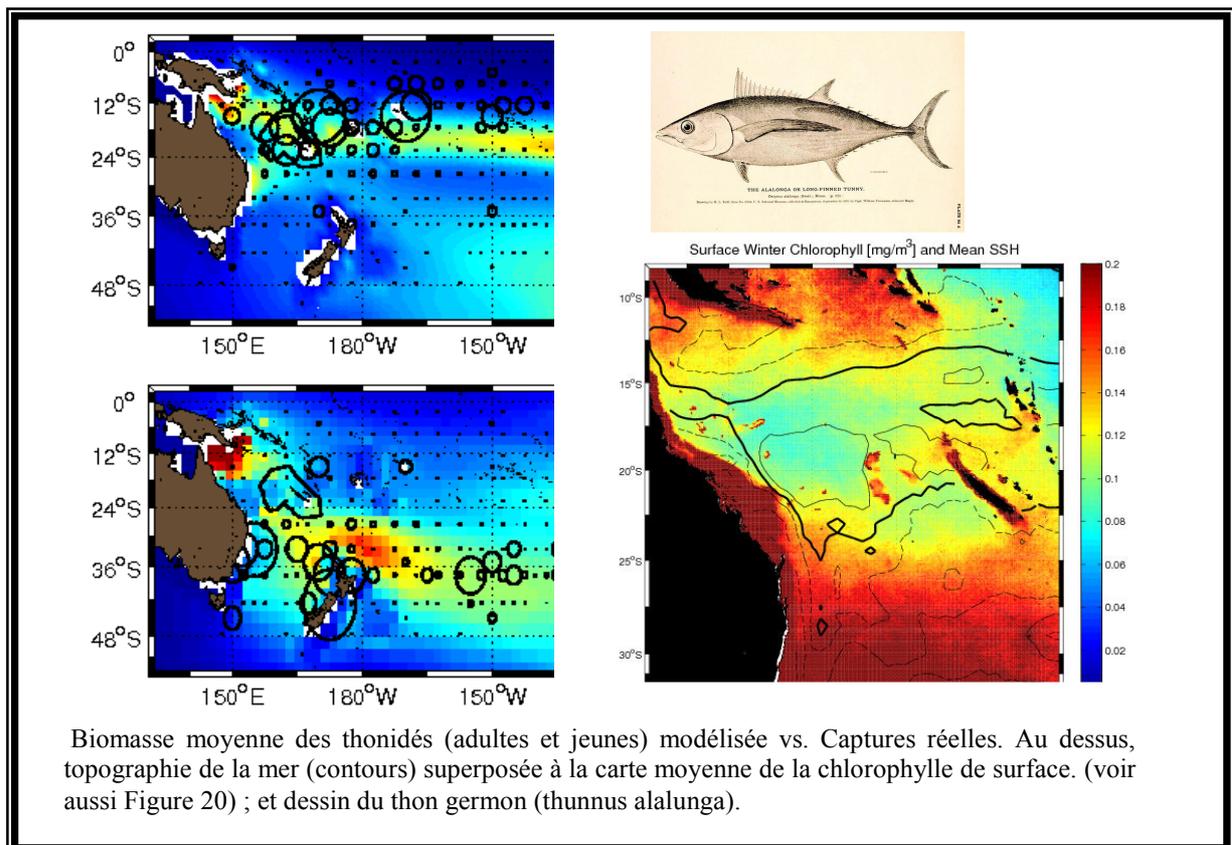


Impact des conditions écologiques sur la distribution des ressources thonières : une étude intégrée d'observation/modélisation dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie



Rapport final

Patrick Marchesiello

Co-auteurs :

IRD : Vincent Faure, Christophe Menkes, Robert LeBorgne, Martine Rodier, Jérôme Lefèvre, Francis Gallois

CPS : Xavier Couvelard, Simon Nicol, Karine Briand, Fabrice Bouyé

CLS : Inna Senina, Patrick Lehodey

Nouméa, le 29 May 2009

SYNTHESE DES RESULTATS	3
ABSTRACT	5
1. INTRODUCTION GENERALE	7
<u>PARTIE I : DYNAMIQUE ET BIOGEOCHIMIE</u>	9
2. Méthodes	9
2.1. Le modèle hydrodynamique: ROMS.....	10
2.2. Le modèle biogéochimique: PISCES.....	10
2.3. Données de terrain.....	12
3. Validation et analyse du modèle: grandeur moyenne et cycle saisonnier	15
3.1. Variables physiques.....	15
3.2. Variables biogéochimiques.....	19
3.3. Comparaison avec les données synoptiques de ZONALIS.....	28
4. Variabilité de la production primaire et mécanismes d'enrichissement des eaux de surface	31
5. Conclusion de la partie I	34
<u>PARTIE II: LE THON GERMON et ses PROIES</u>	36
6. Le thon germon dans le Pacifique Sud	36
6.1. Introduction.....	36
6.2. Le sous-modèle des proies du thon.....	36
6.3. Le modèle SEAPODYM appliqué au thon germon.....	39
6.4. Les équations d'évolution du Thon.....	40
6.5. Le modèle d'habitat.....	41
6.6. Analyse de la biomasse prédite.....	46
6.7. Analyse des captures prédites.....	49
6.8. Migrations saisonnières.....	51
7. Régionalisation : la ZEE calédonienne	53
7.1. Méthode d'emboîtement.....	53
7.2. Résultats et discussion : fenêtre optimale des proies.....	54
8. CONCLUSION GENERALE	59
References	61

SYNTHESE DES RESULTATS

L'objectif de cette étude est de mieux identifier les paramètres environnementaux qui déterminent la distribution et la dynamique de population des thons germon dans le Pacifique sud-ouest. Le but à plus long terme est de fournir des outils de connaissance et de surveillance pour une meilleure gestion des ressources marines. Dans cette étude, nous avons implémenté et développé une chaîne de modèles de la physique au thon suivant une approche écosystémique. Nous avons adapté un plusieurs paramètres existant et développé une capacité de raffinement de la résolution. Cela a nécessité une étude préalable de l'écosystème planctonique et des cycles biogéochimiques qui a conduit à des résultats nouveaux sur le fonctionnement de cette région oligotrophique. Les résultats du modèle intégré jusqu'au thon sont également très encourageants bien qu'un certain nombre de questions se posent encore et un travail de raffinement des paramétrisations restent à faire, notamment à l'échelle régionale.

Notre étude du couplage physique-biogéochimie a mis en évidence le rôle primordial de la circulation régional dans le Pacifique sud-ouest. La circulation anticyclonique de surface qui encercle la Nouvelle-Calédonie et la mer de Corail est façonnée par la présence des îles et par le contre-courant subtropical au sud. Celui-ci est produit par la dérive du aux alizés des eaux tropicales légères au-dessus des eaux subtropicales plus lourdes, qui forment une zone frontale à environ 25°S. Cette zone est une limite entre des régimes de production primaire différents. Au nord, la circulation anticyclonique centrée entre 15-20°S produit une dépression de la thermocline et de la nutricline qui est particulièrement défavorable à la production primaire. En revanche, la présence d'eau chaude dans cette région est favorable à l'habitat de ponte des poissons. L'imagerie satellitale corrobore en partie cette anomalie de production primaire, mais c'est en profondeur qu'apparaît le plus clairement l'anomalie régionale. Le modèle montre que la profondeur de nutricline est telle que le mélange hivernal ne parvient pas à enrichir les eaux de surface autour de la Nouvelle-Calédonie. De même en été, l'upwelling calédonien parvient à atteindre la thermocline saisonnière mais pas la nutricline, ce qui explique la faible réponse de l'écosystème à ces événements récurrents. Cela participe d'un découplage entre thermocline saisonnière et nutricline qui est assez singulier mais parfaitement explicable par le fait que la zone euphotique est toujours plus profonde que la thermocline saisonnière. Les données de campagnes de l'IRD, et plus particulièrement celles de la campagne ZONALIS, menée dans le cadre du projet ZoNéCo, confirment très bien ce résultat important du modèle.

A l'échelle du Pacifique Sud, le modèle de thon présente des résultats très encourageants mais plus difficiles à valider. Il existe très peu d'information par exemple sur le micronecton. Les erreurs éventuelles des distributions spatiales et temporelles données par le modèle sont donc difficile à évaluer. La structuration de départ des 6 classes de micronecton semble influencer les résultats. Par exemple, la dominance du micronecton migrant bathypélagique peut mener à des résultats contre intuitifs de faible productivité sur les hauts-fonds. Néanmoins, la modélisation du micronecton semble fournir un échelon intermédiaire adéquat pour le thon germon dont la biomasse modélisée présente de fortes corrélations avec les captures réelles. Il s'agira néanmoins dans le futur de mieux valider ce compartiment.

Pour les thons adultes, les zones de capture réelles coïncident avec leur habitat moyen modélisé qui est par ailleurs bien représenté par l'intersection des habitats favorables d'alimentation et de ponte entre 10°S et 25°S. La Nouvelle-Calédonie étant situé à l'intérieur de cette zone d'intersection, bénéficie donc d'un environnement favorable pour les thons adultes, particulièrement en période hivernale pour la reproduction. Les adultes migrent en effet au rythme de la saison mais cette migration se limite à environ 40°S, car plus au sud les gradients d'habitat deviennent trop faibles. Une zone de maximum relatif de la biomasse est néanmoins présente au sud de 40°S mais semble

correspondre à un artefact du modèle qui ne peut pas permettre aux recrues des hautes latitudes de migrer. C'est sans doute un point du modèle qu'il faudra revoir.

Pour les thons jeunes, la coïncidence entre biomasse modélisée et capture réelle est également satisfaisante à ces échelles. Le déplacement pour les jeunes est lié aux changements saisonniers de l'habitat d'alimentation, ce qui reste mineur devant la migration des adultes vers l'habitat de ponte. L'habitat d'alimentation tend à concentrer les jeunes autour de la Nouvelle-Zélande. Cela est vrai pour la biomasse modélisée comme pour les captures réelles. Néanmoins, le modèle ne présente pas de déplacement zonal des jeunes comme le suggère les captures, et cela pose quelques questions, soit sur l'incapacité du modèle à représenter une possible migration, soit sur les conditions de pêche qui peuvent varier avec la saison.

A l'échelle régionale, notre raffinement de maillage a ouvert d'autres portes et posé d'autres questions. Les résultats du modèle montrent par exemple un phénomène compatible avec la théorie de fenêtre optimal de concentration de proies pour la capturabilité du thon. En effet, les captures réelles semblent coïncider avec des valeurs intermédiaires de concentration de proies, plutôt qu'avec les maxima. Ceci peut-être expliquer par la préférence supposée des thons pour les proies vivantes quand elles sont en abondances. Ce point est probablement à étudier de manière plus approfondie.

A l'échelle régionale également, les températures épi- et mésopélagiques sont particulièrement chaudes dans la région calédonienne, à cause de la dérive des eaux tropicales de surface vers le sud et de l'impact plus profond de la circulation régionale anticyclonique. Ces eaux chaudes ont un impact important sur l'habitat de ponte et d'alimentation et contribue largement à expliquer la présence du thon dans cette région. A l'inverse, sa faible productivité primaire semble peu contribuer à l'habitat du thon. Cependant, les concentrations locales de proies semblent plus influencées par les processus de convergence/divergence des courants en interaction avec les îles que par la distribution spatiale du phytoplancton. Ceci tend à invalider la pertinence des images satellites de couleur de l'eau pour les activités de pêche.

Au final, il nous semble que le système de modèles que nous avons mis en place est pertinent pour la compréhension des concentrations de thons germon à grande échelle. Dans le temps imparti, nous nous sommes essentiellement limité à comprendre les distributions moyennes et saisonnières à cette échelle et il reste à explorer le rôle des grandes variabilités climatiques comme El Niño. Aux échelles régionales que nous avons abordées en fin de projet, il nous reste des progrès à faire dans l'ajustement des paramètres des modèles et pour comprendre le fonctionnement du système à plus fine échelle. Cependant, le modèle a révélé la contribution probable des îles dans la structuration du micronecton à l'échelle régionale. Pour la suite, il nous semble pertinent d'axer une partie de l'effort futur sur une meilleure compréhension de la dynamique des proies du thon et du modèle correspondant.

ABSTRACT

The objective of this study is to better identify the environmental parameters which determine the distribution and population dynamics of albacore tuna in the south-western Pacific. The longer-term goal is to provide tools of knowledge and monitoring for a better marine stock management. In this study, we implemented and developed a chain of models for an ecosystemic approach to tuna fisheries. We adapted the existing parameters and developed a capacity of refinement of the model resolution. That required a prior study of the plankton ecosystem and biogeochemical cycles which led to new results on the functioning of this oligotrophic region. The results of the tuna model are also very encouraging although a certain number of questions still need to be addressed and further refinement of the parameterizations are required, in particular at the regional scales.

Our study of the physical-biogeochemical coupling highlighted the central role of regional circulation in the southwest Pacific. The surface anticyclonic circulation which surrounds New Caledonia and Coral Sea is structured by the presence of its tropical islands and by the subtropical counter-current. This current is produced by the southward transport by the trade winds of light tropical water over heavier subtropical water, which forms a frontal region around 25°S, which is an important limit separating different primary production regimes. North of this limit, the anticyclonic circulation centered around 15-20°S produces a zone of depression of the thermocline and nutricline which is unfavorable to primary production, although the warm surface water has a favorable contribution to the spawning fish habitat. The satellite imagery partly confirms an anomaly of primary production in the anticyclonic zone, although it appears most clearly at depth in the model. Our analysis shows that the nutricline depth is so depressed that winter mixing cannot manage to enrich the surface waters around New Caledonia. Similarly in summer, the New Caledonia upwelling manages to reach the seasonal thermocline but not the deeper nutricline, which explains the weak response of the ecosystem to these recurring events. That reveals a decoupling between seasonal thermocline and nutricline which is rather singular but perfectly explainable by the fact that the euphotic zone is always deeper than the seasonal thermocline. The data of the ZONALIS cruise, which was part of the ZoNéCo project, confirm very well this important result of the model.

On a Southern Pacific scale, the tuna model also shows very encouraging results but they are more difficult to validate. In particular, there is very little information concerning micronekton and possible model errors in this respect are thus very difficult to evaluate. The model structuration of the 6 classes of micronekton seems to influence our results. For example, the bathypelagic predominance of micronekton migrants can lead to counter-intuitive results of low productivity over shallow water regions. Nevertheless, the micronekton model seems to provide an adequate intermediate level for the albacore tuna since its modeled biomass presents strong correlations with actual captures. Nevertheless, this compartment of the model should be better validated in the future.

For adult tuna, the capture zones coincide with their average habitat which is well represented by the intersection of favorable feeding and spawning habitats (in which New Caledonia is located). The adults migrate at the rhythm of the season but this migration is limited in the model to approximately 40°S, because further south the gradients of habitat become too weak to encourage migration. A zone of relative maximum of the biomass is nevertheless present south of 40°S; we understand it as an artifact of the model which cannot allow the recruits at high latitudes to migrate towards warmer waters. It is undoubtedly a point of the model which will have to be re-examined.

For young tuna, the consistency between modeled biomass and actual captures is also satisfactory on these scales. Displacement of young tuna is related to seasonal changes of spawning habitat, which remain minor compared with of the migration of adults towards the spawning habitat. The feeding habitat tends to concentrate the young tuna around New Zealand. That is true for the modeled biomass as for the actual captures. Nevertheless, the model does not represent a zonal displacement of young tuna, contrarily to what is suggested by the captures. That raises some questions, either about the incapacity of the model to represent a possible zonal migration, or on the fishing conditions which can vary with the season.

At the regional scale, our grid refinement opened new doors and raised new questions. The model results show for example a phenomenon consistent with the theory of optimal window of prey catchability. Indeed, the actual captures seem to coincide with intermediate values of prey concentration, rather than with the maximum ones. This may be explained by the supposed preference of tuna for live preys when they are in abundance. This point needs obviously to be further addressed.

At the regional scale also, both epi- and mesopelagic temperatures are warm in the New Caledonia region because of the southward drift of surface tropical waters and the deeper impact of the previously noted anticyclonic regional circulation. These warm waters have a significant impact on the spawning and feeding habitat and largely explain the presence of tuna in this area. On the contrary, the low primary productivity of the Coral Sea region should be unfavorable to the tuna habitat. However, the local prey concentrations appear to be structured by convergence/divergence of currents interacting with the islands rather than by phytoplankton distributions. This would tend to invalidate the relevance of satellite images of water color for fishing activities.

To conclude, it seems to us that our modeling system is relevant for the comprehension of the ecosystem and population dynamics of albacore tuna at large scales. We primarily limited ourselves to understand the average distributions and seasonal variations, while the role of climatic variability, such as El Niño, remains to be explored. Concerning the regional scales, which we approached at the end of the project, some progress remains to be made in the adjustment of the model parameters and in the understanding of smaller-scale processes, but the model suggests an interesting island contribution to the small-scale structures of tuna prey and habitat. With this intention, it seems to us relevant to organize part of the future effort on a better understanding of the dynamics of the tuna preys and on corresponding model development.

1. INTRODUCTION GENERALE

La pêcherie thonière la plus importante au monde se situe dans le Pacifique occidental, surtout dans la région équatoriale. La distribution des thons est fortement influencée par les conditions écologiques telles que la température d'abord, mais aussi l'oxygène dissous et la disponibilité de leur nourriture. L'alimentation des thons consiste en petits crustacés, calmars et poissons, et la production de ces proies dépend de la production primaire des océans. Pourtant la pêche s'étend en réalité assez loin des centres de production primaire que sont la Papouasie-Nouvelle-Guinée et la limite frontale orientale de la « warm pool », dans des eaux océaniques qui apparaissent parfois très bleues (faible productivité) sur la coloration océanique observée par satellite. Néanmoins les satellites ne sont pas en mesure de rendre compte de la production primaire de subsurface, qui est relativement importante et profonde (~100 m) dans les régions oligotrophes comme le Pacifique sud-ouest, et particulièrement la ZEE calédonienne. De plus, l'ensemble des paramètres environnementaux peut varier sur une large gamme d'échelle, allant des tourbillons de mésoéchelle aux échelles interannuelles avec le phénomène ENSO (El Niño-Southern Oscillation). L'étude de la dynamique des stocks de thons passe donc par une analyse spatio-temporelle des structures fines des variables physiques et biologiques. Ces dernières doivent être comparées aux captures de thons (par unités d'effort, CPUE) à l'intérieur de la ZEE de Nouvelle Calédonie, afin de comprendre puis prédire les situations à venir, et finalement d'aboutir à une gestion optimisée de la pêcherie thonière calédonienne.

L'objectif de cette étude est de mieux identifier les paramètres environnementaux qui déterminent la distribution horizontale et verticale des thons dans le Pacifique sud-ouest. Le but à plus long terme est de fournir des outils de connaissance et de surveillance pour une meilleure gestion des ressources marines. Les observations sont peu nombreuses dans notre zone d'étude, hormis celles du programme PROCAL de 1982-84 (Le Borgne et al., 1985) et les données satellitales qui ne concernent toutefois que la couche superficielle de l'océan. Cependant, la structure verticale est un élément crucial des modèles statistiques et dynamiques de simulation des distributions de thons. C'est pourquoi, notre étude passe par une description de la variabilité spatio-temporelle de l'environnement physique et de l'écosystème planctonique ainsi que des éléments nutritifs qui le conditionnent. Pour cela, un modèle régional haute résolution couplant physique et biogéochimie (ROMS-PISCES) a été implémenté pour la première fois dans cette région. Dans cette première étude, une climatologie est construite sur la base d'une simulation interannuelle et comparée aux données disponibles. Cette approche nous permet d'étudier la variabilité spatiale et saisonnière de la production primaire et des mécanismes sous-jacents. Dans une deuxième partie, les niveaux trophiques supérieurs sont étudiés grâce à un modèle écosystémique déterministe de la distribution des thons (SEAPODYM). L'espèce cible de notre étude étant le thon germon qui domine les eaux calédoniennes, une grosse part de ce travail a consisté en la prise en main du modèle et la calibration des paramètres mal connus qui interviennent dans les équations déterminant les processus de production, croissance, mortalité des thons et de leurs proies.

Notre étude s'est organisée sur la base d'une collaboration entre l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et la CPS (Secrétariat Général de la communauté du Pacifique), avec la participation de Patrick Lehodey de CLS (Collecte Localisation satellites). La partie physique et biogéochimique a été menée par un des deux contractants (Vincent Faure) sous la direction des chercheurs et ingénieurs de l'IRD ; la partie proprement



halieutique a été conduite par le second contractant (Xavier Couvelard) sous la direction des chercheurs et ingénieurs de la CPS et de CLS.

Le travail réalisé a interagit avec d'autres projets des équipes IRD et CPS, en ce qui concerne le développement des outils et la compréhension du fonctionnement de l'environnement néo-calédonien. Plusieurs articles scientifiques ont été publiés ou sont en phase de publications. En particulier, une édition spéciale du journal *Marine Pollution Bulletin* sur l'environnement néo-calédonien devrait paraître en 2009-2010, dans lequel notre équipe IRD valorise ses travaux sur la ZEE (Marchesiello et al. ; Lefèvre et al., Ganachaud et al.). Certains des résultats présentés dans ce journal sont inspirés des travaux dont il est question ici, mais d'autres articles sont maintenant en préparation pour présenter plus spécifiquement les résultats de ce projet ZoNéCo.

PARTIE I : DYNAMIQUE ET BIOGEOCHIMIE

Les satellites ne sont pas en mesure de rendre compte de la production primaire de subsurface, qui est relativement importante et profonde (~100 m) dans les régions faiblement productives comme le Pacifique sud-ouest. On propose donc dans cette partie de déterminer la structure spatiale, notamment verticale, de la production primaire dans la région de Nouvelle-Calédonie à l'aide d'un modèle biogéochimique couplé à un modèle hydrodynamique. On s'attache notamment à comprendre les mécanismes qui lient cette production aux conditions hydrodynamiques à moyenne échelle spatiale, et aux échelles temporelles saisonnières. C'est une étape majeure pour comprendre ce qui détermine les relations fortes entre les signaux climatiques et la dynamique des stocks de thons. Une autre question est de juger de la pertinence des cartes de température de la mer, profondeur de la thermocline et de couleur de la mer beaucoup utilisées par les pêcheurs pour le repérage des stocks.

2. Méthodes

La zone d'étude est le Pacifique sud-ouest, entre 30°S et 8°S de latitude et 143°E et 170°W de longitude. Cette zone est caractérisée par une topographie complexe et rugueuse, orientée plutôt dans la direction méridienne, avec des talus pentus (**Figure 1**).

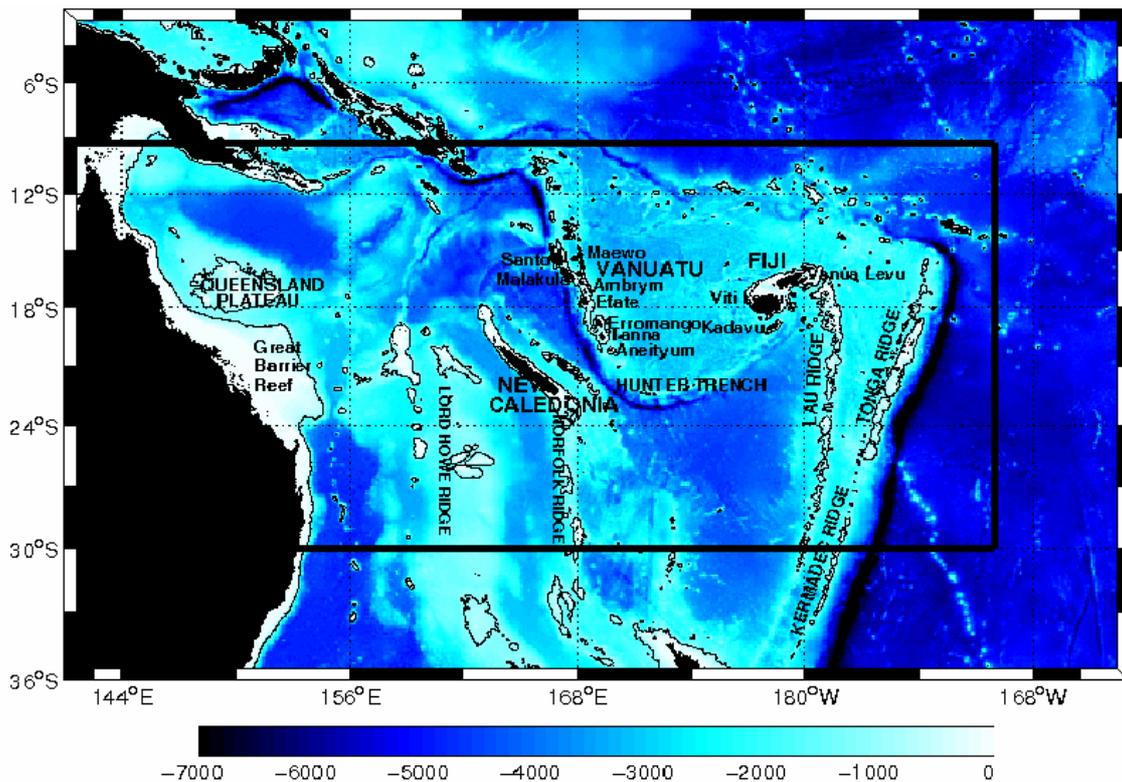


Figure 1: Topographie du Pacifique sud-ouest (d'après Couvelard et al., 2008)

2.1. Le modèle hydrodynamique: ROMS

Dans le but de modéliser les écoulements océaniques régionaux avec une résolution adéquate (de l'ordre de ~5km), nous avons développé à l'IRD un modèle emboîtable, basé sur le modèle régional ROMS (Regional Oceanic Modeling System). Celui-ci permet d'augmenter la résolution dans une région donnée en utilisant les réanalyses globales aux frontières du domaine régional (Marchesiello et al., 2001). Le modèle résout les équations complètes de l'hydrodynamique océanique en utilisant des schémas numériques optimaux pour leur discrétisation (Shechepetkin et McWilliams, 2005). Il est également pourvu d'une procédure de raffinement de maillage (Penven et al., 2006) développé par le Laboratoire Jean Kuntzmann de Grenoble, et d'outils puissants permettant le prétraitement générique des champs initiaux et du forçage océanique (Roms_tools : <http://roms.mpl.ird.fr/>).

Dans notre étude, le modèle ROMS a été appliqué sur la région du pacifique sud-ouest avec une résolution horizontale de 30km et 30 niveaux sur la verticale, resserrés en surface (les niveaux σ du modèle épousent le fond sous-marin et permettent ainsi une meilleure prise en compte de son interaction avec l'écoulement). Une simulation interannuelle réalisée sur la période 1979-2008 a été réalisée en utilisant un forçage atmosphérique de surface, issu des réanalyses NCEP2 (vent et flux thermohalins). Les champs initiaux et le forçage aux limites latérales du domaine sont issus de la simulation ORCA05 (modèle OPA du LOCEAN : Laboratoire d'Océanographie et du Climat). Le paquetage Roms_Tools (Penven et al. 2008) a permis l'interpolation de toutes ces données sur la grille du modèle régional. Un « spinup » de 10 ans a été effectué avant l'initialisation de la simulation couplée.

2.2. Le modèle biogéochimique: PISCES

Pour pallier le manque d'observations biogéochimiques dans la ZEE mais aussi pour explorer la variabilité tridimensionnelle de la région sous l'influence de sa dynamique spatio-temporelle, nous nous proposons d'implémenter un modèle d'écosystème permettant de simuler la distribution de l'oxygène dissous, le cycle des éléments nutritifs majeurs (nitrate, phosphate, silicate) ainsi que leur action sur la croissance planctonique végétale, et ses liens avec la distribution de certaines espèces du zooplancton.

PISCES (Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies) est un modèle biogéochimique simulant le cycle des principaux éléments nutritifs océaniques ainsi que leur action sur la croissance phytoplanctonique [Aumont, et al., 2003]. Le modèle a été conçu pour des simulations de longue durée avec 24 compartiments (**Figure 2**). Le cycle des sels nutritifs est représenté explicitement dans le modèle. La croissance phytoplanctonique est directement limitée par la disponibilité en sels nutritifs (nitrate, ammonium, phosphate, silicate et fer) et par la lumière (Photosynthetic Available Radiation, PAR, sur le schéma). Dans la version standard, deux classes de taille du phytoplancton sont considérées, à savoir le « nanophytoplancton » (2-20 μ m) et les grosses cellules, de type diatomées. La distinction entre ces deux classes se fait essentiellement par la nature des sels nutritifs limitants et les taux de croissance/sénescence imposés dans le modèle (plus rapides pour le petit phytoplancton). Ainsi, les diatomées auront-elles besoin de plus de fer et de silice que le petit phytoplancton qui fonctionne essentiellement sur les sels nutritifs régénérés. Pour le « non vivant », le modèle simule la distribution de la matière organique dissoute semi labile et deux classes de tailles de particules qui diffèrent par leur vitesse de sédimentation (3 m/jour pour la petite classe de taille et 50-200 m/jour pour la grande).

Pour le règne animal, deux classes de taille de zooplancton sont considérées en routine, le « microzooplancton », qui se nourrit essentiellement sur le petit phytoplancton et le « mésozooplancton » qui se nourrit sur les grosses cellules phytoplanctoniques et sur le petit zooplancton. Comme la zone est essentiellement oligotrophe et donc dominée de petites cellules du phytoplancton, il serait justifié de scinder le petit zooplancton en nanozooplancton et microzooplancton. En ce qui concerne le gros zooplancton, il n'est pas correctement simulé puisque son cycle nyctéméral n'est pas considéré mais il sert de fermeture aux équations du modèle, et n'a pas vocation au réalisme. C'est pourquoi on utilise le modèle essentiellement pour sa capacité à simuler la distribution tri-dimensionnelle de la chlorophylle (ou de la production primaire). Pour simuler les niveaux trophiques intermédiaires (mésozooplancton et micronecton) et leurs liens vers les échelons trophiques supérieurs, le projet repose sur le couplage de PISCES avec le modèle de prédateurs supérieurs, SEAPODYM, présenté dans la deuxième partie de ce rapport. Dans ce but, on utilisera en sortie de PISCES les distributions de la production primaire et de l'oxygène dissous, qui constituent les paramètres biogéochimiques essentiels pour simuler les échelons trophiques intermédiaires dans SEAPODYM.

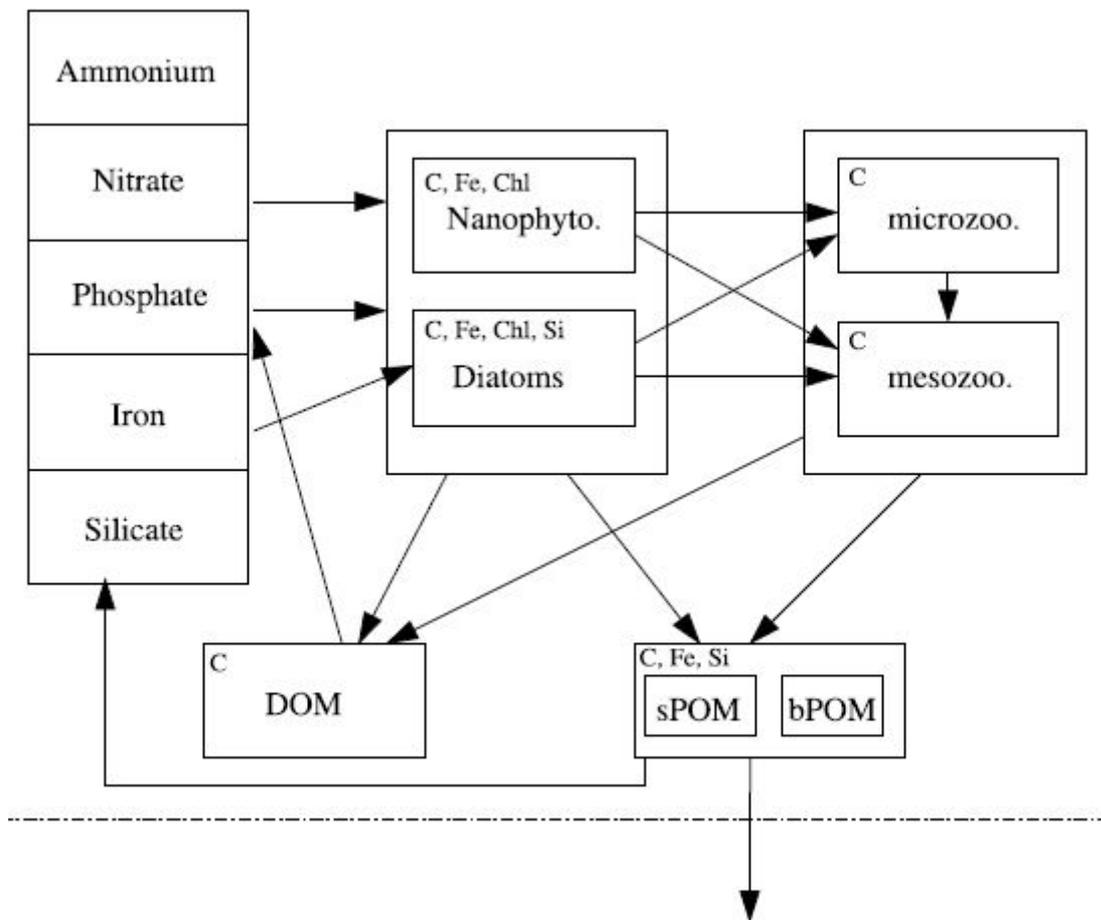


Figure 2 : Description schématique de PISCES. Seule une partie des flux entre compartiments sont représentés. Les éléments notés en haut des cases désignent les quantités explicitement modélisées dans chaque compartiment (d'après Aumont et Bopp, 2006).

Dans tous compartiments du vivant, les rapports entre carbone (C), azote (N) et phosphate (P) prennent une valeur constante (*Takahashi, et al., 1985*). Par contre, les quantités de fer (Fe) dans les deux classes de phytoplancton et de silicate (Si) dans les diatomées, sont des

variables du modèle, fonctions des concentrations externes de nutriments et de la lumière disponible. Le rapport Chlorophylle/carbone (Chl/C) est modélisé par une version modifiée du modèle de photo-adaptation de *Geider, et al.* (1998) mais tous les rapports de la composition élémentaire du zooplancton sont maintenus constants. Comme pour le vivant, la constante de Redfield est imposée pour les rapports C/N/P de la matière dissoute et particulaire. Cependant, les quantités de Fe et Si sont modélisés pour les particules et leur valeur relative par rapport au carbone organique peut donc varier.

Trois sources externes de nutriments sont présentes dans le modèle : la poussière atmosphérique, essentielle pour l'apport en fer à la surface, les rivières et la remise en suspension des sédiments, autre élément essentiel dans le cycle du fer. La déposition atmosphérique de Fe est issue d'une climatologie mensuelle construite à partir des simulations de *Tegen and Fung* (1995) en faisant l'hypothèse d'une solubilité constante dans l'océan (e.g., *Jickells and Spokes* (2001); *Moore, et al.* (2004)). L'apport de carbone par les rivières est issu du Global Erosion Model (GEM) of *Ludwig, et al.* (1996). Fe, N, P et Si sont dérivés du même modèle en considérant des rapports Fe/P/N/Si/C constants dans les rivières. La re-suspension de Fe contenu dans les sédiments marins est connue pour être une source importante pour l'océan (e.g., *Johnson et al.*, 1999 ; *de Baar and de Jong*, 2001). Malheureusement, nous ne disposons pas d'information quantitative sur ce processus et une paramétrisation grossière est réalisée (*Moore, et al.*, 2004).

Il sera sans doute nécessaire dans le futur, de compartimenter la classe du petit phytoplancton pour mieux simuler le comportement du phytoplancton dans cette zone oligotrophe. Le modèle ne comporte pas non plus de boucle bactérienne explicite. Ceci peut être modifié si l'on confirme la nécessité de considérer dans ces eaux oligotrophes un réservoir tampon de passage de la matière organique à l'inorganique.

Enfin, tous les apports en nutriments par advection et diffusion sont simulés à partir des courants et de la diffusivité du modèle hydrodynamique, ce qui permet de fournir des distributions spatiales des variables biogéochimiques évoluant avec le temps. Les conditions initiales et conditions aux limites latérales pour les traceurs biologiques sont interpolées de la simulation couplée ORCA2-ERA40 (OPA-PISCES, 2° résolution).

2.3. Données de terrain

2.3.1. Campagne ZONALIS

Cette campagne fut réalisée en Mars 2008 au sud-est de la Nouvelle-Calédonie, dans le cadre de ce projet ZoNéCo (Chef de mission : C. Menkes). La **Figure 3** présente une carte des 46 stations réalisées avec une résolution de 0.5 degrés. Cette campagne a permis de fournir une vision synoptique de cette région de forte turbulence, avec des mesures physiques et biologiques de tourbillons à mésoéchelle (tourbillons cycloniques et anticycloniques de l'ordre de 100-200km de diamètre) et de zones frontales entre les tourbillons. Des mesures de température, salinité et courants, ainsi que des mesures de nutriments, de fluorescence, proxy de la chlorophylle a, ont ainsi été collectées jusqu'à la profondeur de 500m ; une mesure de biomasse de zooplancton prélevé au filet à chaque station fut également réalisée pour 5 tranches de la colonne d'eau 0-500m. Les résultats de cette campagne notamment la distribution du méso-zooplancton sont encore en cours d'analyse et seuls quelques résultats préliminaires sont exposés ici.

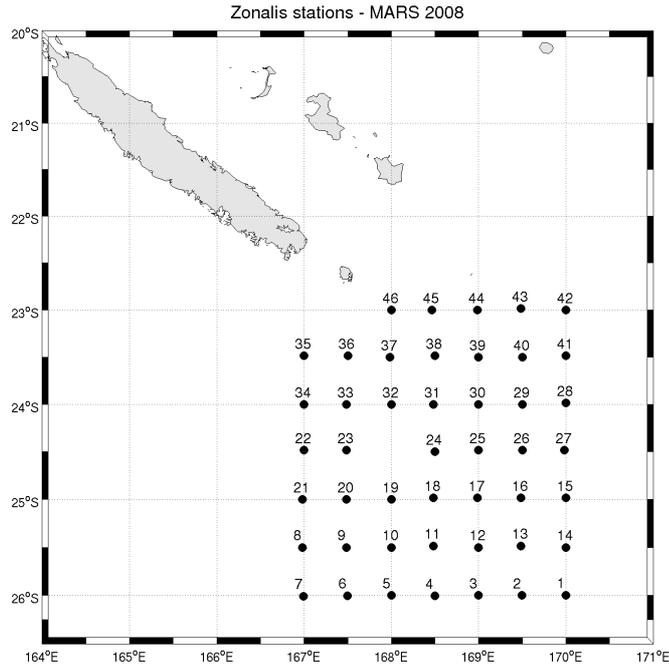


Figure 3: Stations of ZONALIS campaign (March 2008)

2.3.2. Compilation des campagnes de l'IRD dans le Pacifique

A partir d'une compilation des données des campagnes océanographiques de l'IRD principalement réalisées par les groupes PROPPAC et SURTROPAC (<http://www.ird.nc/BIOGEOCHIMIE/index.html>), et avec l'ajout d'autres campagnes et un compactage de l'ensemble des fichiers (Marie-Hélène RADENAC, IRD-LEGOS, Toulouse), nous avons analysé la section méridienne à 165°E des concentrations de nitrate+nitrite, ainsi que leur répartition spatiale en surface dans le Pacifique sud-ouest. Ces données furent collectées entre 1985 et 1992 durant plusieurs campagnes océanographiques (Tableau 1 et 2). Nous noterons dans la suite cette compilation de données : données PAC.

Tableau 1: Campagnes utilisées pour générer la section des concentrations de nitrate+nitrite à 165°E (Figure 12)

	Jan-Mar	Apr-Jun	Jul-Sep	Nov-Dec
Campagnes	SURTROPAC03, SURTROPAC05, SURTROPAC07, SURTROPAC09, SURTROPAC11, SURTROPAC16	PROPPAC02	SURTROPAC04, SURTROPAC08, SURTROPAC12, SURTROPAC15, SURTROPAC17	PROPPAC01, PROPPAC04
Date	1985-1992	1988	1985-1992	1987-1989
Nombre de points	651	24 (non exposé ici)	511	335

Tableau 2: Campagnes utilisées pour générer les cartes de concentrations de nitrate+nitrite en surface (Figure 10).

	Jan-Mar	Apr-Jun	Jul-Sep	Nov-Dec
Campagnes	ALIZE2, SIO, SURTROPAC03, SURTROPAC05, SURTROPAC07, SURTROPAC09, SURTROPAC11, SURTROPAC14, SURTROPAC16	FRANKLIN, PROPPAC02, SIO, SURTROPAC04, SURTROPAC06, SURTROPAC10, SURTROPAC14, ZONAL_FLUX	FLUPAC, FRANKLIN, PROPPAC01, PROPPAC03, SIO, SURTROPAC04, SURTROPAC08, SURTROPAC12, SURTROPAC15, SURTROPAC17	EQUALIS, FLUPAC, FRANKLIN, PROPPAC03, PROPPAC04, SIO, SURTROPAC13
Date	1985-1992	1985-1996	1985-1994	1987-1989
Nombre de points	108	89	204	163

2.3.3. SeaWiFS, WOA01, et MLD

Le *World Ocean Atlas 2001* (WOA01) contient les statistiques et analyses objectives de champs traceurs physiques et biogéochimiques sur une grille régulière avec des mailles de 1° ou 5°, générés à partir de la base de données d'observations: *World Ocean Database 2001*. Les variables océaniques comprennent : température, salinité, oxygène dissous, utilisation apparente d'oxygène, pourcentage de saturation de l'oxygène, nutriments inorganiques dissous (phosphate, nitrate, silicate). Plus d'informations sont disponibles à :

http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01/pr_woa01.html.

L'estimation de la profondeur de la couche mélangée (MLD) utilisée dans cette étude, provient de Boyer Montégut *et al.* (2004). Cette climatologie globale de résolution 2° fut construite sur la base de profils individuels avec un critère en température, $\Delta T=0.2^{\circ}\text{C}$. Notons que cette grandeur est difficile à estimer avec précision et il existe des différences importantes entre les différentes estimations, dépendantes des données utilisées, des méthodes de traitement et des critères de la MLD. Toutefois, l'estimation de Boyer Montégut *et al.* (2004) semble aujourd'hui l'une des plus fiables. Ces estimations sont disponibles à :

<http://www.locean-ipsl.upmc.fr/~cdblod/mlld.html>.

SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) suivit la mission Coastal Zone Color Scanner (CZCS) de 15 ans. C'est un radiomètre mesurant la lumière visible sur 8 canaux dédiés à la mesure globale de la couleur de l'océan. Plus d'informations sont disponibles sur le site :

http://daac.gsfc.nasa.gov/guides/GSFC/guide/SeaWiFS_L3_Guide.gd.shtml

Les données utilisées dans ce rapport sont sous la forme de cartes mensuelles de chlorophylle avec une résolution de 9km, téléchargées du site :

<ftp://oceans.gsfc.nasa.gov/SeaWifs/Mapped/Monthly/CHLO>

3. Validation et analyse du modèle: grandeur moyenne et cycle saisonnier

Dans ce travail, une climatologie est construite à partir de la simulation interannuelle, afin de valider et analyser le cycle saisonnier.

3.1. Variables physiques

Ce travail de validation des champs physiques a été réalisé et publié (Couvelard et al., 2008 ; Marchesiello et al., 2009) à partir de modèles physiques non-couplés à haute résolution (1/12°). Dans cette section, nous nous concentrons sur des aspects plus pertinents pour une étude de l'écosystème et vérifions que notre résolution intermédiaire (1/3°) contient l'essentiel de l'hydrodynamique régionale.

3.1.1. Température

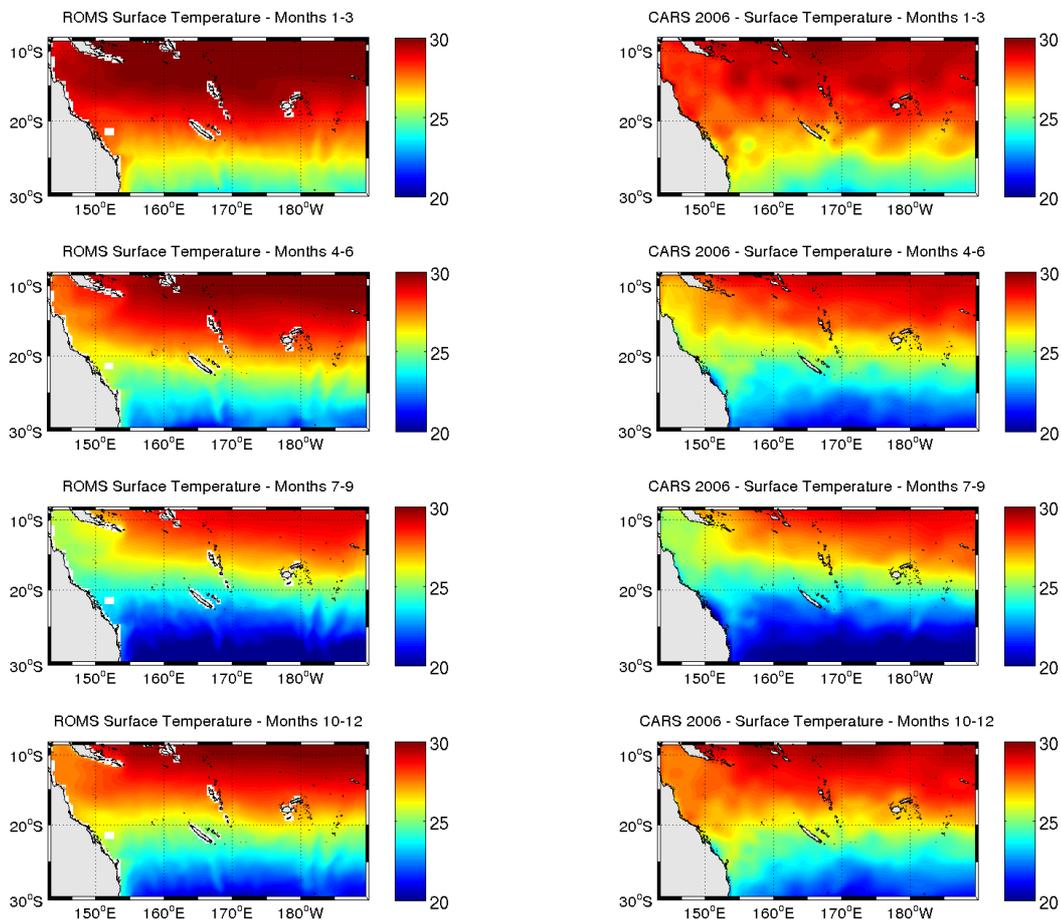


Figure 4 : Température saisonnière de surface [°C]: ROMS (gauche) et CARS 2006 (droite).

La température simulée par le modèle est en bon accord avec les données CARS2006 (Figure 4). La thermocline présente une variation méridienne importante mais peu de variation zonale. La variabilité saisonnière montre un net refroidissement hivernal des eaux de surface

jusqu'à 200m dans le sud entre 30°S and 22°S. L'isotherme 20°C atteint la surface en cette période et la colonne d'eau apparaît bien moins stratifiée.

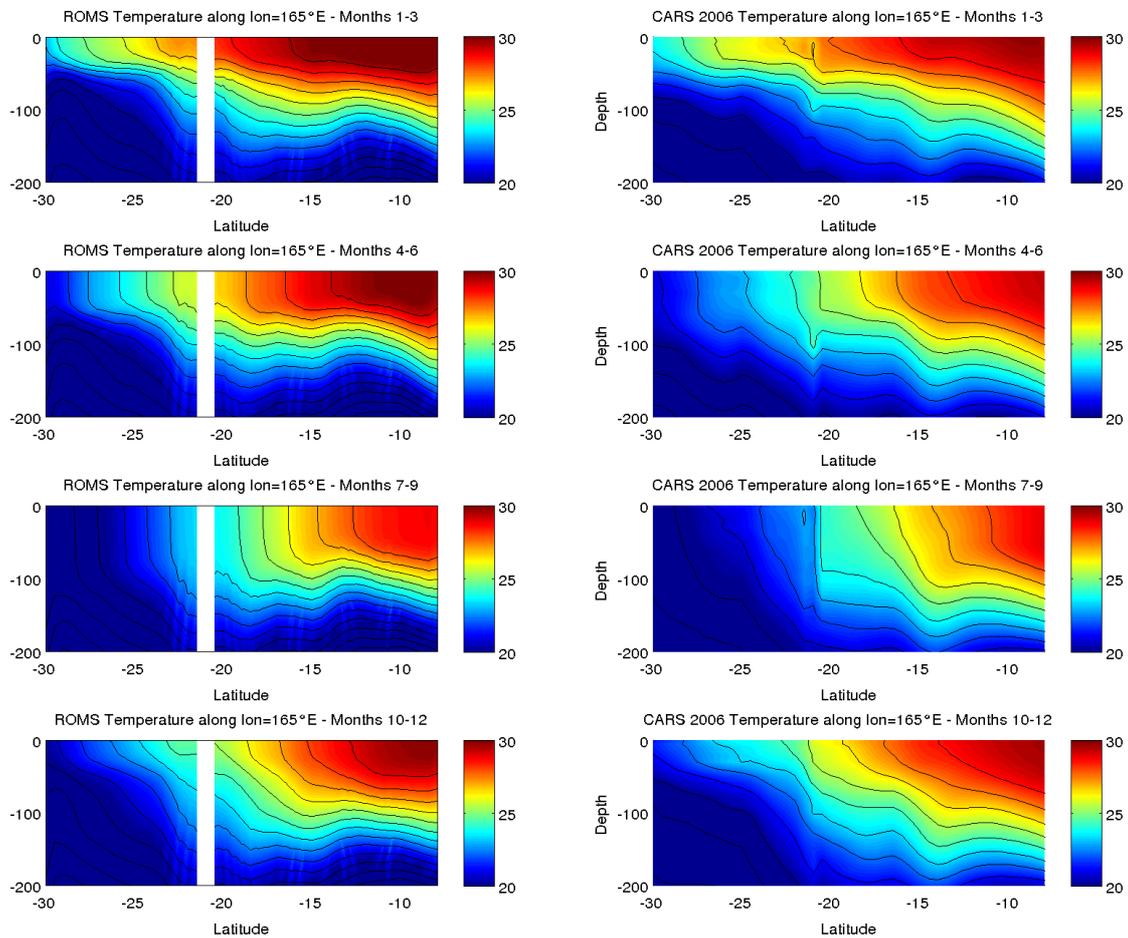


Figure 5 : Section méridienne de température à 165°E: ROMS (gauche) et CARS 2006 (droite).

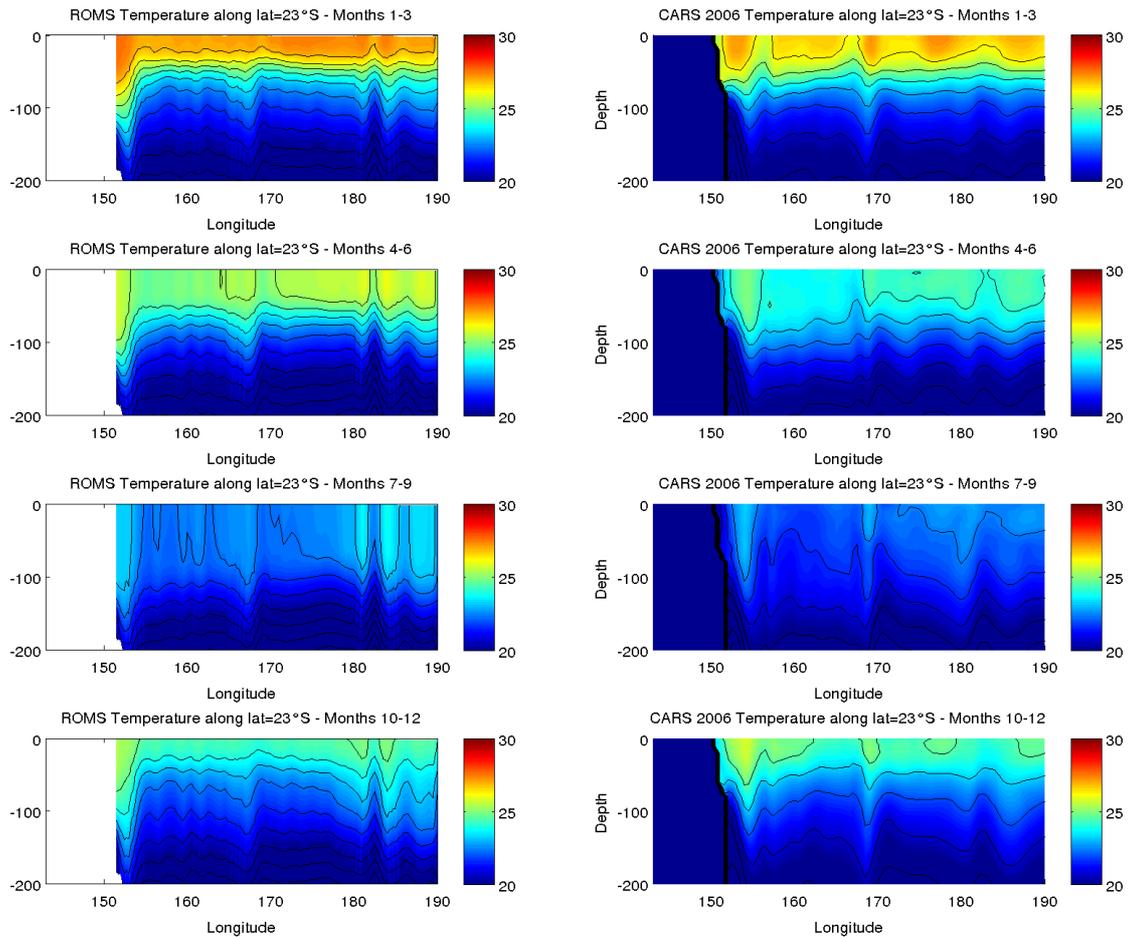


Figure 6 : Section Zonale de température à 23°S: ROMS (droite) et CARS 2006 (gauche).

3.1.2. Profondeur de couche mélangée (MLD)

La MLD du modèle est également en bon accord avec les données de Boyer Montégut *et al.* (2004), exception faite de la partie nord-est du domaine, où les valeurs apparaissent toujours plus faibles dans les simulations (Figure 7). La MLD montre une saisonnalité importante, particulièrement dans le sud du domaine. En hivers, elle atteint 100m de profondeur dans le sud, avec un fort gradient nord-sud. En été, la MLD est spatialement uniforme avec des valeurs inférieures à 50 m.

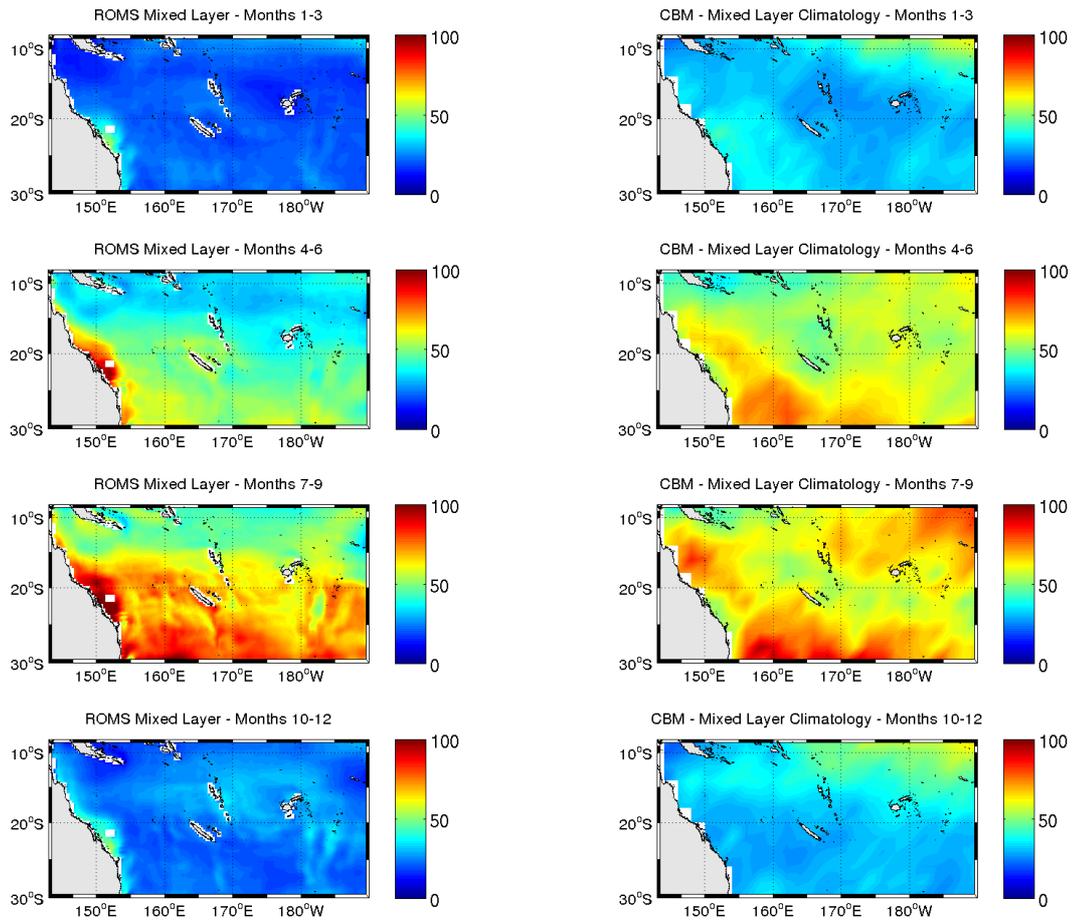


Figure 7: Profondeur de couche mélangée [m]: ROMS (gauche) et Climatologie (droite) de Boyer-Montégut *et al.* (2004).

3.2. Variables biogéochimiques

3.2.1. Chlorophylle *a*

PISCES inclue 2 compartiments de phytoplancton. La chlorophylle des diatomées (DCHL) présente des valeurs très faibles que l'on ne présentera pas ici. Dans ce qui suit, le terme de "Chl.*a*" sera donc réservé à la chlorophylle du nano-phytoplancton dans PISCES.

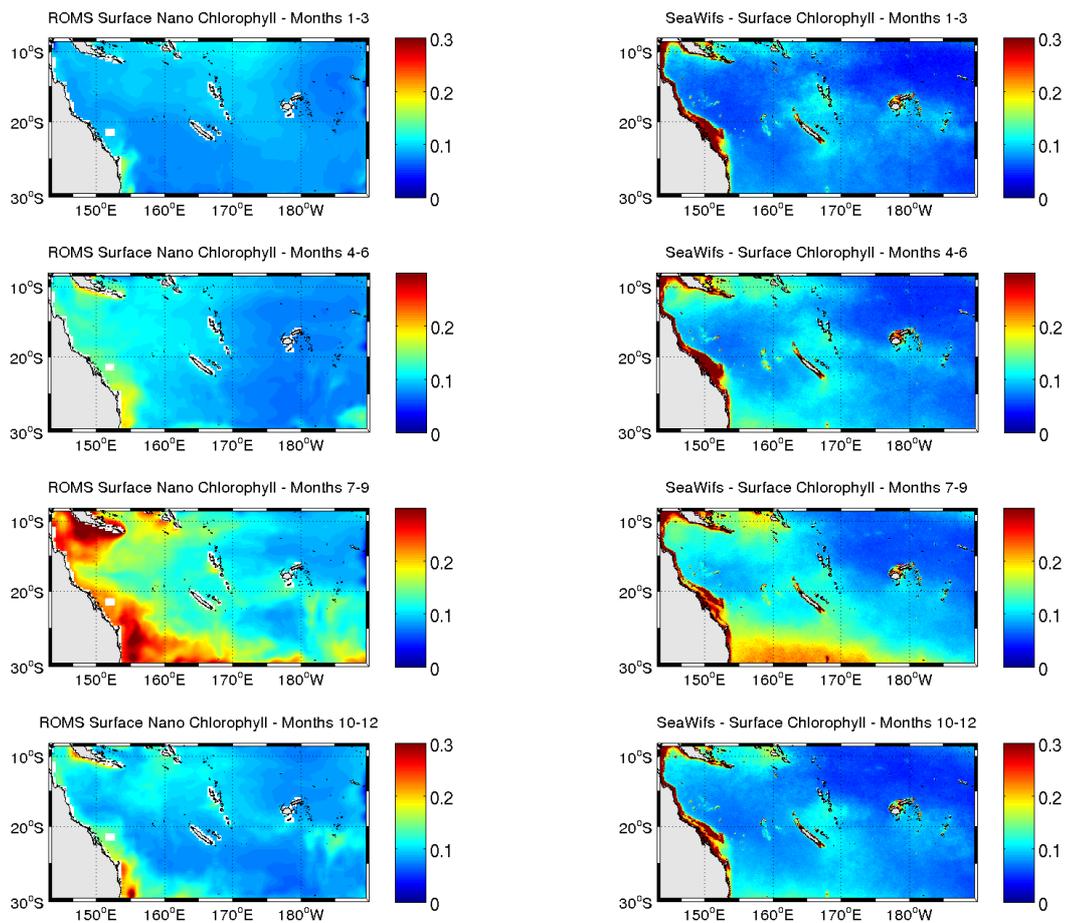


Figure 8: Concentration surfacique de Chl.a [$\mu\text{gChl.a/l.}$]: ROMS-PISCES (gauche) et SEAWIFS (droite). Variabilité saisonnière calculée sur la période 1997-2003.

La variation saisonnière de Chl.a est présentée et comparée aux données SeaWiFS sur la Figure 8. Le modèle est généralement en bon accord avec les données et reproduit la variabilité saisonnière observée. En particulier, la variabilité principale concerne l'augmentation de la concentration de Chl.a de surface dans le sud en hiver. La différence moyenne entre modèle et données, est de $0.055 \mu\text{gChl.a/l.}$, ce qui est faible. Néanmoins, le modèle a une tendance générale à surestimer les concentrations de Chl.a dans la partie ouest du domaine, près de l'Australie. En hiver, la zone de minimum en Mer de Corail et au niveau du plateau du Queensland, est bien représentée mais avec des valeurs plus fortes que dans les données SeaWiFS. La même comparaison à l'échelle régionale autour de la Nouvelle-Calédonie (Figure 9) montre une représentation satisfaisante à la fois du cycle saisonnier, de

l'amplitude et de la distribution régionale de la chlorophylle de surface. On peut s'attendre à ce qu'une augmentation de la résolution du modèle dans le future pourra améliorer encore la représentation et l'impact des structures fines de la bathymétrie et des zones de haut-fond (la bathymétrie est bien lissée à 1/3° de résolution).

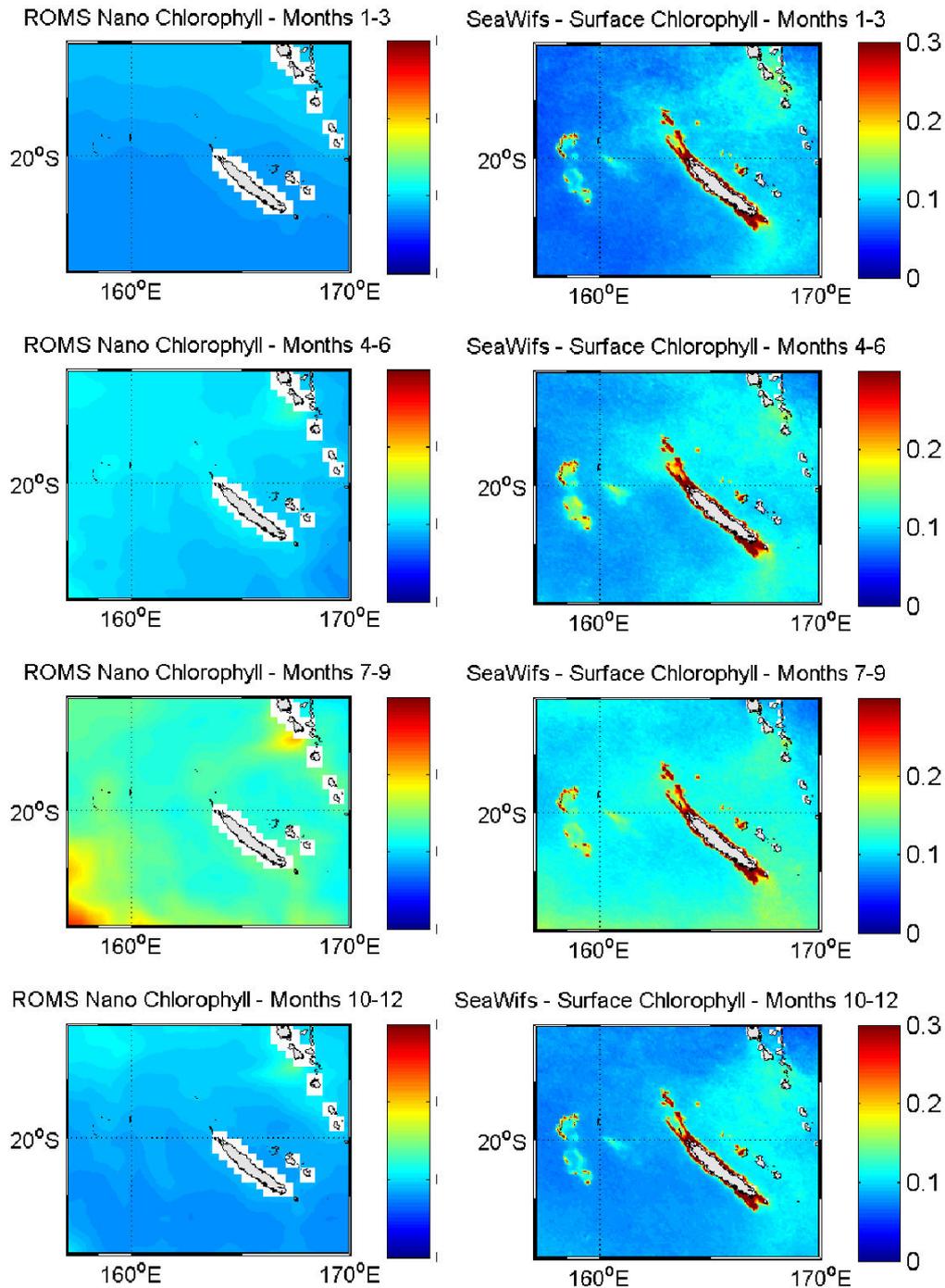


Figure 9 : Concentration surfacique de Chl.a [$\mu\text{gChl.a/l}$]: ROMS-PISCES (gauche) et SEAWIFS (droite) dans la region de Nouvelle-Calédonie. Variabilité saisonnière sur la période 1997-2003.

3.2.2. Nitrate

La Figure 10 présente une comparaison des concentrations de nitrate en surface entre le modèle ROMS, les données d'observation compilées de WOA2001 et les données des campagnes PAC. Alors que les valeurs simulées restent faibles durant toute l'année (moins de $0.1 \mu\text{mol/l}$), les données WOA présentent des zones de fortes valeurs de concentration de nitrate. Ces zones ne sont pas visibles sur les données PAC (non montrées) et on doit probablement mettre en doute la pertinence des données de surface de WOA dans cette région. L'interpolation horizontale de données dispersées et peu nombreuses et l'interpolation verticale peuvent produire dans cette base des artéfacts (« les patches ») et une tendance à propager vers la surface les valeurs de sub-surface. Dans le modèle, des valeurs significatives de nitrate n'apparaissent en surface que dans le sud en hiver et peuvent atteindre $0.4 \mu\text{mol/l}$. Mais il faut noter des valeurs non négligeables également dans la zone de Papouasie-Nouvelle-Guinée.

La comparaison des distributions verticales de nitrate est présentée sur les Figure 11 et Figure 12 et celle de la profondeur de la nitracline, profondeur minimum où $\text{NO}_3 > 1 \mu\text{mol/l}$ (Figure 13). Le modèle apparaît cette fois en très bon accord avec les données. La profondeur de la nitracline montre une variabilité méridienne importante avec des valeurs profondes dans la partie centrale du domaine, ainsi que dans la partie ouest. La nitracline calculée à partir de WOA montre des valeurs un peu plus profondes que les valeurs simulées. Mais là encore, les données PAC semblent en meilleur accord avec le modèle. Nous reprendrons plus loin cette discussion sur la profondeur de la nitracline.

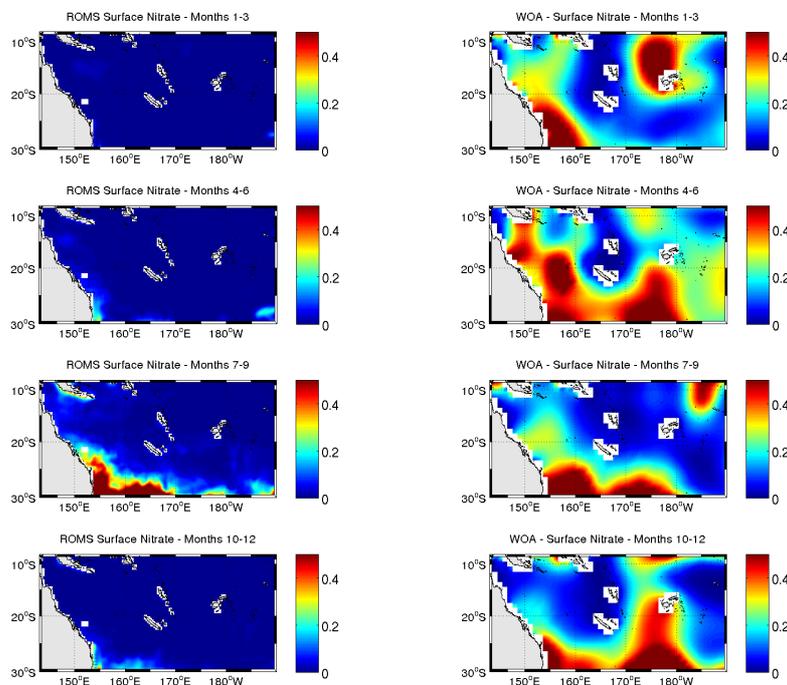


Figure 10: Concentration en surface de NO_3 : ROMS-PISCES (gauche), WOA2001 (droite). Unités en $\mu\text{mol/l}$.

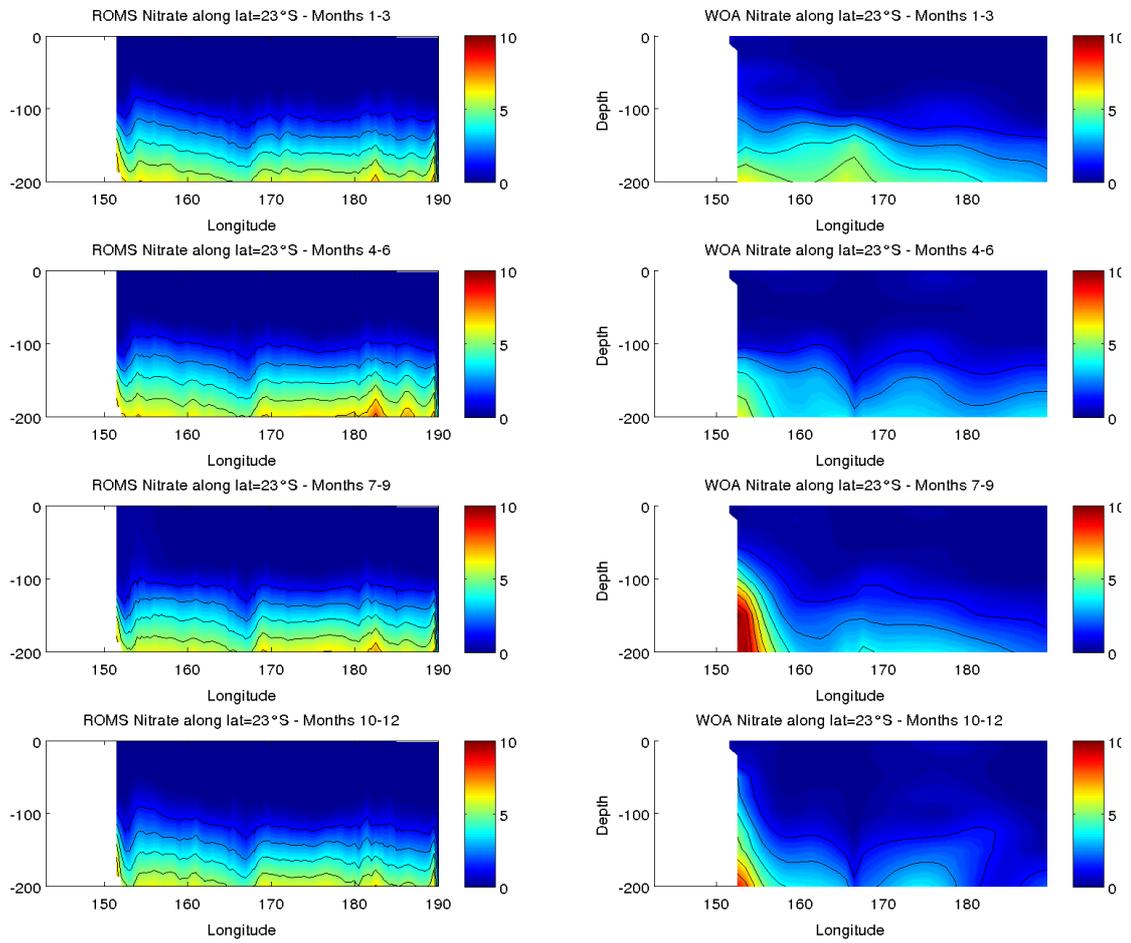


Figure 11: Section zonale de concentration de NO_3 le long de la latitude 23°S : ROMS-PISCES (gauche), WOA2001 (droite). Unités en $\mu\text{mol/l}$.

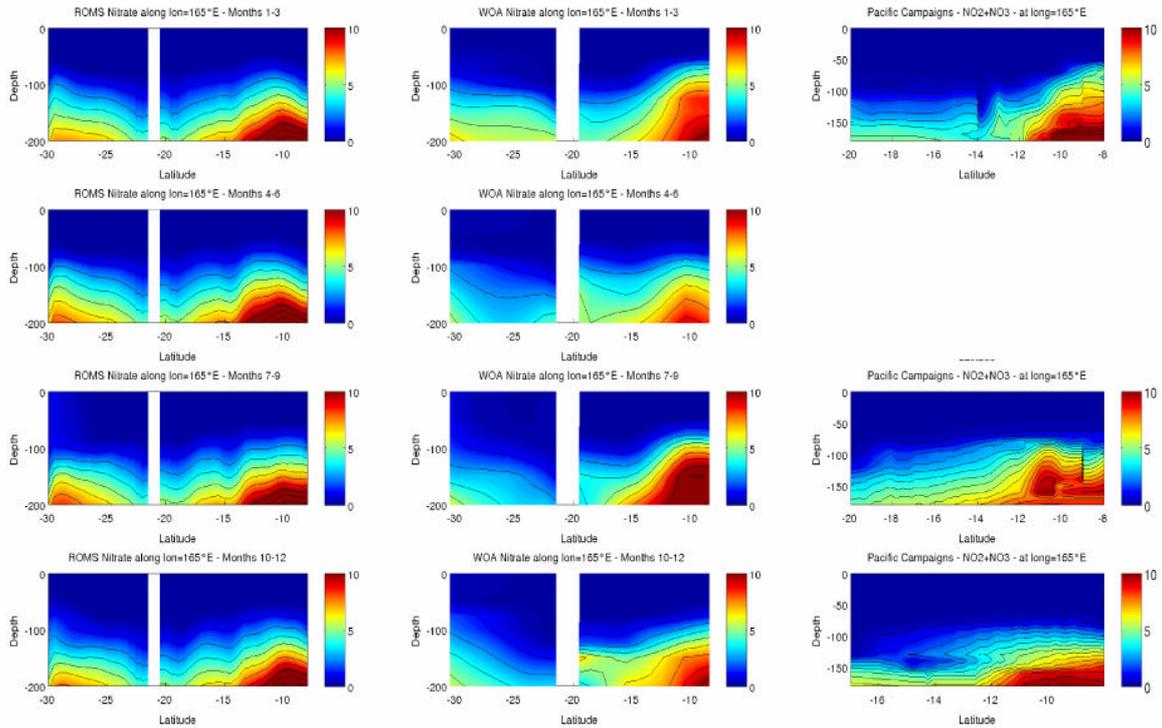


Figure 12: Section méridienne de concentration de NO_3 le long de la longitude 165°E : ROMS-PISCES (gauche), WOA2001 (milieu), campagnes PAC (droite). Unités en $\mu\text{mol/l}$. A noter que les panneaux de droite désignent une région plus petite (entre 20°S et 8°S ; voir le Tableau 1).

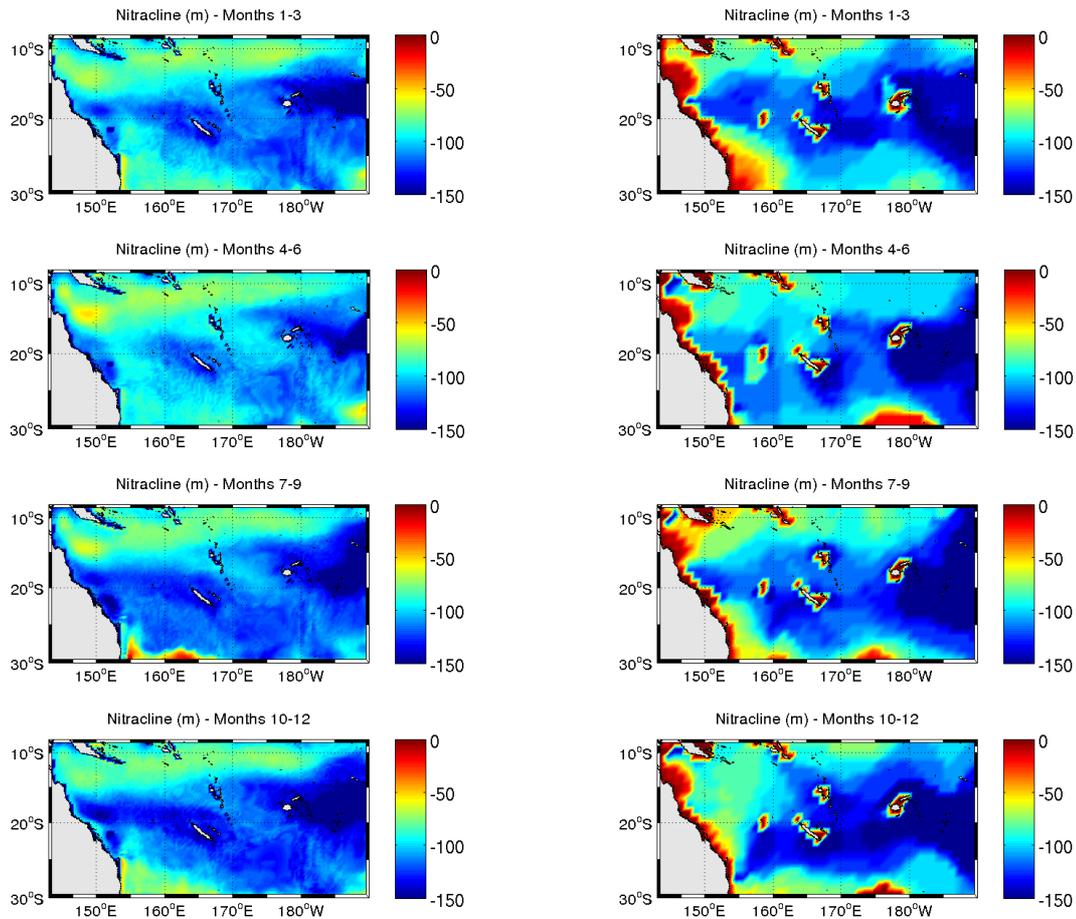


Figure 13: Profondeur de nitracline (m): ROMS-PISCES (à gauche), WOA2001 (à droite). La profondeur de nitracline est estimée comme la profondeur à laquelle la concentration de NO_3 atteint $1\mu\text{mol/l}$. La profondeur moyenne du modèle est de 115m.

3.2.3. Phosphate

Les **Figure 14**, **Figure 16**, et **Figure 15** présentent une comparaison entre phosphate simulé dans ROMS et observé dans WOA. Le modèle présente un biais général qui surestime les valeurs, à la fois en surface et sur la colonne d'eau. Par contre, la structure verticale et la faible variabilité saisonnière dans les simulations sont en bon accord avec les données.

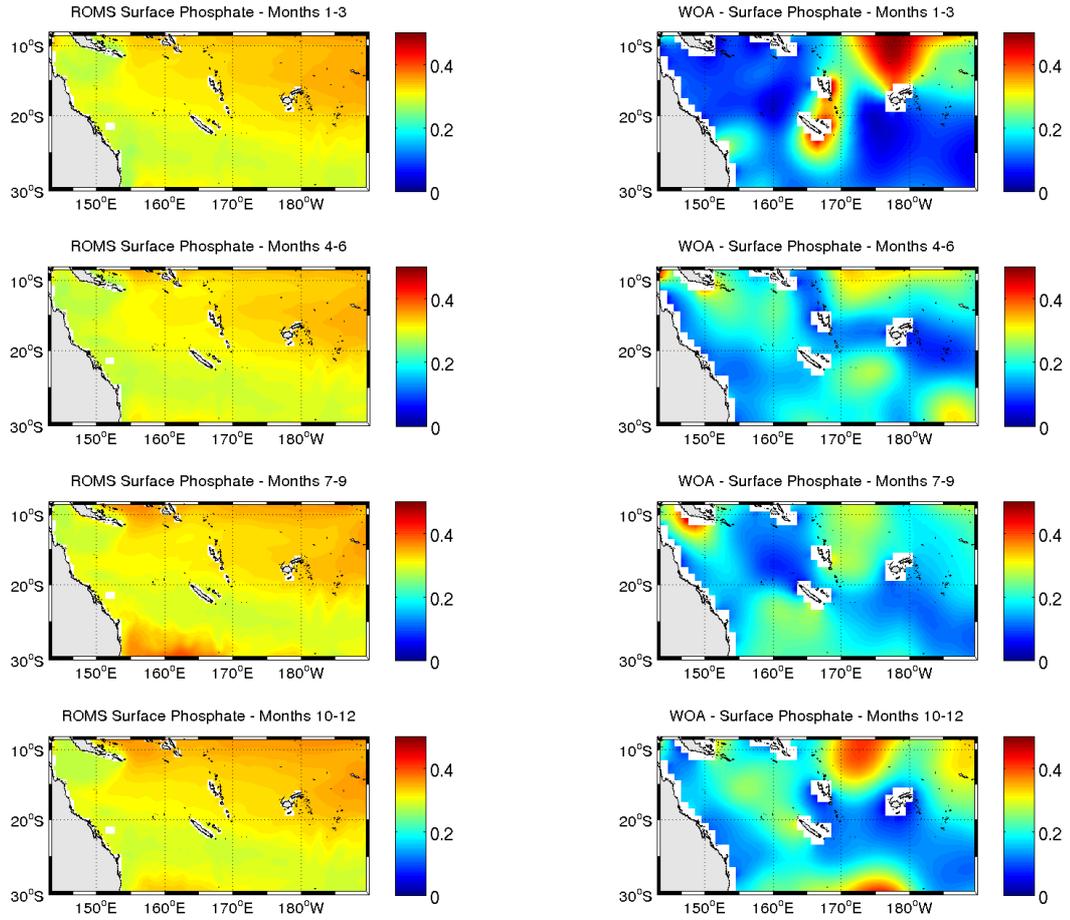


Figure 14: Concentration surfacique de PO_4 : ROMS-PISCES (gauche) and WOA2001 (droite).
Unités en $\mu\text{mol/l}$

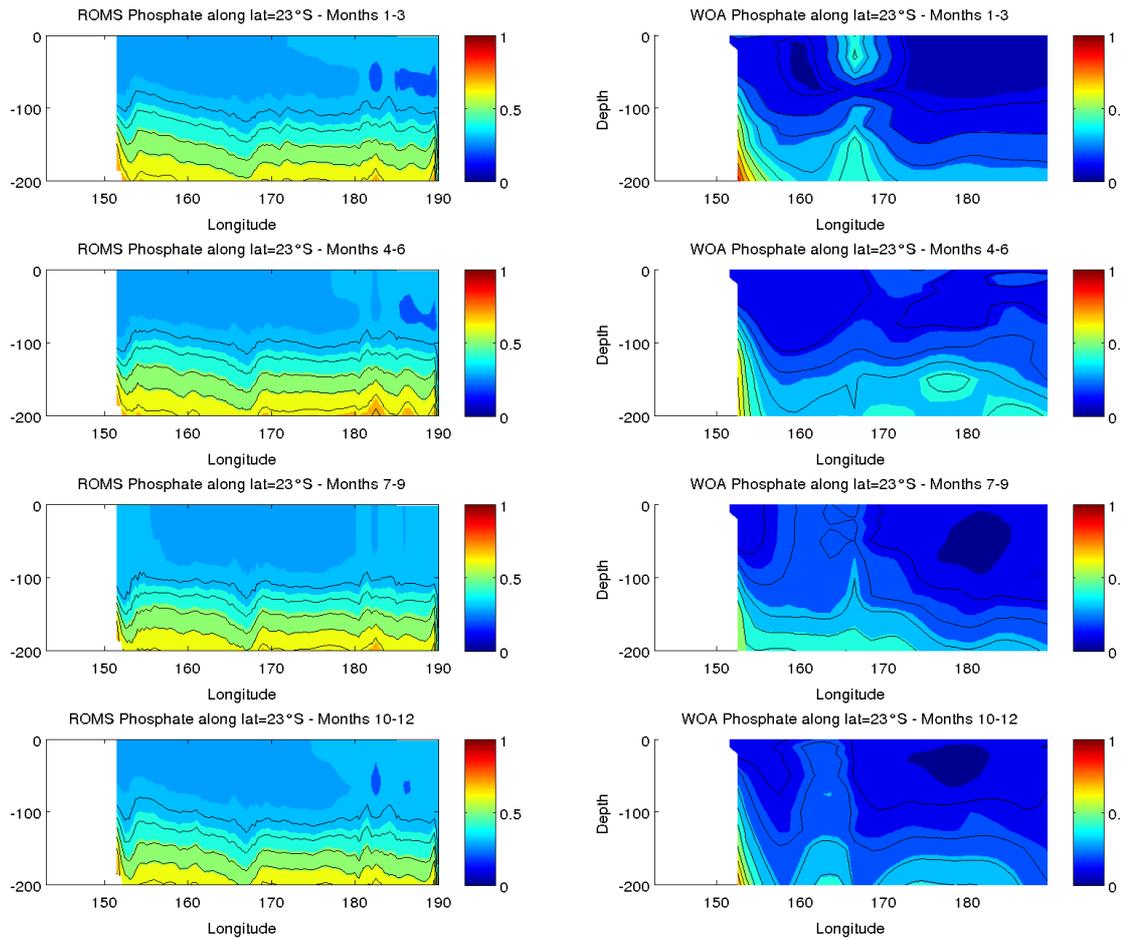


Figure 15: Vertical section of PO₄ concentration along longitude at 23°S: ROMS-PISCES (left), WOA2001 (right). In $\mu\text{mol/l}$

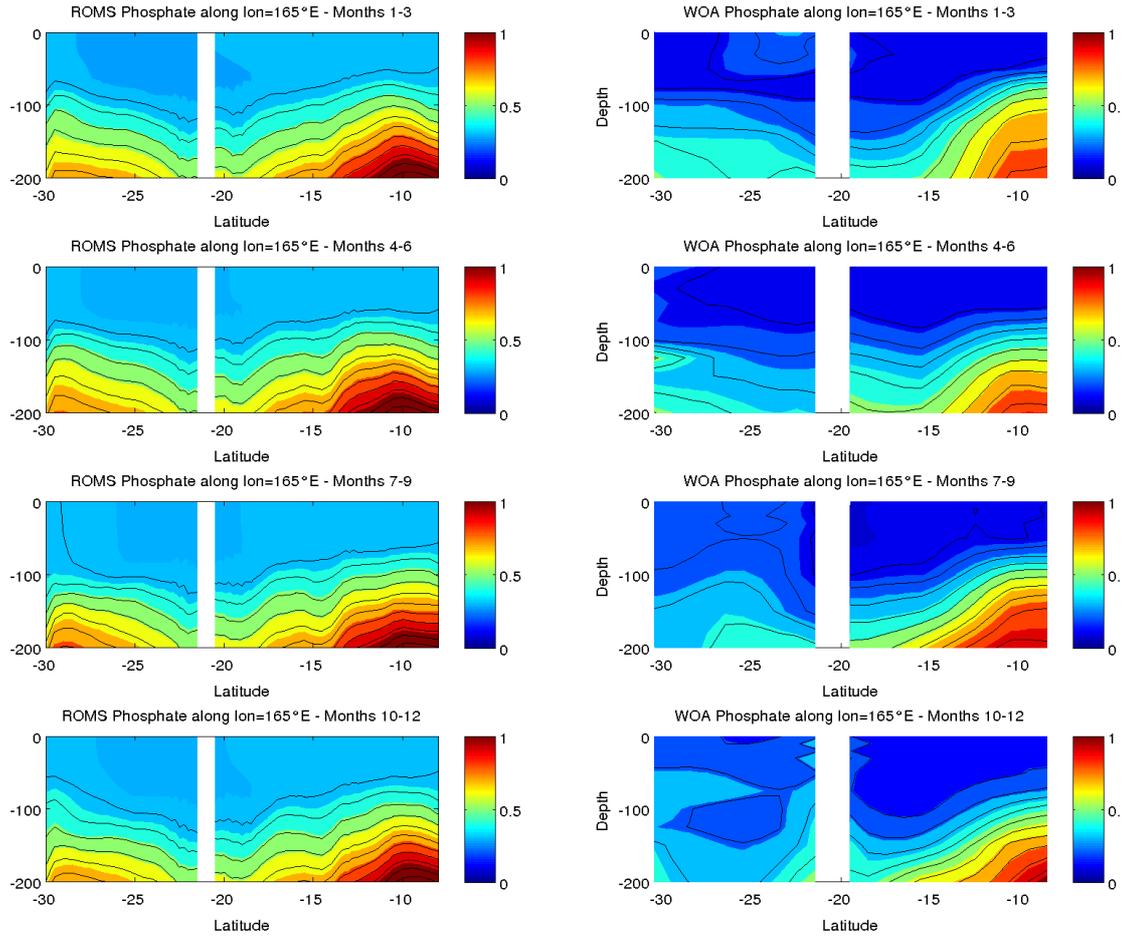


Figure 16: Vertical section of PO_4 concentration along latitude at 165°E : ROMS-PISCES (left), WOA2001 (right). In $\mu\text{mol/l}$

3.3. Comparaison avec les données synoptiques de ZONALIS

Les profils de Chl.a (**Figure 17**), nitrate+nitrites (**Figure 18**) et phosphate (**Figure 19**) de la campagne ZONALIS sont présentés et comparés avec les valeurs moyennes simulées par ROMS-PISCES. Un certain nombre de stations ont été sélectionnées, qui présentent des conditions variables. Une parfaite concordance entre les simulations du modèle et les données observées n'est pas à rechercher, bien sûr, à cause de la variabilité intra-saisonnière et interannuelle qui n'est pas présente dans les moyennes climatologiques du modèle. Cependant la structure à mésoéchelle est quasi-persistante dans la zone de mesures à cause du rôle d'ancrage de la dynamique joué par la topographie, ce qui justifie notre comparaison et apporte plus de précision dans la validation des données du modèle.

Les profils de chlorophylle montrent que la profondeur du maximum de chlorophylle est bien reproduite dans le modèle ; cependant la valeur maximum est parfois surestimée. La chlorophylle de surface est également souvent surestimée. D'ailleurs, le profil de nitrate montre que le modèle surestime le gradient de nitrate dans la nitracline, ce qui peut expliquer l'excès de Chl.a. Cependant, les très faibles valeurs dans les premiers 80 m de la surface sont très bien reproduites par le modèle, tout comme la profondeur de la nitracline. Encore une fois, on peut mettre en doute la validité des données WOA dans notre domaine d'étude, car elles semblent clairement surestimer les concentrations de surface et sous-estimer la profondeur de la nitracline. Rappelons qu'un lissage artificiel des profils verticaux de WOA (lié au grillage de ces données) est probablement à l'origine des erreurs observées. En ce qui concerne le phosphate, c'est le modèle qui semble présenter un biais (comme on l'a vu précédemment), qui s'exprime à toutes les profondeurs, bien que les gradients verticaux semblent assez bien reproduits. Le point le plus marquant reste la couche mélangée qui devrait présenter des concentrations très faibles proches de zéro, d'après les données de la campagne et celles de WOA, alors que la simulation ne produit jamais de valeurs inférieures à 0.3 $\mu\text{mol/l}$.

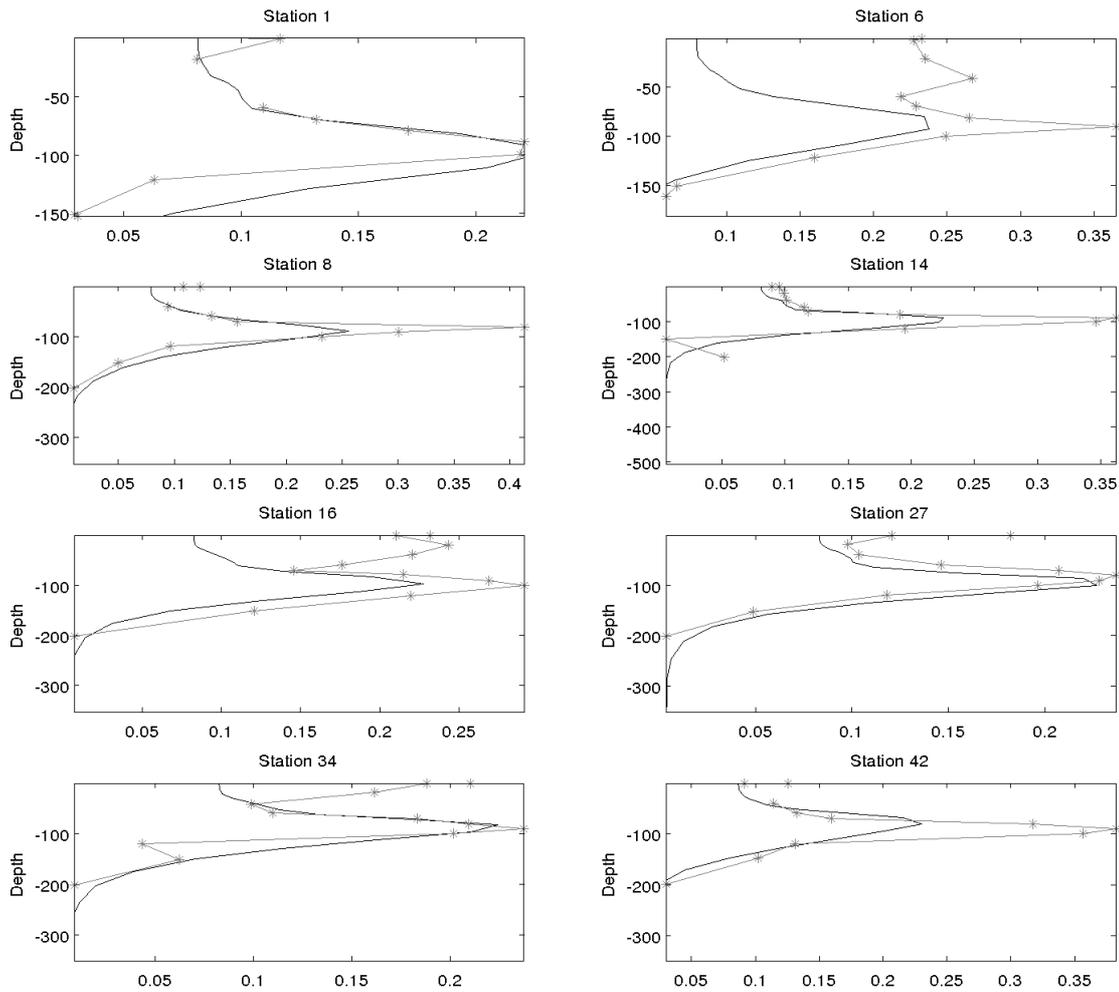


Figure 17 : Profils de Chl-a à différentes stations ZONALIS (1, 6, 8, 14, 16, 27, 34, 42) ; voir Figure 3 pour les positions. Les lignes noires continues représentent les valeurs de ROMS-PISCES; les lignes grises avec étoiles sont les valeurs mesurées.

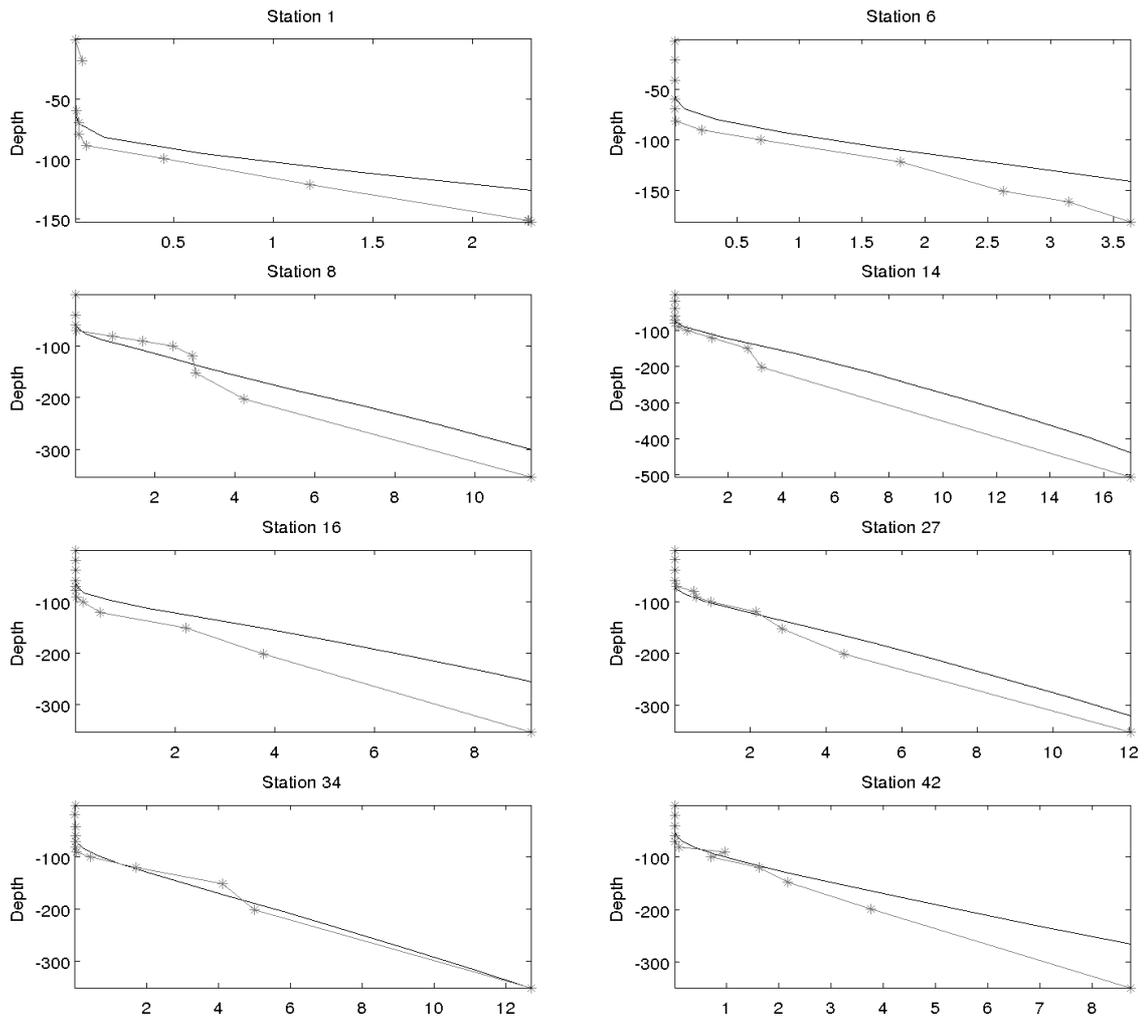


Figure 18: Même figure mais pour le Nitrate+nitrite.

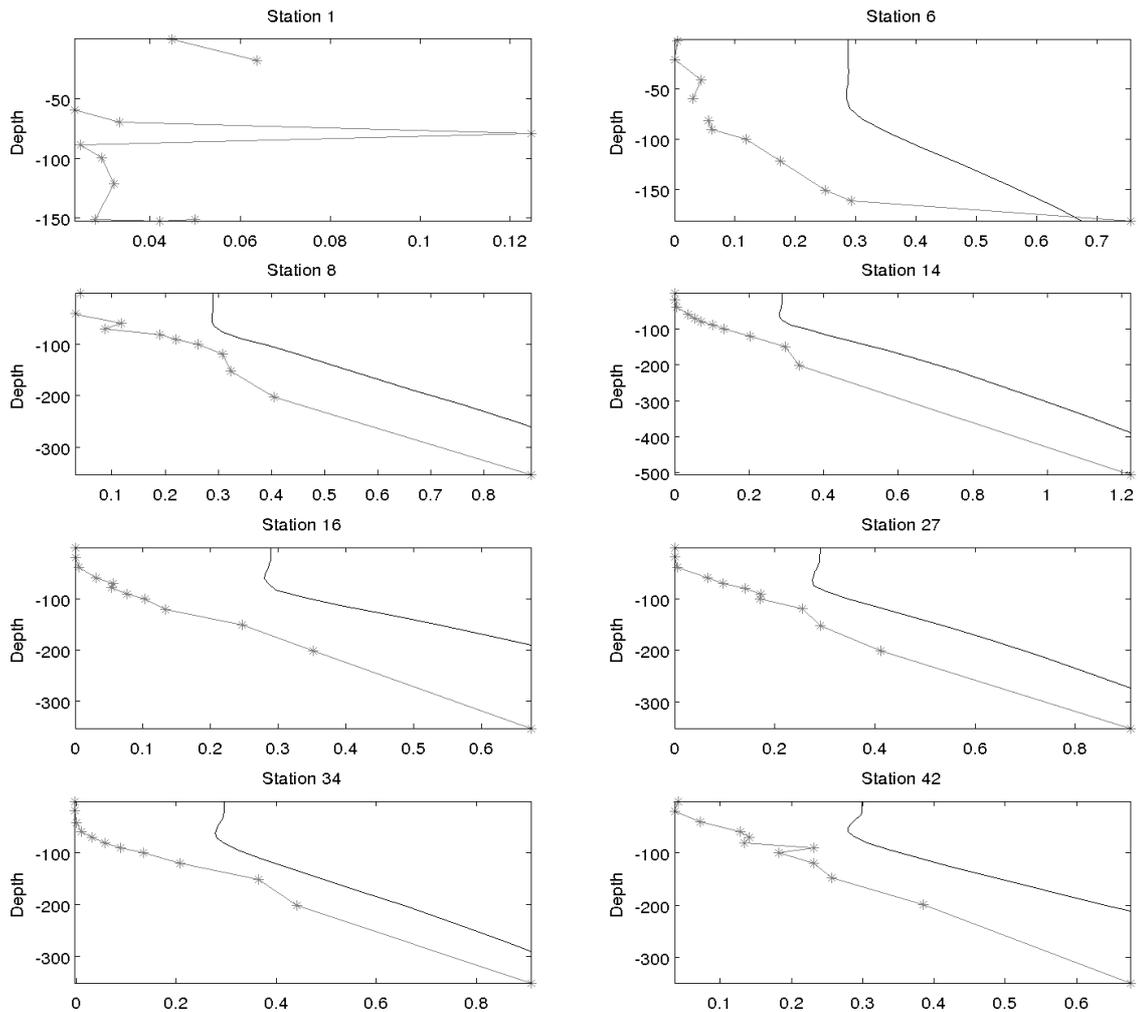


Figure 19: même figure mais pour le Phosphate.

4. Variabilité de la production primaire et mécanismes d'enrichissement des eaux de surface

Notre étude de modélisation et la série de données que nous avons rassemblée ont permis de caractériser la variabilité saisonnière et régionale du Pacifique tropical sud-ouest. C'est une zone oligotrophe avec une concentration de chlorophylle moyenne de surface inférieure à $0.15 \mu\text{gChl.}a/l$. Les concentrations de nutriments de surface restent très faibles toute l'année, avec des valeurs inférieures à $0.05 \mu\text{mol}/l$. Les plus fortes valeurs des données WOA ne se retrouvent pas sur les autres sources de données et peuvent être raisonnablement mises en doute. La variabilité saisonnière est marquée par un fort gradient nord-sud en hiver. La chlorophylle augmente jusqu'à $0.4 \mu\text{g}/l$ dans la partie sud jusqu'à $20-22^\circ\text{S}$, c'est-à-dire jusqu'au front subtropical associé au contre-courant subtropical (STCC). Ce front a été évoqué pour la première fois par Dandonneau & Gohin (1984) à partir de mesures comme une limite de différents régimes de production. En comparant plus précisément dans le modèle le niveau de la mer et les variables biogéochimiques, on s'aperçoit que la zone de très faible production primaire semble être modulée régionalement par la circulation anticyclonique de surface qui s'établit en moyenne sur l'axe méridien entre le sud de la Nouvelle-Calédonie et le

nord du Vanuatu (c'est-à-dire entre le STCC et le SEC (courant sud équatorial) et zonalement fermé par l'Australie (Figure 20 et Figure 21).

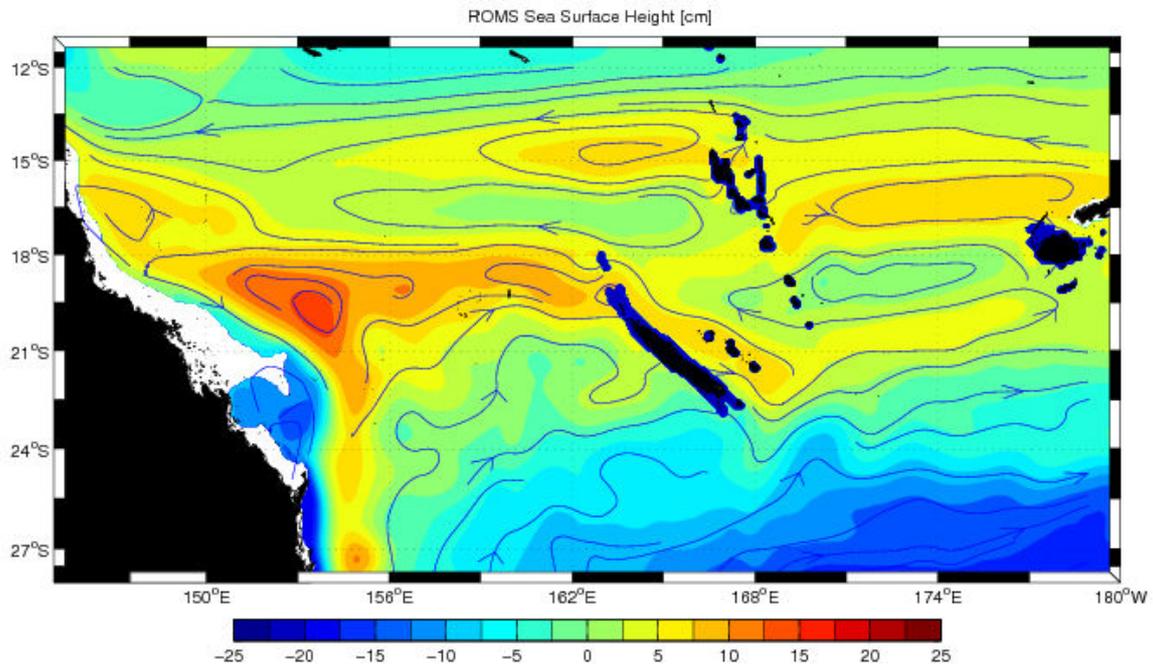


Figure 20: Circulation géostrophique de surface et topographie dynamique dans le Pacifique sud-ouest d'après le modèle ROMS avec une configuration à 1/12° de résolution.

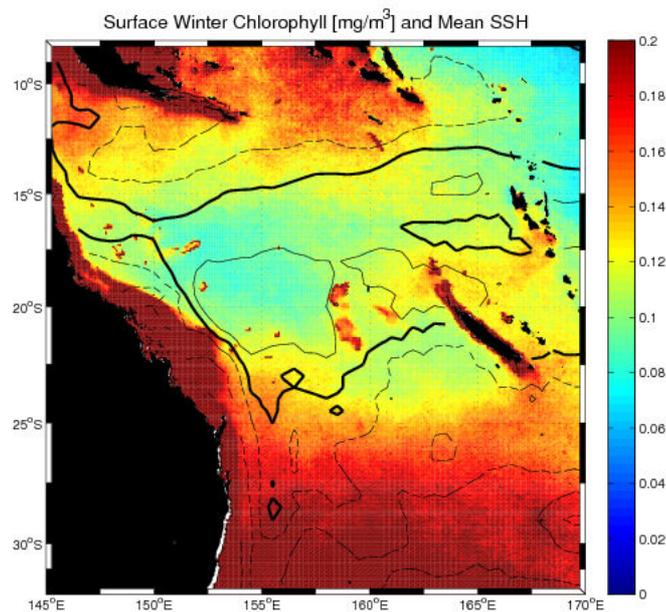


Figure 21 : Les couleurs donnent la concentration de chlorophylle de surface hivernale dérivée de SeaWiFS (mg/m^3); contours noirs : topographie dynamique moyenne 1992-2002 dérivée d'observations satellites et de bouées dérivantes par Maximenko et Niiler (2005) . L'intervalle des contours est de 40 cm/s ; le contour épais dénote la limite de l'écoulement anticyclonique centré sur la mer de Corail.

Cette zone anticyclonique correspond à un approfondissement de la thermocline (Figure 5) ainsi qu'à un approfondissement des variables biogéochimiques tels que la nitracline (Figure 13), et la profondeur du maximum de Chl.a (Figure 22). Une section méridienne de la chlorophylle (Figure 22) nous montre d'ailleurs que cette zone, centrée autour de la Nouvelle Calédonie, est non seulement caractérisée par un approfondissement du maximum de chlorophylle mais également par un affaiblissement de ses valeurs (la valeur moyenne du maximum est alors de $0.2 \mu\text{g Chl.a/l}$). Au contraire, au sud du front subtropical, le maximum profond de chlorophylle disparaît en hiver au profit d'un maximum de surface produit par un apport de nutriments par entraînement des eaux de sub-surface lors du mélange hivernal (évident sur la Figure 16 à la fois dans le modèle et les observations).

Notre interprétation est que l'approfondissement de la nutricline autour de la Nouvelle-Calédonie correspond à un approfondissement du réservoir de nutriments accessible par les processus physiques de remontée d'eau en surface. Ainsi le mélange hivernal, processus dominant d'enrichissement du domaine, qui fait suite à la déstabilisation de la colonne d'eau par les pertes de chaleur vers l'atmosphère (Marchesiello et al., 2009), parvient moins qu'ailleurs dans cette zone de subsidence à enrichir la surface en nutriments. De même, plus localement, l'upwelling calédonien (Henin et Cresswell, 1995 ; Marchesiello et al., 2009) qui se situe à l'extérieur du récif barrière sud-ouest, ne parvient pas à faire remonter suffisamment de nutriments pour déclencher une production primaire importante (Ganachaud et al., 2009). Au contraire, c'est au sud que le refroidissement hivernal est le plus conséquent, produisant un ajustement convectif profond (profondeur de couche mélangée de $\sim 80\text{m}$) qui parvient jusqu'à la nutricline. Au nord du Vanuatu (zone Papouasie-Nouvelle-Guinée), le mélange vertical est plus faible et moins profond ($\sim 50\text{m}$) mais parvient tout de même à entraîner suffisamment de nutriments en surface car la nutricline y est bien moins profonde ($\sim 50\text{-}70\text{m}$ au lieu de $\sim 100\text{-}150\text{m}$ dans la zone centrale). Ainsi, le modèle montre qu'un contexte régional est responsable d'une accentuation du caractère oligotrophe du Pacifique sud-ouest, notamment dans la mer de Corail et le Plateau Nord Fidjien. La Nouvelle-Calédonie apparaît donc comme le point central de cette région qui est l'une des plus pauvres au monde.

Il est important de noter que la production d'une thermocline saisonnière en été sous l'effet du fort réchauffement solaire (le phénomène de stratification est accentué par l'advection vers le sud d'eau tropicale légère ; Marchesiello et al., 2009) ne s'accompagne pas d'une élévation de la nutricline, ce qui peut apparaître comme une caractéristique importante du fonctionnement de l'écosystème pélagique du Pacifique sud-ouest. Cette situation de découplage estivale de l'association nitracline/thermocline semble en partie liée à la profondeur de la zone euphotique qui varie peu en raison de l'oligotrophie des eaux superficielles. En effet, toute diffusion de nitrate vers la surface (par le faible mélange vertical existant sous la couche mélangée), est rapidement utilisée par le phytoplancton, ce qui se traduit par un maximum de production primaire profond. D'ailleurs, la production primaire (PP) a un comportement similaire à la Chl.a avec une profondeur moyenne du maximum à 70m et un approfondissement autour de la Nouvelle-Calédonie. La PP moyenne est de $68.6 \text{ mgC/m}^2/\text{d}$ dont la production nouvelle (f-ratio) représente 23%. Ces chiffres soulignent encore la nature oligotrophe du Pacifique sud-ouest, où les processus de régénération sont importants.

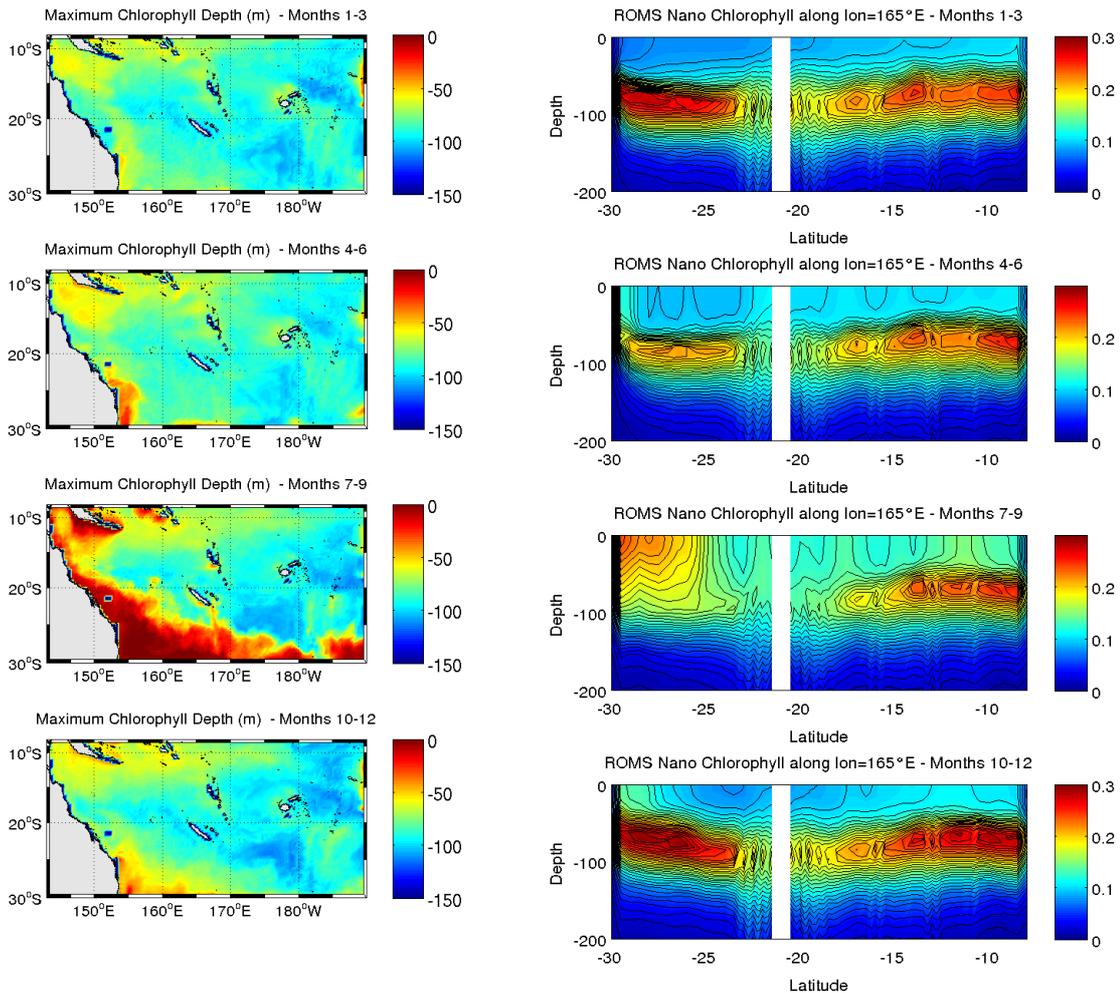


Figure 22 : ROMS-PISCES maximum de Chlorophyll. A gauche : Profondeur de Chla [m]; la profondeur moyenne de la valeur 0.2 $\mu\text{g/l}$ est de 90 m. A droite : section méridienne de concentration de Chla [$\mu\text{g/l}$].

5. Conclusion de la partie I

Notre étude de modélisation a permis de reproduire la variabilité saisonnière de l'écosystème planctonique de l'océan Pacifique sud-ouest. Cet écosystème est presque exclusivement oligotrophe, au sud du front subtropical durant l'hiver austral, lorsque le mélange vertical enrichit la surface de l'océan en nitrate. Ce mélange est lié à la déstabilisation de la colonne d'eau par les pertes de chaleur vers l'atmosphère, plutôt que par un renforcement de l'action mécanique du vent. Ces conclusions, tirées du modèle couplé ROMS-PISCES, sont validées par les données disponibles et sont en bon accord avec d'autres études basées sur l'analyse de ces données (Dandonneau et Gohin., 1984; Dandonneau et al., 2004).

Le modèle permet en particulier de souligner l'importance de la profondeur de la nitracine. Celle-ci montre une variabilité saisonnière faible et peu affectée par la formation d'une thermocline saisonnière relativement peu profonde (40-60 m). Elle montre un maximum dans la partie centrale de notre domaine d'étude comprenant la mer de Corail et le Plateau Nord Fidjien, et englobant les archipels de Nouvelle Calédonie, Vanuatu et Fidji. Le

mélange vertical dans cette région est soutenu en hiver mais ne parvient pas à atteindre la profondeur de la nitracline. De même, l'upwelling calédonien, qui est limité à des profondeurs de ~60m, s'il parvient à refroidir les eaux de surfaces du récif barrière en été car la thermocline saisonnière est peu profonde, ne peut parvenir à les enrichir car la nitracline est trop profonde.

Une comparaison de la structure de la circulation régionale avec celle de la profondeur de la nitracline a permis également de proposer un processus de structuration de la nitracline à l'échelle régionale, avec un impact direct sur la production primaire. Ceci représente une conclusion importante de notre étude et permet de souligner l'intérêt d'un indicateur et moteur de possibles changements de l'écosystème.

Le problème du niveau de phosphate trop important dans le modèle pose encore de nombreuses questions. Le phosphate est-il un élément limitant dans la réalité ? La comparaison du phosphate inorganique dissous dans le modèle avec les valeurs mesurées, montre que le modèle surestime clairement cette variable. Notre interprétation est que la constance du rapport de Redfield dans le modèle PISCES, conduit à l'impossibilité de montrer une limitation par le phosphate. Mais en réalité, peu d'informations sur cette limitation sont disponibles dans le Pacifique sud-ouest, à l'exception notable de l'étude de Moutin et al. (2005) montrant que la disponibilité du phosphate pourrait déterminer le niveau de fixation d'azote par diazotrophie et ainsi modifier la production primaire. Les blooms de la cyanobactérie diazotrophe *Trichodesmium sp.* semblent en effet fréquents dans le Pacifique sud-ouest, particulièrement autour de la Nouvelle Calédonie (Dupouy *et al.*, 2000), ce qui suggérerait une levée de la limitation de l'azote dans la limite de la présence de phosphore minéral en quantités suffisantes. Moutin et al. (2005) ont montré que c'était le cas, sauf à la fin de l'été lorsque tout le phosphore de la couche mélangée a été utilisé par les organismes diazotrophes. Cela suggère que le réalisme du modèle biogéochimique PISCES pourrait être renforcé par l'introduction d'une description explicite de la diazotrophie, en ajoutant une variable d'état pour le phytoplancton fixateur d'azote et les processus associés.

Enfin, nous n'avons eu le temps que d'explorer et de décrire les mécanismes saisonniers. Or, la variabilité interannuelle de type ENSO (El Niño/Oscillation Australe) devra être considérée dans nos futures analyses afin de quantifier l'impact des ces forçages interannuels sur l'écosystème. De même, on peut se poser la question des impacts de variabilités climatiques plus longue de type PDO (Pacific Decadal Oscillation) ou bien des tendances liées aux changements globaux.

PARTIE II: LE THON GERMON et ses PROIES

Réalisé en parallèle du précédent, ce travail comporte deux principales activités. Tout d'abord il a été nécessaire de paramétrer le thon germon (*Thunnus alalunga*) dans le modèle SEAPODYM. Pour ce faire, en collaboration avec CLS (Collecte Localisation Satellites, Toulouse), une configuration basse résolution (2°) à été mise en place pour la Pacifique Sud. Puis, des simulations à haute résolution des proies et du thon germon ont été réalisées en utilisant la solution du modèle ROMS-PISCES dans sa configuration Pacifique sud-ouest à $1/3^\circ$. Pour ce faire, de nouveaux outils d'interpolation ont été développés pour imbriquer les grilles ROMS-PISCES et ORCA2 sur une grille SEAPODYM du Pacifique Sud à $1/3^\circ$ de résolution. Une grande partie de cette étude a donc été consacrée à la mise en place technique de la modélisation.

6. Le thon germon dans le Pacifique Sud

6.1. Introduction

Le thon germon est une espèce tempérée qui vit principalement dans les eaux tropicales et subtropicales à des températures de 14 à 25°C et à des profondeurs comprises entre 0 et 400m. L'espèce comprend un stock bien individualisé dans le Pacifique sud. Les thons germes (ou thons blancs ou « Albacore » en Anglais) adultes se répartissent à des latitudes comprises entre 10°S et 25°S et se reproduisent majoritairement durant l'hiver austral (Ramon and Bailey, 1996). Les jeunes individus (<5ans), quant à eux, se répartissent au sud de 30°S, et sont pêchés au niveau des côtes néo-zélandaises et de la zone de convergence subtropicale par les pêcheries de surface (traîne et filet maillant) à des tailles autour de 50-60 cm. Le thon germon effectue régulièrement des migrations saisonnières entre les zones tropicales et subtropicales pour s'alimenter et pour se reproduire. Ces migrations saisonnières sont visibles dans l'évolution mensuelle des captures palangrières de la région subéquatoriale. Les pêcheries palangrières enregistrent notamment des pics en décembre-janvier et mai-juillet, qui indiquent une migration des thons blancs vers le sud durant l'été et vers le nord durant l'hiver. Ce mouvement semble correspondre au changement de conditions environnementales et notamment à l'emplacement des isothermes de surface compris entre 23° et 28° (Langley, 2004). L'abondance et la distribution des proies du thon ainsi que l'ensemble de ces paramètres environnementaux sont intégrés dans le modèle écosystémique SEAPODYM afin de simuler la dynamique de la population et les captures de thon germon à l'échelle du Pacifique Sud puis dans la région calédonienne (Section 7).

6.2. Le sous-modèle des proies du thon

Le modèle des proies du thon inclus dans SEAPODYM a été décrit en détail par Lehodey (2004) et nous ne reviendrons ici que sur les principes fondamentaux. Ce modèle est basé sur le principe d'un transfert d'énergie, depuis la production primaire vers 6 niveaux trophiques différents (Figure 23:). Ces six compartiments se décomposent en deux groupes comprenant

les espèces migratrices et non migratrices, et 3 couches de la colonne d'eau. La première couche (épipelagique) correspond à la couche euphotique (profondeur à laquelle la lumière ambiante est égale à 1% de celle de surface, soit environ ~100 m), la deuxième (mésopélagique) correspond à 3 fois la profondeur de la base de la couche euphotique (soit environ 100-400m) et la dernière (bathypélagique) de ~400 à 1000m. Pour chacune de ces 3 couches, on peut définir 3 composantes « sédentaires », constituées de proies qui y restent en permanence (composantes 1-3-6 ; Figure 23:) et 3 composantes migratrices décrites ci-après, qui se déplacent dans la colonne d'eau en fonction du cycle diurne. Les migrateurs mésopélagiques (2 dans le schéma ci-dessous), se déplacent à la tombée du jour vers la couche de surface, les migrateurs bathypélagiques (4 dans le schéma ci-dessous), migrent à la tombée du jour depuis la couche bathypélagique vers la couche intermédiaire et les proies hautement migratrices bathypélagiques (5 dans le schéma ci-dessous), remontent depuis le fond jusqu'à la surface au coucher du soleil. Au lever du soleil, toutes les espèces migratrices retournent dans leur habitat vertical respectif le long de la colonne d'eau.

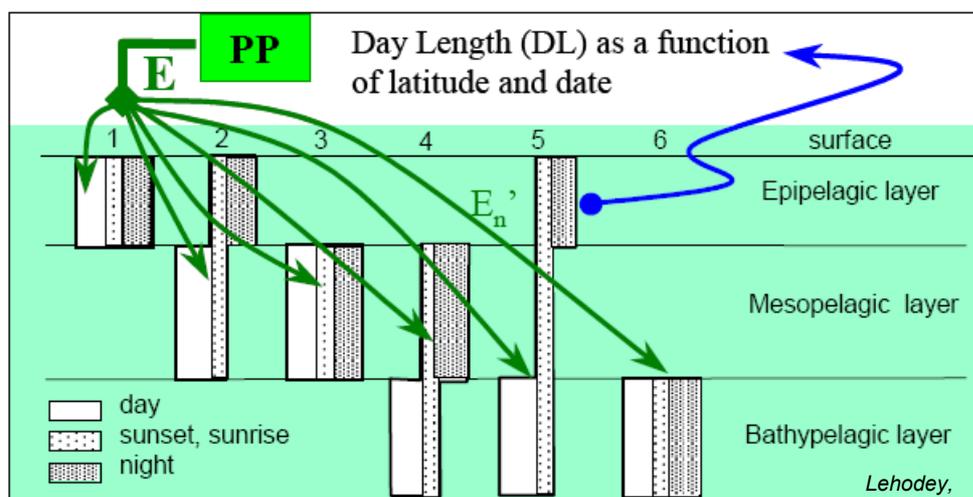


Figure 23: Description des différents compartiments du modèle de proies : (1) épipelagique, (2) migratrice mésopélagique, (3) mésopélagique, (4) migratrice mésopélagique, (5) hautement migrant bathypélagique, (6) bathypélagique. PP est la production primaire, elle est en entrée du système représentée comme une énergie (E), transférée dans les différents compartiments.

L'évolution de chaque compartiment du modèle de proies est ensuite déterminée par deux équations d'advection-diffusion. Dans la première (equation 1), on modélise l'évolution des premiers stades du micronecton (S), à partir du temps initial du cycle de développement jusqu'au moment où les proies sont disponibles pour les thons ($T_r \sim 3$ mois), et cela dans chaque compartiment de proie n . S est d'abord calculée comme un transfert d'une partie de la production primaire, production déduite du modèle couplé physique-biogéochimique. Le coefficient de transfert de la production primaire est fonction de l'échelon trophique de la proie des thons. Ici, on prend 2,5 (micronecton). Ensuite on laisse advecter/diffuser et vieillir le micronecton selon l'équation 1 pendant 3 mois.

$$\frac{\partial S_n}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 S_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S_n}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u} S_n) - \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v} S_n) - m S_n \quad \text{éq 1}$$

S représente alors le terme source pour chaque compartiment (n=1 à 6) dans chacune des trois couches; \bar{u} et \bar{v} représentent les vitesses zonales et méridiennes des courants moyennés sur chaque couche, D est le coefficient de diffusion et m la mortalité.

Au bout de 3 mois, on considère que S est accessible pour la proie des thons dont la biomasse F est calculée par l'intermédiaire de l'équation 2, λ le coefficient de mortalité et S la production de proies au bout de Tr=3 mois (cf équation 1).

$$\frac{\partial F_n}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 F_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F_n}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u} F_n) - \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v} F_n) - \lambda F_n + S_n \quad \text{éq 2}$$

New Primary Production

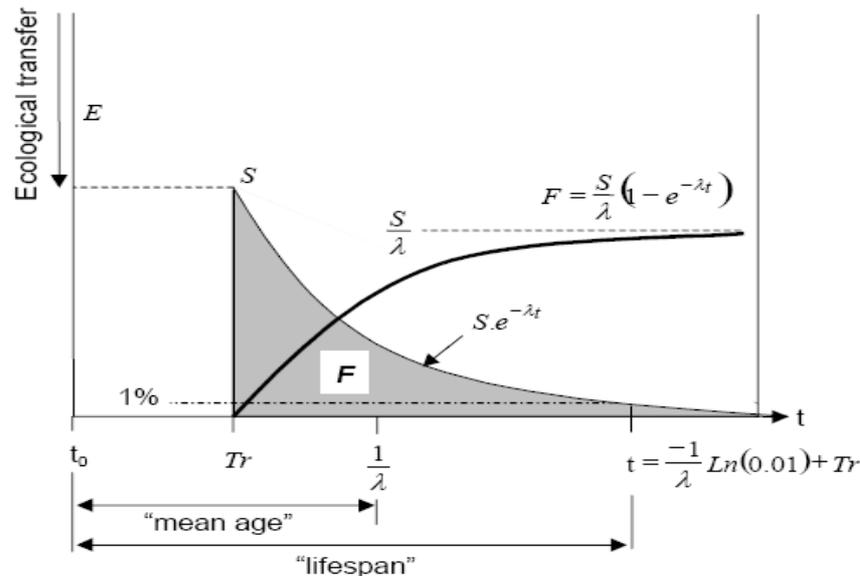


Figure 24: croissance de la biomasse des proies des thons

Ces équations représentent le transfert écologique entre les niveaux trophiques inférieurs et intermédiaires, dont la Figure 24 montre l'évolution dans le cas où l'advection et la diffusion ne sont pas considérées. Ce modèle est relativement simple car il ne considère que des groupes fonctionnels alors que les proies comportent de multiples espèces. Il est cependant d'importance capitale dans la modélisation de la biomasse de thon.

Dans ce projet, les paramètres du modèle de proies ont été calibrés afin d'obtenir une biomasse réaliste pour le thon germon. La Figure 25 représente les proies de jour et de nuit dans les différentes couches. Premièrement, on voit que la biomasse de proies de surface est spatialement décorrélée de la production primaire qui est maximale dans la zone équatoriale. Ceci illustre le processus de transport par les courants et de vieillissement de la source des proies à partir de la production primaire. On comprend alors la nécessité d'un tel modèle pour comprendre la distribution des proies qui ne peuvent pas être déduite, à grande échelle, des cartes de production primaire. A l'échelle régionale, on remarque néanmoins que, comme pour la production primaire (chapitre précédent), la ZEE calédonienne est une zone pauvre en proies, ce qui suggère que la circulation anticyclonique que l'on a mis en évidence dans cette zone a également un impact sur les niveaux trophiques supérieurs. Deuxièmement, on observe clairement sur les cartes les migrations diurnes entre les trois niveaux, notamment une part importante de la biomasse bathypélagique se retrouve en surface pendant la nuit.

Comprendre la distribution des proies est une étape essentielle vers la compréhension de l'habitat des thons (voir la suite) et on comprend la nécessité de bien valider le modèle de proies présenté ici. Pour le moment, ce modèle n'est pas précisément validé par des observations simplement parce que de telles observations sont éparées et difficiles à rassembler, ce que nous n'avons pas pu faire par manque de temps. Une des voix prometteuses pour valider ce modèle vient des données acoustiques dédiées au micronecton qu'il s'agirait de rassembler dans une étape suivante. De même, il semble que l'on puisse aussi se servir des données acoustiques couramment acquise par les campagne d'océanographie physique via l'ADCP qui mesure souvent les courants sur les 500 premiers mètres de l'océan. Une telle étude nous semble importante dans le futur pour mieux valider et ajuster le modèle de proies.

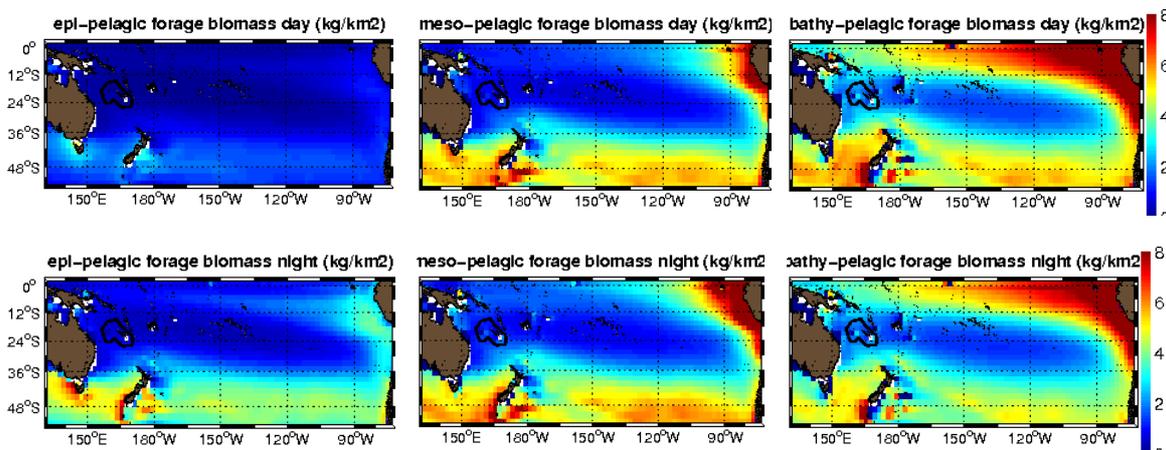


Figure 25 : Biomasse de proies (kg/km²) pour chaque couche durant la nuit (en bas) et le jour (en haut).

6.3. Le modèle SEAPODYM appliqué au thon germon

Avant de décrire le modèle d'habitat et de présenter les résultats obtenus, il est important de revenir sur le fonctionnement global de SEAPODYM et la procédure d'optimisation qui lui est associée.

Le schéma Figure 26 représente le fonctionnement du modèle de thon. A partir des données hydrodynamiques (températures, courants), biogéochimiques (oxygène, production primaire), et des proies (elles-mêmes calculées à partir de ces même données, voir paragraphe précédent), le modèle construit un habitat pour les thons, puis simule les migrations de biomasse ainsi que les captures. Les données de captures utilisées pour ce travail proviennent des fiches de pêche récoltées par la CPS. Ces données sont utilisées pour optimiser les paramètres du modèle. La procédure d'optimisation (largement décrite dans Senina et al. 2008) consiste à estimer les paramètres qui minimisent la différence entre captures prédites et captures réelles.

Le modèle de dynamique du thon est basé sur la description de son habitat. Bien que l'influence des courants soit encore prise en compte, le déplacement des poissons y est réglé principalement par un gradient d'habitat, ce dernier regroupant l'ensemble des caractéristiques écologiques nécessaires à la survie de l'espèce. On distingue l'habitat d'alimentation de celui où a lieu la ponte. L'habitat d'alimentation est une fonction (comprise

entre 0 et 1) de la température, de l'oxygène dissous, et de la concentration des proies. L'habitat de ponte est fonction de la température et d'un rapport entre la concentration des proies (prédateurs des larves de thons) et la production primaire (nourriture pour les larves). Le déplacement des thons qui est réglé par le gradient d'habitat est alors introduit dans une équation d'advection/diffusion.

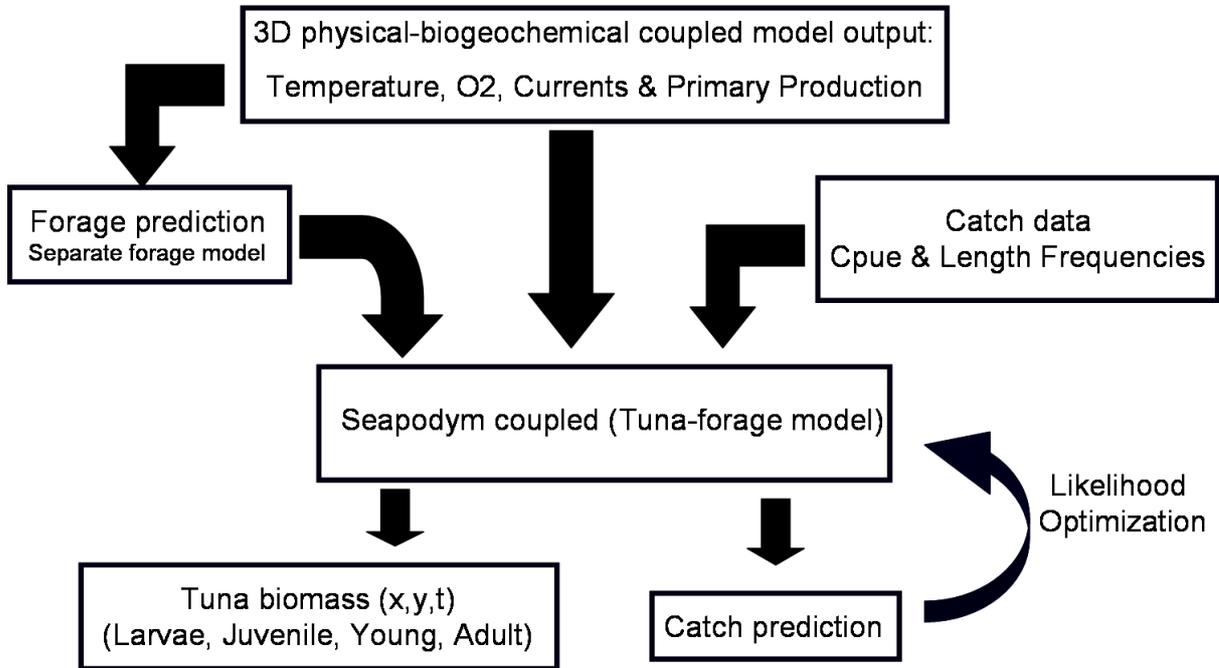


Figure 26 : schéma simplifié du fonctionnement du modèle SEAPODYM

6.4. Les équations d'évolution du Thon

L'équation 3 ci-dessous gouverne l'évolution (terme de droite) en fonction du transport, diffusion, mortalité, et source (termes de gauches) de la concentration des 3 classes de taille de juvéniles J_k (1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} mois), qui dérivent au gré des courants comme du plancton; l'équation 4 gouverne l'évolution des jeunes Y_k (3 mois à 5 ans par classes de 6 mois; équation 4a) et des adultes A_k (5-15 ans par classes de 1 an; équation 4b), dont les déplacements sont essentiellement fonctions de leur habitat :

$$\frac{\partial}{\partial t} J_k = -div(J_k V_C) + div(D_k \nabla J_k) - m_k J_k + S_{J_k} \quad k = 0 - 2 \quad \text{éq 3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} Y_k = -div[Y_k (V_C + V_k)] + div(D_k \nabla Y_k) - m_k Y_k + S_{Y_k} \quad k = 3 - 12 \quad \text{éq 4a}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} A_k = -div[A_k(V_C + V_k)] + div(D_k \nabla A_k) - m_k A_k + S_{A_k} \quad k = 13 - 21 \quad \text{éq 4b}$$

$$\text{avec } V_k = \chi_k \cdot \nabla H_a \quad \text{éq 4c}$$

V_k est la vitesse de déplacement des thons proportionnel au gradient d'habitat (avec le coefficient χ_k) ; V_C est la vitesse moyenne des courants ; D_k est le coefficient de diffusion; m_k est le coefficient de mortalité ; S représente la source de juvéniles, jeunes ou adultes.

Le mouvement des poissons tel qu'il est reproduit dans SEAPODYM peut être facilement compris par trois exemples bien distincts. Sur la Figure 27 sont représentés schématiquement ces trois cas :

- Si le gradient d'habitat est nul le mouvement est alors purement diffusif (Figure 27-gauche)
- si le gradient d'habitat est non nul, alors le mouvement se fait sous l'influence du gradient d'habitat selon la direction G perpendiculaire au gradient avec toujours une part de diffusion représentant les mouvements aléatoires des poissons (Figure 27-milieu)
- si l'habitat est maximum (le gradient est nul) et qu'il est favorable (≈ 1), la diffusion devient nulle et le mouvement également, les thons restent alors sur place (Figure 27-droite).

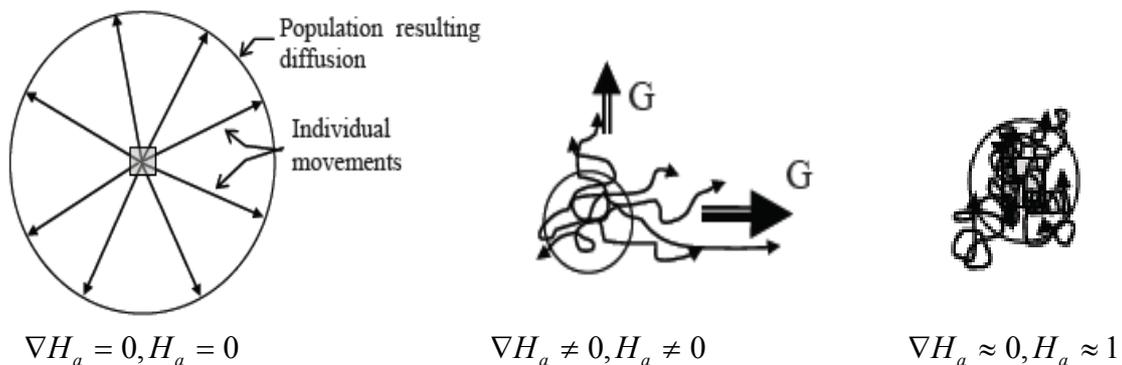


Figure 27 : Mouvements des thons dictés par les équations d'advection-diffusion G représente le gradient d'habitat (amplitude et direction)

6.5. Le modèle d'habitat

Le modèle d'habitat est le cœur du modèle de thons, et nous allons donc nous attacher à le décrire plus en détail. Tout d'abord, l'habitat se décompose en deux, un habitat où les poissons se nourrissent (habitat d'alimentation) et un habitat où ils se reproduisent (habitat de ponte).

6.5.1. Habitat d'alimentation

Cet habitat est basé sur l'accessibilité des thons aux proies. Cette accessibilité est proportionnelle à la présence de proies mais modulée par la température et l'oxygène dissous. L'indice de l'habitat d'alimentation est calculé en chaque point d'espace (i,j), comme la somme des 6 composantes n du compartiment « proies » F (Figure 22) modulée par l'accessibilité en température (Φ) et en oxygène (ψ) (éq 5). La valeur de Hf est ensuite normalisée (entre 0 et 1) dans l'équation 6.

$$Hf_{ij} = \sum_n \psi_{n,ij} \cdot \Phi_{n,ij} \cdot F_{n,ij} \quad \text{éq 5} \qquad Hf = \frac{2}{\pi} \cdot \arctan(Hf \cdot \frac{\pi}{2}) \quad \text{éq 6}$$

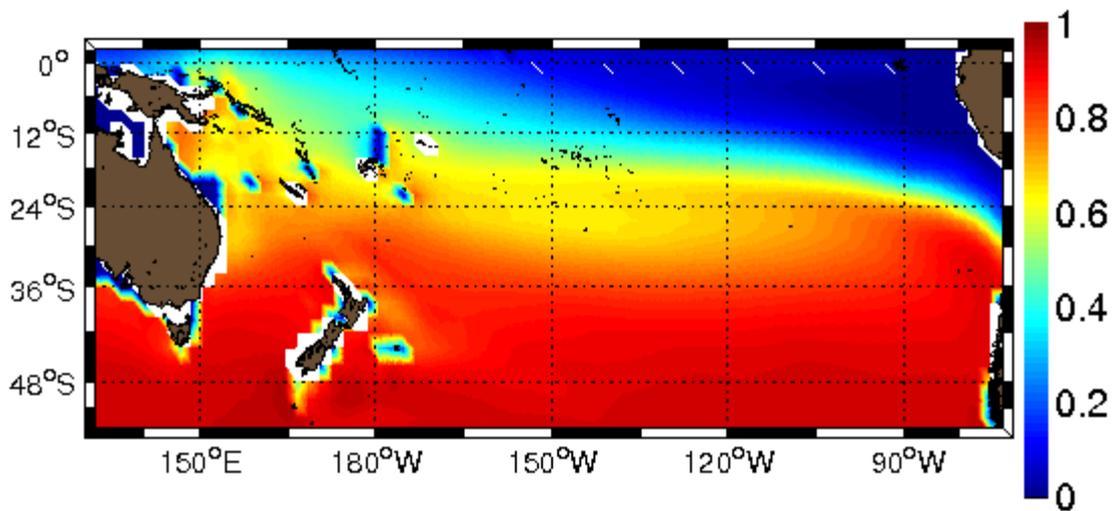


Figure 28 : Habitat moyen d'alimentation (ORCA2-PISCES-SEAPODYM). La moyenne est effectuée sur les années 1979-2002.

La Figure 28 montre la répartition géographique de l'habitat moyen d'alimentation du thon germon, calculé par la chaîne des modèles ORCA2-PISCES-SEAPODYM. L'habitat présente globalement un gradient méridien avec les plus forts indices aux hautes latitudes où les proies sont abondantes et des valeurs très faibles vers l'équateur, particulièrement à l'Est où température et oxygène limitent l'accessibilité aux proies. Il est intéressant de noter que cet habitat est très décorrélé, comme pour la distribution des proies de surface, des zones maximales de production primaire située dans l'upwelling équatorial. Il est également intéressant de noter que la ZEE Calédonnienne se situe dans un habitat d'alimentation assez favorable pour les thons blancs. Cet habitat est également celui des jeunes poissons (3 mois à 5 ans, < 70cm) pêchés essentiellement avec des lignes de traîne autour de la Nouvelle-Zélande. La répartition spatiale de cet habitat s'explique principalement par la présence importante de proies au Sud (Figure 25), alors que les faibles valeurs de proies à l'équateur (en plus des faibles valeurs d'oxygène) limite l'habitat dans le nord du domaine.

Les valeurs faibles d'habitat qui apparaissent de manière singulière dans le pacifique sud à l'ouest et autour de la Nouvelle-Zélande correspondent à des hauts-fonds (bathymétrie inférieure à 1000m). En effet, bien que les thons germon n'aient pas accès à la couche bathypélagique directement, la composante migrante du micronecton dans cette couche

représente la plus grande part des proies, et détermine donc fortement l'habitat. Ainsi, avec la structuration verticale du micronecton qui est actuellement imposée dans le modèle, il ne peut y avoir d'habitat favorable (et donc de poissons) dans les zones où la profondeur est inférieure à 1000m. Cet aspect qui semble irréaliste, bien que marginal à cette résolution sera limitant quand il s'agira de solution à haute résolution, et mériterait une étude plus approfondie et probablement une restructuration des classes de micronecton.

Pour différencier l'influence de chacun de trois paramètres F , Φ et ψ (éq 5) composant cet habitat, on explore maintenant leur structure (F est déjà décrit au chapitre 1.2).

6.5.1.1. Accessibilité à la température (Φ)

L'accessibilité à la température est représentée par un indice Φ qui est une fonction exponentielle de la température ambiante, relative à une température optimale, et d'un écart type qui dépend de l'âge des thons:

$$\Phi_{nij} = e^{-\left(\frac{T_{nij}-T}{2\sigma^2}\right)} \quad \text{eq.7}$$

La Figure 29 représente la gamme de températures accessible au thon germon en fonction de son âge. Plus les thons sont âgés, plus ils sont capables de descendre en profondeur et d'avoir accès aux eaux froides et trouver leur nourriture. L'indice Φ prend alors une forme en cloche qui se déplace sur l'axe des températures : les valeurs de température optimale sont plus faibles lorsque l'âge augmente ; en même temps une plus large gamme de températures est accessible autour de la température optimale (la courbe en cloche s'épaissit car σ augmente).

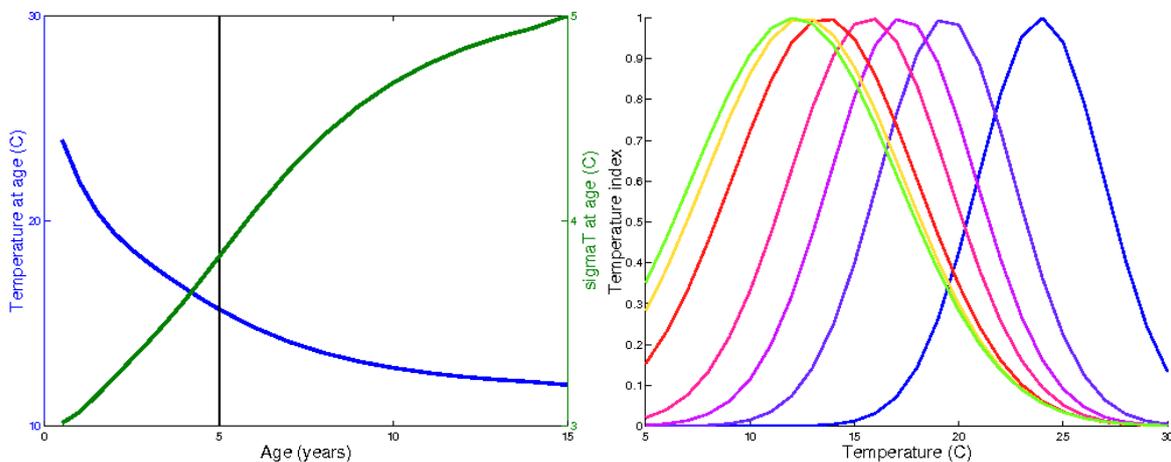


Figure 29 : Représentation de la gamme de température accessible au thon germon en fonction de son âge. A gauche, la courbe bleue représente la température moyenne $T(\text{âge})$ et la courbe verte l'écart type σ . A droite, l'indice de température Φ est représenté en fonction de l'âge des poissons (l'âge augmente à mesure que les courbes s'éloignent du bleu).

6.5.1.2. Accessibilité à l'oxygène

La fonction utilisée pour l'oxygène (éq 8) est de type « sigmoïde » avec une valeur seuil (O_{cr}) aux environs de 2.5 mmol/l :

$$\psi_{nij} = \frac{1}{1 + \gamma^{(O_{nij} - O_{cr})}} \quad \text{éq 8}$$

Cette fonction représentée Figure 30 est étroitement dépendante de γ ; la limitation de l'accessibilité des proies par l'oxygène est plus forte pour des plus grandes valeurs de γ . Dans le cas du thon germon, après optimisation de ces paramètres on obtient $\gamma = 0.01$ et $O_{cr} = 2.8$ ml/l, ce qui correspond à la courbe bleue (Figure 30).

Au final, on constate, si l'optimisation a fonctionné comme prévu, que la forme de la fonction de limitation en oxygène n'est pas importante avec cette valeur de γ . Ce qui importe, c'est que l'habitat en oxygène est favorable si $O > O_{cr}$ et complètement défavorable si $O < O_{cr}$.

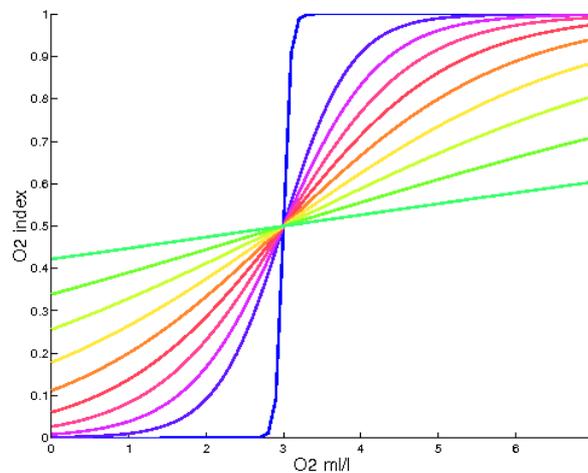


Figure 30 : Fonction limitante en oxygène. Les courbes allant du vert vers le bleu, représentent une augmentation de la valeur de γ .

6.5.2. Habitat de ponte

L'habitat de ponte dépend de la température de la couche de surface, de la production primaire sur laquelle se nourrissent les larves, et des proies qui sont dans ce cas une source de prédation pour les larves. Les thons germon pondent donc dans des eaux chaudes, où la production primaire est suffisante mais où la prédation par le micronecton est faible. La fonction utilisée pour la température est identique à celle de l'habitat d'alimentation (éq. 9) et une fonction de « prédation » (éq. 10) est introduite. L'indice d'habitat de ponte est alors le produit en chaque point de grille de ces deux fonctions. Il est ensuite normalisé, comme pour l'habitat d'alimentation, via l'équation 12.

$$\Phi_{ij} = e^{-\left(\frac{T_{surf,ij} - T}{2\sigma^2}\right)} \quad \text{éq. 9}$$

$$Pf_{ij} = \frac{\Lambda_{ij}}{\alpha + \Lambda_{ij}} \text{ avec } \Lambda = \frac{PP_{ij}}{F_{surf,ij}} \quad \text{éq. 10}$$

$$Hs_{ij} = \Phi_{ij} \cdot Pf_{ij} \quad \text{éq. 11}$$

$$Hs_{ij} = \frac{2}{\pi} \cdot \arctan\left(Hs_{ij} \cdot \frac{0.1 + \alpha}{0.1} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{éq. 12}$$

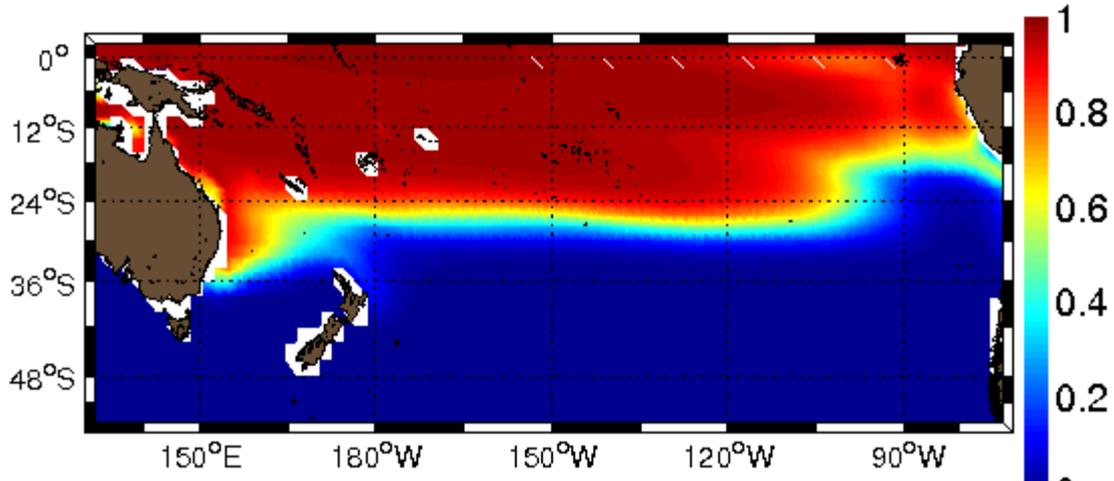


Figure 31 : Habitat de ponte moyen dans ORCA2-PISCES-SEAPODYM

La Figure 31 montre l'habitat de ponte moyen calculé par la chaîne de modèles ORCA2-PISCES-SEAPODYM. Sa répartition est quasiment homogène et occupe la moitié nord du domaine. L'indice est maximum aux basses latitudes où les eaux sont chaudes et les proies peu abondantes. La ZEE de Nouvelle-Calédonie se situe dans des valeurs proche de 1 à la frontière Sud de cet habitat. Cette distribution méridienne est essentiellement pilotée par la température de la couche de surface, tandis que le gradient est-ouest résulte de la présence de prédateurs (micronecton) dans la zone de l'upwelling équatorial et de l'upwelling côtier du Perou-Chili.

Ce qu'on doit retenir c'est que la ZEE de Nouvelle-Calédonie se situant dans une zone à la fois favorable à l'alimentation et à la reproduction du thon germon, les pêcheries de la région peuvent fonctionner toute l'année. Néanmoins, la saison d'hiver (saison de ponte) est la plus favorable.

6.5.3. Indice d'habitat et migration saisonnière

Enfin, l'indice d'habitat (éq 13), est une combinaison des habitats d'alimentation et de ponte, le poids de chacun variant en fonction de la saison. Le passage d'un habitat à l'autre est défini à l'aide d'une fonction basée sur le gradient de durée du jour (la durée du jour variant en fonction de la latitude est de la saison).

$$H_a = H_s \cdot \frac{1}{1 + e^{\alpha(G_d - G_{dTh})}} + H_f \cdot \frac{1}{1 + e^{\alpha(G_{dTh} - G_d)}} \quad \text{éq. 13}$$

avec G_d la durée du jour a chaque pas de temps du modèle, et G_{dTh} la durée seuil a partir de laquelle les thons migrent. α est un paramètre influent sur la rapidité de la migration. Sa valeur est fixé arbitrairement a 300, mais son influence mériterait d’être discutée. Peut être serait-il intéressant de l’inclure dans la procédure d’optimisation ?

La **Figure 32** présente deux instantanés de l’habitat (février et aout 2000. Saisonnièrement, l’habitat est alternativement dominé par l’alimentation et la ponte ainsi que le montre la courbe rouge. Les thons tendent à migrer vers les eaux tropicales l’hiver (vers l’habitat de ponte) et subtropicales l’été (vers l’habitat d’alimentation).

En moyenne, la **Figure 33** indique que l’habitat des thons adultes est bien décrit par la zone de recouvrement des habitats favorables pour la ponte et l’alimentation. Les jeunes n’ayant pas d’activité de ponte par définition, leur habitat moyen est représenté par l’habitat d’alimentation (Figure 31). On note la bonne correspondance des habitats moyens des jeunes et adultes avec les captures (ronds noirs sur la **Figure 33**).

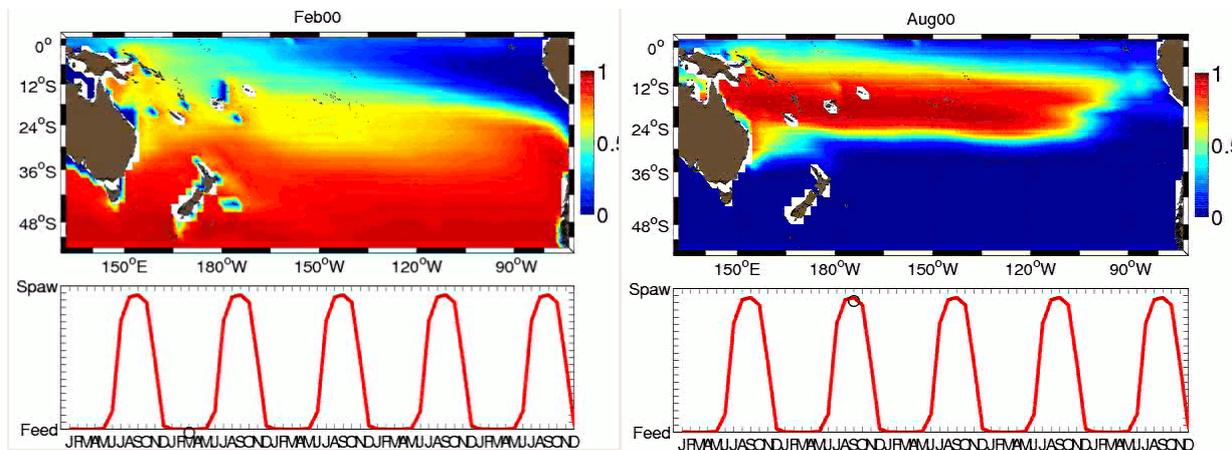


Figure 32 : Habitats saisonniers d’alimentation (à gauche) et de ponte (à droite) avec les fonctions périodiques modulant leur contribution à l’habitat total.

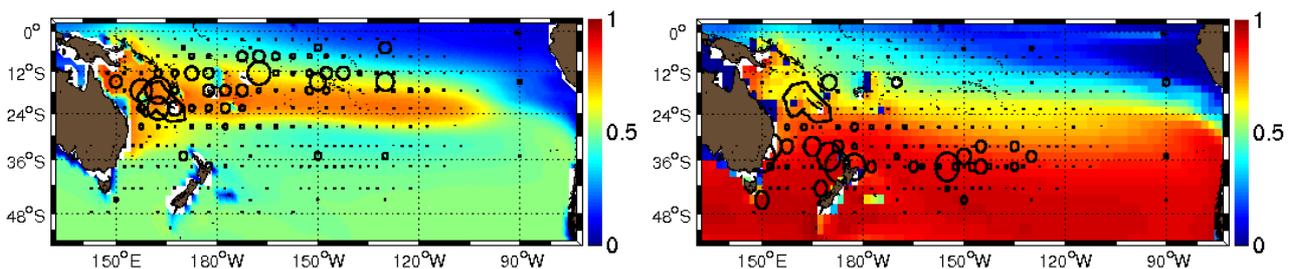


Figure 33 : habitat moyen pour les adultes (gauche) et les jeunes a droite. Les ronds noirs représentent les captures correspondantes.

6.6. Analyse de la biomasse prédite

La première étape de ce travail a consisté à collaborer avec Inna Senina et Patrick Lehodey (CLS-Toulouse) pour obtenir une distribution réaliste du thon germon a l’échelle du Pacifique Sud à une résolution de 2°. En effet le modèle SEAPODYM, bien qu’ayant montré de bons

résultats avec d'autres espèces, notamment la bonite (Lehodey et al., 2008), n'avait pas de paramétrisation disponible pour le thon blanc.

La Figure 34 présente la solution la plus aboutie à l'heure actuelle de répartition simulée de biomasse des thons germans. Sur la carte du haut est représentée la biomasse de thon adulte (>5 ans) ainsi que les captures (cercles noirs). Globalement, les maxima de biomasse prédite sont proches des captures comprises entre 10°S et 25°S. On observe à la fois un maximum à l'est de la Polynésie française et une forte concentration de thon dans le Pacifique Sud Ouest, plus particulièrement aux alentours de la ZEE de Nouvelle-Calédonie. De même, la répartition simulée des jeunes (< 5ans) est assez satisfaisante. Ceux-ci se situent dans le modèle aux alentours de la Nouvelle-Zélande, ce qui est compatible avec les données de capture (Figure 33, panneau du bas). Il existe un autre maximum au niveau du golfe de Papouasie-Nouvelle-Guinée, mais l'absence de données dans cette zone ne permet pas d'en vérifier la véracité. Alors que la répartition de la biomasse des adultes est assez similaire à la structure spatiale de l'habitat, il y a des différences notables pour les jeunes. En effet sur la Figure 33 (à droite), l'habitat est uniforme dans toute la moitié Sud du domaine, alors que les captures, ainsi que la biomasse modélisée ont une structure non homogène (Figure 33, panneau du bas). Pour comprendre les différences entre biomasse et habitat, il faut se rappeler que c'est le gradient d'habitat (non l'habitat) qui détermine le mouvement des thons.

En analysant le gradient (Figure 35 :) il apparaît que la distribution des adultes s'explique par le gradient méridien de l'habitat et que le gradient zonal semble avoir peu d'influence. On retrouve en effet les adultes dans les zones où le gradient est proche de zéro. Dans le cas des jeunes c'est le gradient zonal qui semble contraindre les poissons à rester près de la Nouvelle-Zélande, et dans les deux cas, les faibles gradients au sud ne favorisent pas la migration des jeunes thons vers les plus hautes latitudes.

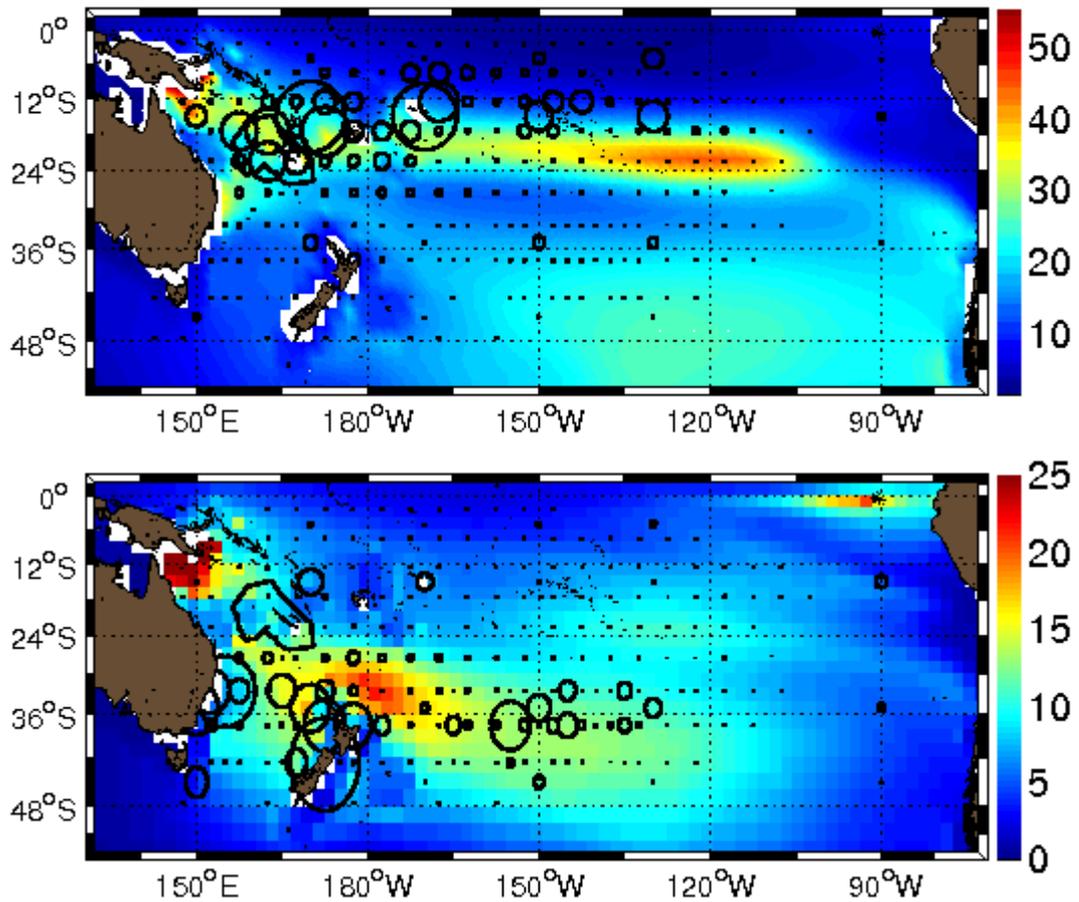


Figure 34 : Biomasse (kg/km²) moyenne d'adultes (haut) et de jeunes (bas) obtenue après optimisation. Les cercles représentent les captures moyennes. La dimension du cercle est proportionnelle à la biomasse capturée (en nombre de poissons).

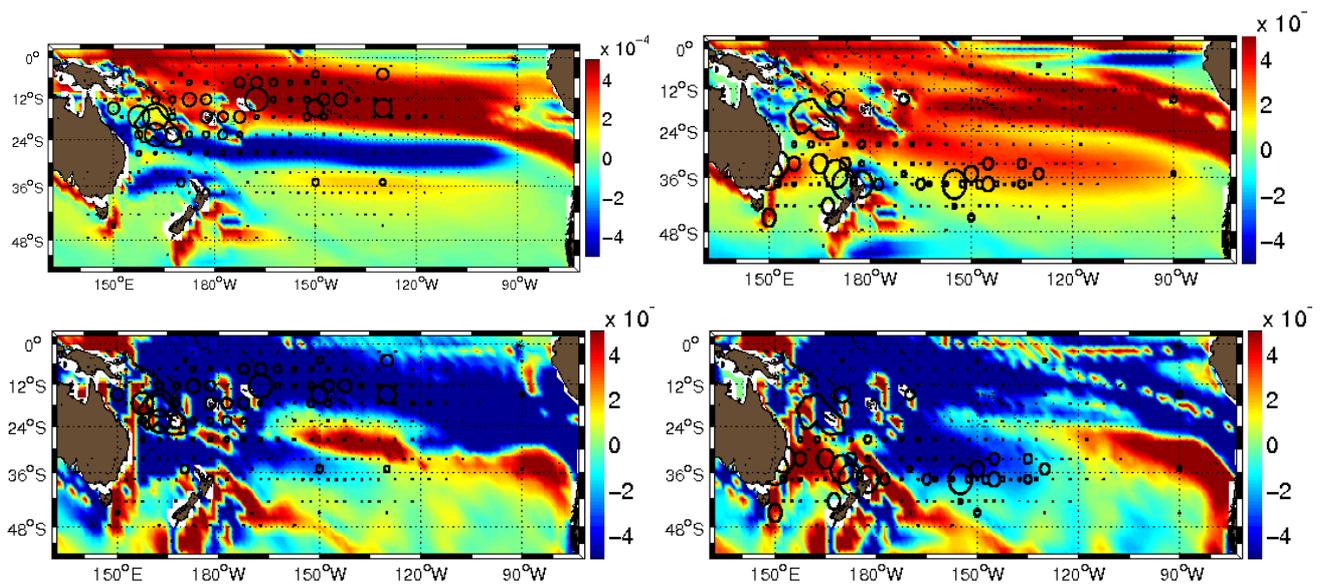


Figure 35 : gradient méridien (haut) et zonal (bas) d'habitat d'adultes (gauche) et de jeunes (droite)

6.7. Analyse des captures prédites

Les comparaisons entre captures prédites et observées ont d'abord été faites pour l'ensemble du Pacifique Sud-ouest (Figure 36), puis région par région en suivant les définitions des régions utilisées par Multifan-CL qui est à ce jour un des principaux modèles de dynamique des populations utilisé par la CPS pour la gestion des stocks. D'un point de vue global, les comparaisons sont plus satisfaisantes que pour la biomasse, avec un niveau de capture équivalent (la biomasse de capture observé est égale à 1,03 la biomasse de capture prédite) et une corrélation temporelle de 74%. Les comparaisons par région (Figure 37, Figure 38) montrent également pour les 4 premières régions une bonne correspondance entre les captures prédites et observées, ce qui indique que la répartition régionale (grande échelle) des captures dans le modèle est réaliste. Le réalisme du modèle pour les captures par rapport à la biomasse n'est pas réellement surprenant car il est sans doute dû au fait que l'optimisation des paramètres du modèle est réalisée sur la base de comparaison de captures et non de biomasses. Il reste à voir si une décorrélation spatiale entre biomasses et captures telle que nous le donne le modèle représente une réalité de terrain ou un simple artéfact du modèle.

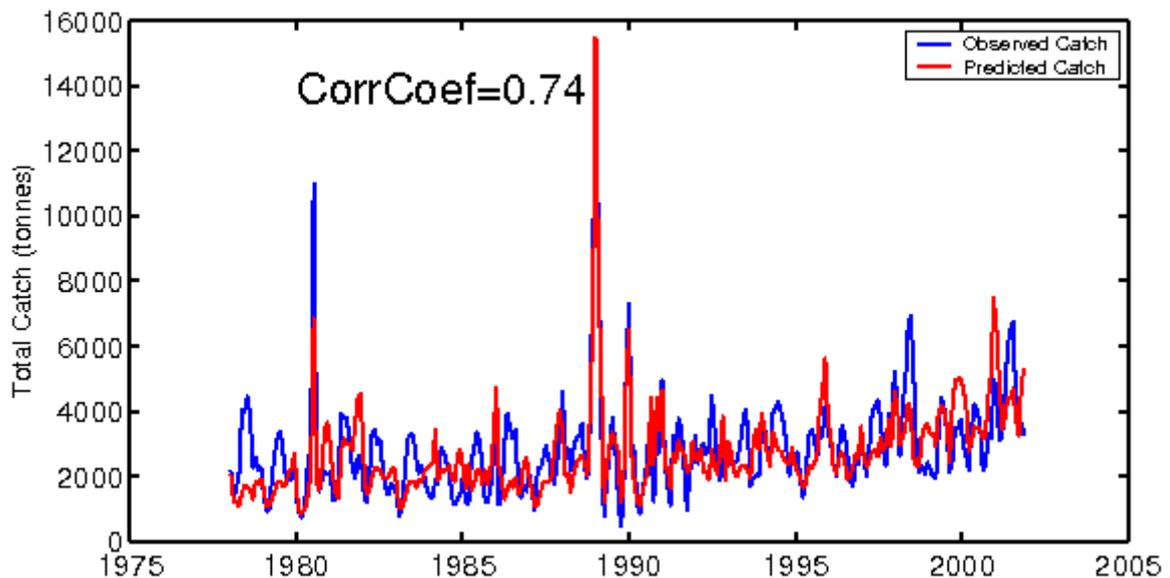


Figure 36 : Comparaison entre les captures prédites par le modèle SEAPODYM et les captures réelles (bleu) pour tout le pacifique sud ouest.

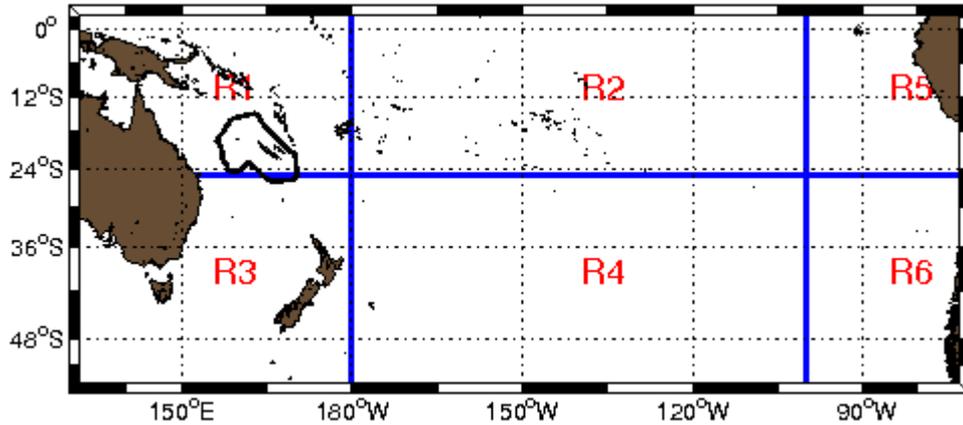


Figure 37 : Définitions des régions utilisées dans le modèle SEAPODYM, identiques à celles utilisées dans le modèle Multifan-CL

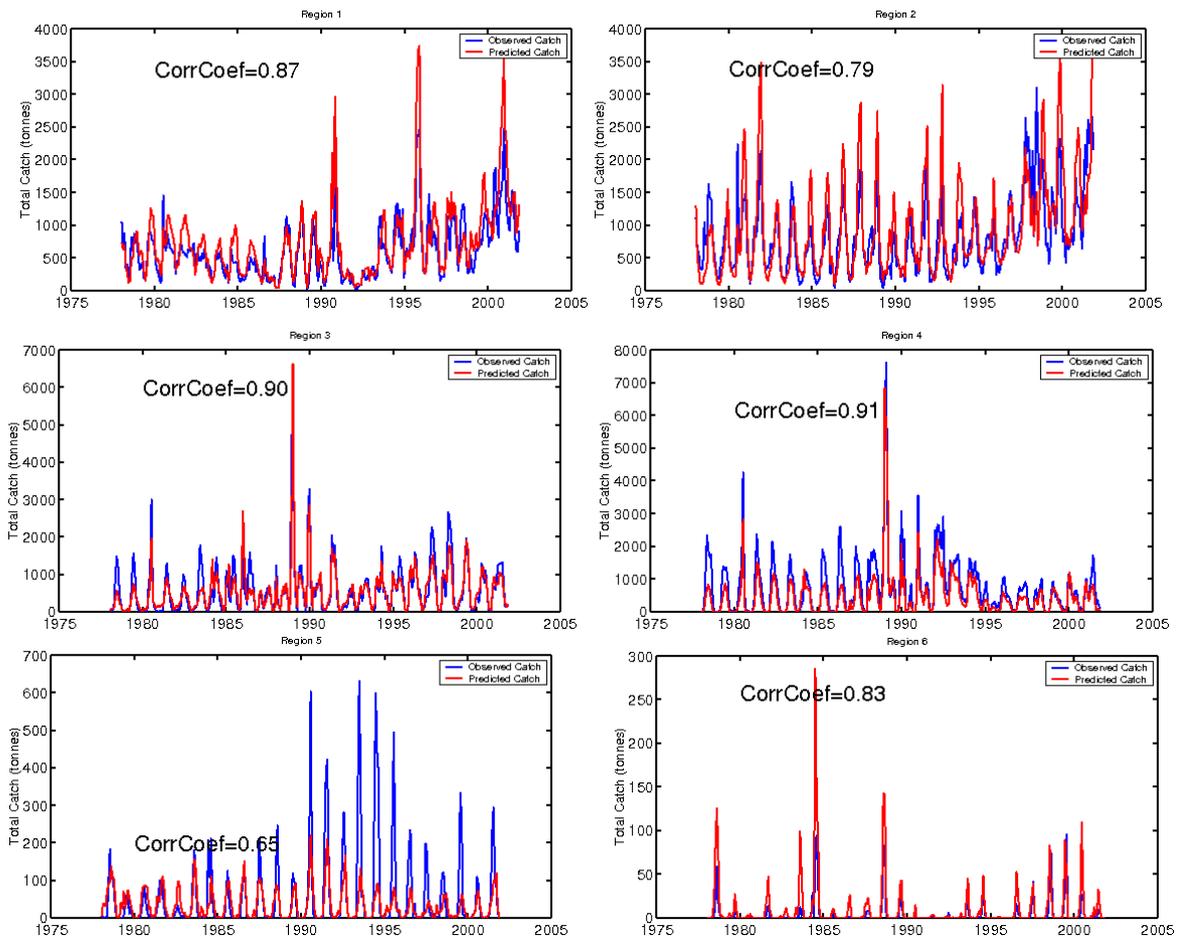


Figure 38 : Comparaison entre les captures prédites et réelles pour les régions.

6.8. Migrations saisonnières

La Figure 39 représente la biomasse totale (adulte + jeune) ainsi que les captures totales par trimestre. Bien que les migrations ne soient pas très évidentes (elles le sont d'avantage sur des séries mensuelles), on distingue tout de même deux saisons. Durant les deux premiers trimestres, les thons sont plus largement répartis et occupent principalement la zone de ponte au nord ($\sim 20^\circ\text{S}$) et la zone d'alimentation au sud ($\sim 40^\circ\text{S}$). A noter que les captures sont généralement au nord du maximum de biomasse situé dans les hautes latitudes. Dans la deuxième partie de l'année, le maximum de biomasse au nord se renforce et s'étend zonalement. On observe la même tendance pour les captures, avec un resserrement méridien autour des latitudes tropicales durant les deux derniers trimestres.

La séparation des adultes et des jeunes (Figure 40) peut nous donner quelques clés utiles pour interpréter d'avantage nos solutions. De manière générale, on note dans le modèle une migration très faible pour les jeunes et un peu plus marquée pour les adultes. La migration des adultes s'effectue de façon méridienne dans la zone de fort gradient d'habitat au nord de 30°S (Figure 35) et s'accompagne de migrations zonales le long de $\sim 25^\circ\text{S}$. Cela est conforme avec les études précédentes effectuées dans le Pacifique et l'Océan indien montrant une migration saisonnière du thon germon dans la direction nord-sud observables dans les captures (Langley, 2006 ; Chen et al., 2005). On constate également que la biomasse est peu variable au sud (zone centrée sur 48°S - 130°W) où elle semble piégée là par l'incapacité de migrer (très faible gradient d'habitat). Cela permet ainsi d'expliquer la zone de maximum de biomasse moyenne observée sur les cartes du modèle, une biomasse qui ne migre pas et dont le réalisme est très incertain.

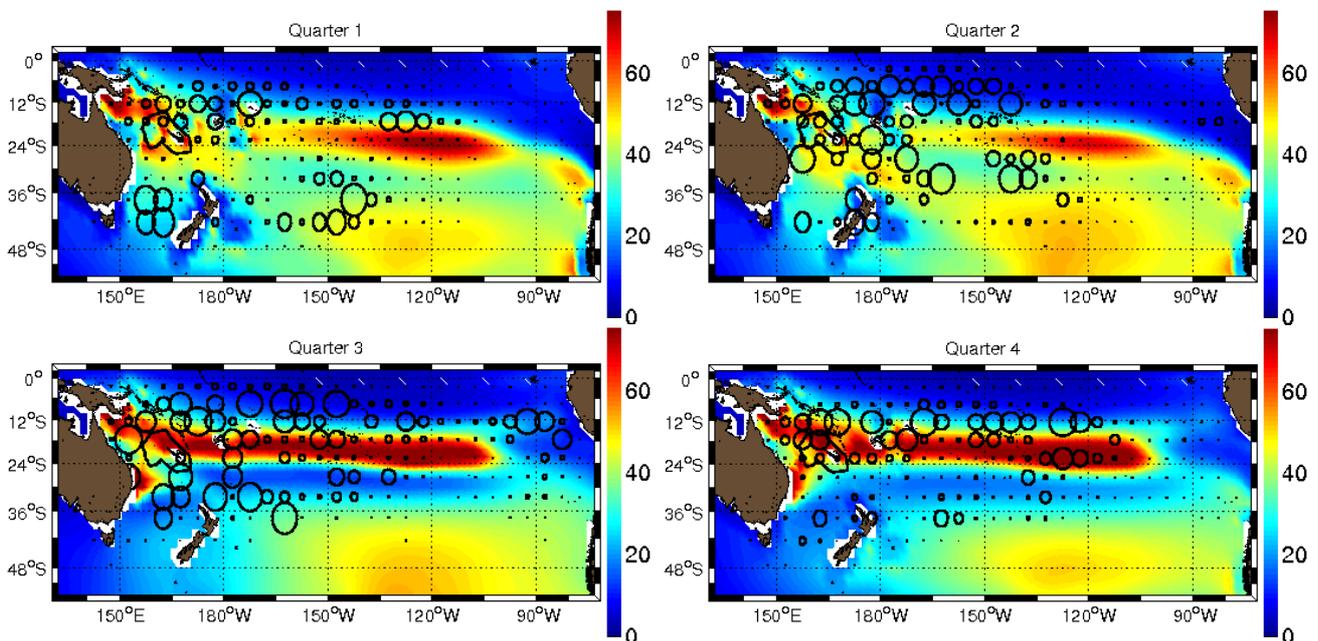


Figure 39 : biomasse totale (adultes + jeunes), par trimestre, en kg/km^2 . Les cercles représentent les captures totales (proportionnelles aux captures par unité d'effort.)

Les captures d'adultes présentent des caractères de migration assez semblables au modèle (migration méridienne et zonale). Pour les jeunes, les captures présentent une variabilité zonale qui n'est pas apparente dans la biomasse du modèle. En particulier au dernier trimestre, les captures sont absentes à l'est de la Nouvelle-Zélande. Bien que le gradient zonal

d'habitat des jeunes favorise leur positionnement près de la Nouvelle Zélande, la biomasse des jeunes ne présente pas de variabilité saisonnière marqué dans le modèle. Cela amène quelques questions : est-ce que l'absence de capture à l'est est due a une migration des jeunes non représentée par le modèle ou à une absence d'effort de pêche en fin d'année pour des raisons météorologiques par exemple?

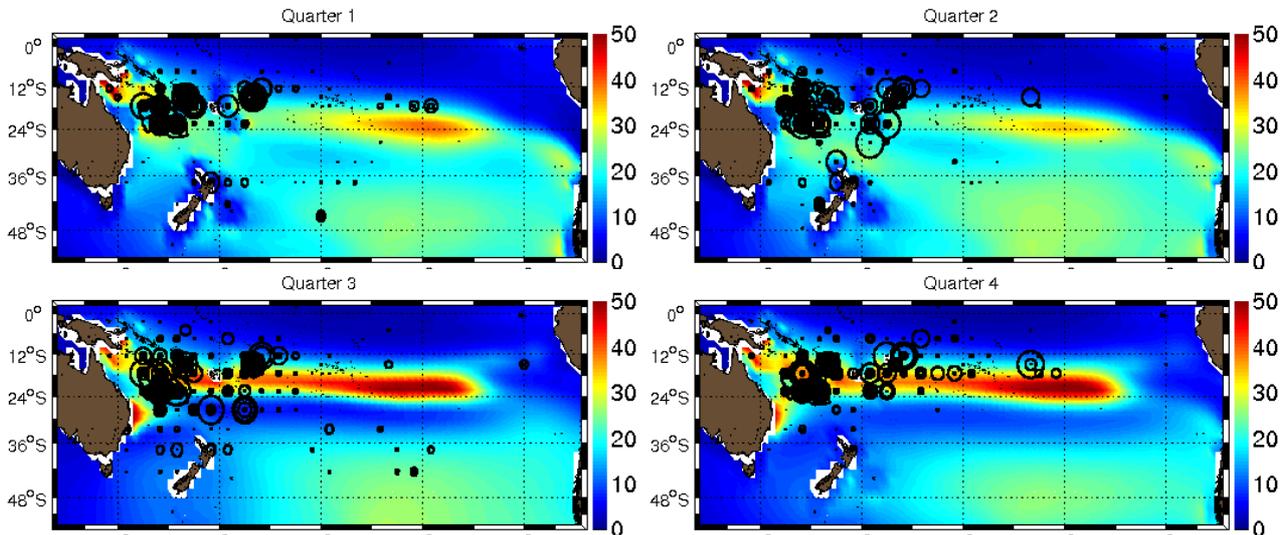


Figure 40 : biomasse d'adultes, par trimestre (kg/km²). Les cercles noirs représentent les captures (proportionnel aux nombres de poissons capturés).

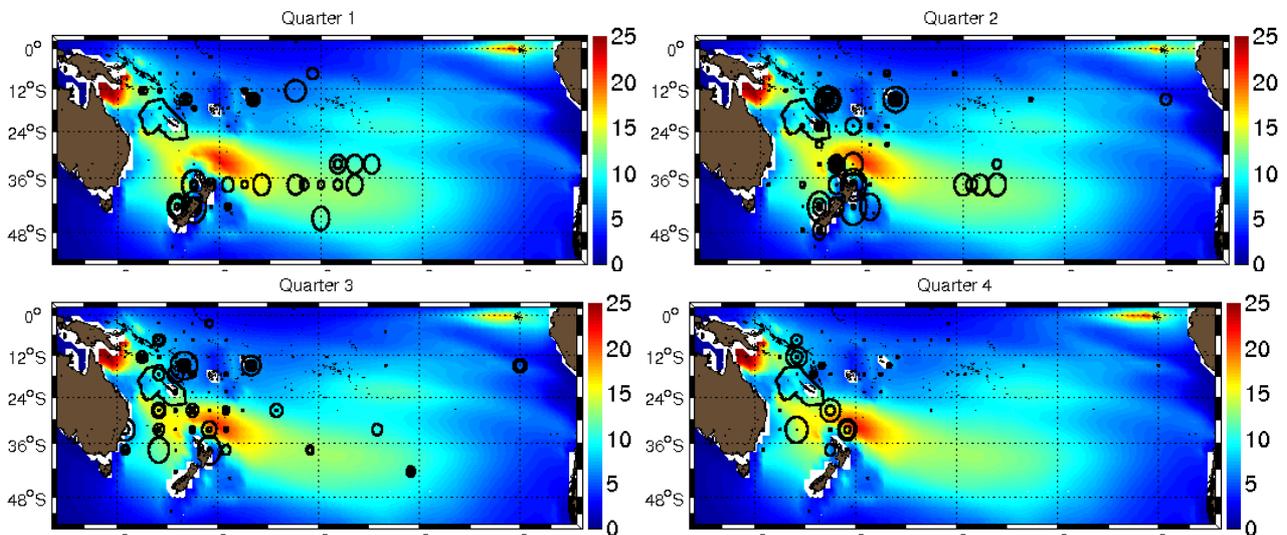


Figure 41 : biomasse des jeunes individus (<5ans), par trimestre (kg/km²). Les cercles noirs représentent les captures (proportionnel aux nombres de poissons capturés).

A l'issue de ce travail nous avons donc obtenu une solution qui après comparaison aux données de pêche semble réaliste. Les comparaisons de biomasse totale avec le modèle MultifanCL (non montrées) montre également une bonne correspondance. Cependant, certaines incertitudes (biomasse d'adultes des zones de faibles gradients d'habitat aux hautes latitudes ; faible migration zonale des jeunes ; ...) sont encore présentes. Il reste donc un certain nombre d'améliorations à apporter pour que le modèle puisse présenter des capacités prédictives pleinement satisfaisante. Néanmoins, avec ces nouvelles paramétrisations pour le

thon germon, notre étude a montré que le modèle SEAPODYM est un outil de compréhension (en attendant d'être un outil de prévision) particulièrement adapté à la dynamique des stocks de germon dans le Pacifique sud-ouest.

7. Régionalisation : la ZEE calédonienne

7.1. Méthode d'emboîtement

Si l'étude du Pacifique Sud à basse résolution montre des résultats satisfaisants de la chaîne de modélisation ORCA2-PISCES-SEAPODYM pour les grandes échelles, le résultat n'est pas directement exploitable à l'échelle régionale où l'influence des îles notamment module les signaux physiques et biologiques. L'étape suivante de notre étude est donc de développer une interface permettant d'emboîter le modèle ROMS-PISCES dans le modèle ORCA2-PISCES afin de réaliser une simulation de SEAPODYM à haute résolution. Ici, nous avons choisi la résolution intermédiaire de $1/3^\circ$ utilisée pour ROMS-PISCES. La méthode utilisée a été de créer une grille régulière du Pacifique à $1/3^\circ$, d'interpoler dans un premier temps les données ORCA2-PISCES sur cette grille et ensuite de surimposer les données ROMS-PISCES dans le Pacifique sud-ouest. La discontinuité des 2 types de données aux frontières latérales du domaine régional a requis une procédure de fusion permettant une transition douce entre grille grossière et grille fine (**Figure 42**).

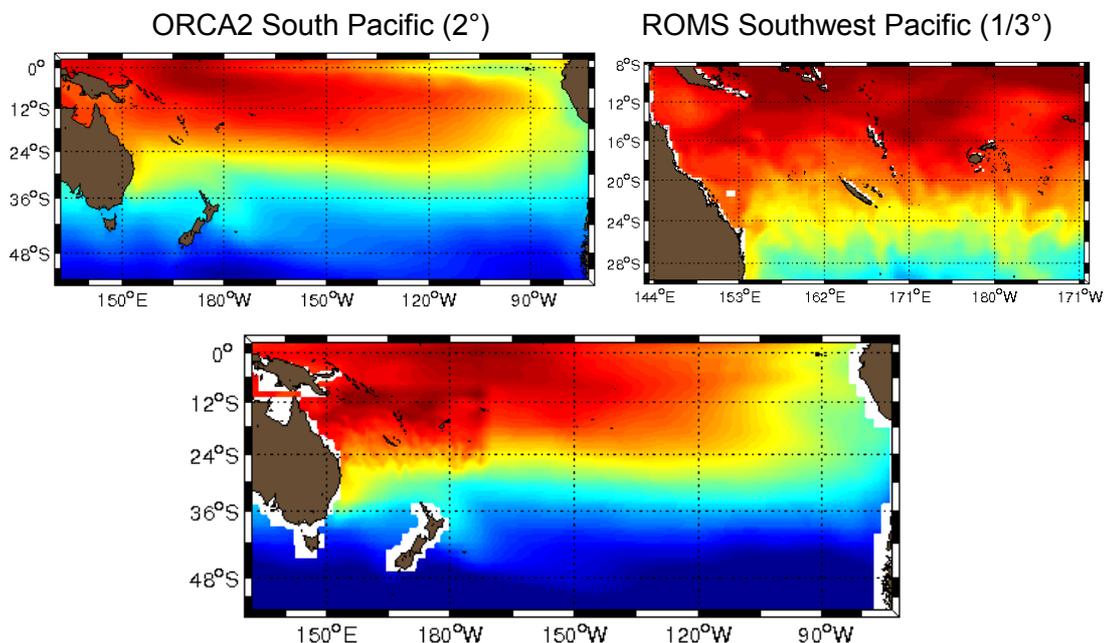


Figure 42 : Méthode d'emboîtement de la grille régionale. Le panneau en haut à droite présente la température de surface sur la grille grossière de ORCA2 ; à gauche, est la température est représentée sur la grille fine de ROMS ; en bas, l'emboîtement de la grille fine dans la grille grossière, est obtenue avec la procédure de fusion permettant une transition douce.

7.2. Résultats et discussion : fenêtre optimale des proies

L'apport principal de ce travail est de pouvoir étudier le rôle supposé des îles dans la modulation de l'habitat des thons, notamment de celui des proies. En effet les îles, outre le phénomène d'upwelling (pour la Nouvelle-Calédonie : Henin et Cresswell, 1995 ; Marchesiello et al., 2009) sont susceptibles, de part l'obstacle à l'écoulement et la turbulence qu'elles génèrent, de produire des zones de convergence ou de divergence qui sont susceptibles respectivement de concentrer ou diffuser le zooplancton et le micronecton. Le champ dynamique associé aux tourbillons et aux fronts peut également exposer localement les nutriments à la lumière de la couche euphotique, et produire ainsi des conditions favorables à l'écosystème.

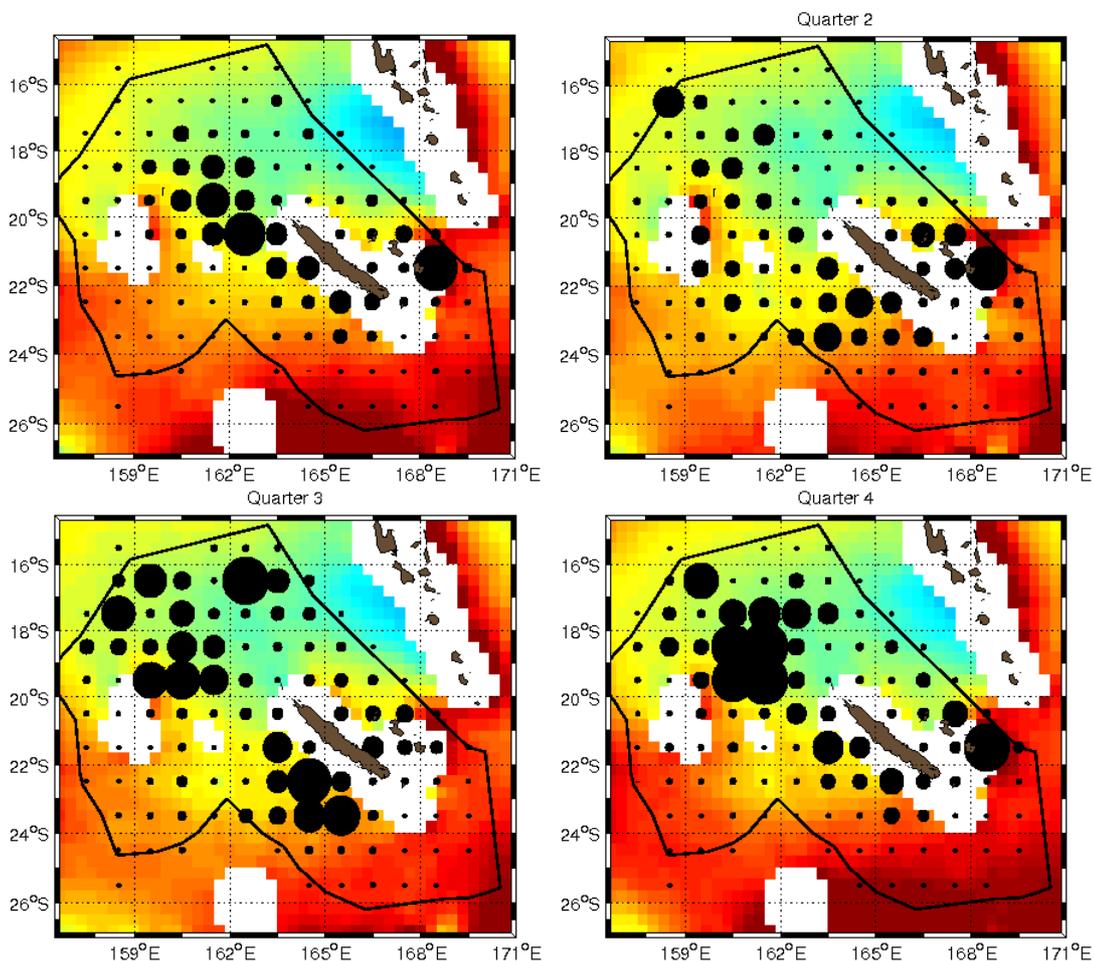


Figure 43 : variabilité saisonnière des concentrations des proies dans le modèle ROMS-PISCES-SEAPODYM (couleur), et captures réelles (1998-2002). La biomasse de proies est intégrée sur les 2 couches supérieures (les composantes migratrices bathypélagique sont présent en compte). La palette couleur comprend des valeurs allant de 0 (bleue) à 0.5 (rouge) kg/km².

A l'échelle de la ZEE, le modèle régional révèle une zone de faible présence de micronecton entre les îles du Vanuatu et la Nouvelle-Calédonie, qui se manifeste également

par une faible valeur des captures réelles (Figure 43). A l'inverse, les captures sont fortes tout autour de cette zone pauvre en nourriture des thons, à l'ouest, sud-ouest et sud-est.

On notera cependant que les rendements les plus importants ne se trouvent pas forcément dans les zones où la concentration de proies est la plus forte. Une étude statistique thon/environnement basée sur un modèle additif généralisé (GAM) a montré que la concentration des proies (épipélagiques et mésopélagiques) prédites par le modèle SEAPODYM dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie est significativement corrélée aux rendements palangriers de thon germon. Néanmoins, les résultats indiquent également que la capturabilité du thon germon (comportement face à l'appât) change en fonction de la quantité de proies environnantes. En effet, bien que les thons aient tendance à se regrouper aux endroits où la densité de proies est la plus forte, leur alimentation semble aussi dépendre de leur niveau de réplétion et de leur tendance à préférer les proies vivantes aux appâts. Ainsi en présence d'une forte densité de proies, l'appât aura tendance à être délaissé car le thon sera attiré préférentiellement par une forte quantité de proies en déplacement dont il sortira vite rassasié (Briand, 2005). Des études acoustiques effectuées en Polynésie française et aux Samoa américaines sur la relation entre le thon germon et son environnement confortent la même hypothèse (Bertrand et al., 2002 ; Domokos et al., 2007). Il existerait donc une fenêtre optimale de densité de proies favorable à la pêche palangrière au thon germon à l'échelle locale et une prise en compte spatiale et temporelle de cette relation dans un modèle écosystémique devrait permettre de fournir des indices utiles pour optimiser le rendement des pêcheries palangrières dans le futur.

Si la densité de proies est un élément essentiel de l'environnement du thon et qu'elle est relativement bien représentée dans notre modèle, elle ne permet pas (sans prise en considération d'une fenêtre optimale) de prédire les captures. Alors que la température de la couche mésopélagique qui intervient dans l'habitat total montre certaines capacités prédictives. En effet, on a vu en première partie de ce rapport que la circulation régionale anticyclonique centrée sur la Nouvelle-Calédonie produit un approfondissement de la thermocline qui se traduit par des températures chaudes dans les couches épi- et mésopélagique de la région néo-calédonienne (Figure 44), qui peuvent favoriser à la fois l'habitat d'alimentation et de ponte du thon germon dans cette région. En effet, la température de l'eau semble y jouer un rôle considérable étant donné que la majorité des thons germon pêchés dans les eaux calédoniennes sont des adultes reproducteurs (Ramon and Bailey, 1996) à la recherche d'habitat favorable (eaux chaudes), essentiellement pour la reproduction. Quand à la production primaire (Figure 45), aucune corrélation n'apparaît avec les captures, ce qui tend à invalider l'utilisation de cette variable comme indicateur direct pour la pêche.

A cette résolution, l'habitat bien que difficile à corréler significativement aux captures présente des structures intéressantes. En effet, hormis durant le troisième trimestre durant lequel l'habitat présente un gradient méridien marqué et peu de variations locales, les autres trimestres de l'année laisse apparaître de petites structures, particulièrement autour des îles et des hauts-fonds. D'une manière générale, si l'on considère l'archipel du Vanuatu, la Nouvelle-Calédonie, et les îles Chesterfield, on observe un habitat plus favorable à l'est de ces obstacles. Durant le troisième trimestre, le maximum de captures correspond à un habitat favorable à l'est des Chesterfield. Cet effet des îles sur l'habitat peut s'expliquer par la concentration de proies. Le courant moyen dans la région s'écoule vers l'ouest provoquant des zones de convergence à l'est des îles et des zones de divergence à l'ouest. Là où il y a convergence, le micronecton tend à s'accumuler alors qu'il est très rapidement dispersé dans les zones de divergence.

Quand à la biomasse (Figure 47), elle est beaucoup plus diffuse et moins variable que l'habitat. Mais bien qu'elle soit quasi uniforme, on observe quelques maxima qui peuvent être associés à des maxima de captures. Il est également intéressant de noter que la biomasse du deuxième trimestre, la plus faible de l'année, est associée au minimum de capture. Cela rappelle simplement la bonne capacité du modèle à reproduire correctement la variabilité saisonnière de la biomasse dans la région.

Dans cette partie nous avons présenté la première tentative de raffinement du modèle SEAPODYM dans la ZEE de Nouvelle Calédonie. Dans le but d'emboîter le modèle global ORCA2 et le modèle régional ROMS couplé au modèle biogéochimique PISCES, de nouveaux outils d'interpolation ont été développés. Les résultats à l'échelle de la ZEE, bien qu'encore préliminaire sont encourageants. Un effet des îles de la région a été mis en évidence sur les proies et l'habitat, induisant des dipôles d'habitat autour des îles (plus favorable à l'est / moins favorable à l'ouest). A cette échelle il est difficile de relier habitat et biomasse, néanmoins, la comparaison de la biomasse à la distribution spatiale et temporelle des captures suggère un comportement pertinent du modèle à fine échelle. Ces résultats pourraient sans doute être améliorés par une optimisation des paramètres pour cette résolution.

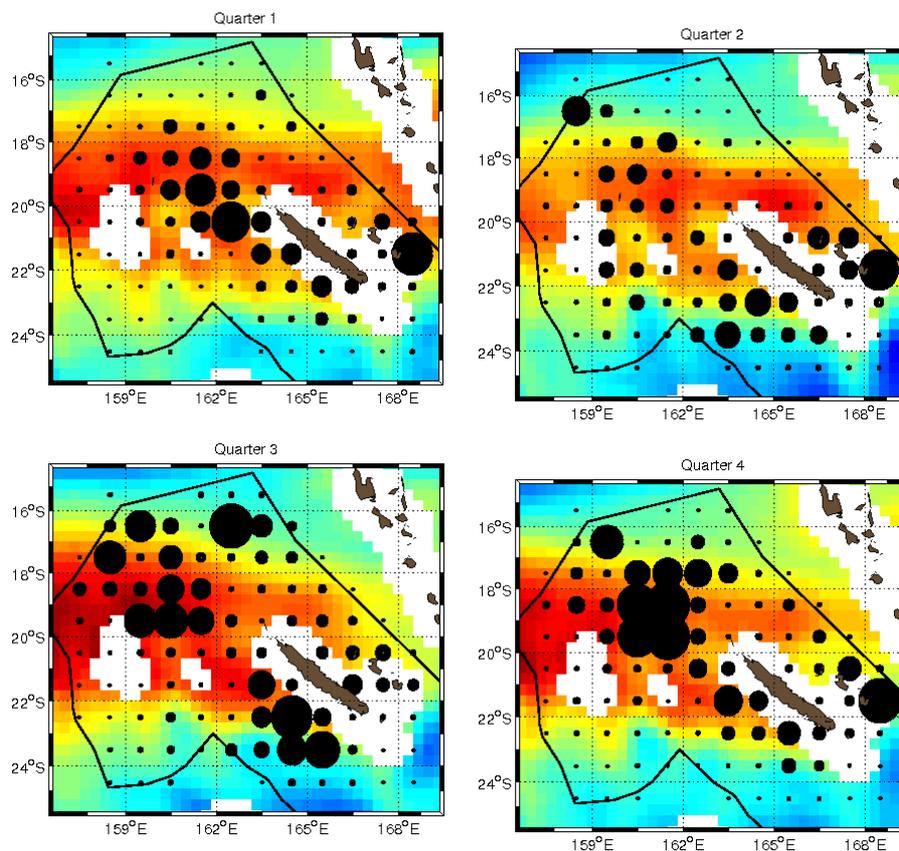


Figure 44 : température dans la couche mésopélagique et captures réelles (1998-2002)

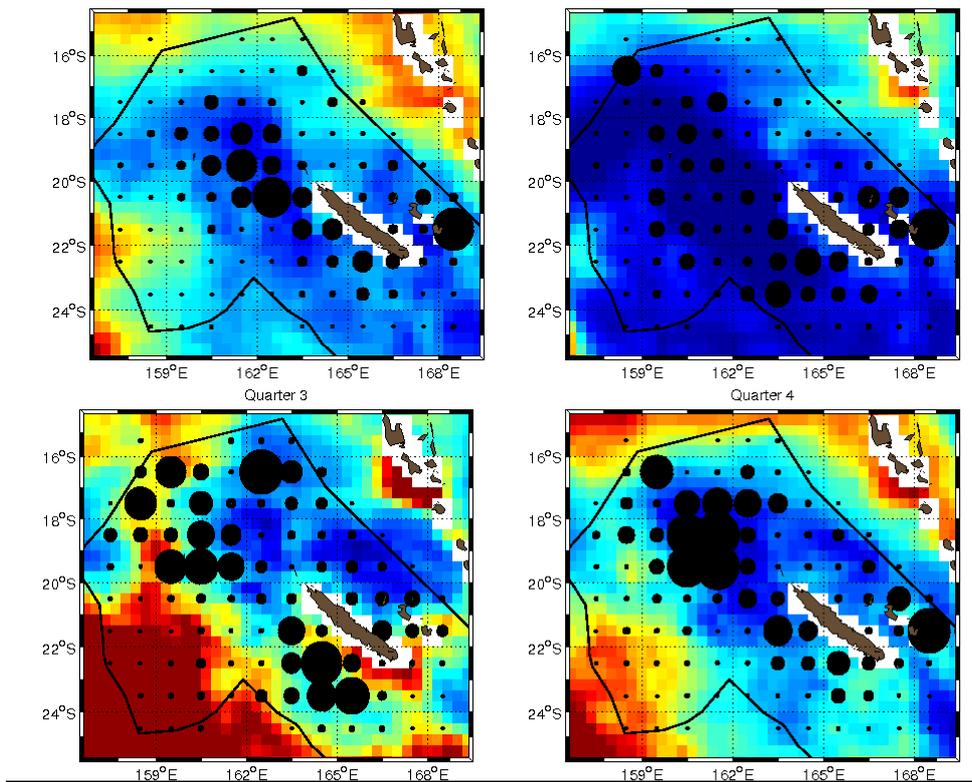


Figure 45 : comparaison entre les captures et la production primaire (1998-2002)

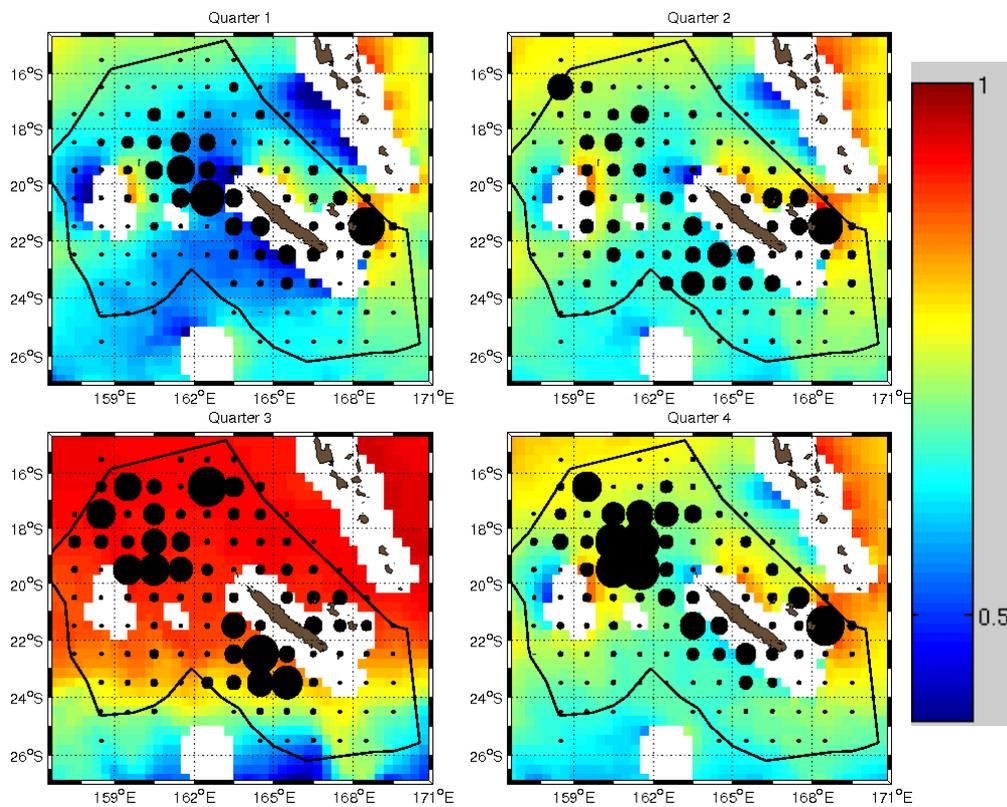


Figure 46 : habitat par trimestre de la dernière classe d'âge des adultes. Captures en noirs.

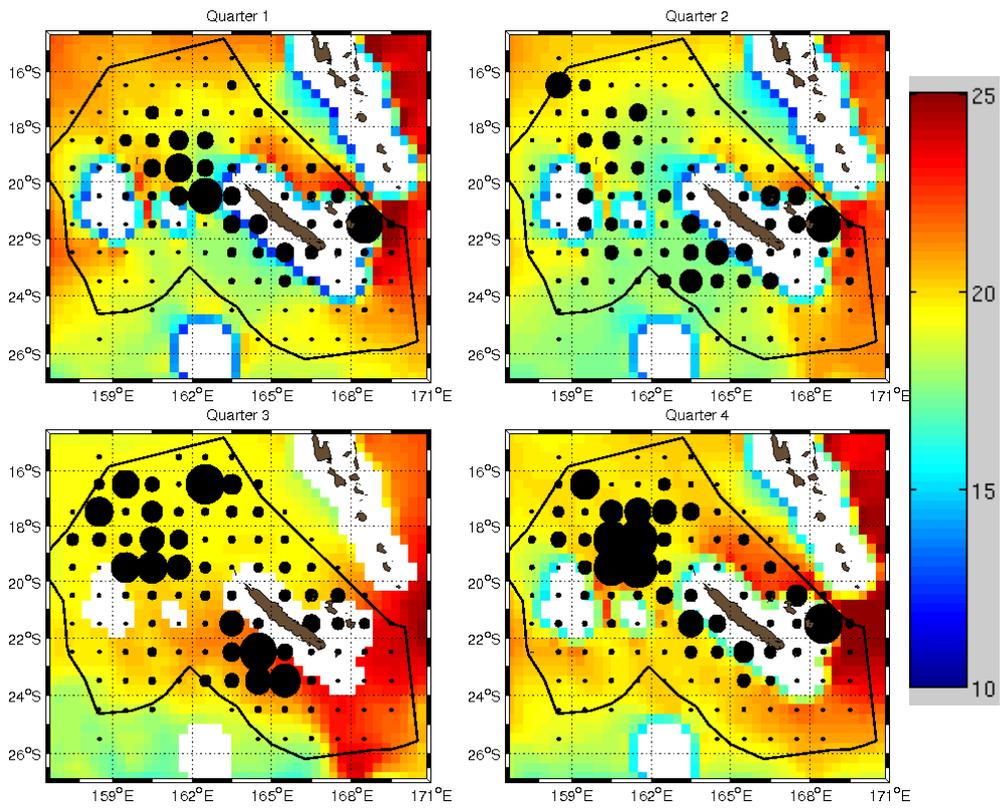


Figure 47 : biomasse de thon adulte (kg/km²) par trimestre (les cercles noirs représentent les captures)

8. CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette étude est de mieux identifier les paramètres environnementaux qui déterminent la distribution et la dynamique de population des thons germon dans le Pacifique sud-ouest. Le but à plus long terme est de fournir des outils de connaissance et de surveillance pour une meilleure gestion des ressources marines. Dans cette étude, nous avons implémenté et développé une chaîne de modèles de la physique au thon suivant une approche écosystémique. Nous avons adapté un plusieurs paramètres existant et développé une capacité de raffinement de la résolution. Cela a nécessité une étude préalable de l'écosystème planctonique et des cycles biogéochimiques qui a conduit à des résultats nouveaux sur le fonctionnement de cette région oligotrophique. Les résultats du modèle intégré jusqu'au thon sont également très encourageants bien qu'un certain nombre de questions se posent encore et un travail de raffinement des paramétrisations restent à faire, notamment à l'échelle régionale.

Notre étude du couplage physique-biogéochimie a mis en évidence le rôle primordial de la circulation régional dans le Pacifique sud-ouest. La circulation anticyclonique de surface qui encercle la Nouvelle-Calédonie et la mer de Corail est façonnée par la présence des îles et par le contre-courant subtropical au sud. Celui-ci est produit par la dérive du aux alizés des eaux tropicales légères au-dessus des eaux subtropicales plus lourdes, qui forment une zone frontale à environ 25°S. Cette zone est une limite entre des régimes de production primaire différents. Au nord, la circulation anticyclonique centrée entre 15-20°S produit une dépression de la thermocline et de la nutricline qui est particulièrement défavorable à la production primaire. En revanche, la présence d'eau chaude dans cette région est favorable à l'habitat de ponte des poissons. L'imagerie satellitale corrobore en partie cette anomalie de production primaire, mais c'est en profondeur qu'apparaît le plus clairement l'anomalie régionale. Le modèle montre que la profondeur de nutricline est telle que le mélange hivernal ne parvient pas à enrichir les eaux de surface autour de la Nouvelle-Calédonie. De même en été, l'upwelling calédonien parvient à atteindre la thermocline saisonnière mais pas la nutricline, ce qui explique la faible réponse de l'écosystème à ces événements récurrents. Cela participe d'un découplage entre thermocline saisonnière et nutricline qui est assez singulier mais parfaitement explicable par le fait que la zone euphotique est toujours plus profonde que la thermocline saisonnière. Les données de campagnes de l'IRD, et plus particulièrement celles de la campagne ZONALIS, menée dans le cadre du projet ZoNéCo, confirment très bien ce résultat important du modèle.

A l'échelle du Pacifique Sud, le modèle de thon présente des résultats très encourageants mais plus difficiles à valider. Il existe très peu d'information par exemple sur le micronecton. Les erreurs éventuelles des distributions spatiales et temporelles données par le modèle sont donc difficile à évaluer. La structuration de départ des 6 classes de micronecton semble influencer les résultats. Par exemple, la dominance du micronecton migrant bathypélagique peut mener à des résultats contre intuitifs de faible productivité sur les hauts-fonds. Néanmoins, la modélisation du micronecton semble fournir un échelon intermédiaire adéquat pour le thon germon dont la biomasse modélisée présente de fortes corrélations avec les captures réelles. Il s'agira néanmoins dans le futur de mieux valider ce compartiment.

Pour les thons adultes, les zones de capture réelles coïncident avec leur habitat moyen modélisé qui est par ailleurs bien représenté par l'intersection des habitats favorables d'alimentation et de ponte entre 10°S et 25°S. La Nouvelle-Calédonie étant situé à l'intérieur

de cette zone d'intersection, bénéficie donc d'un environnement favorable pour les thons adultes, particulièrement en période hivernale pour la reproduction. Les adultes migrent en effet au rythme de la saison mais cette migration se limite à environ 40°S, car plus au sud les gradients d'habitat deviennent trop faibles. Une zone de maximum relatif de la biomasse est néanmoins présente au sud de 40°S mais semble correspondre à un artefact du modèle qui ne peut pas permettre aux recrues des hautes latitudes de migrer. C'est sans doute un point du modèle qu'il faudra revoir.

Pour les thons jeunes, la coïncidence entre biomasse modélisée et capture réelle est également satisfaisante à ces échelles. Le déplacement pour les jeunes est lié aux changements saisonniers de l'habitat d'alimentation, ce qui reste mineur devant la migration des adultes vers l'habitat de ponte. L'habitat d'alimentation tend à concentrer les jeunes autour de la Nouvelle-Zélande. Cela est vrai pour la biomasse modélisée comme pour les captures réelles. Néanmoins, le modèle ne présente pas de déplacement zonal des jeunes comme le suggère les captures, et cela pose quelques questions, soit sur l'incapacité du modèle à représenter une possible migration, soit sur les conditions de pêche qui peuvent varier avec la saison.

A l'échelle régionale, notre raffinement de maillage a ouvert d'autres portes et posé d'autres questions. Les résultats du modèle montrent par exemple un phénomène compatible avec la théorie de fenêtre optimal de concentration de proies pour la capturabilité du thon. En effet, les captures réelles semblent coïncider avec des valeurs intermédiaires de concentration de proies, plutôt qu'avec les maxima. Ceci peut-être expliquer par la préférence supposée des thons pour les proies vivantes quand elles sont en abondances. Ce point est probablement à étudier de manière plus approfondie.

A l'échelle régionale également, les températures épi- et mésopélagiques sont particulièrement chaudes dans la région calédonienne, à cause de la dérive des eaux tropicales de surface vers le sud et de l'impact plus profond de la circulation régionale anticyclonique. Ces eaux chaudes ont un impact important sur l'habitat de ponte et d'alimentation et contribue largement à expliquer la présence du thon dans cette région. A l'inverse, sa faible productivité primaire semble peu contribuer à l'habitat du thon. Cependant, les concentrations locales de proies semblent plus influencées par les processus de convergence/divergence des courants en interaction avec les îles que par la distribution spatiale du phytoplancton. Ceci tend à invalider la pertinence des images satellites de couleur de l'eau pour les activités de pêche.

Au final, il nous semble que le système de modèles que nous avons mis en place est pertinent pour la compréhension des concentrations de thons germon à grande échelle. Dans le temps imparti, nous nous sommes essentiellement limité à comprendre les distributions moyennes et saisonnières à cette échelle et il reste à explorer le rôle des grandes variabilités climatiques comme El Niño. Aux échelles régionales que nous avons abordées en fin de projet, il nous reste des progrès à faire dans l'ajustement des paramètres des modèles et pour comprendre le fonctionnement du système à plus fine échelle. Cependant, le modèle a révélé la contribution probable des îles dans la structuration du micronecton à l'échelle régionale. Pour la suite, il nous semble pertinent d'axer une partie de l'effort futur sur une meilleure compréhension de la dynamique des proies du thon et du modèle correspondant.

References

- Aumont, O., and L. Bopp (2006), Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies, *Global Biogeochem. Cycles*, 20, GB2017.
- Aumont, O., et al. (2003), An ecosystem model of the global ocean including Fe, Si, P co-limitation, *Global Biogeochem. Cycles*, 17, 1060.
- 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.
- Briand, K. 2005. Effets des variabilités climatiques saisonnières et interannuelles sur l'habitat et les captures de thons dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie. ZoNéCo, Rapport final, Programme D'Évaluation des Ressources Marines de la Zone Économique de Nouvelle-Calédonie.
- Chen, I., P. Lee, W. Tzeng. 2005. Distribution of albacore (*Thunnus albacore*) in the Indian Ocean and its relation to environmental factors. *Fisheries Oceanography*, 14/1: 70-80.
- Couvelard X., P. Marchesiello, L. Gourdeau, and J. Lefevre, 2008: barotropic zonal jets induced by islands in the southwest Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 38, 2185-2204.
- Dandonneau, Y., and Gohin, F. (1984), Meridional and seasonal variations of the sea surface chlorophyll concentration in the southwestern tropical Pacific (14 to 32°S, 160 -o 175°E), *Deep-Sea Research*, 31:12, 1377:1393.
- Dandonneau, Y., Deschamps, P.Y., Nicolas, J.M., Loisel, H., Blanchot, J., Monteld, Y., Thieuleux, F., and Bécu, G. (2004). Seasonal and interannual variability of ocean color and composition of phytoplankton communities in the North Atlantic, equatorial Pacific and South Pacific. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51:1-3, 303-318.
- de Baar, H. J. W., and J. T. M. de Jong (2001), Distributions, sources and sinks of iron in seawater, in *The Biogeochemistry of Iron in Seawater*, edited by D. Turner and J. Hunter, pp. 85-121, John Wiley, Hoboken, N.J.
- de Boyer Montégut, C., G. Madec, A. S. Fischer, A. Lazar, and D. Iudicone (2004), Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology, *J. Geophys. Res.*, 109, C12003, doi:10.1029/2004JC002378.
- Domokos, R., Seki, M.P., Polovina, J.J., Hawn, D.R. 2007. Oceanographic investigation of the American Samoa albacore (*Thunnus alalunga*) habitat and longline fishing grounds. *Fish. Oceanogr.* 16(6): 555-572
- Dupouy, C., Neveux, J., Subramaniam, A., Mulholland, M.R., Montoya, J.P., Campbell, L., Capone, D.G. and Carpenter, E.J. (2000) SeaWiFS captures *Trichodesmium* blooms in the South Western Tropical Pacific Ocean. *EOS, Transactions, AGU* **81** 13, pp. 15–16.
- Ganachaud A., A. Vega, C. Dupouy-Douchement, C. Maes, G. Eldin, K. Ridgway, M. Rodier, P. Marchesiello and R. Leborgne, 2009: Observed impact of upwelling on water properties and biological activity on the southwest coast of New Caledonia. *Marine Pollution Bulletin*, accepted.
- Geider, R. J., et al. (1998), A dynamic regulatory model of phytoplanktonic acclimation to light, nutrients, and temperature, *Limnol Oceanogr.* 43, 679-694.
- Jickells, T. D., and L. J. Spokes (2001), Atmospheric iron inputs to the oceans, in *The Biogeochemistry of Iron in Seawater*, edited by D. Turner and K. Hunter, pp. 85-121, John Wiley, Hoboken, N.J.

- Johnson, K. S., et al. (1999), Continental-shelf sediment as a primary source of iron for coastal phytoplankton, *Nature*, 398, 697-700.
- Langley, A. 2006. The south Pacific albacore fishery: a summary of the status of the stock and fishery management issues of relevance to Pacific Island countries and territories. Tech. Rep. No. 37. Nouméa, New Caledonia: SPC Oceanic Fisheries Programme.
- Langley, A., 2004: An examination of the influence of recent oceanographic conditions on the catch rate of albacore in the main domestic longline fisheries. Working Paper SA-4, 17th Meeting of the Standing Committee on Tuna and Billfish, Noumea, 9-18 August 2004.
- Le Borgne R., Dandonneau, Y., Lemasson, L., 1985 - The problem of the island mass effect on chlorophyll and zooplankton standing crops around Mare (Loyalty islands) and New Caledonia. (Le problème de l'effet d'île sur les biomasses de chlorophylle et de zooplancton autour de Maré (Iles Loyauté) et de la Nouvelle-Calédonie). *Bull. Mar. Science* 37, 450-459.
- Lefevre J., P. Marchesiello, N. Jourdain, C. Menkes, 2009: Weather regimes and orographic circulation around New Caledonia. *Marine Pollution Bulletin*, accepted.
- 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. Working Paper ECO-2, 17th Meeting of the Standing Committee on Tuna and Billfish, Noumea, 9-18 August 2004.
- Ludwig, W., et al. (1996), Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion, *Global Biogeochem. Cycles*, 10, 23-41.
- Marchesiello P., J. Lefevre, A. Vega, X. Couvelard, C. Menkes, 2009: Coastal upwelling, circulation and heat balance around New Caledonia's barrier reef. *Marine Pollution Bulletin*, accepted.
- Monod, J. (1942), *Recherches sur la Croissance des cultures bactériennes*, Hermann, Paris.
- Moore, J., et al. (2004), Upper ocean ecosystem dynamics and iron cycling in a global three-dimensional model, *Global Biogeochem. Cycles*, 18.
- Moutin, T., Van Den Broeck, N., Beker, B., Dupouy, C., Rimmelin, P., Le Bouteiller, A. (2005) Phosphate availability controls *Trichodesmium* spp. biomass in the SW Pacific Ocean. *Mar Ecol Prog Ser*, 297: 15-21.
- Ramon, D., and Bailey, K. 1996. Spawning seasonality of albacore, *Thunnus alalunga*, in the South Pacific Ocean. *Fish. Bull.* 94:724-733.
- Sunda, W. G., and S. A. Huntsman (1985), Iron uptake and growth limitation in oceanic and coastal phytoplankton, *Mar Chem*, 50, 189-206.
- Takahashi, T., et al. (1985), Redfield ratio based on chemical data from isopycnal surfaces, *J Geophys Res*, 90, 6907-6924.
- Tegen, I., and I. Fung (1995), Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification, *J Geophys Res*, 100, 18707-18726.