relativement élevé de 0,56 (Tableau 3). La corrélation varie ensuite selon les zones. Elle est très importante dans la zone 1 et 3 avec un coefficient de corrélation $\geq 0,50$. Elle est également visible dans la zone 2 ($R= 0,32$). D'une manière générale, les anomalies de température de surface suivent les mêmes tendances dans les trois zones. Lors des anomalies SOI positives (phénomènes La Niña), on observe des anomalies de températures positives, c'est-à-dire des températures plus chaudes que la normale. Au contraire, lors d'anomalies de températures négatives (phénomènes El Niño) les températures sont plus froides que la normale. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Delcroix et Lenormand, 1997. Il est à noter que nous obtenons un maximum des corrélations pour des délai nuls, c'est-à-dire que l'évolution des deux signaux sont synchrones au cours du temps

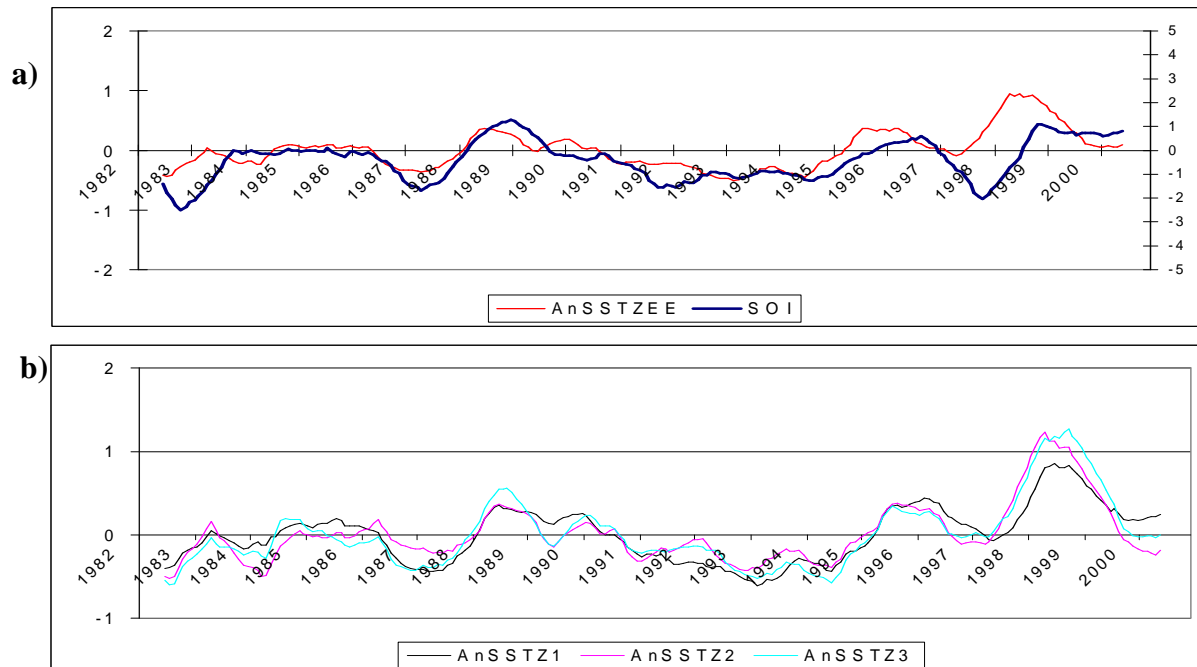


Figure 20. Evolution annuelle de l'index SOI et des anomalies de températures de surface (moyennes mobiles sur 12 mois) a) dans la ZEE et b) dans les 3 zones sur la période 1982-2000.

Tableau 3. Coefficients de corrélation et lags entre la SOI et les anomalies de températures de surface par zone

	<i>An.SSTZ1</i>	<i>An.SSTZ2</i>	<i>An.SSTZ3</i>	<i>An.SSTZEE</i>
SOI	0,657	0,321	0,500	0,562
signif.	*	*	*	*
lag (mois)	0	0	0	0

La même analyse a été effectuée sur les données de température du modèle moyennées pour différentes couches de profondeurs (0-100, 100-400 et 400-1000 m) sur l'ensemble de la ZEE et pour la période 1980-2004 (Figure 21 et Tableau 4). Contrairement aux données de surface, il en ressort une corrélation très faible entre les températures et la SOI dans la couche de surface 0-100 m (-0,19). De plus la relation est négative ce qui suggère des anomalies de températures positives lors d'événements El Niño et inversement avec la Niña. Cette tendance est significativement plus marquée dans la couche 100-400 m avec un coefficient de corrélation de -0,47. En revanche, la corrélation est non significative à des profondeurs supérieures à 400 m. Entre 100 et 400 m, le maximum de corrélation est atteint pour un délai de 3 mois.

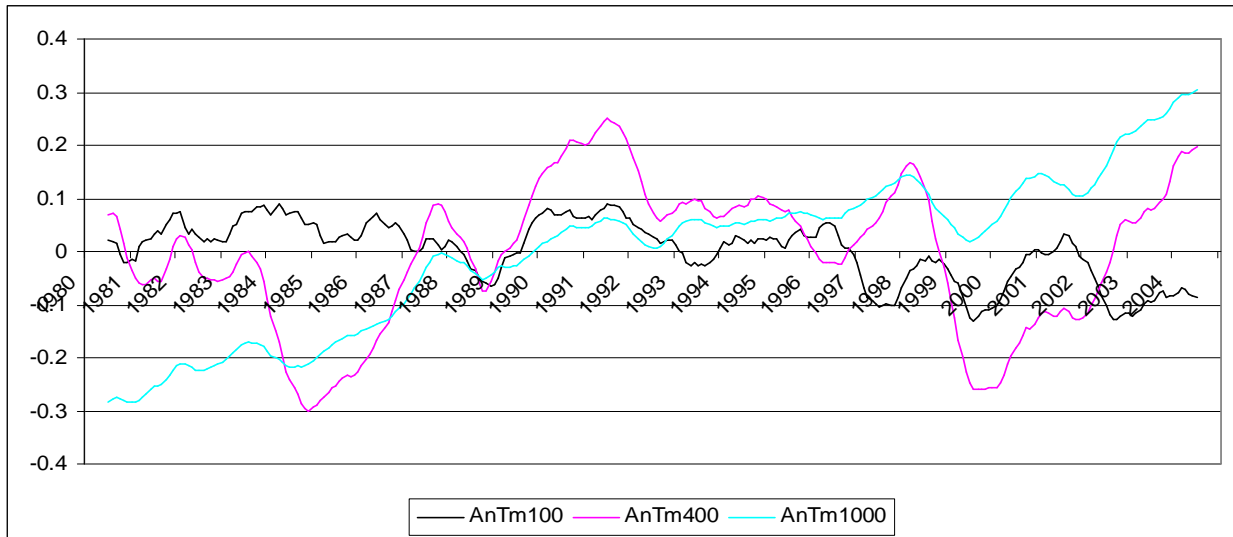


Figure 21. Anomalies de températures (moyenne mobiles sur 12 mois) estimées par le modèle pour la période 1980-2004 pour les différentes couches d'eau.

Tableau 4. Coefficients de corrélations et lags entre la SOI et les anomalies de températures du modèle calculées a) pour différentes couches de profondeurs et b) pour les différentes zones sur la couche 100-400 m.

a)	<i>AnTm100</i>	<i>AnTm400</i>	<i>AnTm1000</i>	b)	<i>Tm400Z1</i>	<i>Tm400Z2</i>	<i>Tm400Z3</i>
SOI	-0,193	-0,476		SOI	-0,385	-0,666	-0,691
signif.	*	*	n.s.	signif.	*	*	*
lag(mois)	7	3		lag(mois)	0	6	6

Dans les différentes zones de la couche 100-400 m où la corrélation est la plus grande, on observe des corrélations négatives relativement élevées (0,60) pour les zones du sud avec un délai de 6 mois. En revanche, la corrélation est plus faible au nord avec un délai nul.

Tout en gardant à l'esprit l'incertitude liée aux prédictions de modèles de circulation océanique, ces différences entre surface et sub-surface suggèrent qu'il peut exister différents phénomènes à l'origine des fluctuations de température en surface et en profondeur. Une analyse complémentaire (non présentée) a montré notamment qu'il existait des corrélations significatives entre les températures et les composantes des courants *u* et *v* avec un délai nul ce qui laisse penser que la variabilité des températures en profondeur peut être due à une advection du courant avec un délai de plusieurs mois après l'anomalie du signal SOI.

C. Chlorophylle

Les mesures de données de chlorophylle de surface sont disponibles à partir de 1998 grâce aux données satellites SeaWiFS. L'évolution des concentrations en chlorophylle a été décrite pour chacune des zones pour la période 1998-2003 sur laquelle les données sont disponibles (Figure 22). Elles ont été ensuite comparées aux prédictions de production primaire obtenues par le modèle.

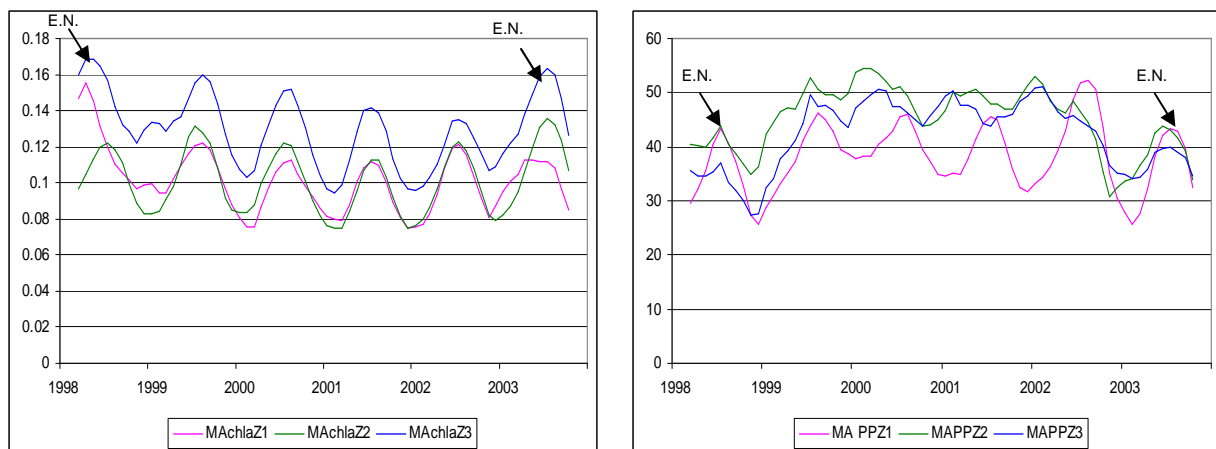


Figure 22. Taux de chlorophylle observé et production primaire prédite sur la période 1998-2003 dans les différentes zones de la ZEE de Nouvelle-Calédonie (E.N. : El Niño).

Les données de chlorophylle de surface montrent des pics saisonniers bien définis pour chacune des zones. La zone 3 au sud reste la zone où l'on observe le maximum de chlorophylle tout au long de l'année. Les taux de chlorophylle dans la zone 1 et 2 sont en revanche très similaires et évoluent parfois en synchronie. On remarque que les années où les pics sont les plus prononcés sont en 1998 et 2003 pendant ou juste après un phénomène El Niño. Pour ces mêmes années, des blooms de surface importants sont également visibles en début d'année (février) notamment dans la partie nord-est (Annexe 5). L'année 1998 a été caractérisée par le passage soudain d'un régime El Niño à La Niña. A partir de mai 1998, le climat a changé brusquement pour un régime La Niña, entraînant une baisse des vents. Quelque mois plus tard, on observe dans la même zone une diminution flagrante de la production primaire à la surface.

La modélisation de la production primaire sur la couche 0-400m montre en revanche une tendance inverse dans les pics, avec des minimums pour les périodes de fort El Niño. La quantité de production primaire est plus faible dans la zone 1 au nord que dans les zones sud; De plus, la variabilité interannuelle de la production primaire est également beaucoup plus faible au sud.

Une comparaison entre le signal SOI et la production primaire sur une période plus importante (1980-2003) confirme ces premières analyses (Figure 23). Il existe bien des

coefficients de corrélation positifs et significatifs entre les deux variables (Tableau 5). La corrélation est relativement forte pour les zones du sud avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0,50; en revanche, elle est un peu moins évidente dans la zone 1 au nord. Le maximum des corrélations est obtenu pour un délai entre 8 et 10 mois.

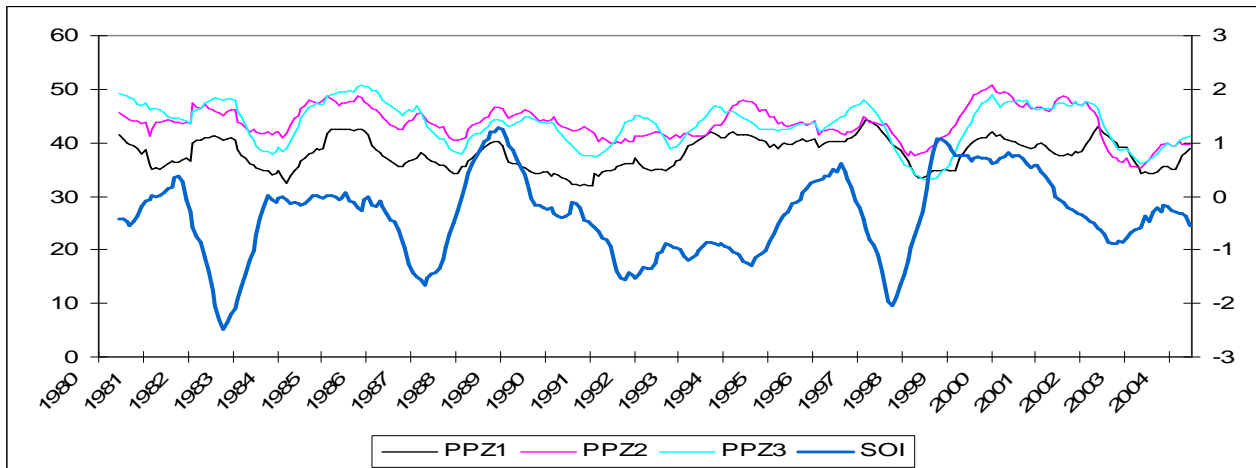


Figure 23. Evolution de la SOI et de la production primaire (moyennes mobiles de 12 mois) sur la période 1980-2004 pour les différentes zones.

Tableau 5. Coefficients de corrélations et lags entre la SOI et la production primaire pour les différentes zones.

	<i>PPZ1</i>	<i>PPZ2</i>	<i>PPZ3</i>
SOI	0,292	0,548	0,563
signif.	*	*	*
lag	9	8	10

Cette différence de tendances entre la surface et la couche 0-400 m rappelle celle décrite avec les températures de surface et de sub-surface. L'évolution interannuelle de la production primaire pourrait aussi s'expliquer par une advection tardive d'une masse d'eau en profondeur qui apporte des conditions favorables ou défavorables au développement de phytoplancton (par exemple, sels nutritifs, fer). Néanmoins, la comparaison entre observation et prédiction est une fois de plus rendue difficile puisque les paramètres pris en compte dans le modèle sont intégrés sur la profondeur 0-400 m.

D. Proies

La dynamique des composantes proies dans le modèle SEAPODYM est liée à la productivité primaire, à la température des couches fréquentées par ces proies, et

finalement aux courants qui les redistribuent passivement. Etant données les variations observées de ces trois paramètres : température, production primaire et courants, il est intéressant d'analyser comment ces variations sont intégrées dans le temps et l'espace par ces différentes composantes.

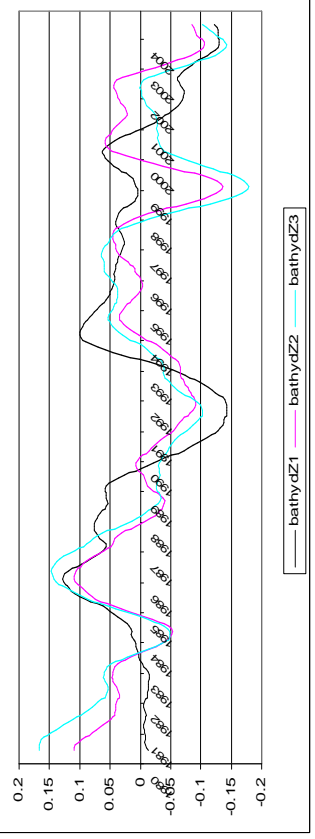
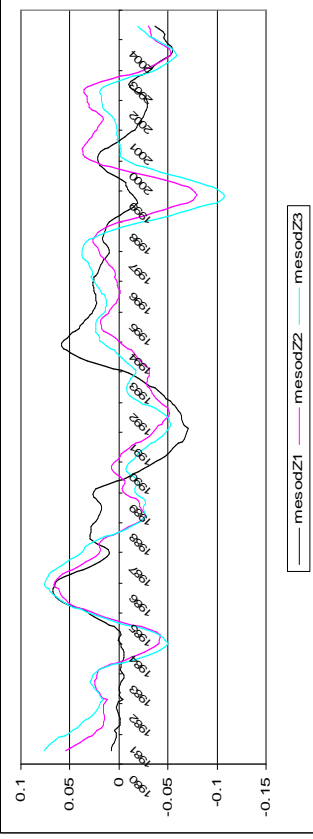
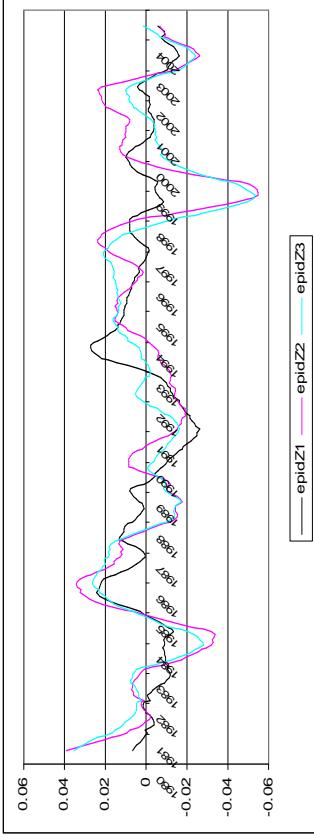
Les séries temporelles 1980-2004 des biomasses de proies (représentées en terme d'anomalies) prédites par le modèle SEAPODYM de jour et de nuit dans les différentes couches verticales sont présentées sur la figure 24. On remarque des anomalies négatives très nettes dans chacune des couches durant les périodes 1982-1983, 1991-1992, 1998-1999, 2002-2003. Ces années correspondent toutes à des événements El Niño. La diminution la plus marquée se situe en 1998-1999, durant un événement La Niña qui faisait suite au puissant phénomène El Niño de 1997-98.

De manière générale, comme pour la production primaire il existe un décalage de plusieurs mois entre le signal SOI et les séries temporelles de biomasses. Et c'est très logiquement que ce décalage augmente au fur et à mesure que l'on considère les composantes proies dont l'habitat est de plus en plus profond, en raison d'une diminution de la température moyenne des couches d'eaux habitées. Ainsi, si le décalage entre SOI et production primaire est de 8 mois (cf ci-dessus), il est de 13-14 mois pour les composantes proies épi-pélagiques, 15 mois pour les méso-pélagiques et 16 mois pour les proies purement bathy-pélagiques (Tableau 6). Toutefois ces corrélations n'apparaissent pas de façon significative dans la zone 1, où il est possible qu'une circulation plus dynamique perturbe ce signal. C'est d'ailleurs dans cette région nord que la corrélation entre la composante de courant zonal u et le signal SOI était la plus forte, avec un décalage de 5 mois.

Tableau 6. Coefficients de corrélation et lag entre la SOI et les biomasses de proies prédites dans les différentes couches et les pour différentes zones étudiées a) de jour et b) de nuit.

a)	<i>epidZ1</i>	<i>epidZ2</i>	<i>epidZ3</i>	<i>mesodZ1</i>	<i>mesodZ2</i>	<i>mesodZ3</i>	<i>bathydZ1</i>	<i>bathydZ2</i>	<i>bathydZ3</i>
SOI		0,587	0,302		0,569	0,335	0,216	0,48	0,163
signif.	n.s.	*	*	n.s.	*	*	*	*	
lag		14	13		13	13	0	15	15
b)	<i>epinZ1</i>	<i>epinZ2</i>	<i>epinZ3</i>	<i>mesonZ1</i>	<i>mesonZ2</i>	<i>mesonZ3</i>	<i>bathynZ1</i>	<i>bathynZ2</i>	<i>bathynZ3</i>
SOI		0,528	0,265		0,534	0,251		0,376	0,121
signif.	n.s.	*	*	n.s.	*	*	n.s.		
lag		14	14		13	13		16	16

Jour



Nuit

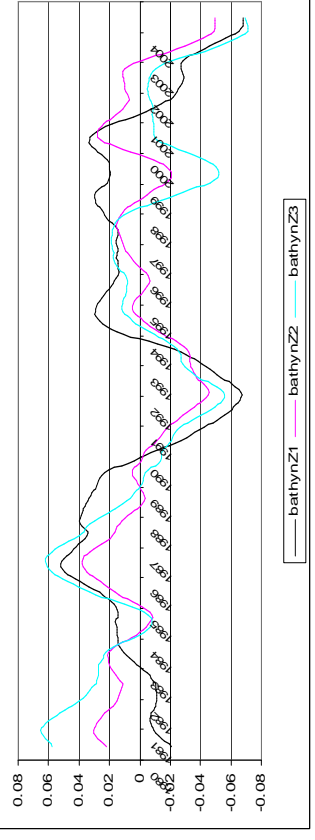
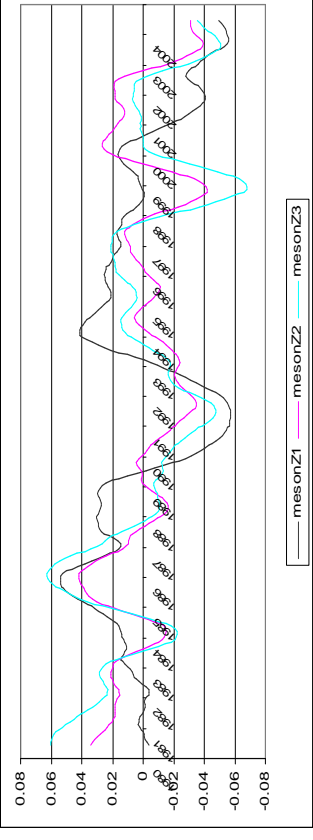
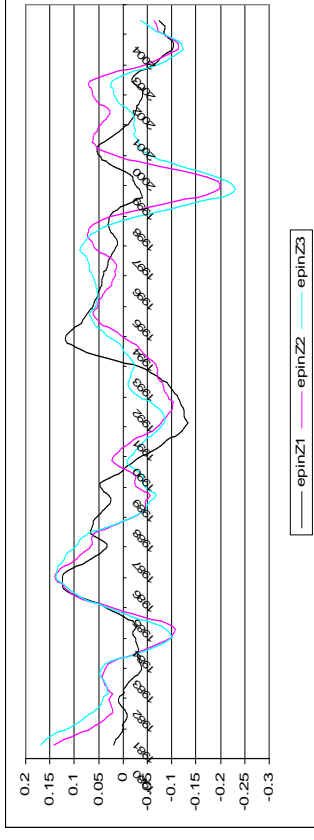


Figure 24. Biomasses de proies estimées (g/m^2) de jour et de nuit dans les différentes couches épi-pélagique, méso-pélagique et bathy-pélagique et pour chacune des zones étudiées.

IV. Conclusion Partie II

De manière générale, on observe une diminution de la température moyenne et une diminution de l'écart thermique saisonnier avec la profondeur. Au nord de la ZEE (Zone 1) les températures dans la couche 0-100 m sont de 2 à 3° plus élevées qu'au sud (Zone 2 et 3) et l'écart thermique entre les saisons est également moins important au nord qu'au sud (2° contre 3° respectivement). Le modèle ESSIC surestime toujours les températures d'environ 2° dans les différentes zones et couches de profondeur, mais retranscrit correctement la variabilité dans ces couches. Concernant la température de l'eau également, le modèle prédit dans la zone 1 une inversion du cycle saisonnier entre la couche de surface et la couche intermédiaire, ce qui n'est pas le cas pour les autres zones au sud.

En terme de production primaire, le pic saisonnier a lieu à la saison fraîche en juillet-août; il est visible sur les observations satellite et reproduit par le modèle. La production primaire est plus forte au sud (Zones 2 et 3) qu'au nord (Zone 1). Les zones sud sont marquées en particulier par un enrichissement hivernal associé au développement de fronts thermiques dus à la rencontre des masses d'eaux chaudes venant du nord qui descendent le long de la cote est (courant du Vauban), avec les eaux refroidies au sud sous l'effet des alizés dont l'intensité est maximum en cette saison.

A l'échelle interannuelle toutefois, il y a un désaccord entre ce qui est observé par satellite pour la chlorophylle de surface et la production primaire totale intégrée sur la verticale prédite par le modèle. Alors que des enrichissements en chlorophylle de surface sont observés avec un retard d'environ 8 mois sur le signal climatique SOI, le modèle prédit au contraire une diminution de la production primaire totale avec le même décalage temporel. Ce décalage de la production primaire par rapport au signal SOI est précédé par un décalage en terme d'anomalie des composantes d'advection du courant, en particulier dans la partie nord.

Il n'est pas impossible pourtant que ces deux phénomènes apparemment contradictoire -- enrichissement de chlorophylle de surface et diminution de la production primaire totale -- puissent coexister. Le développement de blooms de phytoplancton en surface est en effet un phénomène connu dans la région comme pouvant être associé à des efflorescences de *Trichodesmium spp.*, dont les agrégations provoquent parfois des « marées rouges » (Dupouy, 1990). L'autre particularité de ces espèces phytoplanctoniques est qu'elles sont diazotrophes, c'est-à-dire qu'elles peuvent utiliser l'azote atmosphérique pour la photosynthèse. On pourrait alors envisager que suite au développement d'un phénomène El Niño, une advection « anormale » et décalée de plusieurs mois sur le signal atmosphérique apporte une masse d'eau plutôt oligotrophe et chaude dans la ZEE, favorisant ainsi le développement des *Trichodesmium* mais réduisant la production primaire « classique », et la plus importante du point de vue de la chaîne alimentaire vers les niveaux trophiques intermédiaires.

Concernant ces derniers, le modèle prédit sans trop de surprise un décalage temporel croissant par rapport à la production primaire, allant de 4-5 mois pour la composante épipelagique à 7-8 mois pour celle purement bathy-pélagique. Du point de vue spatial, là encore il est possible que l'advection dans la région nord perturbe la distribution des composantes proies et brouille la cohérence de ce signal décalé dans le temps.

Partie III- Etude des relations thons/environnement dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie

I. Relations entre les PUE observées et les variables environnementales prédites par le modèle SEAPODYM

A. Méthodologie

L'étude de la relation entre les différents facteurs hydro-biologiques du milieu et les captures palangrières de la ZEE de Nouvelle-Calédonie a été effectuée à l'aide de modèles additifs généralisés (GAM). Le GAM est une généralisation des techniques de régression multiple (Hastie et Tibshirani, 1990). Il peut être composé d'une somme de fonctions qui ne sont pas forcément paramétriques. Les modèles de type GAM s'utilisent beaucoup pour étudier les liens entre les organismes marins et leur environnement car la non-linéarité des réponses peut être pris en compte par le modèle (Maury *et al.*, 2001). L'analyse a été réalisée pour chacune des espèces de thons pêchées sur la période 1983-2004. La résolution spatiale utilisée dans cette étude est une grille horizontale de $1 \times 1^\circ$ et la résolution temporelle est de 10 jours. Les facteurs explicatifs environnementaux pris en compte sont : la température, les courants u et v, et les composantes du forage de jour et de nuit prédites par le modèle SEAPODYM sur les trois couches de profondeurs 0-100, 100-400 et 400-1000 m ainsi que la production primaire totale intégrée sur la couche 0-400m.

Dans chaque analyse, nous avons utilisé la transformation logarithmique afin de normaliser la distribution de fréquence asymétrique des PUE mais également à cause de la nature à priori multiplicative des processus utilisés dans l'étude. La formulation générale des modèles ajustés est :

$$\text{Log}(\text{PUE}+1) = \sum_i s(X_i) + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

où X_i représente l'ensemble des covariables environnementales (partie déterministe du modèle) agissant sur les rendements palangriers et ε , l'erreur ou résidu aléatoire. Nous avons utilisé sous R v2.0.1 (R Development Core team, 2004) une fonction de lissage « spline » de type polynomiale s , pour chaque variable explicative afin d'ajuster le modèle.

Différents modèles ont été testés afin de mettre en évidence l'effet de chaque variable écologique sur l'abondance des rendements. Les interactions significatives entre les facteurs ont également été pris en compte à chaque fois qu'elles modifiaient la relation considérée et ont été rajoutées afin d'isoler l'action véritable du paramètre environnemental sur les rendements palangriers. Le pseudo-coefficient R^2 ainsi que la déviance ont été calculés pour chaque modèle. Ces deux coefficients donnent une bonne

mesure de l'importance explicative du modèle. Seuls les modèles dont les variables environnementales étaient significatives ont été conservés et présentés.

B. Effet spatio-temporel

Les rendements peuvent être modifiés par des variations interannuelles d'abondance liées au recrutement, par des changements de capturabilité, par une saisonnalité importante et par une différence de distribution spatiale des pêcheries et des ressources. Ainsi nous avons préalablement testé l'ensemble des covariables spatio-temporelles supposées impliquées dans la variabilité des rendements afin d'évaluer leur importance sur les rendements. L'analyse générale de chaque variable spatiale (latitude, longitude) et temporelle (année, période de 10 jours) considérée sur l'ensemble des données a ensuite été effectuée pour chacune des espèces. L'effet spatio-temporel a été déterminé en ajoutant successivement au modèle l'ensemble des variables testées et significatives par leur ordre d'importance (Tableau 7).

Tableau 7. Coefficients de régression ajustés et pourcentages de déviance obtenus pour les différents modèles GAM. lond = longitude ; latd = latitude ; pdj=période de dix jours ; an= année.

Modèle appliqué (effet spatio-temporel)	T test P()	R ²	Déviance
ALB			
log(PUE)=s(lond)+s(pdj)+s(an)+s(latd)	<2,22e-16	0,235	23,8%
YFT			
log(PUE)=s(an)+s(pdj)+s(lond)+s(latd)	<2,22e-16	0,192	19,5%
BET			
log(PUE)=s(lond)+s(pdj)+s(an)+s(latd)	<2,22e-16	0,132	13,7%

Ces résultats montrent que l'effet spatio-temporel total a une influence fortement significative ($P < 2,22 \times 10^{-16}$) sur les rendements des trois espèces pêchées. Les 4 paramètres additionnés par ordre d'importance explicative totalisent à eux seuls 23,8% de la déviance totale des rendements dans le cas du thon blanc, 19,5% dans le cas du thon jaune et 13,7% dans le cas du thon obèse. Une analyse détaillée des relations entre les variables explicatives et les rendements a ensuite été produite par espèce.

Thon germon

L'effet des paramètres spatio-temporels influençant les rendements de thon blanc sont représentés dans le tableau 8. Les résultats de l'analyse indiquent que chacun des quatre paramètres a un effet fortement significatif ($P < 2,22 \times 10^{-16}$) sur le log des rendements de thon germon avec une inertie très forte. Les figures 25 et 26 nous

indiquent séparément les effets et les tendances prédites par le modèle, d'un point de vue spatial puis temporel.

Tableau 8. Importance explicative des différents paramètres spatio-temporels sur le log des rendements de thon germon effectués par les palangriers de la ZEE de Nouvelle-Calédonie.

Paramètre considéré	T test P()	R ²	Déviante
Longitude	<2,22e-16	0,08	9,05%
10j.	<2,22e-16	0,07	7,92%
Année	<2,22e-16	0,06	6,19%
Latitude	<2,22e-16	0,04	4,50%

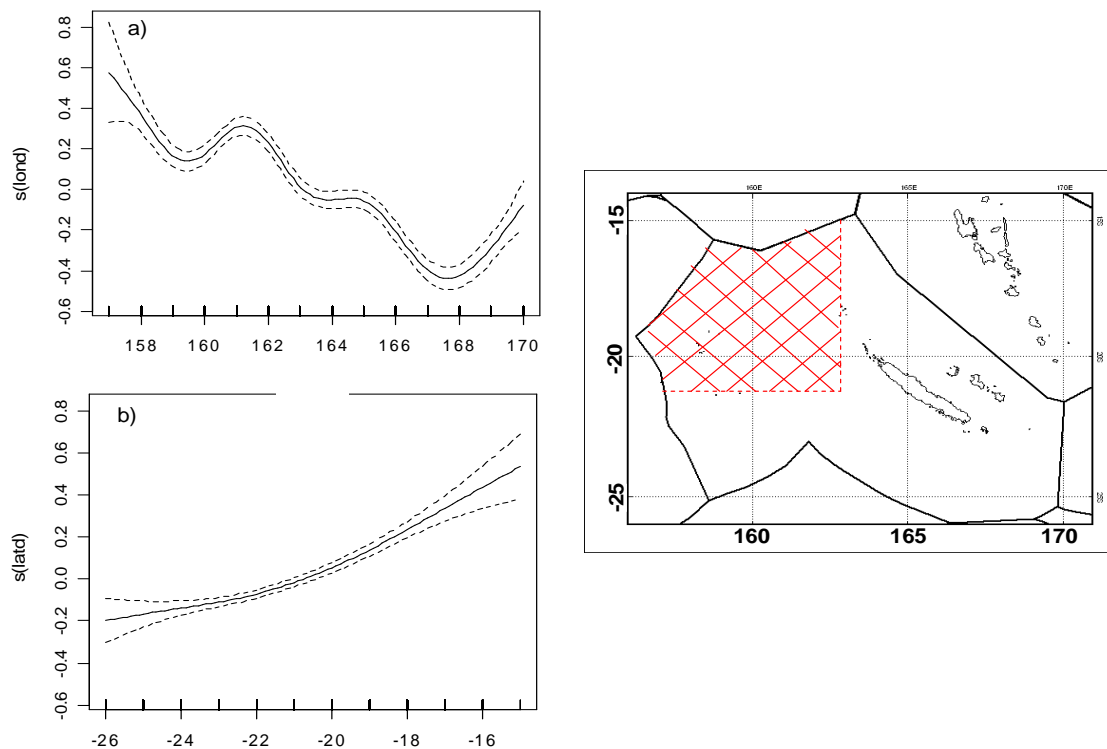


Figure 25. Résultats de la régression GAM indiquant les effets de (a) la longitude et de (b) la latitude sur le log des PUE de thon germon et localisation de la zone où les rendements sont supérieurs à la moyenne.

La longitude est le facteur explicatif le plus important dans le modèle (9.05 % de la déviante du modèle). La tendance indique nettement que les rendements sont supérieurs à la moyenne à l'ouest de la ZEE, notamment entre 159 et 162° E.

La latitude a également un rôle explicatif non négligeable (4,50 %) avec une tendance nette à l'augmentation des rendements vers le nord. Les PUE sont plus fortes que la moyenne au-dessus de la latitude 21° N. Ces résultats indiqueraient donc que la zone nord-ouest englobant les plateaux Chesterfield et les récifs Lansdowne serait la zone où les rendements en thon germon sont les plus élevés.

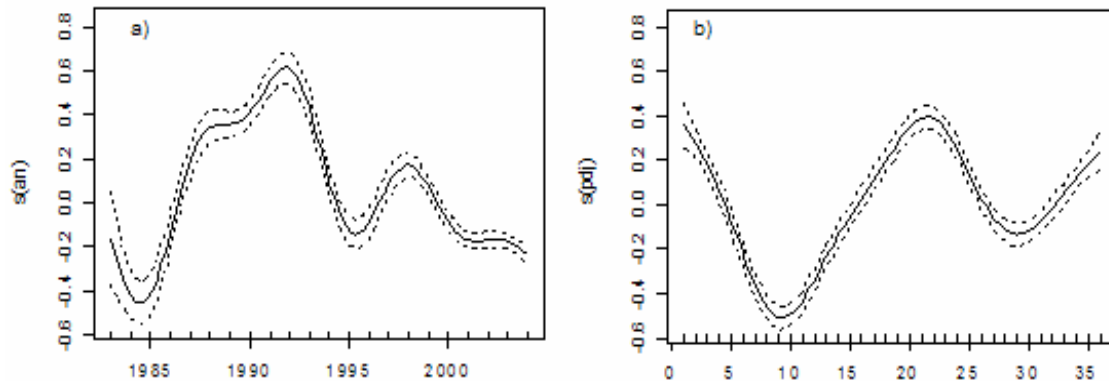


Figure 26. Résultats de la régression GAM indiquant les effets de (a) l'année et (b) la période de 10 jours sur le log des rendements de thon germon effectués sur la période 1983-2004.

Concernant la variabilité temporelle, le modèle indique que la période de 10 jours (décade) est le deuxième facteur explicatif le plus élevé (7.92 %) de l'analyse. La régression décrit notamment des rendements supérieurs à la moyenne entre la 15^{ème} et la 25^{ème} décade de l'année (correspondant aux mois de juin-juillet) et de la 33^{ème} à la 5^{ème} décade de l'année suivante (correspondant aux mois de décembre-janvier). Ces résultats sont en accord avec les tendances saisonnières décrites précédemment dans la Partie 1 de l'étude. L'analyse effectuée sur les années (6.19 % de la déviance) montrent également des CPUE supérieurs à la moyenne pour les périodes allant de 1987 à 1994 et de 1997 à 1999. Il est à noter que l'augmentation des prises en 1986-87 et 1997-98 correspond bien aux évènements El Niño les plus marqués de la période considérée. Le refroidissement des eaux apporté par El Niño aurait donc probablement plutôt un effet bénéfique sur les captures du thon germon.

Thon jaune

Les effets spatio-temporels agissant sur les rendements de thon jaune sont décrits dans le tableau 9.

Tableau 9. Importance explicative des différents paramètres spatio-temporels sur le log des rendements de thon jaune effectués par les palangriers de la ZEE de Nouvelle-Calédonie.

YFT			
Paramètre considéré	T test P()	R ²	Déviante
année	<2,22e-16	0,11	11,6%
10j.	<2,22e-16	0,03	3,44%
longitude	1,58e-13	0,02	2.32%
latitude	<2,22e-16	0,01	1.73%

Les résultats du modèle montrent que l'influence de chaque paramètre spatio-temporel sur les captures de thon jaune est très significative. On remarque cependant que la variabilité semble être majoritairement expliquée par les paramètres temporels. Cette espèce a un cycle de vie court et une croissance rapide, ce qui peut expliquer que sa variabilité temporelle soit plus marquée que pour les autres espèces.

Les effets spatiaux de la longitude et la latitude sur les rendements de thon jaune sont représentés sur la figure 27.

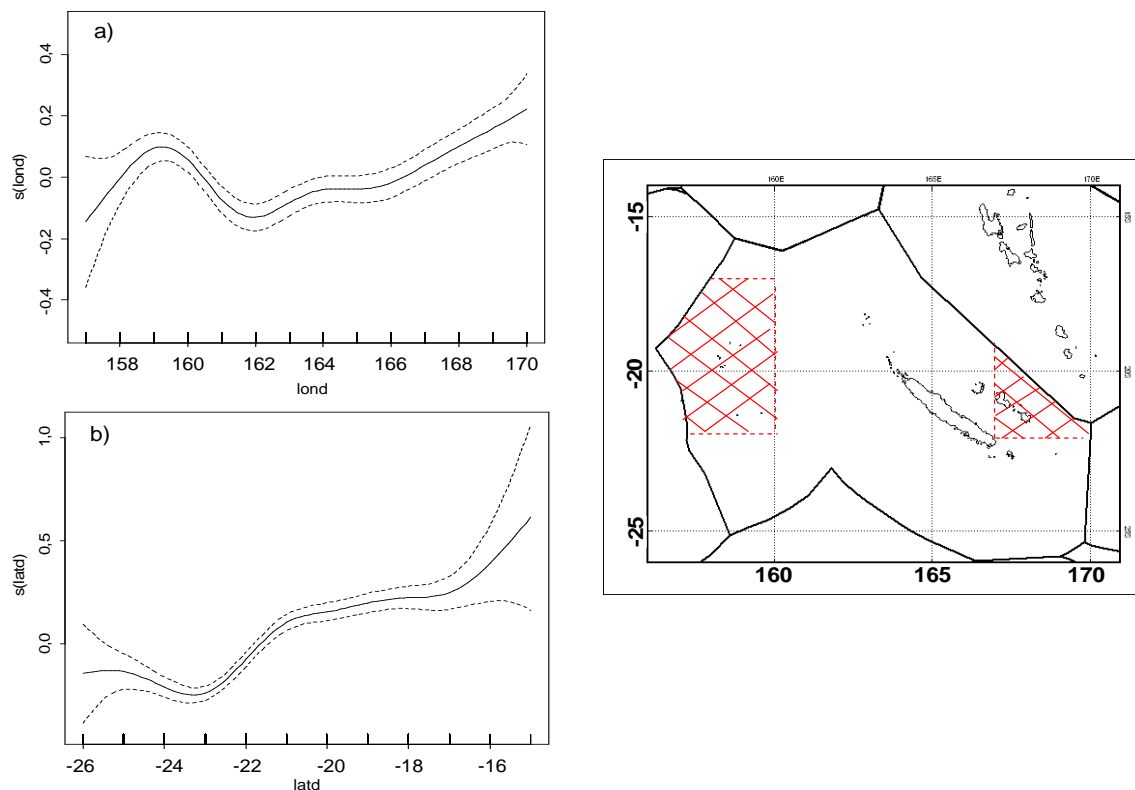


Figure 27. Résultats de la régression GAM indiquant les effets de (a) la longitude et (b) de la latitude sur le log des PUE de thon jaune et la localisation des zones où les rendements sont supérieurs à la moyenne.

Les paramètres longitude et latitude ont un pouvoir explicatif relativement faible (moins de 3 %) dans l'analyse. Cependant, il est tout de même possible de distinguer une tendance nette à l'augmentation des rendements de thon jaune vers le nord à partir de 22° S jusqu'à environ 17° S. Pour la longitude la tendance est moins nette, mais on distingue une bande de rendements supérieurs à la moyenne entre 158 et 161° W et une autre à partir de 167°. Ces tendances permettent de délimiter deux zones. Une située à l'ouest au niveau des îles Chesterfield (comme pour le thon blanc) et une autre située au niveau des îles Loyautés au large de la Grande Terre, où la production primaire est souvent élevée du fait des effets d'îles et de l'apport de matière organique par les rivières. Ces variations spatiales tendent à montrer que la productivité du milieu est un bon indicateur spatial pour la rentabilité des pêches.

La variabilité interannuelle et saisonnière des rendements de thon jaune est décrite dans la figure 28.

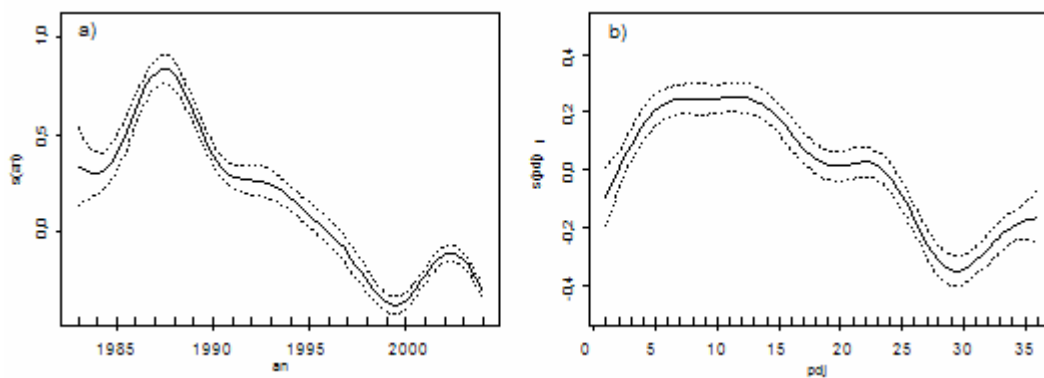


Figure 28. Résultats de la régression GAM indiquant les effets de (a) l'année et (b) de la période de 10 jours sur le log des rendements de thon jaune effectués sur la période 1983-2004.

Le paramètre « année » a une valeur explicative beaucoup plus élevée que les autres variables et explique à lui seul 11,5 % de la déviance. Le résultat des GAM indique que les rendements ont été supérieurs à la moyenne durant la première moitié de la période considérée mais qu'il y a eu une décroissance marquée des rendements dès la fin des années 80. Malgré une légère augmentation des rendements à partir de 1999, ceux-ci restent tout de même inférieurs à la moyenne. L'effet des événements El Niño sur les rendements de thons jaune semble assez peu évident, mais on remarque cependant que le maximum des rendements a été obtenu durant le El Niño de 86-87. La saisonnalité décrite avec la période de 10 jours explique quant à elle 3,44 % de la déviance totale avec des rendements supérieurs à la moyenne entre la 3^{ème} et 19^{ème} décade, ce qui correspond aux mois de février à juin. Ce résultat est en accord avec la saisonnalité des rendements décrite dans la partie 1 du rapport.

Thon obèse

Les sorties GAM montrant les effets des variables spatio-temporelles sur les rendements de thon obèse sont présentées dans le Tableau 10.

Tableau 10. Importance explicative des différents paramètres spatio-temporels sur le log des rendements de thon obèse effectués par les palangriers de la ZEE de Nouvelle-Calédonie.

BET			
Paramètre considéré	T test P()	R ²	Déviante
longitude	<2,22e-16	0,05	5,57%
10j	<2,22e-16	0,04	4,54%
année	<2,22e-16	0,03	3,45%
latitude	9,75e-10	0,02	2,23%

A la différence des deux autres espèces, la valeur explicative des différentes variables spatio-temporelles est moins forte sur les rendements du thon obèse et ne dépasse pas 5,57 %. Ce résultat vient sans doute du fait que cette espèce n'est pas forcément ciblée toute l'année par l'ensemble de la flottille.

La figure 29 représente l'effet de la variabilité spatiale sur les rendements de thon obèse.

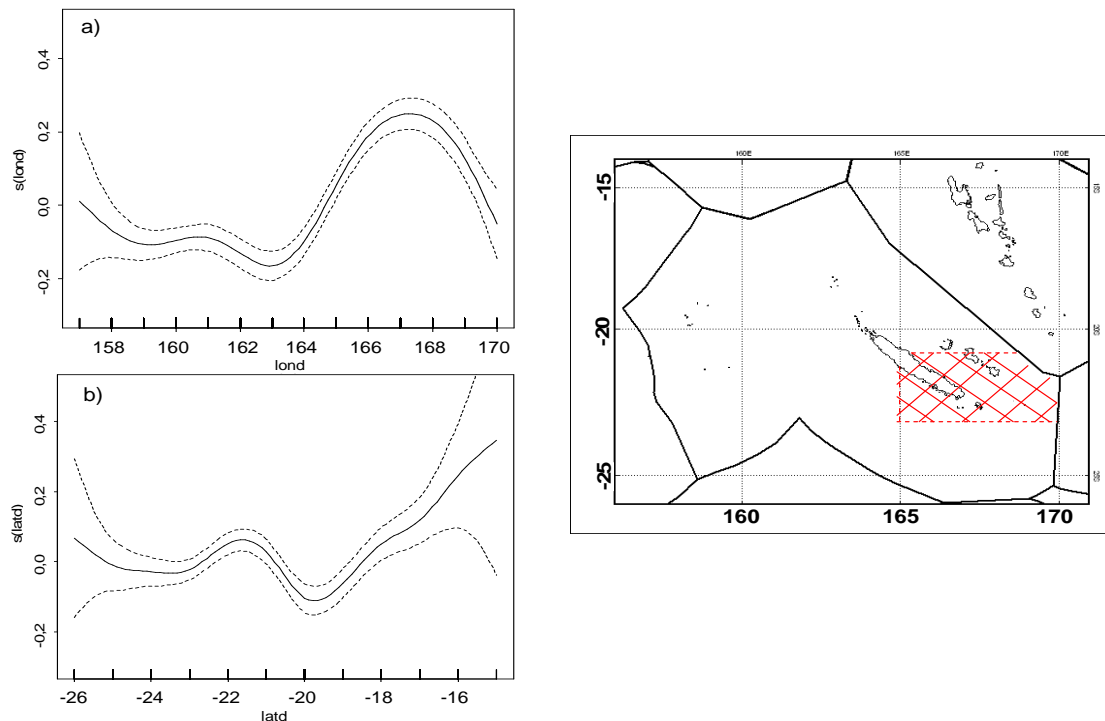


Figure 29. Résultats de la régression GAM indiquant les effets de (a) la longitude (b) de la latitude sur le log des PUE de thon obèse et localisation de la zone où les rendements sont supérieurs à la moyenne.

La longitude qui est la première variable explicative (5,57 % de la déviance) montre que la majorité des prises s'effectuent à l'est de 165° E avec des rendements au dessus de la moyenne pour ces longitudes. En ce qui concerne la latitude (2,23 %), la tendance est moins nette mais les rendements semblent supérieurs à la moyenne entre 21 et 23° S. Ces coordonnées délimitent une zone située au sud de la Grande Terre et qui englobe les îles Loyautés, ainsi que l'île des Pins. En hiver austral, en plus de la forte productivité primaire, il se forme dans cette zone, au sud de l'île des Pins, une zone de forte discontinuité thermo-haline, connue pour être un lieu favorable à la concentration de grands pélagiques et des mammifères marins (Rougerie, 1986).

La figure 30 représente la variabilité temporelle interannuelle et saisonnière des PUE de thon obèse .

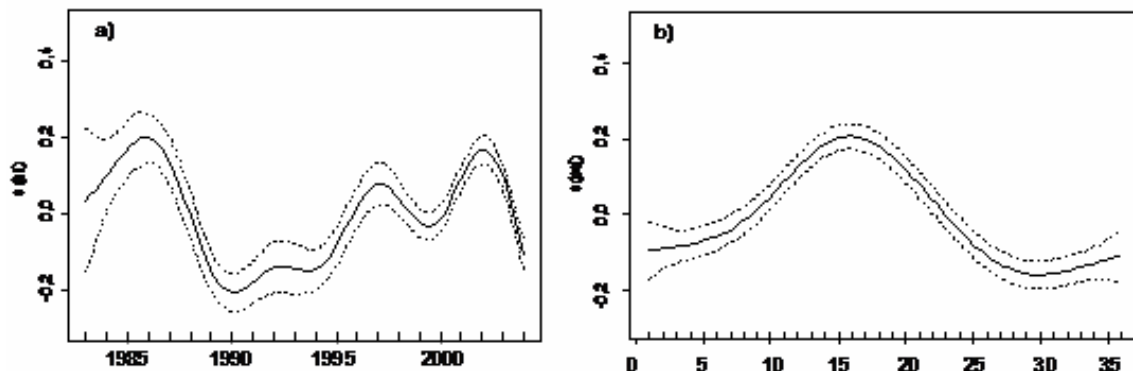


Figure 30. Résultats de la régression GAM indiquant les effets de (a) l'année et (b) de la période de 10 jours sur le log des rendements de thon obèse effectués sur la période 1983-2004.

L'influence du paramètre pdj (4.54 %) est net, on observe une augmentation des rendements entre la 10^{ème} et la 23^{ème} décade, ce qui correspond à la saison froide et à la saisonnalité décrite dans la partie 1 du rapport. Enfin si on considère la variation des rendements en fonction des années, on remarque que les captures ont été fortement supérieures à la moyenne de 1983 à 1987 et de 2001 à 2002. Ces périodes correspondent toutes à des années La Niña et les chutes de rendements observées en 1987, 1998 et 2002 correspondent à des événements El Niño. Des conditions de température plus chaudes que la normale associées aux évènements La Niña en Nouvelle-Calédonie, semblent donc être favorables aux prises de thon obèse.

C. Effet des variables environnementales

Nous avons utilisé la même méthodologie pour tester globalement chacune des variables environnementales en tenant pas compte de l'effet spatio-temporel (saisonnier) mais en tenant compte toutefois des effets interannuels de variabilité liés au recrutement et à la capturabilité, (ie. en rajoutant systématiquement le paramètre année au modèle)

afin de voir quelle variable pouvait être la plus influente sur les rendements sur l'ensemble de la zone considérée.

Le modèle suivant a été appliqué pour chaque espèce :

$$\text{Log(PUE+1)} = s(\text{année}) + s(\text{variable environnementale}) + s(\text{variable environnementale} * \text{année})$$

Au total, 16 facteurs environnementaux ont été testés. (Tableau 11). Nous avons rejeté les paramètres environnementaux non-significatifs et pris en compte seulement les paramètres significatifs dont le R^2 était suffisamment marquée ($\Delta R^2 > 0.02$) par rapport au modèle initial $\text{Log (PUE+1)} = s(\text{année})$ seul. Les interactions entre la variable environnementale et la variable année ont également été testées et prises en compte dans le modèle lorsqu'elles étaient significatives.

Tableau 11. Résumé des différentes variables testées et de leur influence sur le log des rendements de chaque espèce. n.s. : non significatif ; * : significatif ; Temp : température ; PP : production primaire ; U : courant est-ouest, V : courant nord-sud. Epi : couche épipelagique, méso : couche mésopélagique, bathy : couche bathypélagique.

Paramètre considéré	ALB	YFT	BET
Temp (0-100 m)	n.s.	n.s.	*
Temp (100-400 m)	n.s.	*	n.s.
Temp (400-1000 m)	n.s.	*	n.s.
PP (0-400 m)	n.s.	*	*
U (0-100 m)	*	n.s.	n.s.
U (100-400 m)	n.s.	n.s.	n.s.
U (400-1000 m)	n.s.	n.s.	n.s.
V (0-100 m)	n.s.	n.s.	n.s.
V (100-400 m)	n.s.	n.s.	n.s.
V (400-1000 m)	n.s.	n.s.	n.s.
proies_épi_jour	n.s.	*	n.s.
proies_méso_jour	*	*	n.s.
proies_bathy_jour	n.s.	n.s.	n.s.
proies_épi_nuit	*	*	n.s.
proies_méso_nuit	n.s.	n.s.	n.s.
proies_bathy_nuit	n.s.	n.s.	n.s.

D'une manière générale, beaucoup de variables environnementales ne sont pas significatives selon le modèle appliqué. La composante nord-sud (V) des courants en particulier n'est significative pour aucune des espèces. Pour le reste des facteurs, l'influence n'est pas la même en fonction des espèces. Une analyse détaillée par espèce a été produite pour chacune des variables influentes.

Thon germon

Les différents paramètres environnementaux retenus par le modèle et ayant une influence significative sur les rendements de thon germon sont représentés dans le tableau 12, avec le détail des statistiques.

Tableau 12. Importance explicative des différents paramètres environnementaux sur le log des rendements de thon.

ALB			
Paramètre considéré	T test P()	R2	Déviante
Année (seul)	<2,22e-16	0,060	6,19%
U (0-100m)	0,017	0,063	6,43%
Proies_méso_jour	0,014	0,062	6,38%
Proies_épi_nuit	0,028	0,062	6,36%

Parmi les trois paramètres environnementaux retenus par le modèle pour expliquer les variations de rendements du thon germon, la composante est-ouest du courant dans la couche de surface est la plus influente et explique 6,43 % de la déviance du modèle. Les composantes proies mésopélagiques de jour et épipélagiques de nuit suivent ensuite avec un pouvoir explicatif de 6,38 et 6,36 % respectivement. Les effets de ces composantes sur les rendements sont représentés dans la figure 31.

L'influence de la composante est-ouest varie en fonction de la direction et de la force du courant. Pour des courants dirigés vers l'ouest il n'y a pas de relation clairement définie avec les PUE, surtout pour des courants moyens au-dessus de 0,11 m/s. On remarque cependant que les rendements sont supérieurs à la moyenne pour une gamme de courants modérés comprise entre 0,06 et 0,11 m/s. Si les courants changent de direction et vont vers l'est, la corrélation avec les rendements en revanche devient clairement négative. Il est à noter qu'il est difficile d'avoir des tendances et des prédictions claires pour cette variable car les courants sont moyennés sur une profondeur de 0-100 m. Or les conditions de courant à la surface et au niveau inférieur de la couche ne sont pas les mêmes en terme de direction et vitesse. Cependant, une autre étude effectuée sur le thon germon dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie a montré que de forts PUE étaient souvent associés à de forts courants de surface allant vers l'ouest et que de faibles rendements étaient associés à des courants allant vers l'est (Langley, 2002). Ces conclusions renforcent et complètent nos prédictions.

Ce phénomène peut être relié au déplacement d'isothermes qui peuvent faire varier horizontalement l'habitat des thons germon et donc déterminer son abondance dans la zone. Des forts courants d'est peuvent également apporter par formation de cellules tourbillonnaires, des enrichissements en production primaire dans les zones où les masses d'eaux sont arrêtés par le relief (zone Chesterfield, bancs Lansdowne, bancs Capel). Il peut également contribuer à la formation et au renforcement de front thermiques et donc à la concentration des proies et de thons. Lorsque que les courants diminuent et changent de direction, le flux n'est sans doute plus assez fort pour créer des zones de concentration

intéressantes et les proies, ainsi que les thons se dispersent à la recherche de zones d'alimentation plus intéressantes.

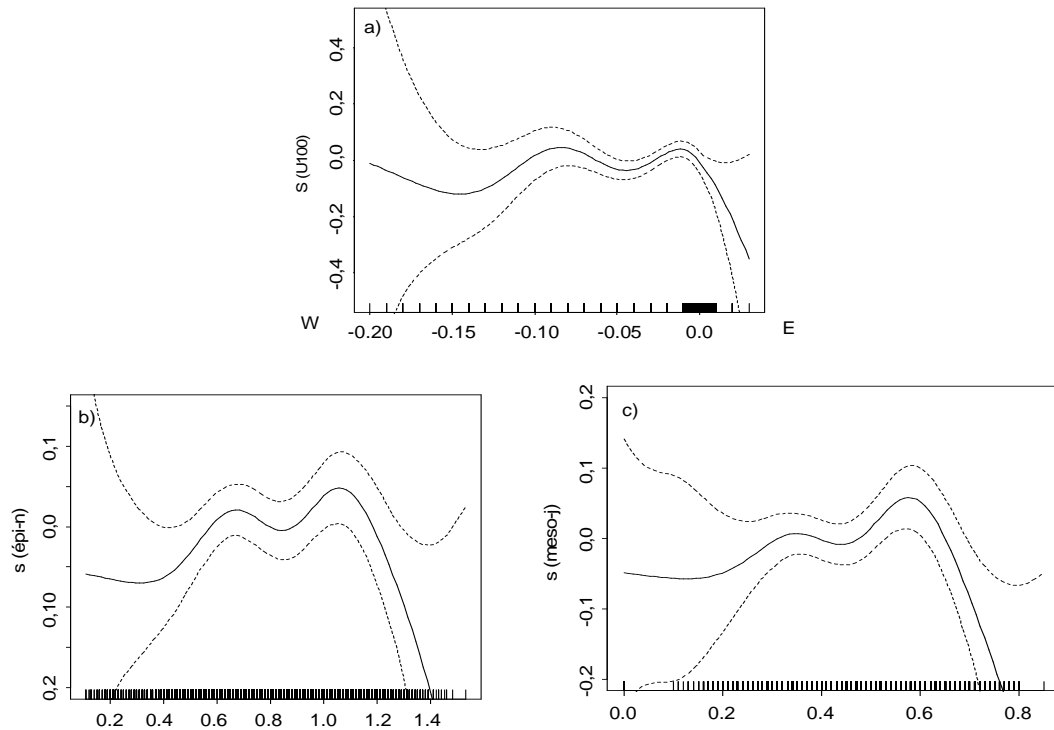


Figure 31. Résultats de la régression GAM indiquant les effets (a) du courant est-ouest entre 0-100 m (b) des proies épipélagiques de nuit et (c) des proies mésopélagiques de jour sur le log des rendements de thon germon.

La composante proie est significative sur deux couches d'eau et à des moments différents de la journée. La couche mésopélagique en journée et la couche épipélagique de nuit retenues par l'analyse correspondent à l'habitat dans lequel le thon blanc a l'habitude d'évoluer. Dans la couche mésopélagique, lorsque la biomasse de proies est faible (proies dispersées), la relation entre les proies et les rendements n'est pas définie. A partir de 0.3 g/m^2 (poids humide), la corrélation devient plutôt positive et on trouve des PUE supérieures à la moyenne autour de $0,5-0,6 \text{ g/m}^2$. En revanche, lorsque la concentration devient trop élevée, la corrélation s'inverse et les rendements chutent brutalement. On observe un peu le même type de relation dans la couche épipélagique. Il existe une corrélation positive entre les rendements et la concentration de proies dans le milieu pour une échelle de biomasse entre $0,5$ et $1,1 \text{ g/m}^2$. Lorsque la biomasse en proies dépasse une certaine quantité, la corrélation devient négative.

Une étude acoustique effectuée sur la relation entre densité de proies et captures de thon a montré un résultat similaire pour le thon germon (Bertrand *et al.*, 2002). D'une manière générale, le thon a tendance à se répartir dans les endroits à fortes densités de

proies. Cependant, les captures de palangre se basent sur le comportement d'attrait du poisson par l'appât. Ainsi, lorsque le thon est en recherche de nourriture et que le niveau de proies dans le milieu n'est pas trop important, le thon est susceptible de mordre à l'appât. En revanche, en présence d'une trop forte densité de proies, l'appât aura tendance à être délaissé car le thon sera beaucoup plus attiré par des proies mouvantes et sera vite rassasié.

Thon jaune

Les effets environnementaux agissant sur les rendements de thon jaune sont décrits dans le tableau 13 et la figure 32.

Tableau 13. Importance explicative des différents paramètres environnementaux sur le log des rendements de thon jaune. T : température ; PP : production primaire.

YFT			
Paramètre considéré	T test P()	R2	Déviante
Année (seul)	<2,22e-16	0,115	11,6%
T (100-400m)	4,03e-07	0,119	12%
proies_épi_nuit	0,000	0,117	11,9%
proies_méso_jour	0,001	0,117	11,9%
PP	0,000	0,117	11,8%
proies_épi_jour	0,000	0,116	11,8%
T (400-1000m)	0,000	0,116	11,7%

Parmi les paramètres environnementaux présentés, seules la température entre 100 et 400 m (12 %), les composantes proies dans la couche épipelagique de nuit et mésopélagique de jour (11,9 %) et la production primaire (11,8%) ont été retenues et analysées, les deux autres paramètres ayant une déviance trop faible par rapport au modèle initial n'ont pas été pris en considération.

Au sein de la couche intermédiaire (100-400m), la gamme de température semble avoir une importance relative sur le succès des rendements. Pour des températures inférieures à 20° la corrélation est négative et les rendements sont en dessous de la moyenne; à partir de 20° en revanche la corrélation s'inverse et les rendements deviennent supérieurs à la moyenne dès 20,5°. Cette gamme de température correspond grossièrement au niveau supérieur de la couche intermédiaire où se trouve la thermocline (entre 100 et 200 m en fonction des zones) où les thons se répartissent préférentiellement.

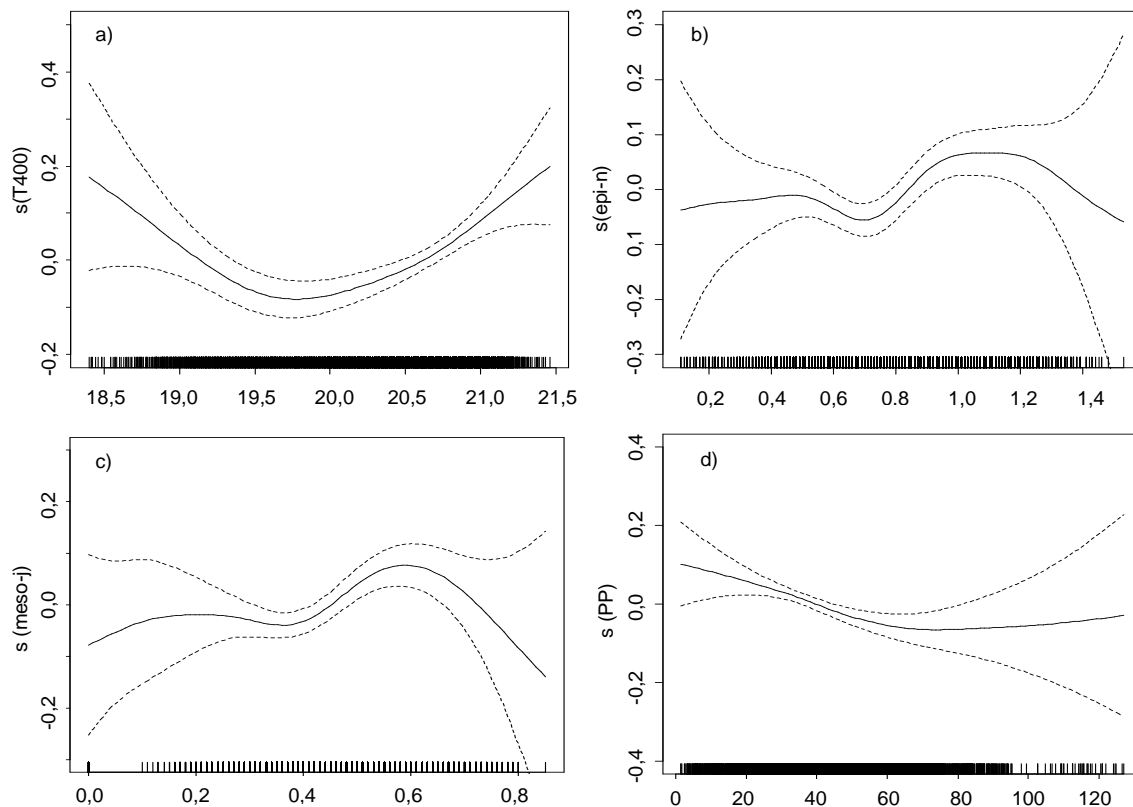


Figure 32. Résultats de la régression GAM indiquant les effets (a) de la température entre 100-400 m (b) des proies épipélagiques de nuit (c) des proies mésopélagique de jour et (d) de la production primaire sur le log des rendements de thon jaune

L'effet des composantes proies dans la couche épipélagique la nuit et mésopélagique le jour a également un effet significatif sur les captures de thon jaune qui rappelle celui observé sur le thon germon. Aucune relation n'est visible pour de faibles quantités de proies. En revanche à partir d'une certaine biomasse de proies dans le milieu (0.4 g/m^2 dans la couche mésopélagique et 0.7 g/m^2 dans la couche épipélagique), la corrélation devient positive et les rendements augmentent jusqu'à atteindre un plateau. Pour de plus fortes concentrations en proies la relation se dégrade un peu mais les rendements restent néanmoins supérieurs à la moyenne pour des gammes de biomasse élevées et l'on n'observe pas de chute de rendements nette comme pour le germon. Ce résultat peut s'expliquer par une différence physiologique entre les deux espèces. En effet, le thon jaune a un comportement beaucoup plus dynamique que le germon et donc une demande énergétique plus importante, c'est-à-dire plus de proies, y compris les appâts..

En ce qui concerne la productivité primaire, la relation décrite par le modèle est clairement négative. Les rendements de thon jaune sont positifs en dessous de 40 mmol/m^2 et diminuent au-delà de cette concentration. Cela indique que les thons jaunes

sont plus pêchés dans les eaux où la charge particulaire est peu élevée. En effet, dans les zones frontales, les thons semblent rechercher les eaux claires pour pouvoir chasser.

Thon obèse

Les statistiques des paramètres environnementaux ayant une influence significative sur les rendements de thon obèse sont détaillées dans le tableau 14.

Tableau 14. Importance explicative des différents paramètres environnementaux sur le log des rendements de thon obèse. PP :production primaire ; T : température.

BET			
Paramètre considéré	T test P()	R2	Déviante
Année (seul)	<2,22e-16	0,033	3,45%
PP	0,012	0,036	3,67%
T (0-100m)	0,005	0,034	3,58%

Seules la production primaire et la température dans la couche 0-100 m ont une influence significative sur les rendements de thon obèse. Cependant la fraction de la déviance expliquée par ces deux paramètres est très faible. Nous n'avons examiné que l'effet de la production primaire sur les PUE (figure 33) car la différence de variation de R^2 pour la température à 0-100 m n'est pas assez marquée pour y distinguer une tendance.

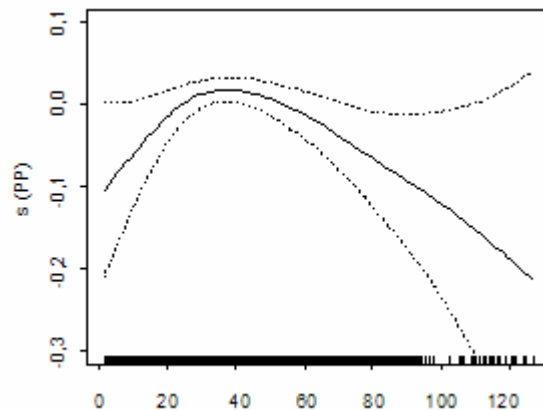


Figure 33. Résultats de la régression GAM indiquant les effets (a) de la production primaire sur le log des rendements de thon obèse.

L'effet de la production primaire sur les PUE de thon obèse n'est pas évidente à interpréter car l'inertie du modèle est relativement faible. Cependant, il semblerait que la plupart des captures s'effectuent aux alentours de 40 mol/m². Au dessus de cette valeur, on observe une tendance négative identique à celle observée pour le thon jaune. Le thon obèse est donc pêché dans des zones où il existe une certaine quantité de production

primaire. Cependant les rendements diminuent si la concentration devient trop forte. Comme le thon jaune, le thon obèse chasse à vue et évite donc les eaux où il y a une trop forte concentration en chlorophylle *a* et une trop faible visibilité.

II. Exemple de simulation : mise en évidence de l'influence de l'environnement sur les PUE de thon blanc

Dans cette partie, nous avons superposé sur des cartes de la ZEE les distributions de PUE avec des paramètres océanographiques fournis par le modèle SEAPODYM. Nous avons ainsi pu vérifier l'exactitude des tendances fournies par les modèles statistiques GAM présentés ci-dessus. Cette démarche a également servi à comprendre et émettre certaines hypothèses sur les liens unissant les rendements et l'environnement. Nous avons pris l'exemple du thon blanc, espèce commerciale la plus pêchée sur toute l'année.

A. Cartes mensuelles de capturabilité

Nous avons représenté sur la figure 34, l'effet combiné des courants et de la concentration en proies qui d'après l'analyse sont les deux facteurs qui ont le pouvoir explicatif le plus élevé sur les rendements de thon blanc. Pour combiner la concentration en proies épipélagiques de nuit et mésopélagiques de jour, nous avons utilisé l'équivalent d'un indice de « capturabilité » selon les résultats fournis par le modèle statistique. Cet indice a en effet été calculé avec les échelles de proies les plus favorables selon la relation statistique obtenue plus haut. Il est à noter que la capturabilité varie aussi en fonction de l'abondance globale de la population de thon dont le recrutement varie d'une année sur l'autre ; l'indice défini ici doit donc être interprété en conséquence. Nous avons superposé pour chacune des cartes l'indice de capturabilité, les courants moyens ainsi que les rendements effectués sur l'ensemble de la période étudiée.

Comme précédemment indiqué dans la partie II § III-A, les courants moyens mensuels sont majoritairement dirigés vers l'ouest à l'intérieur de la ZEE. Les courants les plus forts se trouvent au nord de la ZEE et sont renforcés en hiver austral par le courant équatorial sud à partir de juin. La force de ce courant diminue progressivement en début d'année et atteint son niveau le plus faible en mars-avril (voir la zone nord-ouest à l'extérieur de la ZEE). Au sud de la ZEE, on observe des courants relativement forts provenant d'un système de courant bien établi toute l'année. A l'ouest de la Grande Terre, les courants demeurent relativement faibles. Toutefois, le système de vents d'ouest peut modifier la direction de ces courants en période estivale (octobre à mars) le long de la Grande Terre (Rougerie, 1986).

En ce qui concerne l'indice de capturabilité associé aux proies, il varie en fonction des mois et des zones. De juin à août, l'ensemble de la ZEE possède une bonne capturabilité (densité de proies ni trop forte, ni trop faible). A partir de septembre jusqu'à janvier, la capturabilité diminue nettement dans le sud-ouest de la ZEE (zone 2) car la concentration en proies (principalement épipélagiques) est maximale dans cette zone suite au bloom saisonnier de juillet (cf Partie II § II-E). De février à mai, la capturabilité

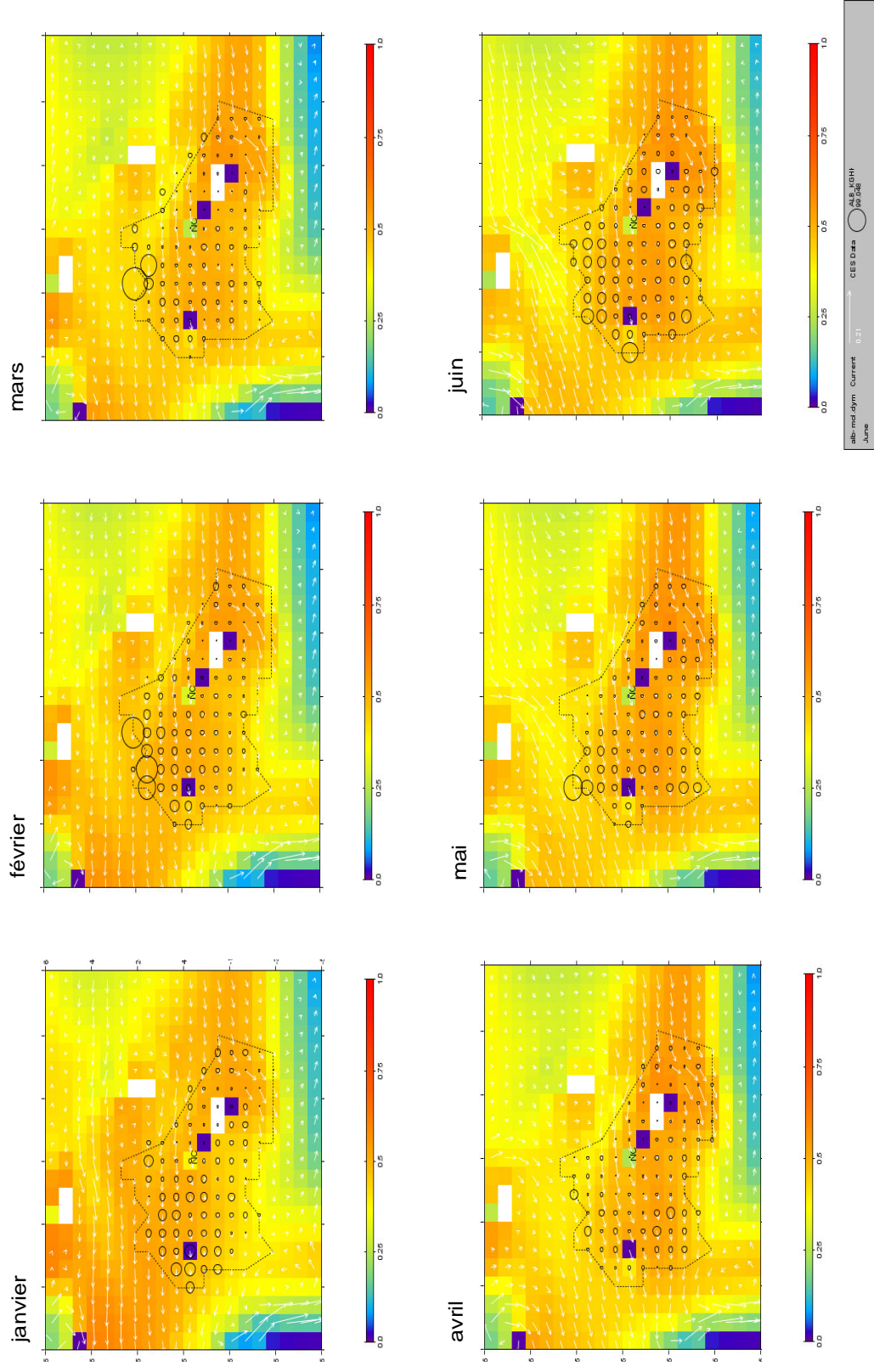


Figure 34a. Distribution des rendements en thon blanc en fonction de l'indice de capturabilité et des courants dans la ZEE.

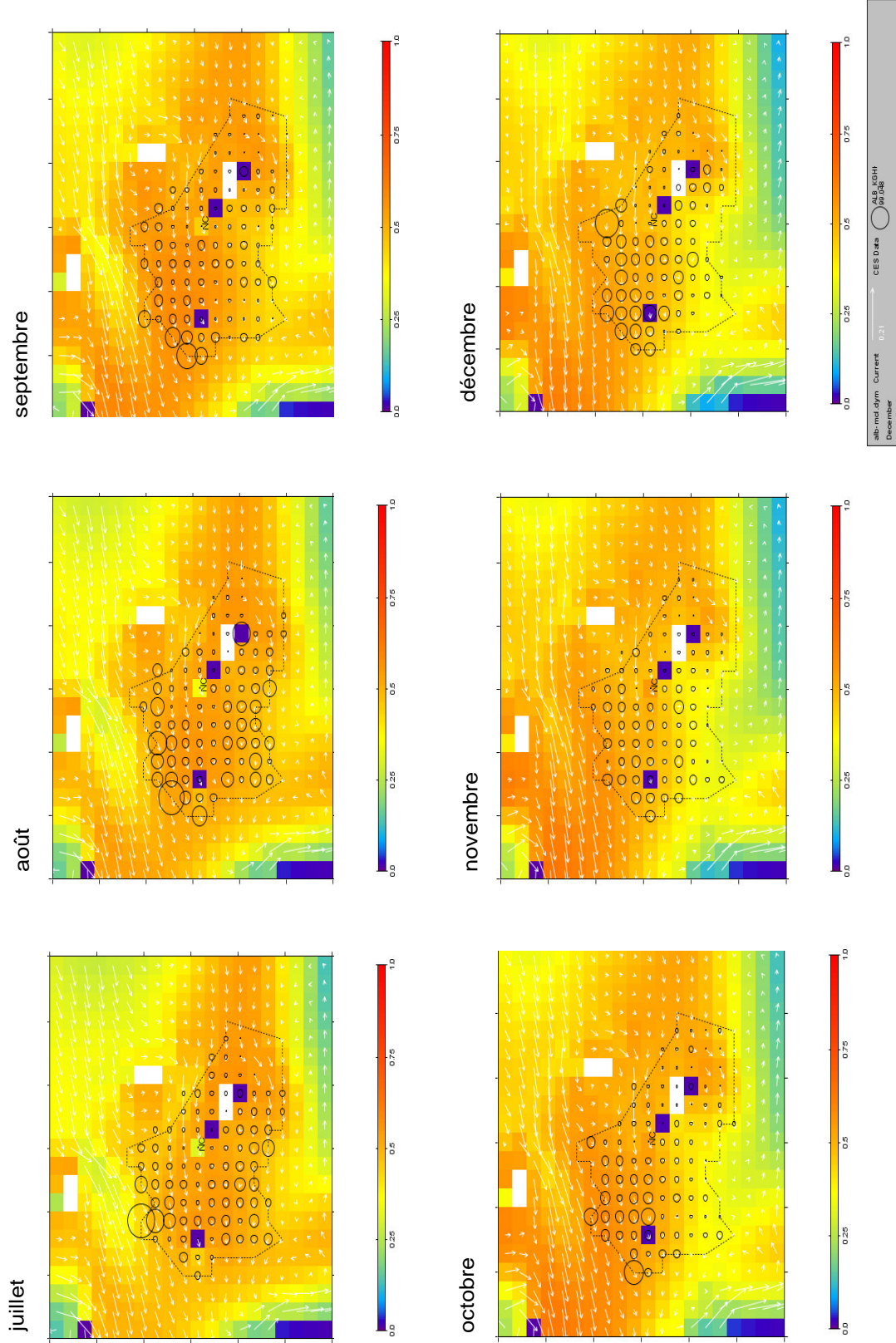


Figure 34b. Distribution des rendements en thon blanc en fonction de l'indice de capturabilité et des courants dans la ZEE

augmente à nouveau dans le sud-ouest (diminution progressive de proies par prédation) mais diminue dans le nord est de la ZEE . La densité de proies à ce moment là est minimale dans la zone 1 et la probabilité de capturer du thon blanc diminue donc également.

La distribution mensuelle des rendements confirme l'importance du courant et de la densité de proies sur la capturabilité du thon blanc. D'une manière générale, les rendements sont meilleurs dans le nord ouest de la ZEE où les courants sont plus importants. Les rendements sont en revanche moins bons près des côtes à l'ouest de la grande terre, où les courants sont plus faibles et peuvent changer de direction. Les mois où les rendements sont les plus faibles (mars-avril) correspondent à des mois où le courant équatorial sud est le plus faible. Ce résultat suppose donc que le courant équatorial sud pourrait avoir un impact sur la répartition et l'abondance du thon germon dans la zone. La diminution du courant agit peut être sur l'augmentation de la température à la surface et le déplacement des isothermes, ce qui pourrait avoir une action sur la distribution des thons. Cela peut également agir sur la distribution des proies. A partir de mars, la zone nord qui est la zone où l'on observe généralement les meilleurs rendements commence à devenir pauvre en proies d'où une diminution nette des rendements. Les mois où les rendements sont les plus importants sont corrélés à la fois à une augmentation du courant équatorial sud et à une densité optimale de proies sur l'ensemble de la ZEE. Cette situation se retrouve en juillet-août. Durant ces mois, à la fois le nord et le sud ouest de la ZEE possède des rendements élevés. A partir de septembre en revanche, malgré des courants toujours importants, seul le nord ouest de la ZEE reste rentable. Les captures dans la zone sud diminuent significativement, probablement en raison d'une densité élevée de proies en surface qui nuit à l'attractivité des appâts.

B. Mise en évidence de l'effet ENSO

La même approche a été suivie afin de mettre en évidence les variations interannuelles causées par les phénomènes ENSO. Nous avons choisi sur la série temporelle 1983-2004, des années à fort épisode El Niño et des années à fort épisode La Niña, puis nous avons suivi l'évolution simultanée des conditions environnementales et des rendements de thon blanc dans la zone. Nous n'avons étudié ces variables que sur la période chaude située entre octobre et mars, comprenant d'après l'analyse ultérieure pour une année moyenne deux mois de faibles rendements (octobre et mars) et quatre mois de forts rendements (novembre à février).

Effet El Niño

La période 86-88 a été choisie afin de mettre en évidence l'effet El Niño sur la zone. La figure 35 (a et b) montre l'évolution des conditions environnementales et des rendements sur les deux années. Pour les même mois étudiés, on observe déjà une forte différence d'une année sur l'autre.

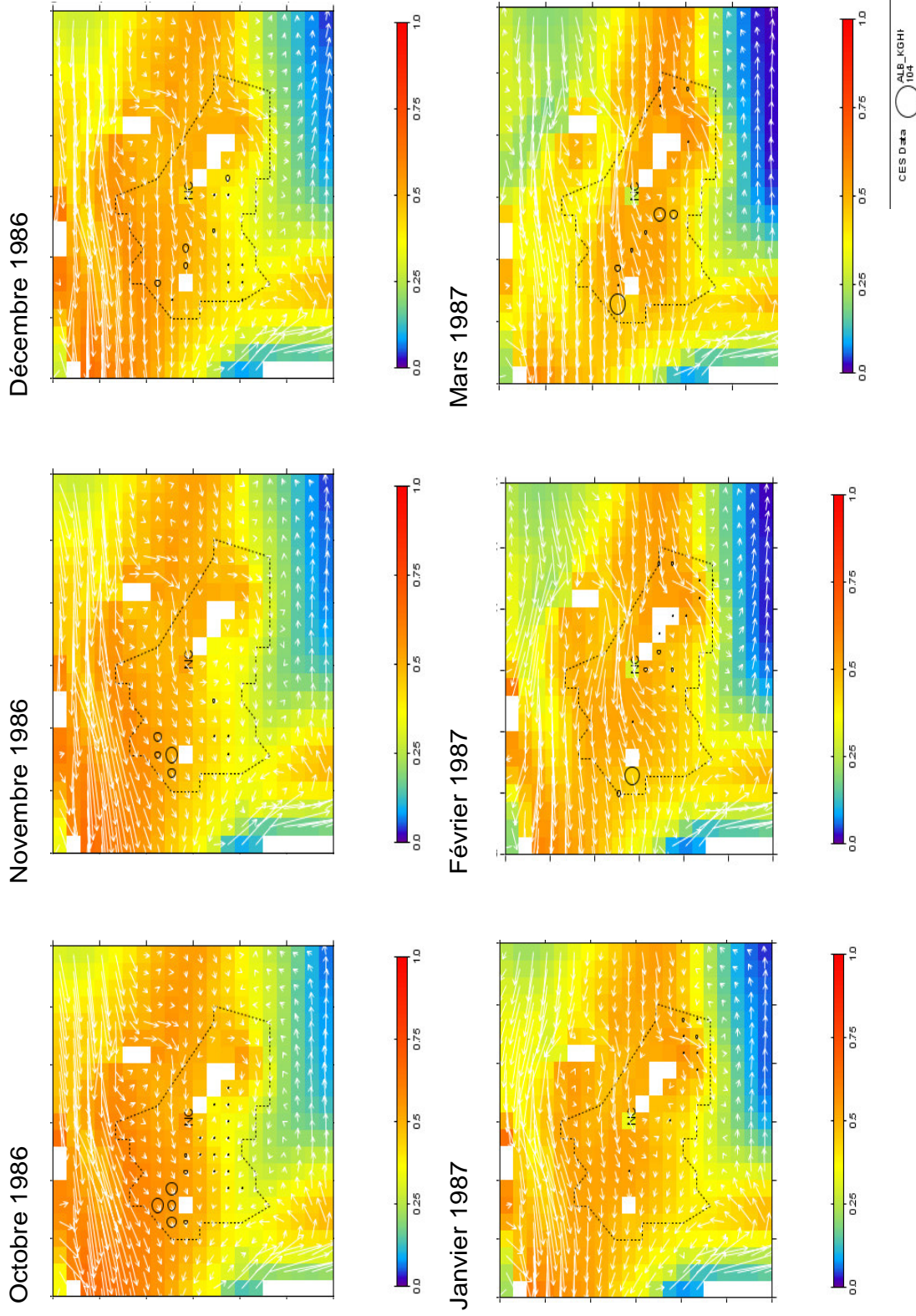


Figure 35a. Distribution des rendements de thon blanc en fonction de la capturabilité et des courants en période El Niño

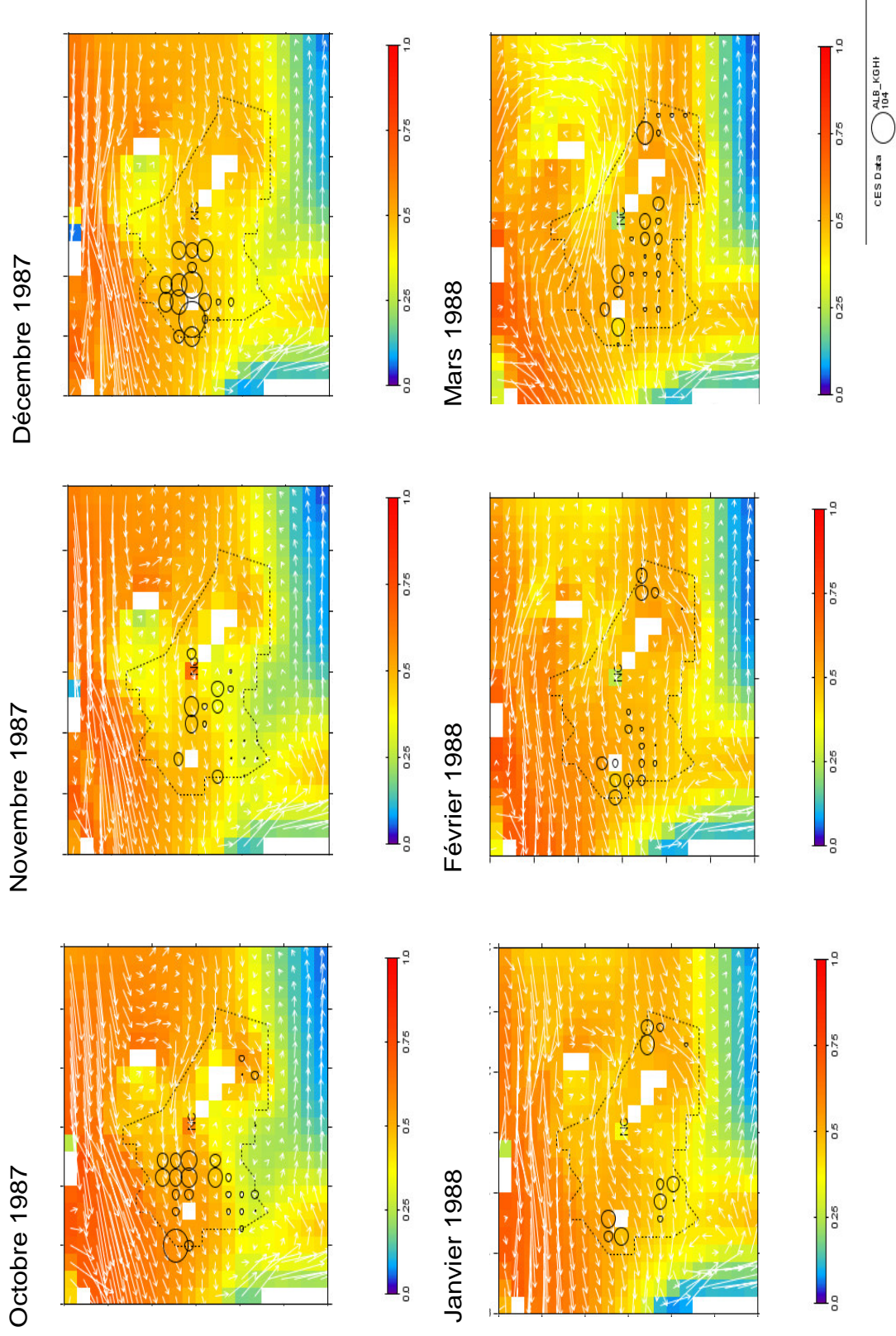


Figure 35b. Distribution des rendements de thon blanc en fonction de la capturabilité et des courants en période El Niño

La période El Niño 86-87 est marquée par une circulation nettement renforcée à partir du mois de janvier 1987, et plus particulièrement dans le nord de la zone, où habituellement l'effet du courant sud équatorial est à son minimum à cette période de l'année. Ce phénomène est de plus combiné à une intensification et une extension de la zone de faible capturabilité au sud (dûe à une augmentation des densités de proies épipelagiques). La capturabilité totale dans la ZEE diminue donc globalement. Il en résulte effectivement des rendements plus faibles que la normale pour les mois observés.

Dans la phase finale du phénomène, d'octobre 1987 à janvier 1988 l'intensité du courant sud équatorial demeure supérieure à la moyenne dans le nord de la zone. Malgré une zone de capturabilité largement diminuée dans l'ensemble, en raison d'une augmentation simultanée des proies épipelagiques dans la zone sud et des proies mésopélagiques dans la zone nord, les rendements de thon blanc dans les zones favorables sont extrêmement élevés comparés à l'année d'avant. Ce résultat suggère que les thons sont sûrement en abondance supérieure à la normale, vraisemblablement attirés par l'augmentation des proies dans la zone, ou/et parce que le courant sud équatorial intense a favorisé leur concentration dans ces régions. Les rendements continuent ensuite à être élevés les mois suivants avec un maximum en décembre. Il existe une bonne corrélation entre la distribution des PUE maximales et l'indice de capturabilité.

Février et mars 1988 constituent la phase de transition vers le phénomène La Niña. De janvier à mars, l'indice de forte capturabilité s'étend dans la ZEE (car les proies diminuent) et le courant dans la zone reste intense. Des rendements élevés sont observés, même au sud-est de la ZEE, alors que les rendements y sont habituellement plus faibles que la moyenne.

Ainsi, il semblerait que l'augmentation générale des rendements de thon albacore observée pour les années El Niño 86-87 soit dûe aux effets combinés d'une augmentation de la biomasse totale de proies et d'une augmentation du courant sud équatorial. L'augmentation de proies dans la zone justifie que les thons blancs soient en nombre supérieur car ils sont attirés par les zones où la concentration en proie est élevée. Cependant on remarque que même dans de bonnes conditions de densité de proies, les rendements n'augmentent que s'il y a un renforcement du courant sud équatorial au nord de la ZEE. Les courants semblent donc jouer un rôle majeur dans la migration des thons blancs et leur abondance dans la zone. Notamment, l'intensification du courant sud-équatorial peut favoriser à la fois la migration des thons dans la zone et la concentration des proies.

Effet La Niña

Nous avons étudié la période La Niña 1998-2000 qui faisait suite au fort El Niño de 1997-1998. Les effets environnementaux durant cette période sont reproduits sur la figure 36 (a et b) avec les rendements correspondants.

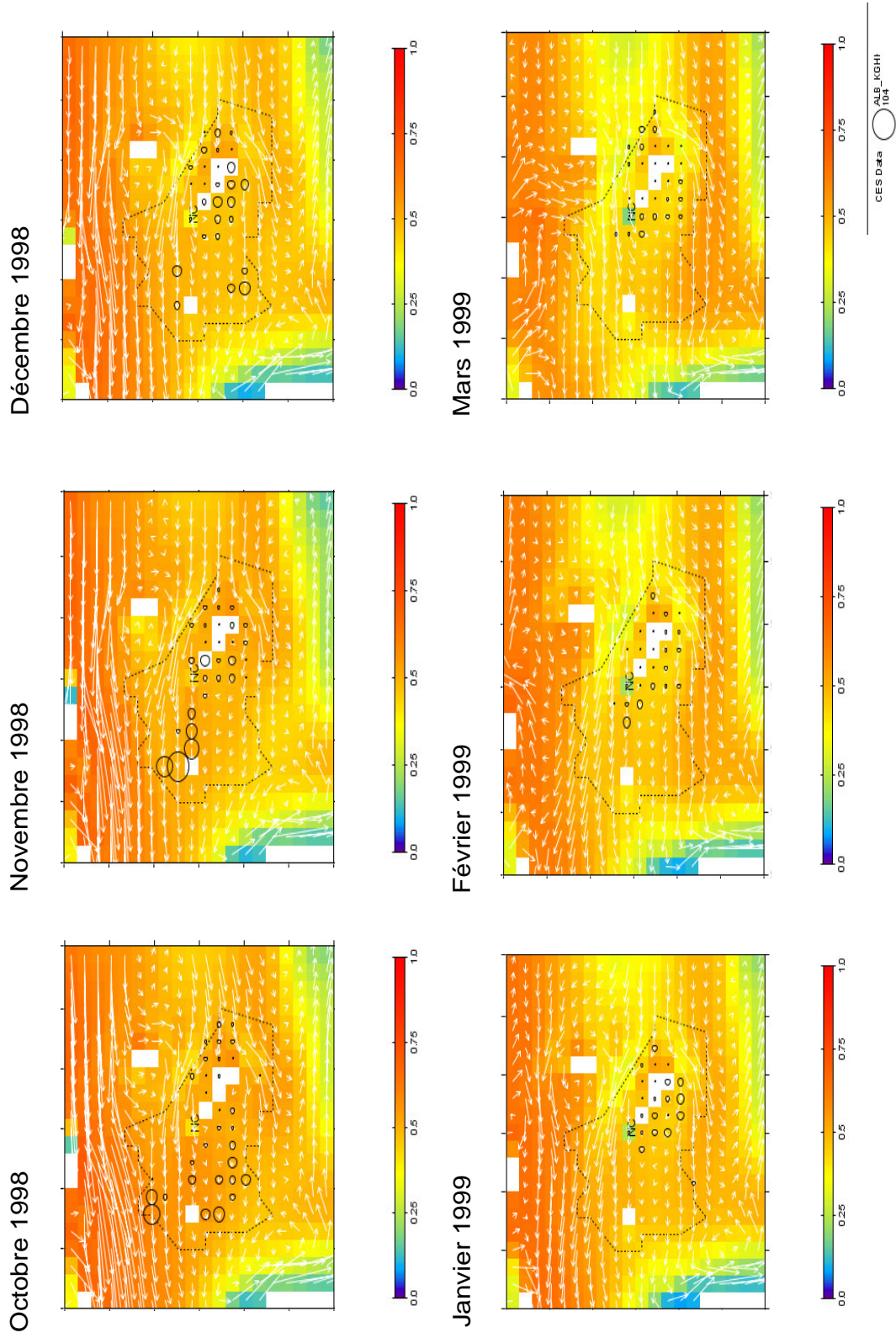


Figure 36a. Distribution des rendements de thon blanc en fonction de la capturabilité et des courants en période La Niña

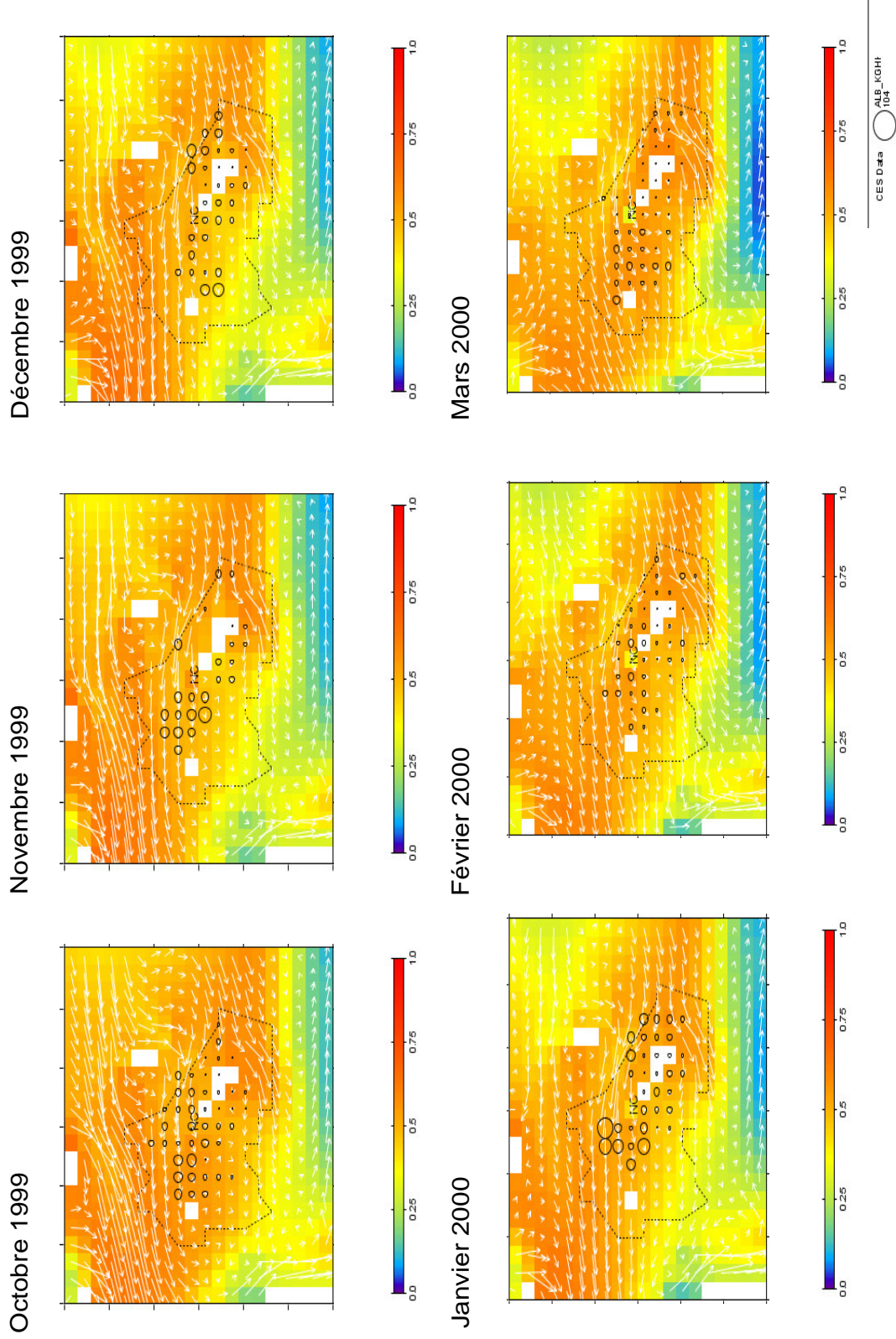


Figure 36b. Distribution des rendements de thon blanc en fonction de la capturabilité et des courants en période La Niña

Le début de la période La Niña 98-99 est marqué par des courants plus importants que la normale dans la ZEE d'octobre 1998 à janvier 1999. Ce phénomène est associé à une abondance anormalement faible de proies épipelagiques dans la zone sud qui produit une augmentation de l'indice de capturabilité. On observe effectivement des rendements plus élevés que d'habitude en octobre dans cette région sud. A partir de janvier, le courant sud équatorial diminue très largement dans la zone. La densité de proie continue également de diminuer en deçà du seuil minimum à partir duquel l'indice de capturabilité chute. Ces deux phénomènes peuvent expliquer la diminution nette des rendements pour les mois de février et mars 1999.

A partir d'octobre 1999, l'intensité du phénomène La Niña diminue et la situation tend à redevenir « normale ». On retrouve les caractéristiques décrites pour une année moyenne.

CONCLUSION

Cette étude confirme que la variabilité des captures fait intervenir des interactions de nombreux paramètres à différentes échelles. La variabilité spatio-temporelle a un impact majeur sur les captures des différentes espèces et doit donc être prise en compte. Il apparaît que l'environnement peut expliquer une grande part de la variabilité des captures, du fait des changements hydroclimatiques saisonniers, des effets directs ou indirects des phénomènes ENSO sur la zone, et d'une hétérogénéité spatiale de la niche écologique.

Les différentes espèces étudiées ne recherchent pas le même type d'habitat. Leurs réponses aux changements de l'environnement seront donc différentes. A grande échelle, leur présence dans la zone va dépendre en grande partie de la température. D'une manière générale, les espèces tempérées tels que le thon germon seront plus abondantes quand les températures sont froides (phénomène El Niño), tandis que les espèces tropicales telles que le thon jaune et le thon obèse seront plus abondantes en période chaude (phénomène La Niña) (Lagitoto Helu, 2004).

A plus petite échelle, leur distribution va être déterminée par des structures physiques et biologiques plus petites, tels que le déplacement d'isothermes en surface, la mise en place de fronts thermiques, la profondeur de thermocline, la couleur de l'eau et la présence de proies (Maury, 2001). Là encore, face à ces phénomènes les espèces réagissent différemment en fonction de leur physiologie et de leur adaptation à l'habitat.

Ainsi, d'après les résultats de notre étude, le thon blanc est avant tout sensible aux déplacements des masses d'eau (isothermes) en surface. Le thon jaune est sensible aux températures à l'intérieur de la couche intermédiaire tandis que le thon obèse qui est le mieux adapté aux variations de température semble être plus sensible à la production primaire. La concentration de proies dans le milieu a également une importance capitale pour la pêche. Bien que les thons aient tendance à se regrouper aux endroits où la densité de proies est la plus forte, leur comportement face à l'appât est directement lié à la

densité de proies elle-même. En effet, la concentration de proies dans le milieu va déterminer le niveau de réplétion des thons et va donc avoir un impact direct sur les taux de mordage aux appâts. L'ensemble de ces paramètres doit donc être pris en compte lors du ciblage des espèces.

Bien qu'elle ne soit qu'une approximation de la réalité, la modélisation s'est avérée une méthode efficace pour simplifier l'analyse d'un grand volume de données, extraire les tendances et examiner les relations à différentes échelles. Certains résultats obtenus dans cette étude apportent une confirmation forte à des faits déjà avancés par d'autres études. L'ensemble de ces résultats peut donc être une base à une meilleure gestion de la pêcherie palangrière calédonienne et pourrait également être appliqué à d'autres pêcheries. Il serait intéressant de poursuivre l'analyse avec des prédictions des l'environnement physique (température courants) et biologique (production primaire, proies) plus détaillées et réalistes (utilisant par exemple l'assimilation de données).

Références bibliographiques

- Alonso, C., Arrizabalaga, H., Restrepo, V.R. 2005. Contribution of a chapter on albacore tuna for the revised ICCAT field manual. Col. Vol. Sci.Pap. ICCAT, 58 (5): 1646-1661
- Bailey, N.K. 1980. Synopses of biological data on eight species of scombrids. No. Special Report N°2.
- Bertignac, M., Lehodey, P., and Hampton, J. 1998. A spatial population dynamics simulation model of tropical tunas using a habitat index based on environmental parameters. Fish.Oceanogr. 334 pp.
- Bertrand, A., Josse ,E., Bach, P., Gros, P., and Dagorn, L. 2002. Hydrological and trophic characteristics of tuna habitat: Consequences on tuna distribution and longline catchability. Can.J.Fish.Aquat.Sci., **59** : 1002-1013.
- Bour,W., Marcille, J., and Rebert, J.-P. 1981. Pêche thonière et conditions hydrologiques dans le Pacifique tropical Ouest. Pêche Marit., **1245**: 752-758.
- Christian, J., M. Verschell, R. Murtugudde, A. Busalacchi, and C. McClain, 2002. Biogeochemical modeling of the tropical Pacific Ocean I: Seasonal and interannual variability. Deep Sea Res. II, **49**: 509-543
- Delcroix, T. 1993. Seasonal and interannual variability of sea surface temperatures in the Tropical Pacific, 1969-1991. DEEP-SEA RES.(A OCEANOGR.RES.PAP.): 2217-2228.
- Delcroix, T. and Lenormand, O. 1997. ENSO signals in the vicinity of New Caledonia, south western Pacific. Oceanologica Acta, **20**: 481-491.
- Dupouy, C. 1990. Surface chlorophyll observed by NIMBUS-7 satellite in an archipelago (New Caledonia, Vanuatu). A preliminary analysis. *In* Halieutique, océanographie et télédétection. pp.125-148.
- Etaix-Bonnin, R. 2003. New Caledonia tuna and billfish fisheries. SCTB Working Paper No. NFA-16. Nouméa, Nouvelle Calédonie. 5 pp.
- Fournier, D.A., Hampton, J., and Sibert, J.R. 1998. MULTIFAN-CL: A length-based, age-structured model for fisheries stock assessment, with application to South Pacific albacore, *Thunnus alalunga*. Can.J.Fish.Aquat.Sci./J.Can.Sci.Halieur.Aquat. **55**: 2105-2116.
- Hallier, P. 1984. Longline fishing in the E.E.Z. of New Caledonia (August 1981-December 1983). Rapp. Sci. Tech. (Océanogr.) CENTRE ORSTOM, Nouméa, **31**: 52 pp.
- Hare, S.R. and Mantua, N.J. 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. Prog.Oceanogr., **47**: 103-145.

Hastie, T. and Tibshirani, R. 1990. Generalized additive models. Chapman and Hall, London, U.K.

Henin, C., Guillerm, J.M., and Chabert, L. 1984. Superficial circulation around New Caledonia. *OCEANOGR.TROP.*, **19**: 113-126.

Henin, C. 1999. Thermohaline survey of the EEZ in 1997 and 1998. *Arch.Sci.Mer Oceanogr.Phys.Cent. Nouméa IRD*, **10**: 45pp.

Langitoto Helu, S. 2004. An evaluation of recent trends in albacore catches in the domestic longline fisheries operating in the South Pacific Ocean and the evaluation of a proposed alteration of the area strata presently used in stock assessment for albacore. SCTB17 Working Paper No. SA-8:.

Langley, A. 2002. The western and central Pacific Tuna fishery 2002-Overview and status of stocks. Tuna Fisheries Assessment Report N° 5.

Langley, A. 2004. An examination of the influence of recent oceanographic conditions on the catch rate of albacore in the main domestic longline fisheries. SCTB17 Working Paper No. SA-4. Nouméa, Nouvelle Calédonie.

Larkin, N.K. and Harrison, D.E. 2002. ENSO warm (El Niño) and cold (La Niña) event life cycles: Ocean surface anomaly patterns, their symmetries, asymmetries, and implications. *Journal of Climate*, **15**: 1118-1140.

Legand, M. 1961. Taille, répartition sexuelle, cycle annuel de l'albacore dans l'ouest de la Nouvelle Calédonie. *Pac.Tuna Biol.Conf.*, Honolulu, Aout 1961, Nouméa: ORSTOM (Oceanogr.), **7**: 8 pp.

Lehodey, P. Les monts sous marins de Nouvelle-Calédonie et leur ressources halieutiques. *Etudes et Thèses à l'université française du Pacifique*, Nouméa: ORSTOM : 401 pp.

Lehodey, P. 2000. Impacts of the El Niño Southern Oscillation on tuna populations and fisheries in the tropical Pacific Ocean. SCTB13 Working Paper No. RG-1: 32 pp.

Lehodey, P. 2001. The pelagic ecosystem of the tropical Pacific Ocean: dynamic spatial modelling and biological consequences of ENSO. *Prog.Oceanogr.*, **49**: 439-468.

Lehodey, P., Chai, F., and Hampton, J. 2003. Modelling climate-related variability of tuna populations from a coupled ocean-biogeochemical-populations dynamics model. *Fish.Oceanogr.*, **12**: 483-494.

Lehodey, P. 2004. A Spatial Ecosystem And Populations Dynamics Model (SEAPODYM) for tuna and associated oceanic top predator species: Part I - Lower and intermediate trophic components. SCTB17 Working Paper No. ECO -1: 26 pp.

Lehodey, P. 2004. A Spatial Ecosystem And Populations Dynamics Model (SEAPODYM) for tuna and associated oceanic top-predator species: Part II - Tuna populations and fisheries. SCTB17 Working Paper No. ECO-2: 36 pp.

Lehodey, P. 2005. Reference manual for the Spatial Ecosystem And Populations Dynamics Model. First meeting of the scientific Committee of the Western and Central Pacific Fisheries Commission WCPFC- No. SC1: 54 pp.

Lenormand, O. 1995. Have climatic anomalies associated to ENSO an impact round about New-Caledonia? *Aquilo, Series Zoologica*. 52 pp.

Marsac, F. and Leblanc, J.-L. 1998. Interannual and ENSO-associated variability of the coupled ocean-atmosphere system with possible impacts on the yellowfin tuna fisheries of the Indian and Atlantic Ocean. *ICCAT Collection Volume of Scientific Papers L(1)*: 345-377.

Maury, O., Gascuel, D., Marsac, F., Fonteneau, A., and De Rosa, A.L. 2001. Hierarchical interpretation of nonlinear relationships linking yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) distribution to the environment in the Atlantic Ocean. *Can.J.Fish.Aquat.Sci.*, **58**: 458-469.

Mc Gowan, J.A., Cayan, D.R., and Dorman, L.M. 1998. Climate-ocean variability and ecosystem response in the northeast Pacific. *Science*, **281**: 210-217.

R Development Core Team. 2004. R: a language and environment for statistical computing, V.2.0.1, Copyright, 2004.

Rasmusson, E. and Wallace, J.M. 1983. Meteorological aspects of the El Niño/Southern Oscillation. *Science*, **222**: 1195-1202.

Rougerie, F. 1986. Le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie: spécificité hydrologique, dynamique et productivité. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération. Etudes et Thèses, ORSTOM, Paris: 233 pp.

Stenseth, N.C., Mysterud, A., Ottersen, J.W., Hurrell, J.W., Chan, K.S., and Lima, M. 2002. Ecological effects of climate fluctuations. *Science*, **297**: 1292-1296.

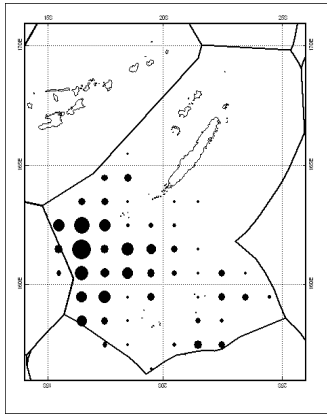
Stenseth, N. C., Ottersen, J. W., Hurrell, J. W., Mysterud, A., Lima, M., Chan, K. S., and Yoccoz, N. G. 2005. Studying climate effects on ecology through the use of climate indices: The North Atlantic Oscillation, El Niño Southern Oscillation and beyond. *Biological Sciences of the royal Society*, **270**: 2087-2096.

Suarez Sanchez, J., Ritter Ortiz, W., Gay Garcia, C., and Torres Jacome, J. 2004. ENSO-tuna relations in the eastern Pacific Ocean and its prediction as a non-linear dynamic system. *Atmosfera*, **17**: 245-258.

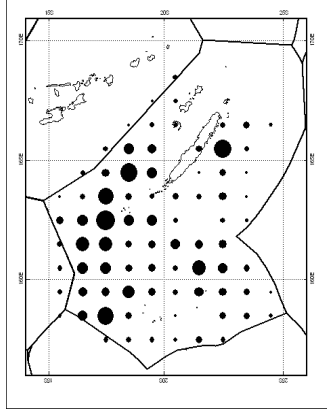
Virly, S. 1996. Synthèse halieutique des données thonières de la zone économique de Nouvelle Calédonie (années 1956-1994). Rapport Zonéco, Nouméa, Nouvelle Calédonie : 215 pp.

Annexe 1. Distribution inter-annuelle de l'effort de pêche de la flotille japonaise dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie

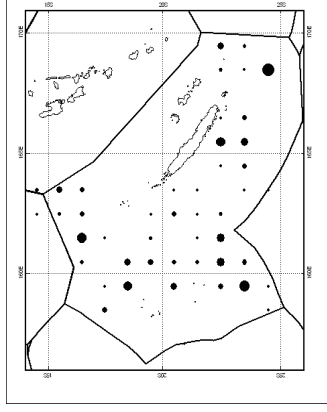




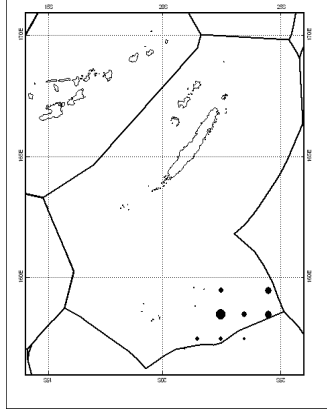
1994



1995

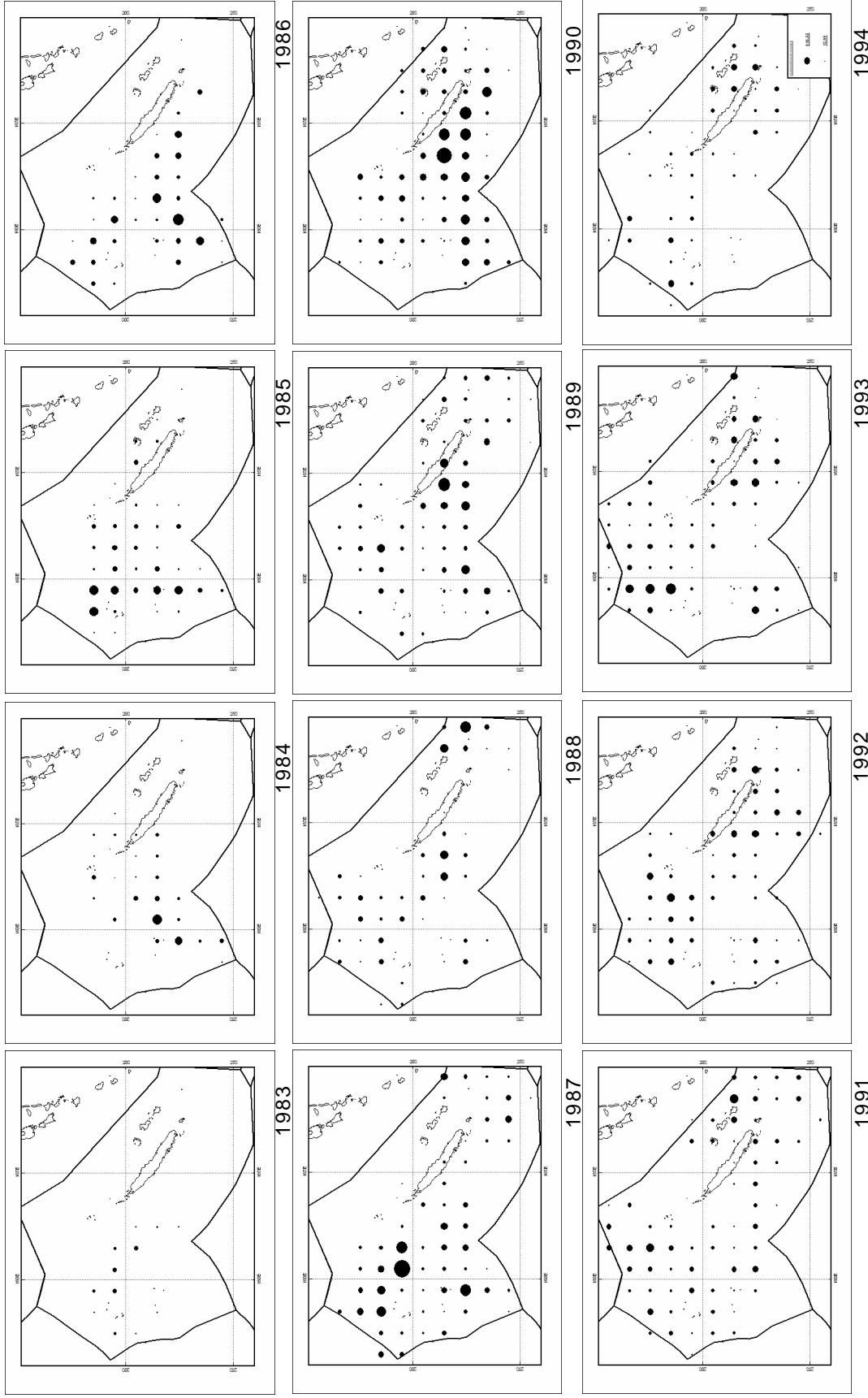


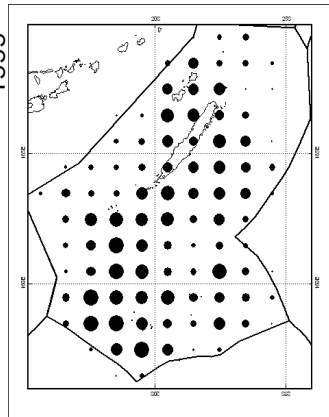
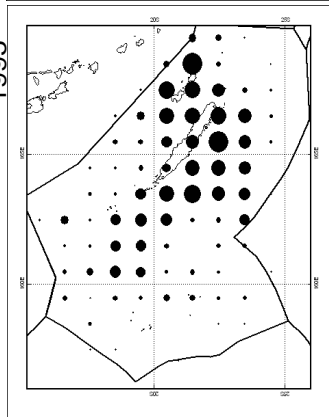
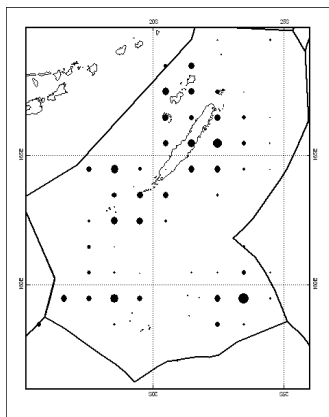
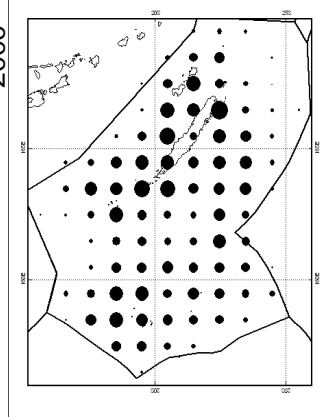
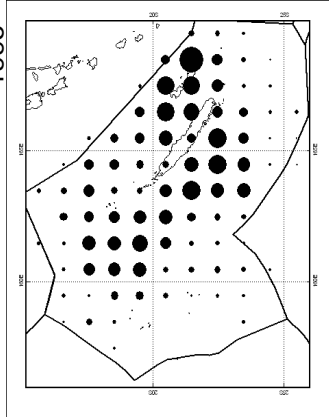
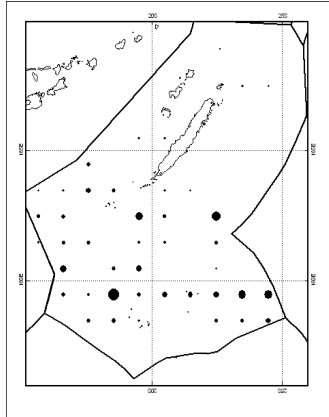
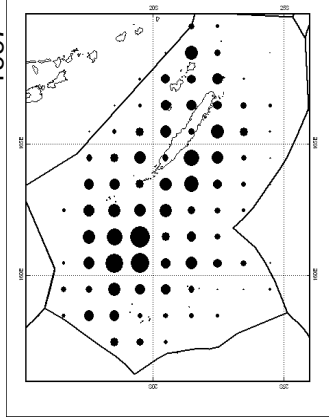
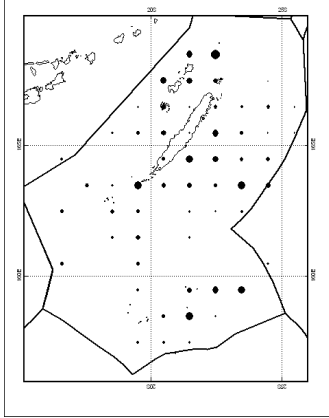
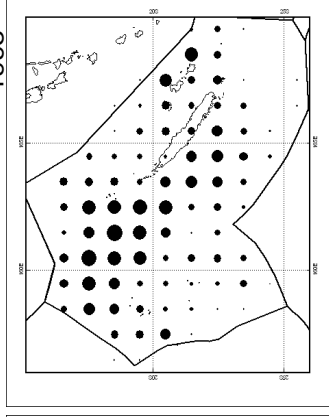
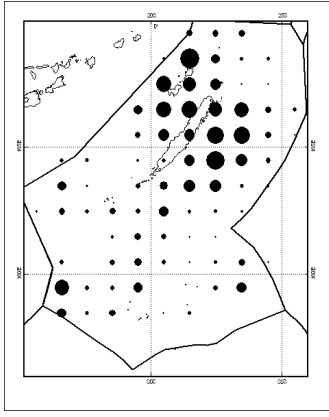
1996



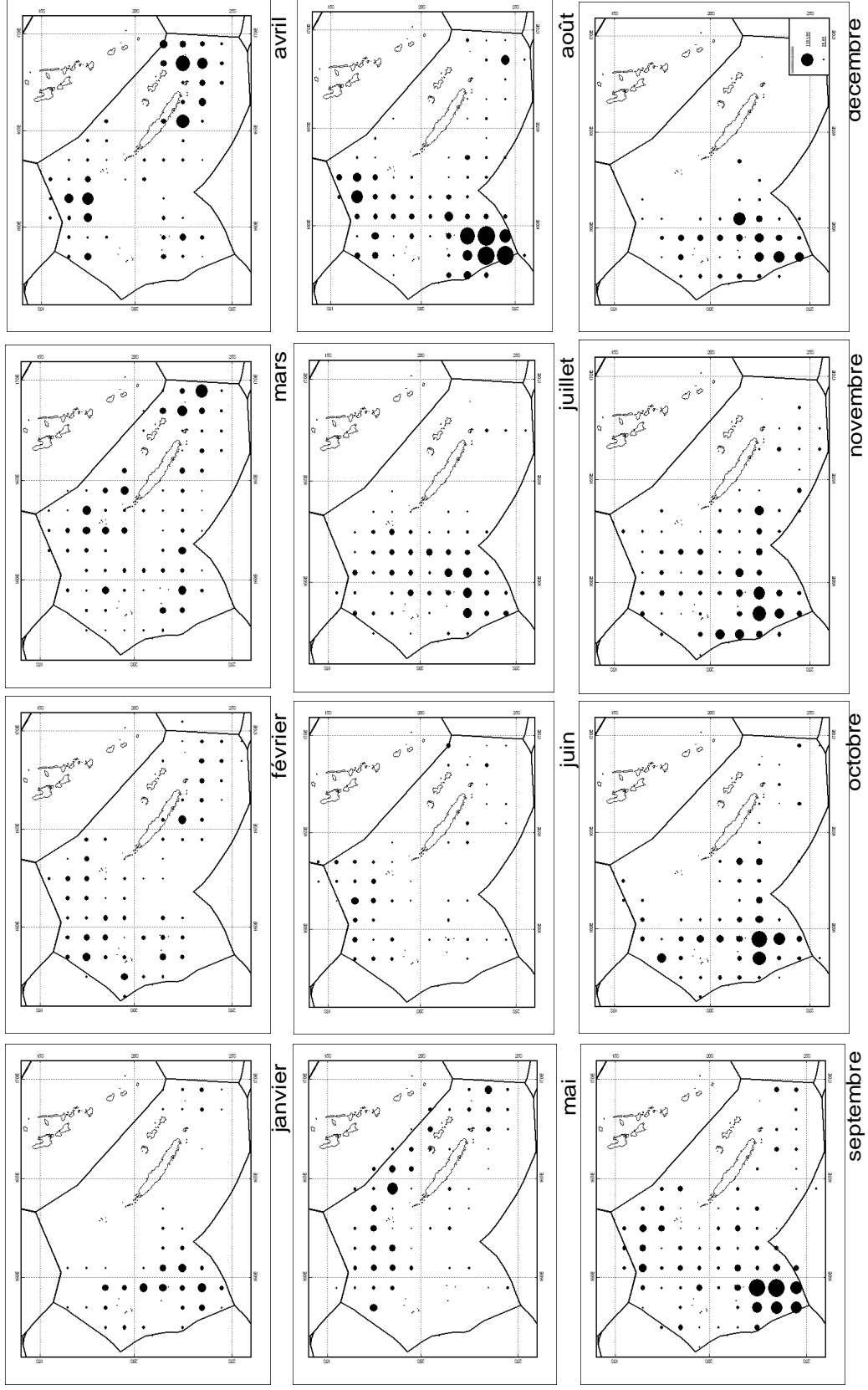
1997

Annexe 2. Distribution inter-annuelle de l'effort de pêche de la flottille calédonnienne dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie

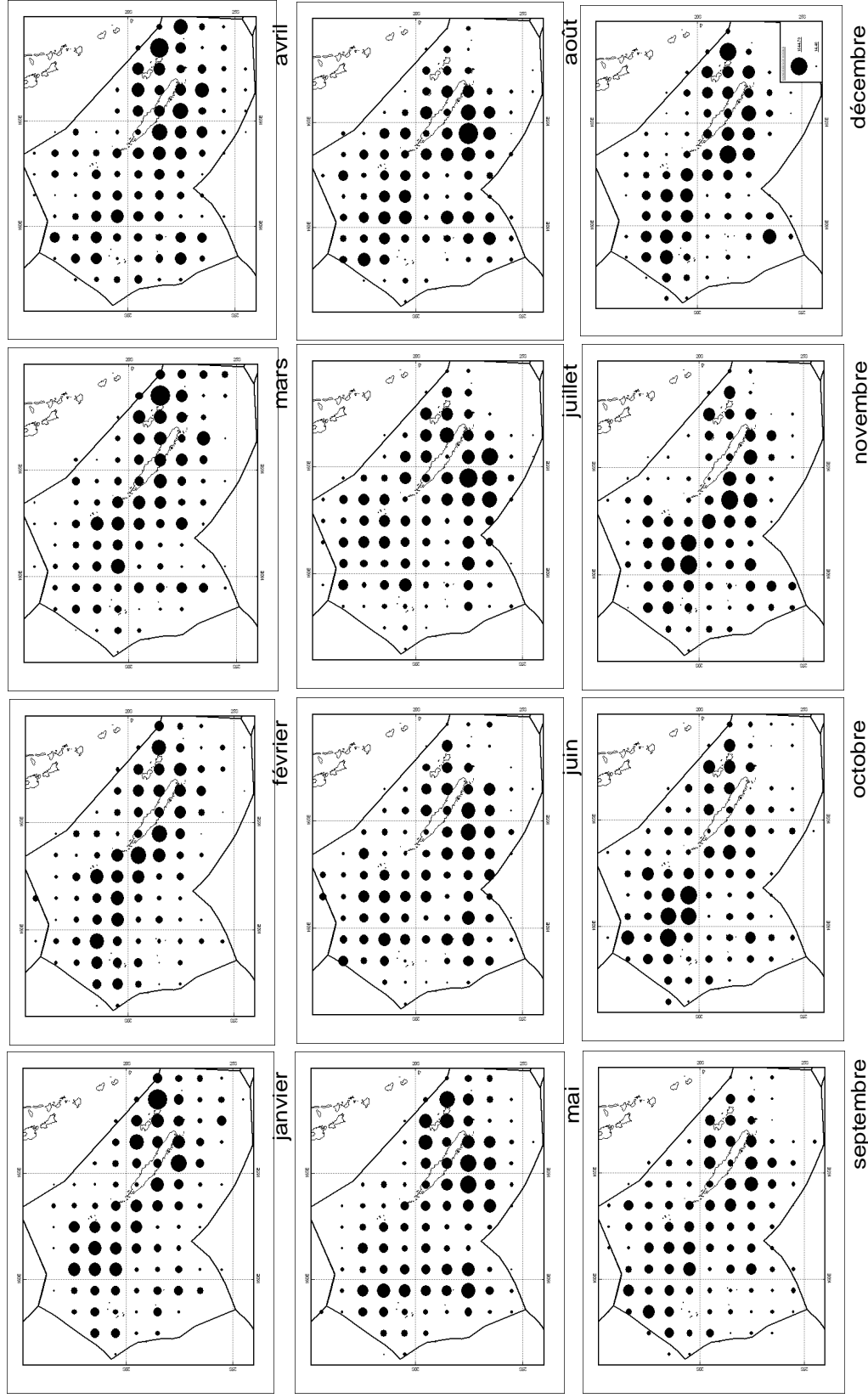




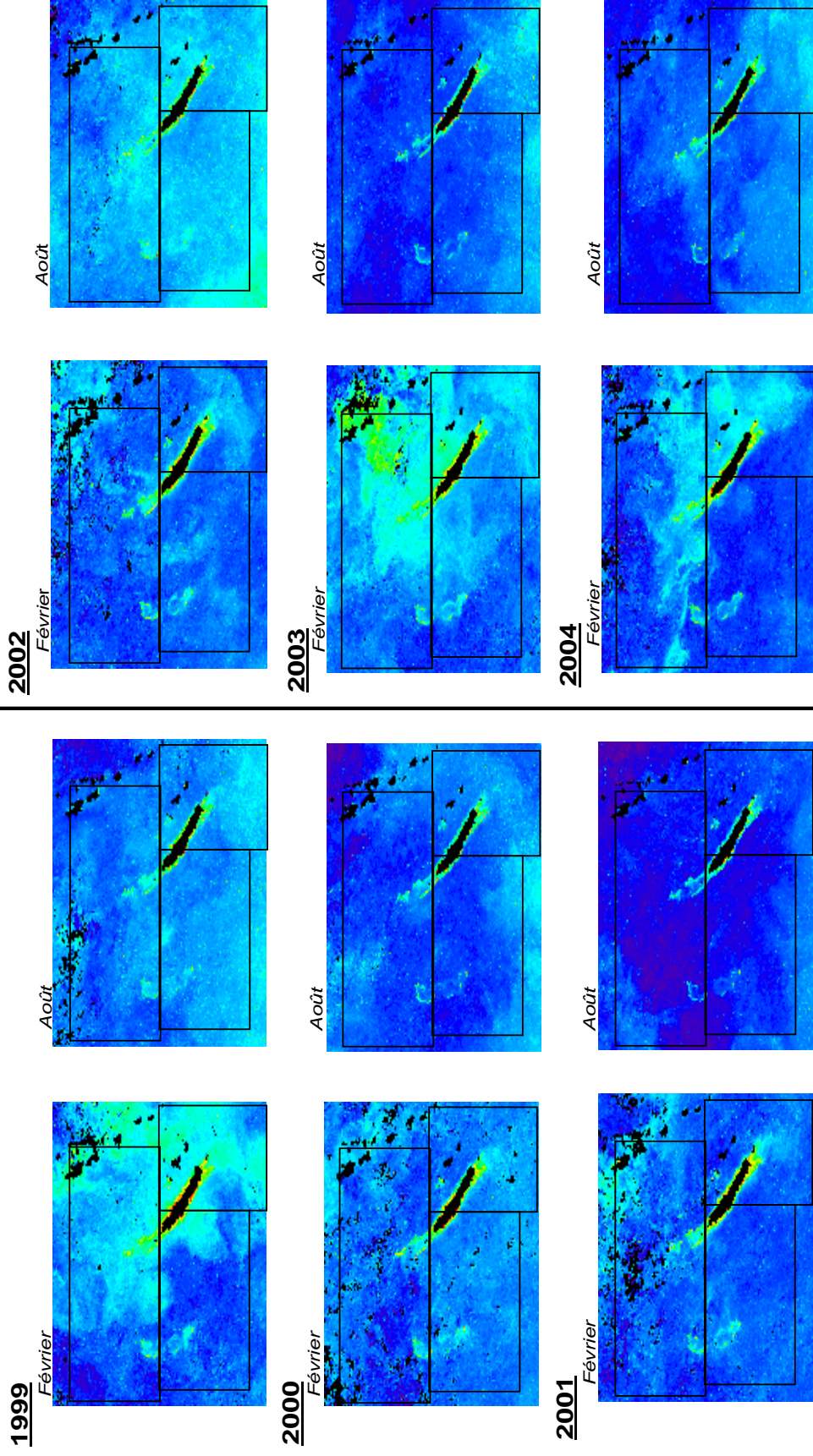
Annexe 3. Distribution mensuelle de l'effort de pêche japonaise dans la ZEE de Nouvelle Calédonie



Annexe 4. Distribution mensuelle de l'effort de pêche calédonien dans la ZEE de Nouvelle Calédonie

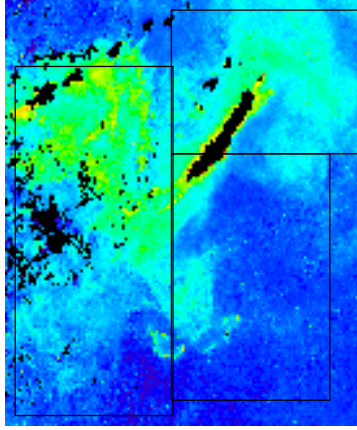


Annexe 5. Distribution interannuelle de chlorophylle *a* évalué par satellite (données SeaWiifs) dans la zone étudiée pour les mois de février et aout sur la période 1998-2004. La couleur verte indique les cellules chlorophylliennes.

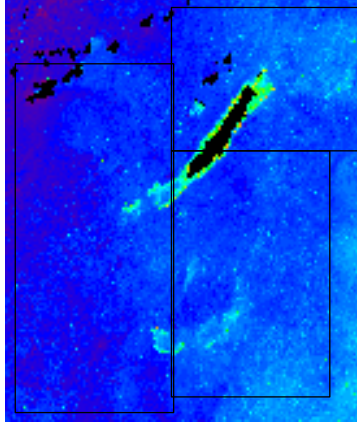


Annexe 5. (suite) Mise en évidence d'une situation "particulière" en 1998

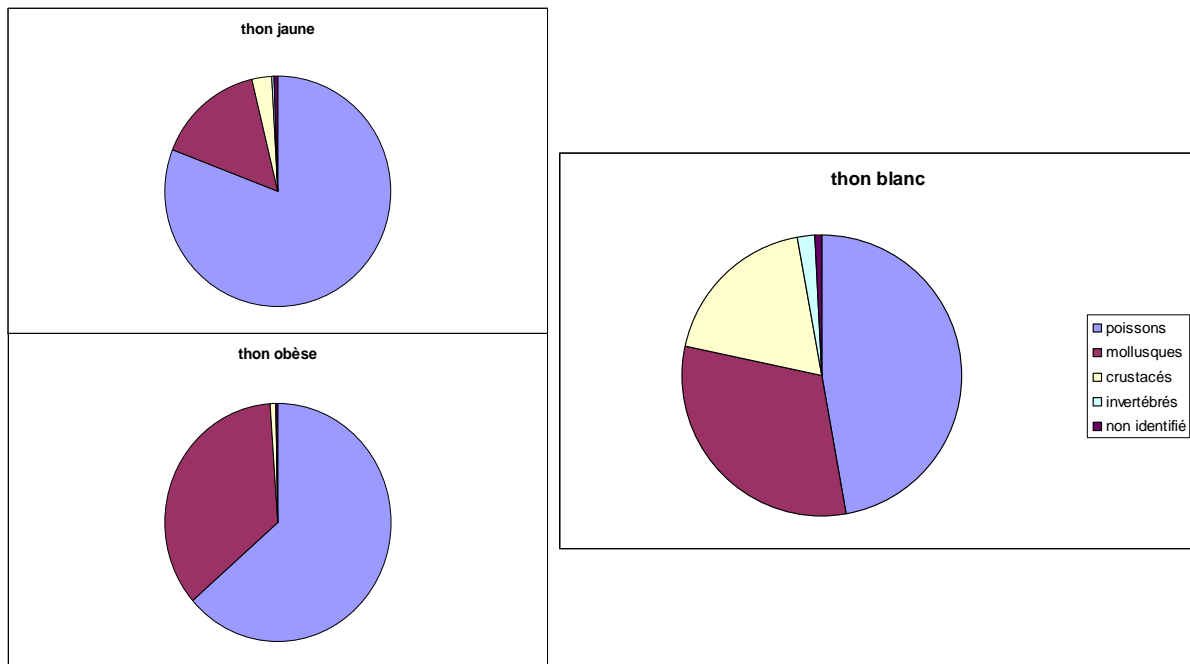
Février 1998 (El Niño)



Août 1998 (La Niña)



Annexe 6. Alimentation des différentes espèces de thons dans la ZEE de Nouvelle Calédonie (données fournies par V. Allain, CPS)



Exemples de proies trouvées dans les estomacs de thons :

- **Poissons** : Poisson volant, poissons lancette, brême, escolier, carangue, wahoo, daurade coryphène, barracudina profond, poisson ballon, rascasse, poisson lune, dawa, thons (bonites)...
- **Mollusques céphalopodes** : calmars, juvéniles de poulpes
- **Crustacés** : euphausides, squilles, mysidas, crevettes, larves de langouste et de crabe.
- **Invertébrés** : Vers polychètes pélagiques

