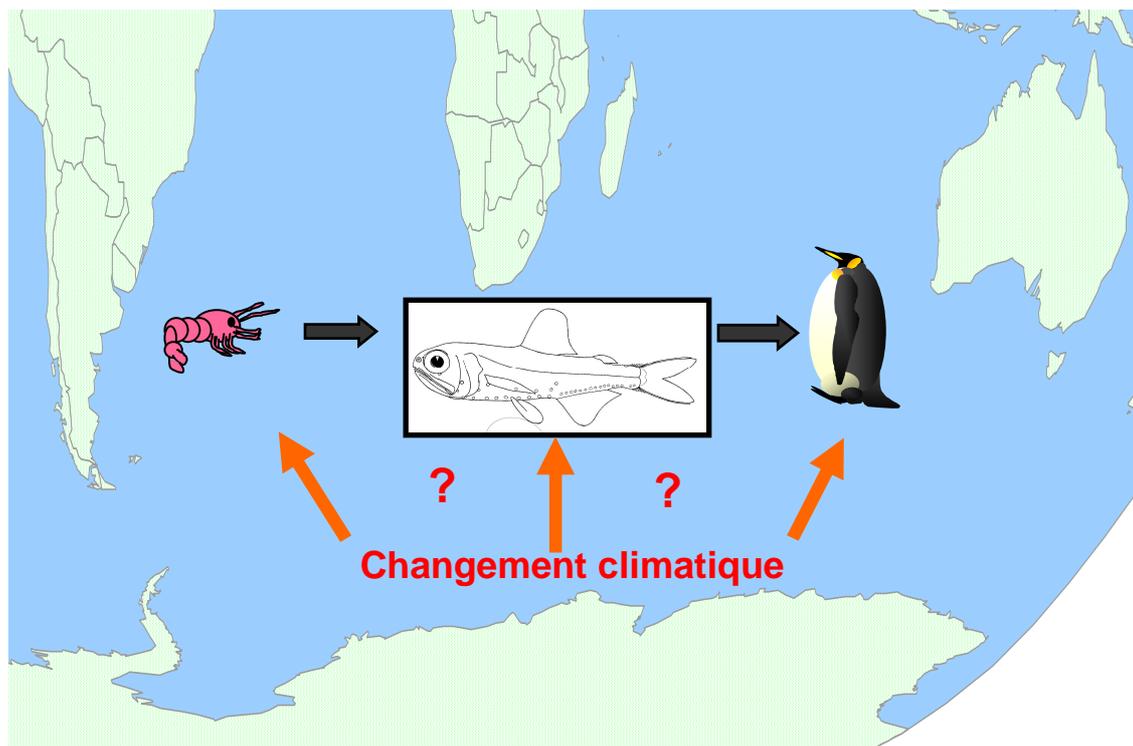


**IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE
SUR LES RESSOURCES HALIEUTIQUES
ET LA DISTRIBUTION DES PREDATEURS MARINS
DANS LES DOM-TOM (Indien Austral)**

Rapport final

11 mai 2006



Mots-clés : ressources marines; variabilité climatique ; océanographie physique ; poissons pélagiques ; modélisation; prédateurs marins; télémétrie; océan austral

Thème de l'APR concerné : **Thème 3** (Evaluation, impacts potentiels et stratégies d'adaptation au risque climatique : Impacts sur la santé et les ressources marines)

Rédaction : C.A. Bost – C. Guinet

Numéro de la convention : CV 03000001

Coordinateur Scientifique : **C.A. Bost**, Chargé de recherche CNRS (CR1)
adresse actuelle : CEBC-CNRS
Villiers en Bois, 79360 Beauvoir / Niort
Tél : 05 49 09 96 09, Fax : 05 49 09 69 06
mél : *bost@cebc.cnrs.fr*

Organismes partenaires:

- Centre d'Ecologie et de Physiologie Energétiques (CEPE-CNRS, Strasbourg)(**Y. Handrich**)
- Centre d'Etude Biologiques de Chizé (CEBC-CNRS, Chizé)(**C.Guinet, L. Dubroca**)
- Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie (LOCEAN, **J.M. André**)
- Laboratoire d'Océanographie du Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris (**Y. H. Park, J.B. Charassin**)

Durée initiale prévue : 2 ans

Coût prévisionnel total (TTC) : 181.400 Euros

Montant de l'aide (TTC) demandé au programme GICC : **91.400 Euros sur 2 ans**

Cofinancement assuré et/ou prévus (y compris autres que nationaux) :

- 45.000 Euros/an provenant de l'IPEV (Institut Polaire Français), permettant un soutien logistique au programme.
- 4600 Euros /an pour l'analyse des données en France, provenant du Programme Environnement, Systèmes Ecologiques et Activités Humaines du CNRS.

I. INTRODUCTION

1. Objectifs initiaux du projet et place dans le contexte scientifique général

Contexte scientifique général

Les changements climatiques globaux qui affectent l'environnement physique de la planète, vont vraisemblablement influencer profondément les communautés animales et végétales (Gates 1993, *Climate change and its biological consequences*. Sinauer Assoc., Mass. USA). Ils devraient en particulier engendrer une intensification de la variabilité environnementale, notamment en milieu polaire (Dickson 1997, *Nature* 386: 649-650). Une prise de conscience internationale s'est matérialisée au cours des 5 dernières années par la mise en place d'un réseau international d'études à long terme reconnues maintenant comme essentielles pour comprendre l'évolution des organismes et des populations dans un environnement.

Dans l'océan austral, on sait maintenant que des perturbations atmosphériques et océanographiques majeures, reliées au phénomène ENSO (El Niño Southern Oscillation) peuvent se propager tout autour du continent antarctique (White & Peterson 1996, *Nature* 380: 699-702) et modifier considérablement le fonctionnement des réseaux trophiques. Ainsi, la reproduction de plusieurs espèces de prédateurs marins de l'océan austral s'est trouvée profondément affectée à la suite des anomalies climatiques survenues depuis le début des années 80 consécutives notamment à l'effet ENSO (Guinet et al. 1998).

Cependant, de façon générale, l'impact de la variabilité climatique à moyen terme sur les écosystèmes marins de l'austral (réchauffement) reste une inconnue majeure. Pourtant, l'océan austral recèle des stocks considérables de poissons mésopélagiques encore inexploités, qui sont de très importants gisements de ressources renouvelables (Lubimova et al. 1987, Lancraft et al. 1989). Les poissons pélagiques (myctophidés) forment un maillon essentiel des chaînes alimentaires marines. Ils assurent une partie importante du transfert d'énergie de la production secondaire vers les niveaux supérieurs des chaînes trophiques (Green et al. 1998).

Les Terres Australes et Antarctiques Françaises, abritent des ressources halieutiques en poissons myctophidés particulièrement importante et diversifiée, nourrissant des populations considérables de prédateurs marins (otaries, phoques, manchots, Guinet et al. 1996, Duhamel 1998). Vaste de plus de 800 000 km², la zone économique de Kerguelen est exploitée par des pêcheries commerciales, dont l'activité concerne jusqu'à présent d'autres espèces de poissons, essentiellement benthiques (Duhamel et Hureau 1990). De façon générale, les myctophidés faisaient jusqu'à présent l'objet d'une exploitation commerciale limitée, malgré l'importance des stocks disponibles.

Si on assiste à un effort de recherche croissant sur le plan international sur l'impact de la variabilité climatique sur les écosystèmes de l'océan austral (GLOBEC 2000), la réponse des stocks de poissons pélagiques reste virtuellement inconnue malgré leur importance dans les réseaux trophiques. Il a cependant été établi que ces poissons sont étroitement dépendants de caractéristiques thermiques précises au niveau de la couche d'eau de sub-surface, en relation avec leurs exigences métaboliques notamment durant la reproduction (Torres et Somero 1988). Tout changement dans les caractéristiques de température des masses d'eau est susceptible d'affecter fondamentalement leur distribution via leurs

caractéristiques écophysiological ou en raison de déplacements de leurs proies préférentielles issus du macro zooplancton (Pakhomov et al. 1996).

Il est donc très important de développer dès à présent des études contribuant à répondre aux questions suivantes :

Les ressources pélagiques de l’océan austral sont-elles sensibles à la variabilité climatique à court terme (type ENSO) et moyen terme (réchauffement global) ?

Si oui, quelle est l’importance de cet impact sur la distribution et l’abondance de ces ressources et sur les principales chaînes alimentaires qui en dépendent?

Peut-on prévoir l’évolution spatiale de ces ressources à long terme par les modèles développés ?

Un des principaux obstacles pour aborder ces questions reste le coût des campagnes océanographiques et océanologiques, auquel s’ajoutent les contraintes logistiques et climatiques des hautes latitudes, qui empêche une réelle approche synoptique de la distribution des ressources.

Dans ce contexte, **les prédateurs situés en fin de chaîne alimentaire (oiseaux et mammifères marins) sont de plus en plus considérés comme de précieux auxiliaires bio-indicateurs**. Du fait de leur situation en fin de chaîne alimentaire, **ils intègrent l’ensemble des modifications intervenant dans les composantes physiques et trophiques de l’océan austral** (Croxall et al. 1988, Bost et Le Maho 1993). Sur le plan du suivi des transferts trophiques au sein des chaînes alimentaires, l’étude de ces prédateurs est hautement significative du fait de leur un impact considérable sur les ressources marines. Ainsi, il a pu être estimé que chaque année 5 millions de tonnes de proies (“fourrage”, essentiellement composé de crustacés, petits céphalopodes, et poissons mesopélagiques) sont prélevées autour des archipels Crozet et Kerguelen. Grâce aux développements de la micro-électronique et de la micro-informatique, leurs déplacements en mer et l’activité alimentaire associée ont pu être suivis, parfois avec une extrême précision (Cherel, Bost, et Weimerskirch 2001). Ainsi, leurs déplacements à très grande distance dans le domaine pélagique et leurs modes de recherche alimentaire ont pu être mis en relation directe avec la distribution, l’abondance, et la disponibilité de leurs proies (Rodhouse et al. 1996; Boyd 1996, Bost et al. 1997, Guinet et al. 2002).

Les travaux de recherche menés sur la bio-indication des ressources marines par les équipes du CEPE-CNRS et du CEBC-CNRS ont montré que ces prédateurs ne prospectaient pas au hasard mais concentraient leurs activités de pêche dans des secteurs particuliers, largement utilisés par les pêcheries et pouvant être identifiés en surface à partir de certaines caractéristiques physiques et biotiques ou en profondeur (bathymétrie, thermocline) (Charrassin et al. 2001, Bost et al. 1997, Guinet et al. 2001). Ces prédateurs possèdent un fort potentiel bio-indicateur dans la mesure où ils intègrent spatio-temporellement l’ensemble des modifications intervenant dans les composantes physiques et trophiques de l’océan à plusieurs niveaux trophiques. Ainsi, les paramètres de leur écologie en mer et démographie sont très sensibles aux variations environnementales.

Objectifs initiaux du projet

L'objectif de ce programme de recherche a été d'étudier quelles peuvent être les conséquences des changements climatiques globaux sur l'environnement austral et certaines de ses ressources "clés" (poissons pélagiques, crustacés). Le site d'étude choisi a été l'océan austral et plus particulièrement les Terres Australes et Antarctiques Françaises.

Le présent projet s'est proposé d'évaluer l'impact des changements climatiques à court et à long terme sur l'abondance, la distribution, et la biodiversité des ressources en poissons pélagiques. Une approche originale, pluridisciplinaire, a été utilisée, basée sur l'utilisation des principaux prédateurs (oiseaux marins, mammifères marins) comme auxiliaires océanographiques car intégrateurs supérieurs des variations climatiques et de leur propagation le long des réseaux trophiques.

Le système océan étudié est l'océan austral, avec pour principal site d'étude le sud de l'océan Indien incluant es Terres Australes et Antarctiques Françaises (DOM-TOM) où des variations climatiques importantes ont été détectées au cours des dernières décennies. Un accent particulier est mis sur la distribution et la disponibilité des poissons pélagiques à l'échelle de la zone atelier de Kerguelen, dans le sud de l'océan indien, où plusieurs pêcheries existent actuellement.

Trois axes de recherche étaient planifiés :

- I) Une simulation de l'abondance et de la distribution spatio-temporelle des ressources marines (du niveau trophique secondaire).
- II) Une confrontation des séries simulées d'abondance de proies aux paramètres bio-indicateurs de prédateurs marins, situés au sommet des réseaux trophiques.
- III) Une approche prédictive de l'effet du changement climatique, basée sur un modèle intégré évoluant sous différents niveaux de forçages du système océan-climat.

II. Résumé du Projet de recherche et équipes participantes

ABSTRACT

Impact of climate variability on pelagic resources and at-sea distribution of marine predators of the Southern Ocean (French Southern and Antarctic Territories, TAAF)

C.A. Bost¹, J.B. Charrassin², C. Cotté¹, F. Bailleul¹, L. Dubroca³, Y. Handrich⁴, & C. Guinet¹

1 : Centre d'Etudes Biologiques de Chizé, CNRS , 7960 Villiers en Bois

2 : USM 402 - Equipe "Physique de l'Océan Austral", Département Milieux et Peuplements Aquatiques Muséum National d'Histoire Naturelle, 43 rue Cuvier, 75231 Paris Cedex 05

3 : Stazione Zoologica Anton Dohrn, Villa Comunale, 80121 Naples, Italie

4 : Centre d'Ecologie et Physiologie Energétiques, CNRS, 23 rue Becquerel, 67087 Strasbourg Cedex 2.

The Southern Ocean is hosting a huge biomass of pelagic resources (pelagic fish and crustaceans), yet essentially unexploited. Biomass and species diversity of such resources are remarkably high in the waters surrounding the French Southern and Antarctic Territories (DOM-TOM). These resources account for a substantial part of the energy transfer from secondary production to higher trophic levels and make the bulk of the food for very large populations of predators (birds and pinnipeds). While the consequences of ENSO on tropical ecosystems are well documented, little is known on the biological response of the Southern Ocean marine food webs, and even less is known on the response of the Southern Ocean ecosystems to long-term climate variability. These difficulties can be partly explained by logistical difficulties for *in situ* sampling of such a vast and remote ocean.

The main objective of this multidisciplinary research project was to evaluate the biological impact of short-term and long-term climate variability on at-sea distribution and abundance of pelagic resources of the Southern Ocean, based on a new approach using their main predators (seabirds, pinnipeds and cetaceans) as oceanographic auxiliaries. Predators integrate spatially and temporally the trophic and physical changes that occur at several trophic levels in the ocean and are very sensitive to environmental variability. The main study site was the Southern Indian Ocean, including the French Southern and Antarctic Territories (TAAF, DOM-TOM)

Three research axes have been developed:

- I) A retrospective analysis of time-series of marine predators spatial distribution. Time-series were made of i) 15 years of tracking data of predators foraging trips and ii) long term catching data from the International Whaling Commission (IWC).
- II) A simulation of at sea distribution and abundance of marine resources (second trophic level).

- III) A comparison of predators time-series as bio-indicators *versus* climatologies so as to estimate how changes in bio-indicators can be related to decadal changes of the ocean-atmosphere system.

A fourth axis is still under development, involving prediction of the impact of climate change based on integrative modelling operating at several levels of ocean and climate forcing.

Data from predators as bio-indicators were obtained by means of detailed telemetric studies of their oceanic foraging trips. Analysis of the seasonal and interannual datasets have provided estimations of the spatial distribution of pelagic fish resources (myctophids) at different scales and estimations of the myctophids relative abundance. Such information were inferred from the predators "Catch per unit effort". Analysis of primary production were based on weekly SeaWifs data extracted for the global Southern Ocean. Fish prey distributions were obtained using LOCEAN (ex-LODyC) "forage" models of trophic transfer. Secondary production indices were developed by modelling the transformation and transport of the secondary production by surface currents fields. Indices of secondary production were parameterized following the first life stages of Antarctic Krill *Euphausia superba*. Climate variability in the study ocean regions has been inferred from spatial remote sensing and *in situ* hydrological data. The surface circulation (integrated over the depth of the euphotic layer) was based on Topex-Poseidon sea surface heights for the geostrophic component and wind data for the Ekman component (ERS and Quicksat data). At some locations a correlation coefficient was used to measure associations between secondary production indices and the observed parameters. To determine the spatial scales of these associations, covariograms between secondary production indices and each of the observed distribution were calculated. The typical spatial scales of the associations were determined from the theoretical variograms.

Axis 2

The main results show that in spite of transport process, primary and secondary productions are linked locally. Associations between the two processes are no longer observed for distances higher than 700 km. Below 700 km, two spatial scales were found that were typical of the covariance of the two processes: 1400 km and 4500 km. The focus on the Kerguelen study site (regional scale) has shown relative differences in the distribution of Chlorophyll *a* concentration and the secondary production index, consistent with the dominating westward circulation in the area. The secondary production index and Chlorophyll *a* concentration are positively correlated in this window. The covariogram shows that two spatial scales structure the processes, 400 and 2400 Km. While the larger scale is linked to the productive sectors centred East and West of Kerguelen, the smaller one characterizes the radius of decorrelation between primary production (Chl *a*) and the secondary production index.

Axis 3

Methodological developments have concerned the study of relationships between at-sea distribution of satellite-tracked predators and oceanographic conditions, such as identifying the appropriate study scales and the shape of these relationships. We have then verified whether the modelled areas of secondary production corresponded to the predators foraging areas. “Forage” model outputs were compared to (1) chlorophyll a surface distribution, (2) distribution of historical catches of three whale species (IWC data) and (3) at-sea distribution of Antarctic fur seals and king penguins. Although a high interannual variability was observed, the spatio-temporal distribution of marine resources available to predators is relatively predictable at the large scale (hundreds of Km). Data from predators as bio-indicators were highly consistent with available scientific trawling data, such as those of frontal areas.

At the large scale (Southern Ocean, whaling data), there is no strong correlation between secondary production index (“forage”) and whale distribution (as shown by correlation coefficients and variography). At the regional scale (fur seal data from Kerguelen), even if there is no numerically significant relationship, strong macrozooplankton concentrations (“forage” data) can be superimposed with the main foraging areas of predators feeding on pelagic fish, as opposed to areas of high Chlorophyll a concentrations.

Axis 1

In the Crozet-Kerguelen area, relationships between regional hydrology and marine resources were studied over a 15 years period. Time-series of predators at-sea distributions (penguins, fur seals) clearly demonstrate a strong impact of the climate variability (sea surface temperature anomalies) on pelagic fish.

On the long-term (> 40 years) and at a large geographic scale (Antarctic area) analysis of IWC data indicate that environmental changes such as sea-ice cover had a major impact on the Antarctic ecosystem, particularly in the Weddell Sea (which contributes itself to half the Antarctic primary production in the sea-ice zone, and shelters the main part of the krill population). The large sea-ice retreat as evidenced in this study has profoundly affected the distribution of large krill-eating cetaceans.

With regards to conservation, critical habitats for the main predators of the Southern Ocean ecosystems (seabirds, seals, whales) have also been identified. Among the perspectives of the study, it is planned to develop a predictive model operating at several forcing levels of the Southern Ocean-climate system in the TAAF region.

RESUME FRANCAIS

Impact de la variabilité climatique sur les ressources pélagiques et la distribution des prédateurs marins de l'Océan Austral (Terres Australes et antarctiques Françaises)

C.A. Bost¹, J.B. Charrassin², C. Cotté¹, F. Bailleul¹, L. Dubroca³, Y. Handrich⁴ & C. Guinet¹

1 : Centre d'Etudes Biologiques de Chizé, CNRS , 7960 Villiers en Bois

**2 : USM 402 - Equipe "Physique de l'Océan Austral", Département Milieux et Peuplements Aquatiques
Muséum National d'Histoire Naturelle, 43 rue Cuvier, 75231 Paris Cedex 05**

3 : Stazione Zoologica Anton Dohrn, Villa Comunale, 80121 Naples, Italie

4 : Centre d'Ecologie et Physiologie Energétiques, CNRS, 23 rue Becquerel, 67087 Strasbourg Cedex 2.

L'océan austral recèle des stocks considérables de ressources pélagiques encore peu exploités (poissons pélagiques, crustacés). En termes de biomasses et de diversité spécifique, l'importance de ces ressources est remarquable dans les eaux entourant les Terres Australes et antarctiques Françaises (DOM-TOM). Elles assurent une partie importante du transfert d'énergie de la production secondaire vers les niveaux supérieurs des chaînes trophiques et constituent la base de la nourriture pour de très importantes populations de prédateurs (oiseaux, pinnipèdes). Si les conséquences de l'ENSO sur les ressources marines tropicales sont bien documentées, son impact sur les ressources et les chaînes alimentaires de l'océan austral est beaucoup moins connu. A long terme, l'impact de la variabilité climatique reste une inconnue. Ces difficultés sont en partie liées à l'immensité des zones océaniques concernées et les difficultés logistiques dans l'échantillonnage in situ.

L'objectif de ce projet pluridisciplinaire a été d'évaluer l'impact des changements climatiques à court et à long terme sur l'abondance, la distribution de ressources pélagiques de l'océan Austral, par l'intermédiaire d'une approche originale, basée sur l'utilisation des principaux prédateurs (oiseaux marins, pinnipèdes, cétacés) comme auxiliaires océanographiques. Ces prédateurs intègrent spatio-temporellement l'ensemble des modifications intervenant dans les composantes physiques et trophiques de l'océan à plusieurs niveaux trophiques et sont très sensibles aux variations environnementales. Le principal site d'étude a été la partie indienne de l'océan Austral, notamment les Terres Australes et Antarctiques Françaises (T.A.A.F., DOM-TOM).

Trois axes de recherche ont été développés :

- IV) Une analyse rétrospective des séries temporelles de distribution spatiale des prédateurs marins i) à moyen terme (15 ans) issues du suivi télémétrique de leurs déplacements pélagiques et ii) à long terme (données distributions de cétacés de la commission baleinière).
- V) Une simulation de l'abondance et de la distribution spatio-temporelle des ressources marines (du niveau trophique secondaire).
- VI) Une confrontation des séries de données prédateurs bio-indicateurs et des séries climatiques et

océanographiques afin de déterminer dans quelle mesure les variations des paramètres bio-indicateurs peuvent être mises en relation avec les anomalies à moyen terme du système océan-atmosphère.

Un quatrième axe est encore en développement. Il concerne une approche prédictive de l'effet du changement climatique, basé sur un modèle intégré évoluant sous différents niveaux de forçages du système océan-climat.

Les informations bio-indicatrices des prédateurs ont été obtenues grâce à l'étude détaillée de leurs trajets alimentaires en haute mer, à partir de l'utilisation d'émetteurs miniaturisés et de capteurs. Les analyses de ces suivis (saisonniers et interannuels), ont permis d'évaluer la répartition spatiale des ressources en poissons pélagiques (myctophidés), à différents niveaux d'échelle et d'estimer l'abondance relative de ces poissons, via la mesure de l'effort de pêche des prédateurs étudiés (données de type " Catch Per Unit Effort "). Les analyses relatives à la production primaire sont issues des données hebdomadaires SeaWifs et ont été extraites sur l'austral global. La distribution des proies des poissons considérés a été établie au moyen des modèles développés par le laboratoire du LOCEAN (" modèle transfert trophique " forage "). Des index de production secondaire ont été développés en modélisant la transformation et le transport de la production secondaire par les champs de courants superficiels. Ces index de production secondaire sont paramétrés selon les caractéristiques des premiers stades de développement du krill antarctique *Euphausia superba*.

La variabilité climatique dans les zones océaniques concernées a été analysée à partir des données de télédétection spatiale et des stations hydrologiques de références. La circulation superficielle (intégrée jusqu'à la profondeur de la couche euphotique), a été calculée à partir des mesures de hauteur de la mer pour la composante géostrophique (données Topex-Poseidon) et à partir des mesures de vent pour la composante d'Ekman (données ERS et Quickscat). Localement le calcul d'un coefficient de corrélation a permis de mesurer l'association entre index de production secondaire et paramètres observés. Pour déterminer l'échelle spatiale de ces associations, les covariogrammes entre l'index de production secondaire et chacune des distributions observées ont été calculés. Les échelles spatiales caractéristiques des éventuelles associations ont été déterminées à partir de la portée du (ou des) variogramme(s) théorique(s).

Par rapport à l'axe 2, les principaux résultats montrent que malgré les processus de transports, production primaire et secondaire restent liées localement. Au-delà de 7000 km les processus ne sont plus liés. En dessous de cette valeur, 2 échelles spatiales structurent la covariance des 2 processus, à 1400 km et 4500 km.

Le zoom sur le site atelier de Kerguelen (échelle régionale) met en évidence une distribution relativement différente entre la concentration en chlorophylle *a* et l'index de production secondaire, suivant la circulation ouest-est dominant le secteur. L'index de production secondaire et la concentration en chlorophylle *a* restent corrélés positivement sur cette fenêtre. Le calcul du covariogramme met en évidence

l'existence de deux échelles spatiales structurant les processus: 400 et 2400 km. Si la plus grande échelle relève des 2 secteurs productifs centrés à l'est et à l'ouest de Kerguelen, la première portée caractérise le rayon de décorrélation entre production primaire représentée ici par la concentration en chlorophylle *a* et l'index de production secondaire.

Par rapport à l'axe 3, les aspects méthodologiques ont concerné l'étude des relations entre la distribution en mer des prédateurs marins suivis par télémétrie et les conditions océanographiques, notamment les méthodes d'identification des échelles d'études pertinentes et de la géométrie spatiale (ou la forme) de ces relations.

Nous avons ensuite vérifié si les zones de production secondaire modélisées correspondaient aux zones de pêche des prédateurs marins supérieurs. Les sorties du modèle « forage » ont été confrontées à (1) la distribution de la chlorophylle *a* de surface, (2) la climatologie de la distribution des prises de 3 espèces de baleines (données IWC), (3) la distribution de l'otarie à fourrure antarctique et la distribution du manchot royal. Les travaux effectués ont permis de montrer que, malgré une forte variabilité inter-annuelle, la distribution dans le temps et dans l'espace des ressources marines accessibles aux prédateurs est relativement prévisible à grande échelle (centaine de km).

Les données bio-indicatrices des prédateurs montrent une grande cohérence avec les données des pêches scientifiques disponibles notamment au niveau des zones frontales.

-A grande échelle (océan austral, données cétacés), il n'existe pas de relation forte entre l'index de production secondaire (« forage ») et la distribution de grands cétacés (comme l'indique les coefficients de corrélation et la variographie.

A l'échelle régionale (Kerguelen, données otaries à fourrure), même si la relation n'est pas significative numériquement, les fortes concentrations en macro-zooplancton (données « forage ») se superposent avec les zones préférentielles de pêche aux poissons pélagiques des prédateurs, à l'inverse des zones où la concentration en chlorophylle *a* est élevée.

Par rapport à l'axe 1 : A l'échelle du site de Crozet-Kerguelen, a été étudiée en détail l'évolution des relations entre hydrologie régionale et ressources lors de variabilité climatique à moyen terme. Les analyses des séries temporelles de distribution en mer des prédateurs (manchots, otaries) indiquent clairement un fort impact de la variabilité climatique (anomalies des températures de surface) sur les stocks de poissons pélagiques.

A long terme (>40 ans) et à très grande échelle spatiale (zone antarctique), l'analyse des données de la commission baleinière indique que les changements environnementaux en termes de couverture des glaces ont eu un impact majeur sur l'écosystème antarctique, particulièrement en mer de Weddell (qui contribue à la moitié de la production primaire associée à la glace de mer en Antarctique, et qui abrite également la majorité de la population de krill). Le retrait important de la glace mis en évidence a eu des conséquences très marquées sur la distribution des grands cétacés consommateurs de krill.

Sur le plan de la conservation, les analyses réalisées ont permis aussi d'identifier des habitats critiques pour la conservation des populations de prédateurs clés de ces écosystèmes marins (oiseaux, phoques, baleines).

Dans les perspectives de l'étude, il est à prévu le développement d'un modèle prédictif évoluant sous différents niveaux de forçages du système océan austral - climat et concernant la zone d'étude des T.A.A.F.

III) Méthodologies expérimentales, modélisation utilisées et résultats

Axe 1 : Analyse rétrospective des changements ayant affectés l'océan austral

1.1. Evolution des conditions de glace de mer à partir des données baleinières

Contexte

La glace de mer est le témoin des changements climatiques et ses variations au niveau des pôles influencent en retour la circulation océanique et atmosphérique et les écosystèmes marins. Les satellites permettent de suivre les fluctuations de l'étendue de la banquise tout autour de l'Antarctique depuis le début des années 1970 (Comiso 2003) mais peu de données existent en revanche pour la première moitié du 20^{ème} siècle. Plusieurs proxy de l'étendue de la glace de mer ont ainsi été mis en œuvre comme les mesures de concentration de gaz contenus dans les carottes de glaces (Curran et al., 2003). Une méthode originale, proposée par de la Mare en 1997, consiste à utiliser les positions de captures baleinières les plus méridionales comme indicateur de la position de la bordure de glace. En effet la glace est un élément crucial du cycle de vie du krill (Loeb et al., 1997) que l'on retrouve en fortes densités le long de la bordure de glace (Brierley et al., 2002). Ces agrégations de krill attirent ainsi les rorquals qui viennent s'en nourrir abondamment le long de la glace pendant l'été austral (Hjort et al., 1933; Shimadzu and Katabami 1984). Ce lien trophique est à l'origine de la chasse massive dont ont fait l'objet les rorquals par les bateaux-usines qui ont alors permis une chasse tout autour de l'Antarctique et particulièrement en bordure de glace, n'étant plus inféodés aux stations baleinières. Cette approche a permis de mettre en évidence un fort retrait de l'étendue de la glace de mer en Antarctique depuis les années 1950. Cependant aucune analyse, y compris l'analyse des captures baleinières de de la Mare (1997), n'a encore permis de savoir si cette diminution de la glace de mer était un phénomène global et homogène sur le pourtour de l'Antarctique, ou si le retrait de la glace était hétérogène, avec des variations marquées entre différentes régions de l'Antarctique. Nous proposons donc de reprendre l'approche de la Mare et d'utiliser cette base de données unique afin de démontrer si les variations de l'étendue de la glace de mer est un phénomène circumpolaire homogène ou alors s'il existe des variations inter-régionales.

Méthode

Depuis le début de la chasse commerciale, on peut ainsi distinguer une 1^{ère} période (1931-1960), avant l'ère des satellites, caractérisée par la chasse des grands rorquals bleus et communs (700000 captures soit plus de 95% des populations), et une 2^{ème} période (1972-1987), contemporaine aux satellites, durant laquelle l'industrie baleinière s'est reportée sur le petit rorqual (110000 capture depuis 1972). Après avoir découpé l'Antarctique en 36 secteurs de 10° de longitude, la méthode consiste à calculer la latitude moyenne des 10 captures les plus méridionales pour chaque secteur, et ceci pour chaque mois de Novembre (début de la saison de chasse) à Février (où l'étendue de la glace est minimum), et pour chaque années de 1931 à 1987 (excepté de 1941 à 1945 et de 1961 à 1971). Ensuite l'étendue de la glace autour de l'Antarctique est calculée pour chaque mois en moyennant l'ensemble des années pour chaque période, avant 1960 et après 1972.

L'étendue de la glace dérivée des satellites est ici définie par la limite Nord de la concentration de 80% de glace (GOSTA gisst22; IGOSS nmc Reyn_SmithOiv2), qu'on appelle le pack serré.

1.2. Champs prédits d'habitats et d'abondance des ressources

-Mise au point d'échelles pertinentes : l'un des axes du travail effectué a porté dans un premier temps sur des aspects méthodologiques concernant l'étude des relations entre la distribution en mer des prédateurs marins et les conditions océanographiques notamment sur les méthodes d'identification des échelles d'études pertinentes et de la géométrie spatiale (ou la forme) de ces relations.

-Données physiques utilisées : Dans le cas de la zone Atelier Crozet, les données environnementales proviennent de mesures par les satellites. Le paramètre océanographique utilisé dans cette étude est la température de surface de la mer (SST). Les données satellites présentées ici sont disponibles sur le site <http://poet.jpl.nasa.gov/>. La résolution spatiale des données utilisées est de 18 km et la résolution temporelle est le mois, en dessous duquel les images sont très incomplètes en raison des conditions de couverture nuageuse dans cette région.

Champs d'habitats production secondaires et modélisation des habitats :

L'abondance et la distribution des ressources marines de l'austral est difficilement accessible par les moyens d'observation conventionnels (campagne océanographique et prélèvement *in situ*) du fait de l'étendue du milieu à prospecter. En effet pour valider les liens existant entre la distribution des prédateurs marins et leurs proies il est nécessaire d'échantillonner la distribution de ces proies à des échelles spatiales et temporelles similaires à celle utilisées par les prédateurs marins. Ces échelles dépassent largement les durées des campagnes océanographiques et les conditions de navigation propres à l'océan austral rendent malaisée une telle approche.

Des études précédentes (Guinet et al 2001, Bost et al. 2002, Lea et al. 2006) ont pourtant démontré l'intérêt d'avoir accès à la distribution de la ressource, en particulier pour expliquer l'effet de la variabilité environnementale sur les paramètres démographiques d'une population. De 1998 à 2000 a eu lieu une série d'études sur l'écologie de l'otarie à fourrure *Arctocephalus gazella* sur l'île de Kerguelen : paramètres biodémographiques de la colonie de Cap Noir et suivis satellitaires des individus. En parallèle des chalutages sur les zones d'alimentation des animaux ont été effectuées. Le lien fort entre les index de condition des animaux et la disponibilité des proies permet d'expliquer en partie la variabilité des paramètres biodémographiques observées sur les animaux suivis. Ces études montrent aussi les limites d'une telle approche : logistique difficile et limite spatiale et temporelle de l'échantillonnage des proies. Pour des espèces prospectant à des échelles plus large et/ou d'une manière plus dispersée, la mise en oeuvre des moyens d'échantillonnage (navire océanographique) est quasi impossible.

A ces échelles les seuls moyens d'observation *in situ* reste l'observation satellitaire. Hélas, les paramètres mesurés sont à l'heure actuelle limités aux paramètres physique (température de surface, vent, hauteur de la mer...) ou aux paramètres biologiques relatif aux premiers niveaux trophiques (concentration en chlorophylle a, production primaire) (Johannessen et al. 2000).

Une approche alternative consiste alors à utiliser les champs mesurés disponibles pour construire à l'aide de la modélisation un équivalent de la distribution des niveaux trophiques supérieurs. Ainsi un modèle de transfert trophique a été développé afin de prédire les zones de concentration des proies des thons dans la zone équatoriale pacifique et atlantique (Lehodey et al., 1998). Dans ce modèle, le transfert trophique du niveau de la production primaire au niveau de la production secondaire est paramétré en terme d'efficacité de transfert et en temps nécessaire au recrutement des espèces-proies considérées. L'ensemble est transporté au cours du temps par les courants. Les courants et les champs de production primaire sont soit modélisés, soit observés à partir d'outil de télédétection satellitaire.

Nous avons développé un modèle similaire à l'échelle de l'océan austral (de -20° à -60° de latitudes sud). La circulation et les champs de production primaire ont été calculés à partir des observations satellitaires correspondantes: mesure du vent et des hauteurs de la mer pour établir la courantologie et mesure de concentration en chlorophylle a pour la production primaire.

Initialement dans le cadre de ce projet nous avons prévu un modèle de production secondaire forcé à partir d'un modèle bio-géochimique (PISCES) développé par O. Aumont (LOCEAN-LEMAR) et adapté par les soins de J-M André (LOCEAN) et L. Dubroca (CEBC-CNRS-LOCEAN) à l'Océan Austral. Ce travail devait être réalisé, dans le cadre de ce projet, mais cette partie du projet n'a pas pu aboutir dans le cadre de ce projet compte tenu du retard pris dans la mise au point de PISCES et surtout son ajustement à la situation de l'océan Austral qui devait être conduit sous la responsabilité de J.-M. André. PISCES n'était qu'en phase de développement dans la phase avancée de ce programme de recherche et nous n'avons pu qu'initialiser les « runs » de PISCES 1° à l'échelle globale de l'océan austral et entreprendre la réalisation d'une climatologie et initier première validation à grande échelle. Les résultats préliminaires

sont présentés dans ce rapport. Ces travaux sont actuellement poursuivis en active +collaboration avec O. Aumont.

Les étapes initiales et indispensables prévues dans ce programme d'étude étaient de :

- 1) -décrire les relations existantes entre la distributions des prédateurs marins étudiées et leur environnement marin (SST, Chlorophylle a, bathymétrie, champs de courant, glace de mer abondance et distribution de proies...) afin d'essayer d'identifier quels étaient les paramètres océanographiques les plus pertinents dans l'études de ces relations et à quels échelle spatiale.
- 2) -vérifier si l'utilisation d'un modèle de transfert trophique (afin de simuler la distribution de la production) améliorerait la résolution spatiale des relations entre la distribution des prédateurs marins supérieurs et de leur ressource simulée par rapport à la prise en compte uniquement de facteurs océanographiques. Cette validation devait être conduite à deux niveaux : d'une part à l'échelle spatiale d'une façon globale et climatologique pour l'océan austral (modèle grands cétacés) et à une échelle régionale (zone atelier de Kerguelen-Crozet : modèles d'étude manchot royaux et otaries). D'autre part à une échelle temporelle : vérifier si les variations simulées de distribution et d'abondance de forage à l'échelle de la zone atelier de Kerguelen étaient cohérentes avec les variations inter-annuelle de distribution en mer de prédateurs (manchots royaux et otaries) et de leur performances bio-démographiques.

Cette validation constituait un près requis indispensable pour envisager la partie simulation de l'effet d'un changement climatique sur le fonctionnement de ces écosystèmes.

Le modèle choisi

Les communautés des prédateurs marins supérieurs sont situés en fin de réseaux trophiques et la distribution de leurs proies principales n'est pas encore disponible à des échelles écologiques pertinentes. Une alternative consiste à développer une approche tournée vers la modélisation. La variabilité des régimes alimentaires intra et inter spécifique des prédateurs marins (du zooplancton aux myctophidés) devraient être intégré au sein d'un tel modèle. Implémenter ce type de modèle de réseau trophique à l'échelle d'un bassin est une tâche ardue (voir Ekman 1994) et plus adapté à une approche mono spécifique. Le modèle développé ici prédit la distribution d'un index de production secondaire. Nous simplifierons cette appellation par production secondaire dans la suite. Ce choix résulte du compromis entre diminuer la distance trophique entre le modèle et les proies consommées par les prédateurs et garder un formalisme eulérien simples des paramètres biologiques. Les hypothèses utilisées sont (i) l'index est issu de la conversion de la production primaire en production secondaire au sein de la zone euphotique (Iverson 1990) (ii) durant la conversion, la redistribution des productions primaire et secondaire a lieu sous l'influence de la circulation dans la zone euphotique et (iii) un processus diffusif reproduit la diffusion des masses d'eau et le déplacement aléatoire des organismes.

La variation dans le temps de la production secondaire (ou ressource pour les prédateurs considérés : R) s'écrit :

$$\frac{dR}{dT} = \text{Transport} - \text{Perte} + \text{Source} \quad (1)$$

Le type de proie modélisé est considéré comme appartenant à une seule population et présuppose un taux de mortalité constant (λ) avec un recrutement continu (S) pendant une période fixe T_r :

$$\frac{dR}{dt} = S - (\lambda R) \quad \text{avec} \quad S = P e^{-m_r T_r} \quad (2)$$

où P est la production primaire et m_r un coefficient de perte. Les valeurs des transferts écologiques entre production primaire et les niveaux de production supérieurs ont été déterminées à partir de la bibliographie. Iverson (1990) a calculé pour le domaine marin les taux de transfert de nitrate à travers les réseaux trophiques : 4 % de la production primaire (assimilée aux nitrates) est transférée sur le niveau

trophique de niveau 2.5 (donc du phytoplancton aux poissons carnivores). Dans notre étude cette valeur est de 14 % car nous nous intéressons aux niveaux trophiques inférieurs (zooplancton essentiellement). Ainsi le transfert de la production primaire vers un échelon trophique supérieur décroît constamment durant T_r en utilisant une fonction exponentielle (équation 2). Durant la période T_r , la cohorte des organismes issue de la production primaire est soumise aux déplacements des masses d'eau.

Le transport horizontal est décrit par les équations de diffusion-advection, avec σ le coefficient de diffusion et u et v les composantes zonales et méridionales du courant dans la couche euphotique. Un terme de perte dépend du coefficient λ et le terme source S est la biomasse recrutée après un temps caractéristique T_r . Durant cette période T_r , la production nouvelle P est redistribuée dans la couche euphotique suivant le même modèle de transport que R avec. Ceci est décrit par les équations (3) et (4) :

$$\frac{\partial R}{\partial T} = \sigma \left(\frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 R}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (uR) - \frac{\partial}{\partial y} (vR) - (\lambda R) + S \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial T} = \sigma \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (uS) - \frac{\partial}{\partial y} (vS) - (m_r S) \quad (4)$$

Paramètres du modèle

Nous nous intéressons ici à la distribution de différents prédateurs marins. Le modèle a donc été paramétré de manière généraliste vis-à-vis des proies exploitées. Le modèle simule donc la production secondaire de première ordre : euphausiacées et copépodes essentiellement. Le caractère ubiquiste et l'abondance de ces deux groupes dans l'océan austral (Atkinson 2004) et le fait qu'ils constituent la base des réseaux trophiques sur lesquels s'alimentent les prédateurs marins supérieurs justifient ce choix (Everson 2000).

Les caractéristiques écologiques du krill Antarctique *Euphausia superba* apporte les valeurs numériques propres à l'implémentation. Cette espèce d'invertébré vit en large essaim donc la concentration peut atteindre 10000 à 30000 individus par m^3 (Hamner et al. 1983). Espèce pélagique, le krill antarctique se nourrit de phytoplancton. La taille peut atteindre 6 cm avec un poids de 2 g et l'espérance de vie de 6 ans. Cette espèce est une espèce clef de l'écosystème antarctique. La mortalité du krill durant les premiers mois de vie est critique (plus de 90 % de la population). Cette période est associée à un stade de développement larvaire où le krill est transporté passivement par les courants (de 3 à 5 mois – Nicol et Endo 1997, Murphy et al. 2004). Le modèle a donc été paramétré en fonction de ce temps de transport. Un temps de transport supérieur ne permettrait pas d'inclure dans la simulation les caractéristiques comportementales d'un krill d'âge supérieur (comportement grégaire, nage active).

Analyse de sensibilité

Nous avons testé différentes gammes de valeurs afin d'expérimenter la sensibilité du modèle. La durée de transfert trophique inférieure à 30 jours conduit à reproduire la distribution de la production primaire. Au de-là de 150 jours, peu de changements apparaissent dans la distribution la production secondaire. Le coefficient de diffusion a été fixé à $25 m^2 s^{-1}$. La variation de ce coefficient apparaît n'avoir que peu d'influence sur les sorties du modèle. Ces résultats sont similaires à ceux de l'étude de Lehodey et al. (1998).

Le transport de R et S

Le transport de R et S utilise un système standard d'équation d'advection diffusion. Les équations différentielles sont résolues sur une grille régulière par la méthode des éléments finis (Okubo 1980). Le

pas de temps est un heure et la grille utilisée est celle du modèle OPA ½ degrés centrés sur l'océan austral (Madec et al. 1998).

Champs d'entrée du modèle

Circulation

La circulation océanique superficielle a été calculée à partir des observations satellitales pour l'hémisphère Sud sur un secteur englobant l'océan austral. La circulation de surface se décompose en deux termes : un terme géostrophique estimé à partir des mesures de hauteur de la surface de la mer et un terme d'Ekman estimé à partir du stress du vent à la surface de la mer (Bonjean et Lagerloef 2002). Le courant total est la somme de la composante géostrophique et de la composante d'Ekman. Cette approche utilise deux sources de données satellitales (Lagerloef et al. 1999). Elle est largement utilisée en océanographie et un produit équivalent à ces calculs sera disponible en ligne courant 2006 (produit OSCAR pour Ocean Surface Current Analysis Real-time sur <http://www.oscar.noaa.gov/>). Les études de Lagerloef et al. (1999) et Bonjean et Lagerloef (2002) résument et valident cette approche sur la zone équatoriale. L'étude de Park et Gambéroni (1997) illustre le calcul de la géostrophie sur le secteur austral. Les hypothèses associées au calcul de ces deux composantes et le détail des calculs ne sont pas détaillés dans ce rapport (voir Pedlosky 1996).

Courants géostrophiques

La géostrophie part de l'hypothèse d'équilibre entre gradient de pression et force de Coriolis dans les équations de Navier-Stokes. Ceci permet d'obtenir une relation directe entre courant géostrophique et dérivée au premier ordre de la hauteur de mer. Nous avons utilisés directement le produit Ssalto/Duacs distribué par AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data, supporté par le Centre National d'Etude Spatiale - CNES). Nous avons utilisé la courantologie géostrophique calculée à partir des cartes de hauteur absolue de la mer. La résolution temporelle est hebdomadaire sur une grille Mercator de 1/3° par 1/3°. Ces courants sont disponibles de 1998 à 2002.

Courants dus au vent

Les champs de vent utilisés proviennent des analyses objectives des vents de surface de la mer fournies par le CERSAT (Centre ERS d'Archivage et de Traitement - French ERS Processing and Archiving Facility – centre de traitement et de distribution de données spatiales de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la mer). Les champs moyens de vent (Mean Wind Fields- MWF) et les mesures dérivées sont élaborées à partir des observations effectuées par les diffusiomètres AMI-WIND (satellite ERS-1 et 2) et NSCAT (satellite QuickSCAT). Le CERSAT met à disposition les champs mesurés projetés sur une grille régulière avec une résolution spatiale et temporelle donnée. D'autres variables géophysiques sont aussi fournies. Le maillage est de 1° par 1° en latitude et longitude pour les satellites ERS-1 et ERS-2 et 0.5° par 0.5° pour QuickSCAT. Nous avons donc utilisé les champs hebdomadaires des composantes zonales et méridionale de la tension du vent provenant d'ERS-2 de 1998 à 2000 et de QuickSCAT de 2001 à 2002. Le transport d'Ekman est calculé à partir des mesures de tension de vent à la surface de la mer. Le transport d'Ekman (U_{Ex}, U_{Ey}) est calculé à partir des mesures de tension de vent à la surface de la mer (τ_x, τ_y) et représente le transport d'Ekman intégré jusqu'à la profondeur h:

$$U_{Ex} = \int U_E dz = \frac{\tau_y}{\rho f}, V_{Ex} = \int V_E dz = -\frac{\tau_x}{\rho f}$$

avec ρ la densité de l'eau de mer ($\rho=1025 \text{ kg.m}^{-3}$), U_{Ex} et U_{Ey} en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$, τ_x et τ_y en pascal et f le paramètre de Coriolis ($f=2 \omega \sin(\phi)$) avec ω la vitesse angulaire de rotation de la terre et ϕ la latitude du lieu considéré). Ce transport est intégré sur la profondeur de la couche euphotique afin d'obtenir un courant moyen pour cette couche.

Production primaire

La concentration en chlorophylle a de surface (mg.m^{-3}) est mesurée par le capteur Sea viewing Wide field of view Sensor (SeaWiFS) embarqué sur une plate-forme satellitale OrbView-2. Les données sont délivrées par le Data Active Archive Center (DAAC) via internet. Les données mensuelles de niveau 3 ont été utilisées, à l'échelle mensuelle. La concentration en chlorophylle a est convertie en production primaire ($\text{g.C.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$) à l'aide des données relatives à l'éclairement du programme SeaWiFS et des algorithmes de conversion établis par Morel et André (1991). La profondeur de la couche euphotique est estimé à partir de la concentration en chlorophylle a suivant l'étude de Morel et Maritorena (2001).

Regrillage et simulation

Les entrées du modèle (circulation et production primaire) ont été recalés sur un grille de maille de $1/2^\circ$. Les interpolations (nébulosité dans le cas de la concentration en chlorophylle a et ré-échantillonnage de données de courantologie) ont été faites par krigeage (Wackernagel 1998). La grille comporte 722×136 compartiments (-180° à 180° en longitude et -10° à -60° en latitude), à l'échelle mensuelle. 5 ans de simulations de 1998 à 2000 ont été effectués. Un spin up d'un an a été mis en place avant chaque simulation. Le modèle est écrit en fortran et a tourné sur une station de travail sous Linux.

Le modèle n'a pas pu être implémenté pour des latitudes supérieures à 60°S pour les deux raisons suivantes : d'une part la couverture nuageuse ne permettait pas d'interpoler correctement des champs de chlorophylle a en particulier pour la période hivernale, et d'autre part il n'était pas possible de calculer les champs de courants à partir des anomalies de hauteur de mer sous la glace de mer et par conséquent pour une grande partie de la période hivernale.

Analyses

Les analyses ont été effectuées sur deux niveaux. Localement le calcul d'un coefficient de corrélation permet de mesurer l'association entre index de production secondaire et paramètres observés. Le coefficient de corrélation de Spearman (Saporta 1990) a été utilisé. Pour déterminer l'échelle spatiale de ces associations, les covariogrammes entre l'index de production secondaire et chacune des distributions observées ont été calculés (Wackernagel 1998). La portée du ou des variogramme(s) théorique(s) correspondant permet de déterminer les échelles spatiales caractéristiques des éventuelles associations.

La Figure 3.1.1 représente un variogramme. Habituellement les valeurs augmentent en fonction de l'éloignement des points de mesure et atteignent fréquemment un palier aux grandes distances. Les caractéristiques du palier sont en rapport étroit avec la morphologie de la variable régionalisée et donc avec la structuration spatiale du processus étudié. Des changements successifs de la pente du variogramme indiquent le passage à des structurations spatiales de nature différente. Le comportement aux très petites échelles, près de l'origine du variogramme, renseigne sur le degré de continuité de la variable. Par exemple le cas de valeurs changeant abruptement à très petite échelle témoigne d'une discontinuité à l'origine ou effet pépite (comme les sautes de teneurs en minerais lorsqu'il y a des pépites dans le substrat). Lorsque l'écart moyen entre les valeurs est constant pour tous distances entre les points, il y a une absence complète de structuration spatiale des valeurs. Les analyses ont été utilisées le progiciel R (R Development Core Team 2004).

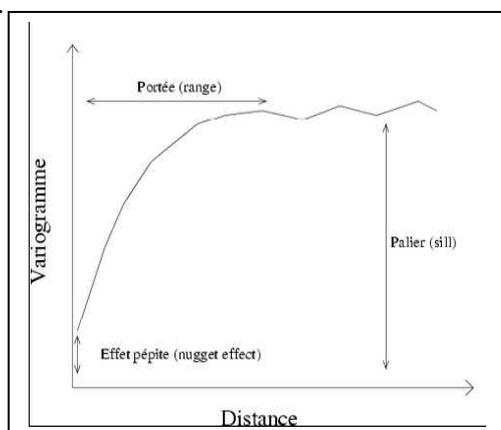


Figure 3.1.1: Variogramme : représentation graphique et structure

Axe 2 : confrontation des séries simulées d'abondance de proies aux paramètres bio-indicateurs de prédateurs marins, situés au sommet des réseaux trophiques.

Présentation des modèles prédateurs supérieurs étudiés

modèle grands cétacés

Le contexte océanographique influence très largement la distribution spatiale de la productivité de l'Océan Austral qui détermine en retour la distribution de la plupart des espèces de prédateurs supérieurs antarctiques, notamment les grandes baleines (Tynan 1998; Nicol *et al.* 2000; Thiele *et al.* 2000). Les baleines bleue et le rorqual commun se nourrissent presque exclusivement de krill (*Euphausia superba*) en zone antarctique tandis que le rorqual de Rudolphi ou rorqual boréal consomme presque exclusivement des copépodes ou de krill subantarctique (*Euphausia valentini*) en zone subantarctique (données commission baleinière internationale). Les grandes baleines antarctiques étaient les plus grands prédateurs de krill avant que ne débute dans les années 1930 leur exploitation industrielle. Chaque année les rorquals bleus et communs consommaient une biomasse estimée de 200 millions de tonnes de krill, soit 1000 fois plus que les pêcheries actuelles de krill. La disparition de ces espèces a été responsable du « surplus de krill » des années 1960 (Laws 1977; Lubimova *et al.* 1985). L'étendue et l'exploitation de ces deux espèces, la très forte philopatrie observée chez les baleines (Clapham & Seipt 1991) suggère que ce jeu de données fournit des informations objectives sur la distribution passée de ces grands cétacés en Antarctique.

Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé ce jeu de données pour essayer de comprendre dans un premier temps l'influence exercée par les facteurs océanologiques et notamment la distribution des biomasses estimées de krill (à partir des données de pêche expérimentales) ou dans un deuxième temps à partir des distribution simulées de krill à partir de modèle de transport-advection de la production primaire sur les variations d'abondance longitudinale de ces espèces de grands cétacés à l'échelle circum-antarctique.

Par ailleurs nous avons utilisé ce jeu de données unique afin de reconstruire à l'échelle de l'antarctique l'évolution de l'étendue de la banquise au cours de ces 70 dernières années. En effet la plupart des espèces de grands cétacés antarctiques était chassée en bordure de banquise ceci était tout particulièrement vrai pour trois espèces : le rorqual bleu, le rorqual commun et le petit rorqual.

Les données baleinières proviennent de la commission baleinière internationale. Les données de captures de baleines bleues et de rorqual communs effectuées à partir des flottilles de chasses pélagiques opérant autour des navires usines dans l'océan Austral entre 1931 et 1966 ont été utilisées pour estimer la distribution spatiale estivale (décembre-janvier-février) de ces espèces.

Les données de température de surface proviennent de la climatologie mensuelle à 1° établie par Bottomley *et al.* (1990) à partir des données in situ collectées entre 1951 et 1980. L'étendue de la glace de mer à été estimée à partir de la climatologie mensuelle de l'étendue de la glace de mer à partir des données collectées entre 1903 et 1994 par les navires qui étaient sur zone mais principalement à partir des données satellitales disponibles depuis le début des années 1970 (GOSTAgisst22, disponible sur <http://iridl.ldeo.columbia.edu>). Nous définissons l'étendue saisonnière de glace (SIZ) comme la surface délimitées entre l'étendue hivernale maximale (septembre) et l'étendue estivale minimale (février) de la banquise (concentration de glace de 80 %).

Les données baleines et chlorophylle *a* ne sont pas contemporaines. Nous avons construit une climatologie synoptique de la concentration estivale (décembre-février) de chlorophylle *a* en surface entre 1998-2003 en utilisant les données de la couverture globale mensuelle obtenues par SeaWIFs. La concentration en chlorophylle_ *a* estivale a été calculée pour la zone océanique (profondeur > 1000 m) de l'océan austral.

Les estimations globales des biomasses de krill ont été extraites à partir des données historiques de densité de krill dans l'océan austral obtenues entre 1926 et 1951 (à partir d'Atkinson *et al.* 2004). Nous avons utilisé ce jeu de données historiques parce que d'une part il couvre l'ensemble de l'océan austral comparé au jeu de données obtenus entre 1976-2003 qui provient essentiellement des zones ouest atlantique et des

hautes latitudes de l'océan indien et d'autre part les données collectées entre 1926 et 1951 étaient contemporaines des données de chasse baleinière.

Pour l'analyse circumpolaire, nous avons divisé l'abondance longitudinale des baleines et du krill, l'étendue saisonnière de glace, et de krill et la concentration océanique de chlorophylle_a en 24 secteurs de 15° afin de supprimer l'effet de l'auto corrélation spatiale des données entre chaque secteur observée à des résolutions spatiales plus fines. Compte tenu du fait que les données n'étaient pas distribuées de façon normale (Shapiro-Wilk tests, tous les $p < 0.05$), nous avons utilisé la procédure GENMOD (GLM analysis) dans SAS avec une fonction log-link et une distribution binomiale négative (bleu et commun, krill et étendue saisonnière de glace) et une distribution de Poisson pour la distribution de la concentration océanique de chlorophylle a de surface) (Cotté et al, soumis).

modèle éléphant de mer : lien entre conditions hydrologiques à très grande échelle, glace de mer

L'utilisation du modèle éléphant de mer (*Mirounga leonina*) a été décidé après le début du projet GICC. Plusieurs raisons importantes ont justifiées à nos yeux l'intégration des éléphants de mer dans la base de données « habitats d'alimentation des prédateurs selon l'évolution de la disponibilité des ressources ».

Phoques de grande taille, ils jouent un rôle très important en termes de biomasse consommante vis à vis de l'ichtyofaune pélagique. Leur potentiel bio-indicateur résulte de leurs déplacements à très grande échelle spatiale, de leurs plongées à très grande profondeur (>1000 m). Leur grande taille qui permet de les équiper de plusieurs types de capteurs d'activité. Dans le cadre d'un autre programme, soutenu par le CNES débuté en .., les éléphants de mer sont utilisés comme plates-formes d'acquisition de données climatiques grâce à leur équipement de capteurs très précis (CTD, plongée, vitesse, température de l'eau, salinité) et de balises Argos reconstituant leurs déplacements alimentaires. Ce travail se situe dans le cadre du projet international SEaOS (*Southern Elephant seals as Oceanographic Samplers*) qui voit plusieurs pays (RU, Australie, USA) étudier simultanément le comportement alimentaire des éléphants de mer en fonction des paramètres hydrologiques dans plusieurs sites autour de l'Océan Austral. Cette approche permet de collecter une quantité considérable d'informations océanographiques, et est quasiment devenue aujourd'hui la principale source de données hydrologiques pour cette région du globe. Ainsi, cette partie du programme contribue de façon très substantielle à l'étude des changements et de la variabilité océanographique de l'océan Austral.

modèle manchot royal : lien entre zone polaire frontale –poissons myctophidés

Le manchot royal (*Aptenodytes patagonicus*) espèce étudiée intensivement par l'équipe depuis 14 ans, est un modèle bio-indicateur très intéressant en raison de son rayon d'action très étendu en mer (jusqu'à 1800 km), de ses plongées à très grandes profondeurs (jusqu'à 400m). De plus il se nourrit essentiellement de poissons mésopélagiques et des calmars et présente une grande dépendance vis à vis de la zone polaire frontale, zone de productivité secondaire et tertiaire forte. Les manchots royaux étudiés par télémétrie (CEBC-CNRS) jouent aussi le rôle de plates-formes océanographiques en fournissant à chacun de leur retour de mer, des données de température très détaillées au plan spatial, à l'échelle régionale (sud-est de Kerguelen, depuis 1998). La base de donnée ainsi constituée a déjà apporté de nouvelles informations qualitatives qui ont permis de mieux comprendre la circulation océanique ainsi que son rôle dans les mécanismes de production primaire dans une région très productive (Charrassin *et al.* 2002, *Ecology Letters*, Charrassin *et al.* *Deep-Sea Res.* 2004). Un atout important est la présence dans la région de Kerguelen explorée par les manchots du suivi mensuel et interannuel hydrologique CLIOKER (Programme CLIOKER, Climat Océanique à Kerguelen, responsable Y.H. Park, débuté en décembre 1998), indispensable pour identifier les phénomènes climatiques de basse fréquence (3-4 ans pour El Niño).

modèle otaries à fourrure :

La distribution et l'écologie en mer d'otarie à fourrure antarctique a été étudiée de façon intensive, en relation avec la distribution de leurs proies échantillonnées par des campagnes de chalutage mésopélagiques, sur la zone atelier de Kerguelen sur la période 1998-2000 (Guinet *et al.* 2001, Lea *et al.* 2005). Nous avons alors montré qu'il existait une bonne relation entre la distribution en mer du temps

passé à plonger (i.e. à pêcher) des otaries et la distribution de leurs proies (Guinet et al. 2001). Par ailleurs nous avons établi l'existence de très fortes variations des performances de pêche et biodémographiques entre ces trois années : 1998 se caractérisant par un taux de croissance pondérable des nouveaux nés très faible et l'inclusion dans le régime alimentaire des mères d'espèces proies à faible valeur énergétique. Les meilleures performances de croissance des nouveaux nés ont été observées l'année 2000 (Lea et al. 2005). Dans le cadre du projet GICC nous avons utilisés les données relatives aux variations inter-annuelles de distribution spatiale de l'activité de plongées des otaries et de leur performances bio-démographiques aux variations inter-annuelles de distribution spatiale et d'abondance de forage sur la ZA de Kerguelen. Afin vérifier la pertinence d'une approche modélisation de la production secondaire.

Estimation de l'abondance et la disponibilité des poissons via l'effort de pêche des prédateurs

Les travaux réalisés par le CEBC et le CEPE ont permis de caractériser et de valider, via des techniques télémétriques de pointe, plusieurs paramètres bio-indicateurs importants vis à vis du suivi de la disponibilité des ressources en poissons mésopélagiques. Ainsi les nouvelles approches utilisées dans l'instrumentation (par utilisation de sondes de mesure de température oesophagiennes non invasives, couplées à des balises et des enregistreurs de plongée, température de l'eau) permet d'estimer la quantité de proies ingérées par unité de temps au cours des transects effectués par l'animal entre sa colonie et sa zone (figure 3.2.1). Par la mesure de la température oesophagienne (par microsondes de température « embarquées »), nous avons pu développer des outils relativement simples permettant d'étudier le succès de chasse selon les conditions hydrologiques annuelles. En équipant simultanément des animaux munis des capteurs de prise alimentaire interne et des capteurs de plongée (faciles à poser sur les animaux, très performants, à haute résolution), nous avons pu valider l'utilisation des profils de plongée enregistrés à haute fréquence et à haute résolution pour la bio-indication des poissons pélagiques (Bost et al. sous presse, Deep Sea II). Ainsi le temps passé au fond (« bottom time ») est étroitement corrélé avec le nombre de proies capturé au fond. 2) le succès de pêche des oiseaux par plongée (nombre de poissons pélagiques capturés) est aussi étroitement corrélé au nombre de « zigzags » effectués au fond des plongées et à la remontée. Ce dernier résultat a une portée appliquée importante : sachant qu'il est beaucoup plus facile d'enregistrer et d'analyser des profils de plongée, l'analyse fine des accidents dans les profils de plongée peut être un très bon indice du succès des prédateurs plongeurs à une profondeur donnée.

La confrontation des données prédateurs équipés avec les données de campagnes océanographiques entreprises simultanément et des données existantes sur la disponibilité régionale a permis de valider 2 autres paramètres importants :

- le temps passé par secteur géographique et par pallier de profondeur
- la distance verticale parcourue par unité de temps

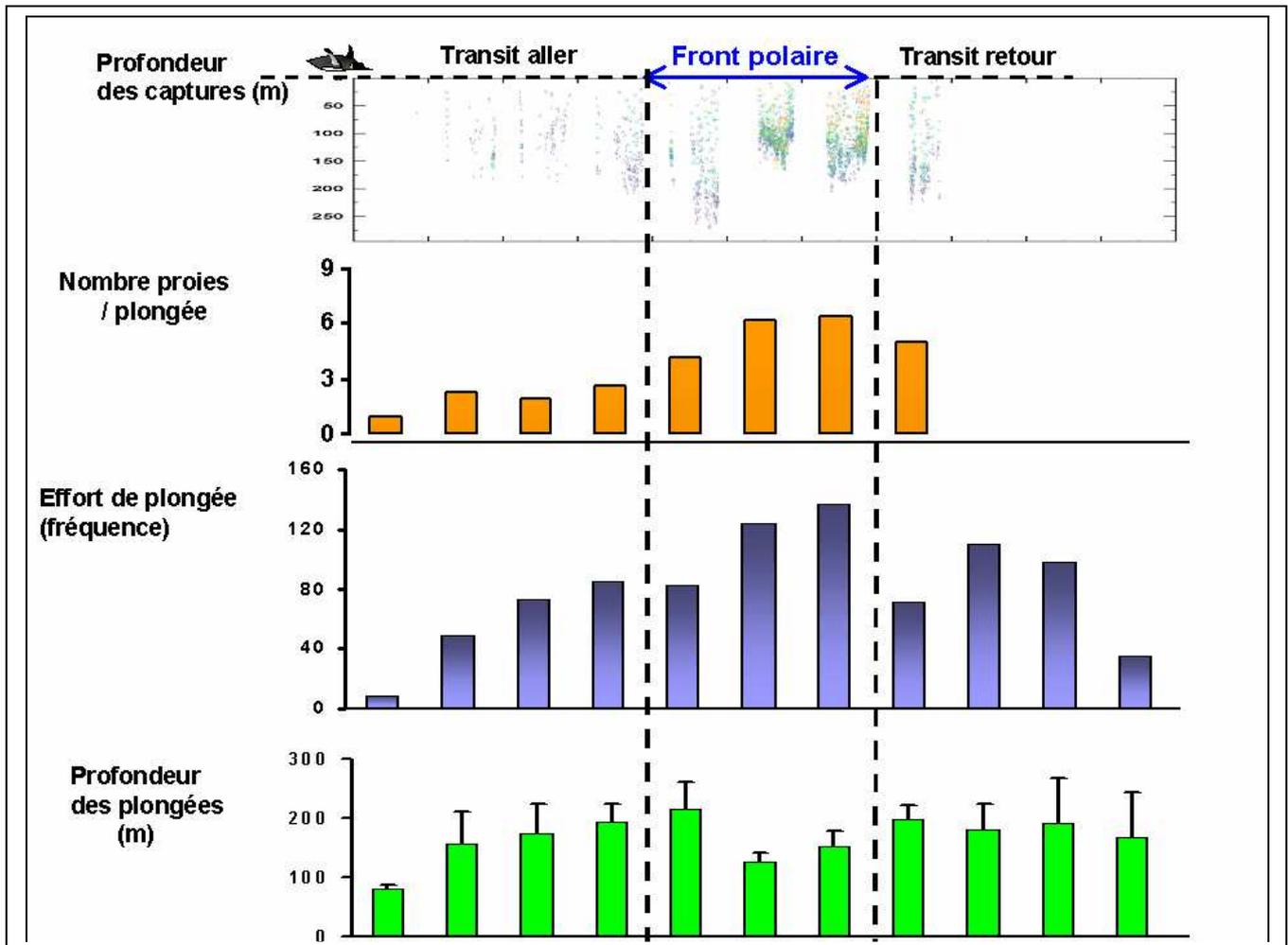


Figure 3.2.1 : Suivi du succès de chasse d'un prédateur supérieur (manchot royal) sur les bancs de myctophidés au cours de son voyage aller et retour depuis sa colonie, jusqu'à la zone frontale polaire (Indien sud). La fréquence des captures de poissons est obtenue via la méthode de mesure de la température oesophagienne en continu au moyen de sondes miniaturisées implantées (et par conséquent les captures de proies : Charrassin et al. *Proceeding Royal Society Lond.* 2001). L'augmentation marquée du succès de pêche au niveau des zones frontales particulièrement productives comme le Front Polaire (Pakhomov et al. 1994, *MEPS* 111 : 155-169) est associée à une diminution de la profondeur des plongées en rapport avec une thermocline moins profonde.

IV Résultats

Axe 1 : Simulation de l'abondance et de la distribution spatio-temporelle des ressources marines

Analyse de la distribution de la concentration en chlorophylle a et circulation

Climatologie

La climatologie de la concentration en chlorophylle a (Figure 4.1.1) localise les zones productives les plus productives entre -40° et -50° de latitude, à l'est de l'Amérique du Sud, au sud de l'Afrique et sur le plateau de Kerguelen. La climatologie de la circulation est en accord avec la courantologie décrite : le courant-circum-polaire antarctique y est clairement visible.

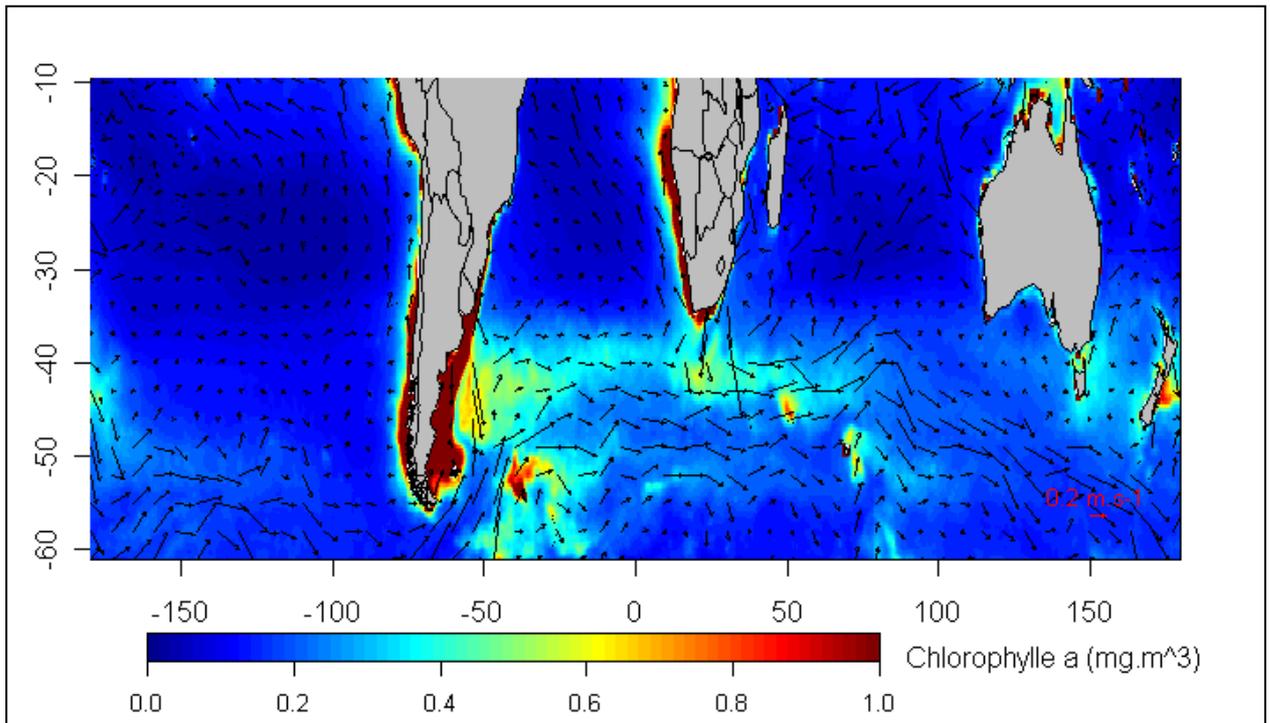


Figure 4.1.1 : Climatologie de la concentration en chlorophylle a (mg.m^3) et circulation

Variabilité inter-annuelle

L'analyse visuelle de la climatologie annuelle de la distribution de la concentration en chlorophylle et des courants de surface indiquent qu'à grande échelle les zones de production et la circulation de surface étaient globalement identiques pour les trois années étudiées (figure 4.1.2). Cette similitude s'expliquant par la très forte contraintes exercées par la circulation et les plateaux continentaux sur la distribution de la production primaire. A plus fine échelle, alors que la circulation de surface varie peu, d'importantes variations de la distribution et de la concentration en chlorophylle sont visibles notamment pour secteur situé à 50°W (nord de la mer de Weddell et le secteur localisé à 70°E (Zone Kerguelen Heard).

L'analyse climatologique de la chlorophylle_a révèle des variations inter-annuelles globale des concentrations de chlorophylle_a en de surface à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude. Ainsi au niveau global les plus faibles concentration en chlorophylle_a ont été observées en 1998 et les plus élevés en 2000 avec une variation globale de 7.4 % (voir figure 4.1.5) . Les données actuelles ne nous permettent pas de déterminer si la productivité globale des océans présente une variabilité du même ordre ou si les variations de chlorophylle en surface ne reflètent qu'imparfaitement les biomasses de phytoplancton présentes dans la colonne d'eau (i.e. Est-ce que le maximum de concentration en surface reflète objectivement de du maximum de sub-surface ?)

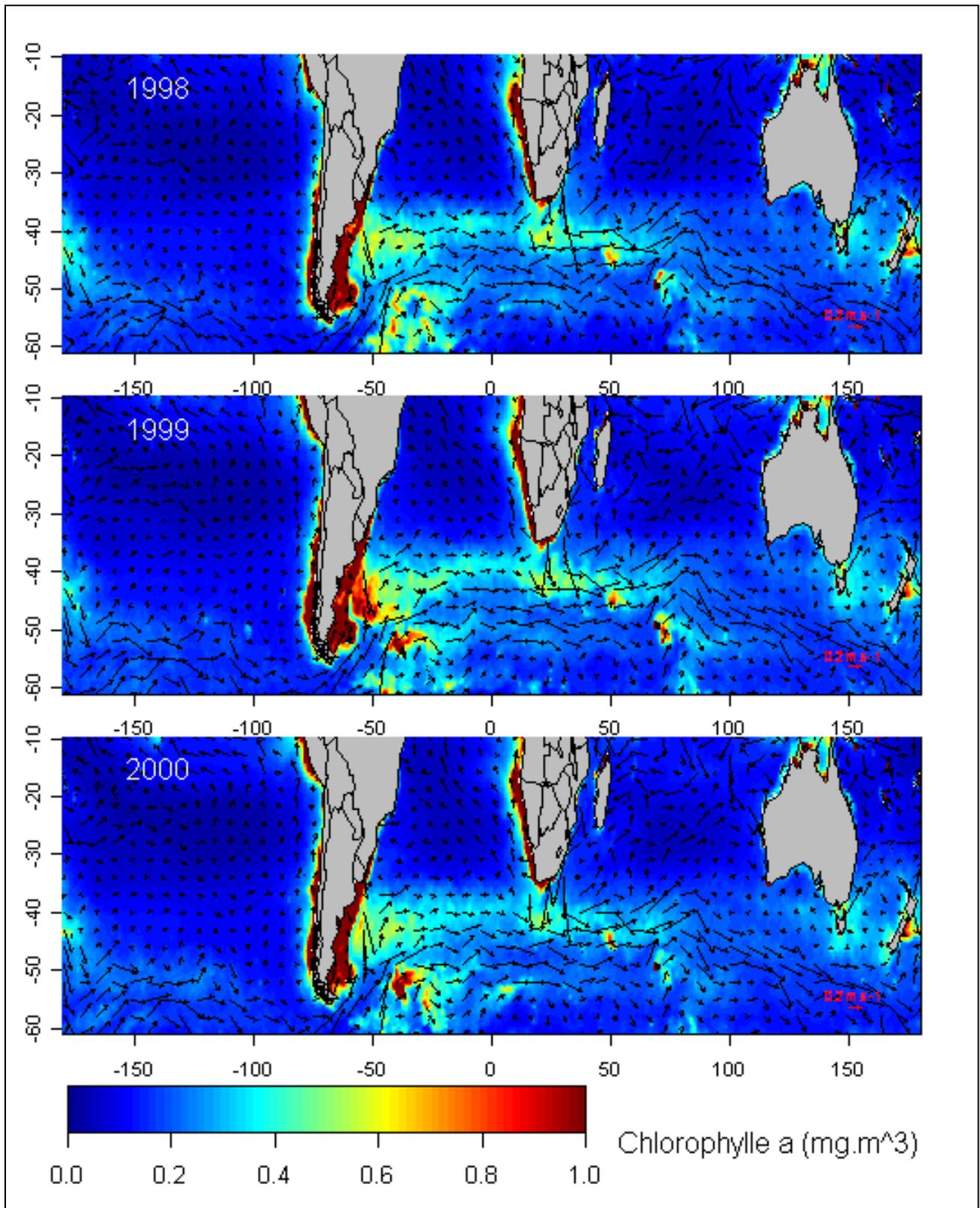


Figure 4.1.2 : moyenne annuelle des concentration en chlorophylle_a de surface (mg.m³) et circulation associée sur la période 1998-2000.

La distribution de production secondaire « forcées » par le modèle de transport d'advection diffusion est présentée à l'échelle globale en analyse climatologique sur la période 1998-2000 (figure 4.1.3) et en terme de variation inter-annuelle dans la figure 4.1.4

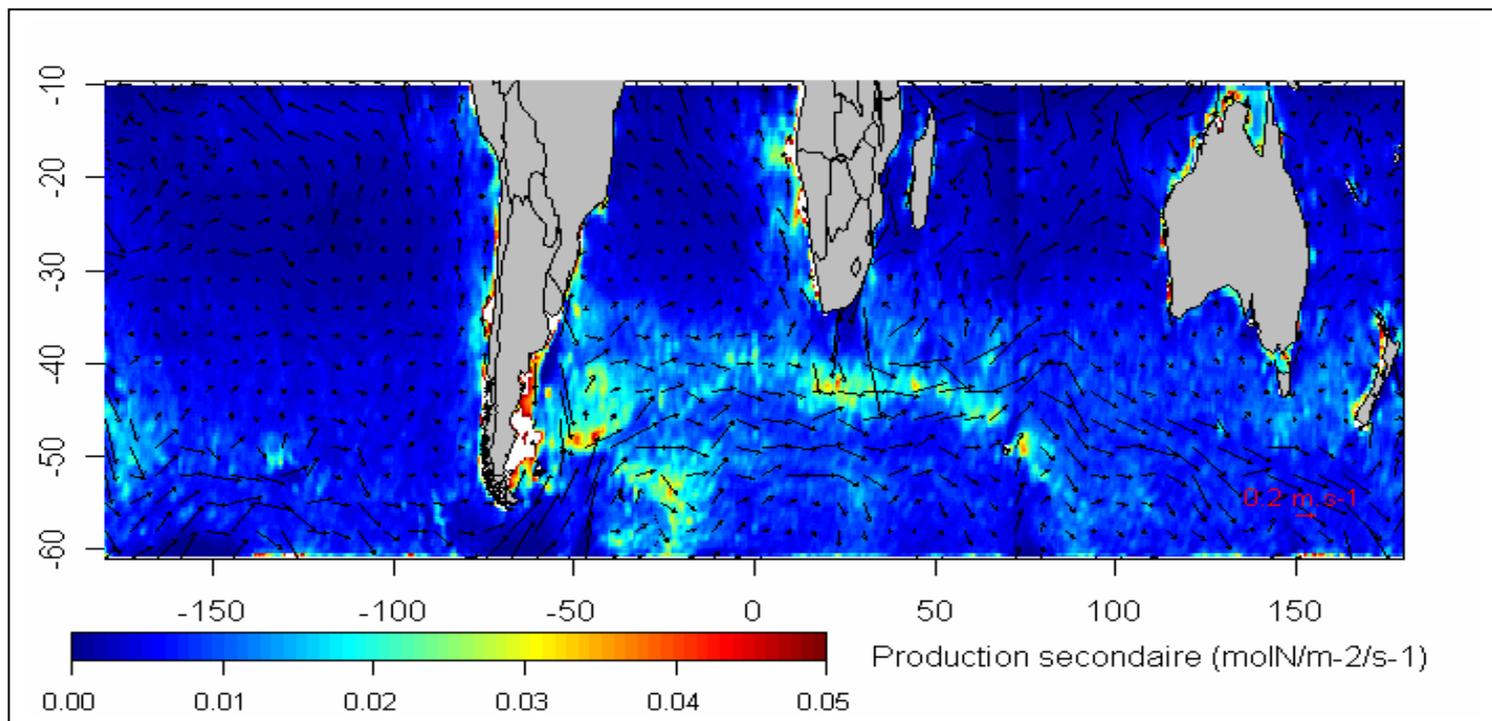


Figure 4.1.3: climatologie de la production secondaire dans l'hémisphère sud sur la période 1998-2000

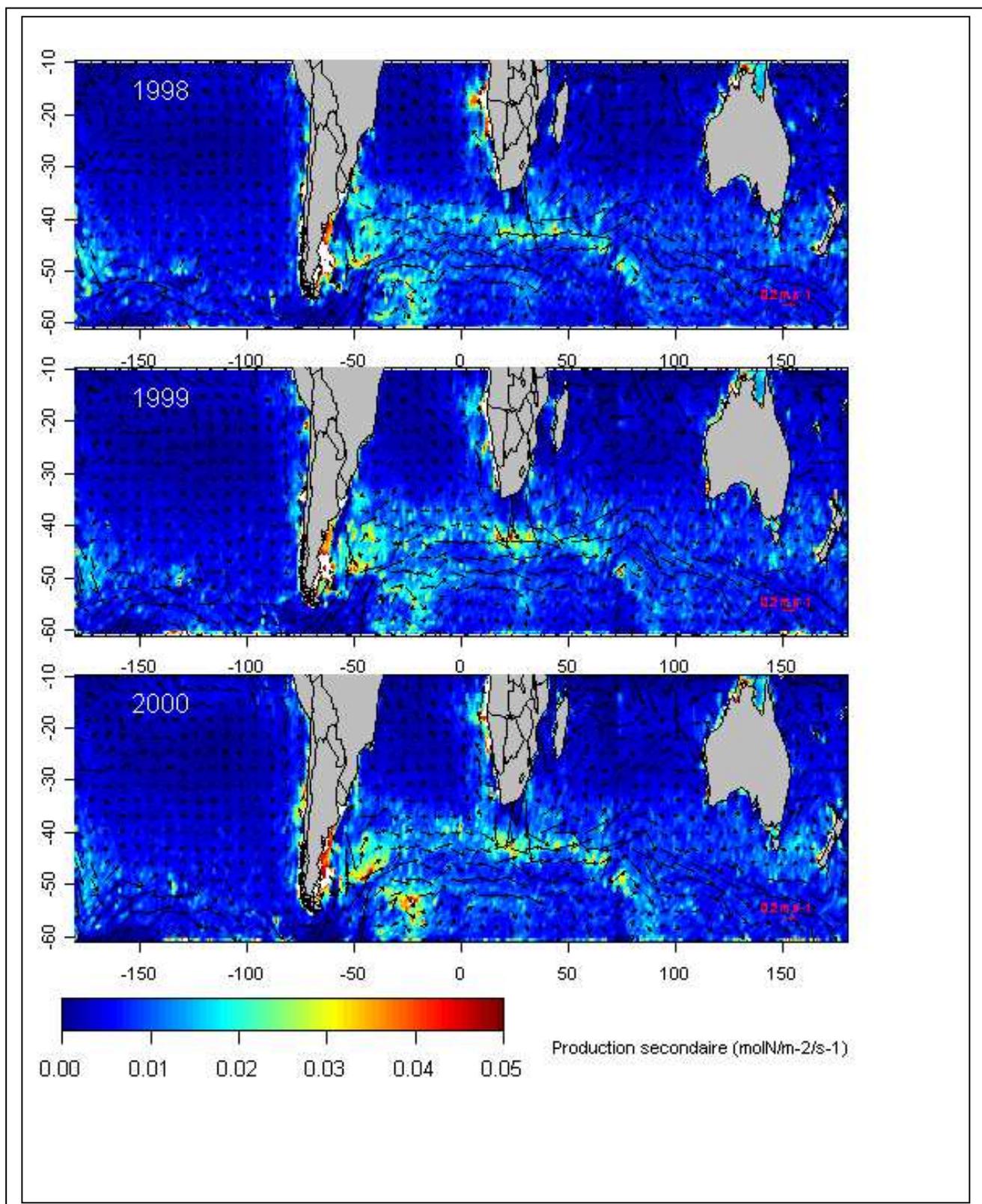


Figure 4.1.4: moyenne annuelle de la production secondaire disponible (molN/m²/s⁻¹) estimée à partir du modèle de transport advection sur la zone 10°S – 60° S et circulation sur la période 1998-2000.

Variation temporelle

L'extraction des moyennes mensuelles montre la dé-corrélation temporelle existante entre niveau de production au cours du temps, au niveau global (haut) et à l'échelle du site de Kerguelen (bas) ce « lag » ne fait que refléter les 5 mois paramétrés dans le modèle et nécessaire au recrutement du zooplancton à partir du phyto-plancton disponible dans l'environnement (Figure 4.1.5). Il est néanmoins intéressant de remarquer les variations importantes de concentration en chlorophylle_a de surface pouvant être observées d'une année sur l'autre à l'échelle de la zone globale ou de la zone atelier de Kerguelen. Ainsi la concentration en chlorophylle à l'échelle globale et de la zone atelier de Kerguelen était respectivement 7.4 % et 19.6 % plus élevée 1999-2000 par rapport à 1998-1999.

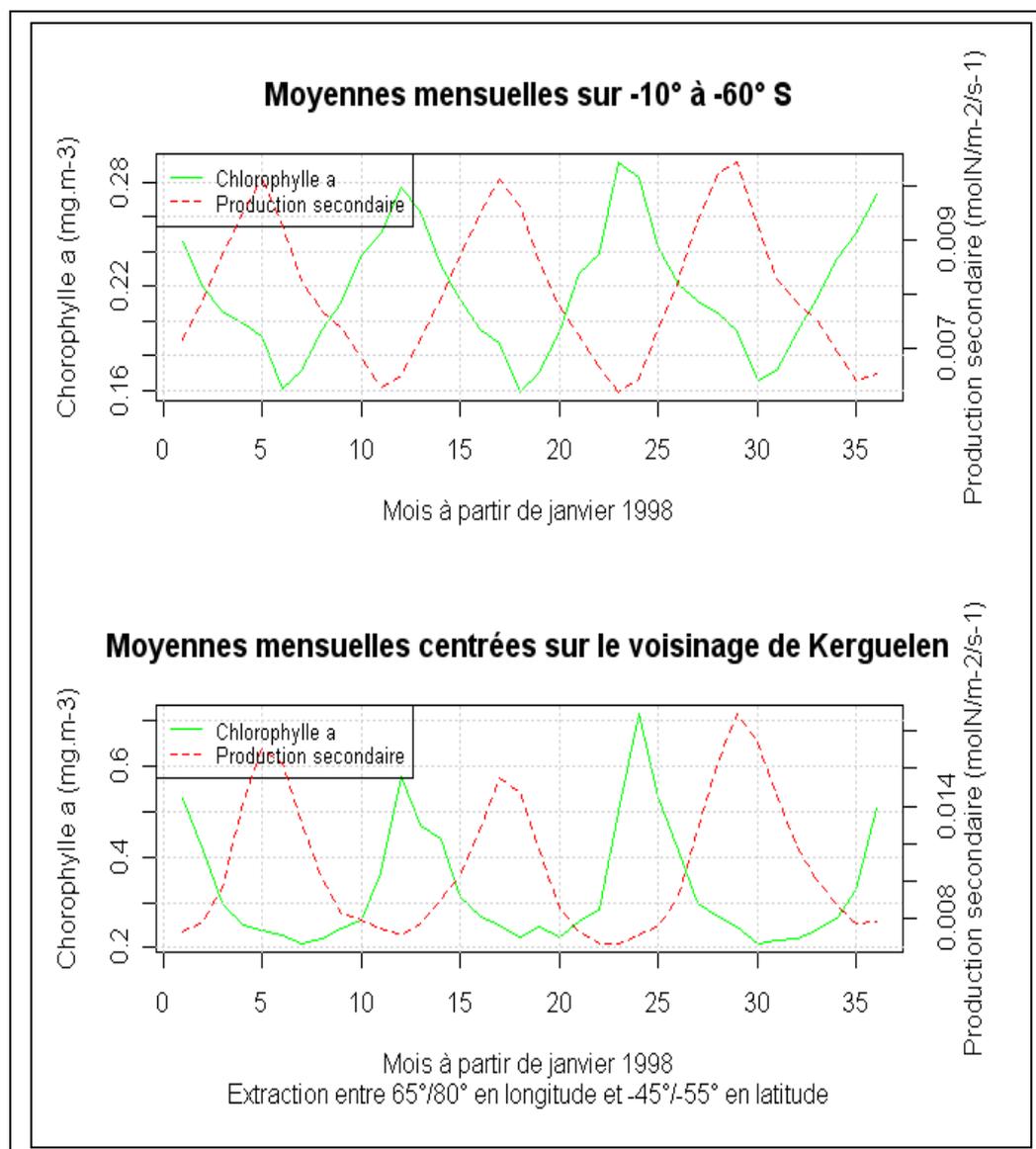


Figure 4.1.5 : variation inter-annuelles de la concentration en chlorophylle_a et en production secondaire estimée à l'échelle globale (10°S-60°S) et de la zone atelier Kerguelen

Relation spatiale entre production primaire et production secondaire estimée

La distribution climatologique de la chlorophylle a et de la production secondaire simulée se concentrent principalement dans un bande comprise entre -35 et -50 degrés de latitude sud. Sur cette bande les médianes des 2 séries regroupées par bande de 5° soit en longitude soit en latitude (figure 4.1.6). Ainsi sur toute la zone l'index de production secondaire est corrélé positivement avec la concentration en chlorophylle a (coefficient de corrélation de Spearman sur les variables log transformées : en longitude $r=0.92$, $S=4452$, $p<0.0001$ et en latitude : $r=0.91$, $S=228$, $p<0.0001$).

L'analyse globale point par point échelle dépendante présentée dans la figure 4.1.7 montre que cette relation reste valable et forte quelque soit les échelles prise en compte

Il apparaît donc que la production secondaire simulée et la concentration en chlorophylle a sont très étroitement inter-reliées et que la composante transport part les courant ne semble modifier que faiblement la distribution de la production secondaire par rapport au zone de production primaire.

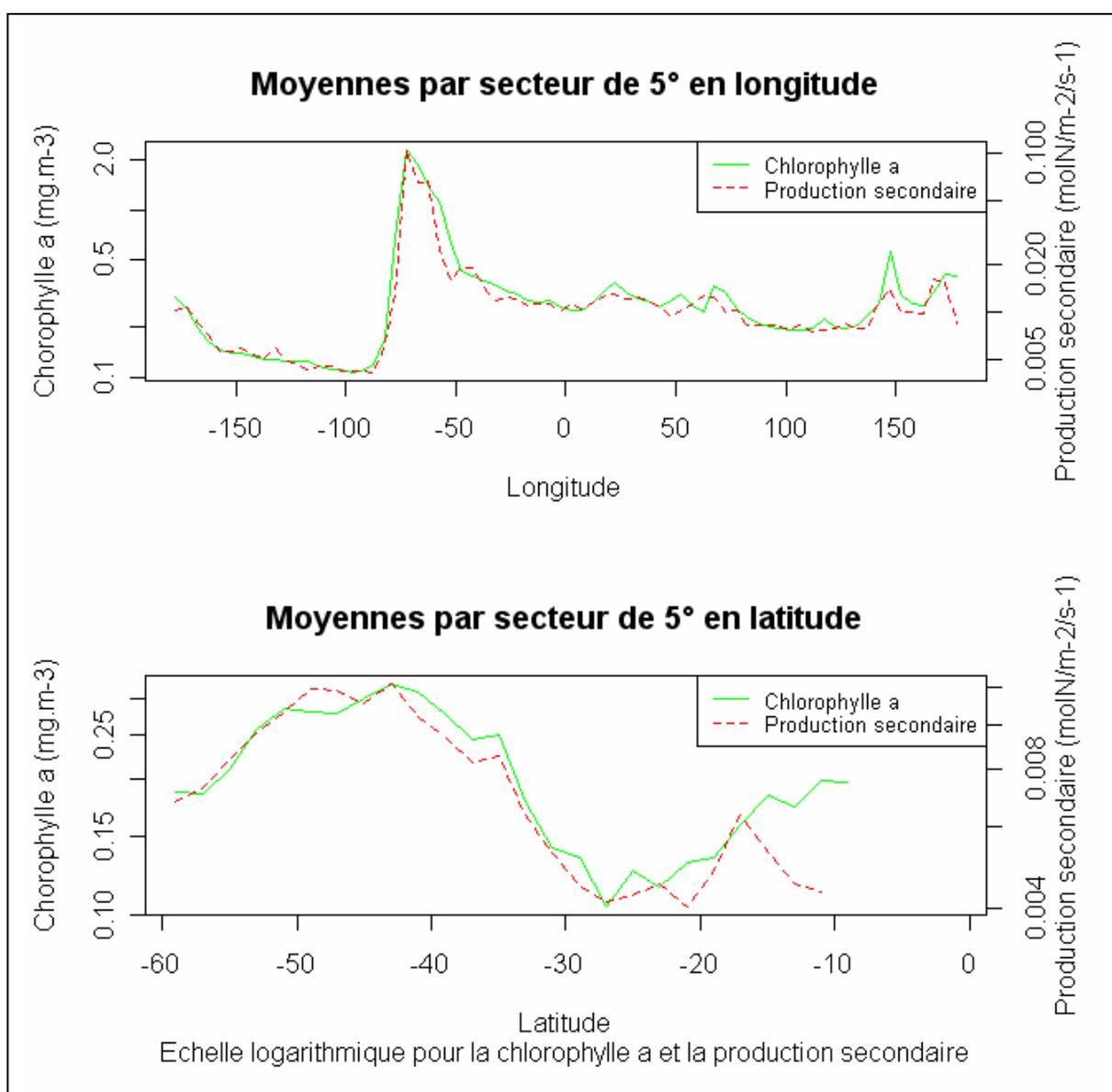


Figure 4.1.6: relation entre la distribution primaire observée et la distribution secondaire simulée en fonction de la longitude (haut) et de la latitude (bas)

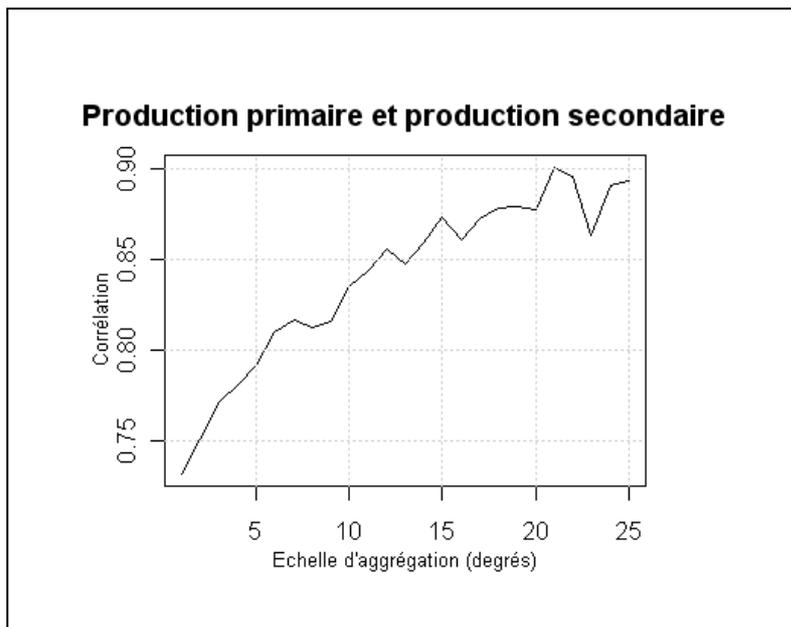


Figure 4.1.7: Coefficient de corrélation de Spearman entre la concentration en chlorophylle a et la production secondaire simulée (log transformée) avec dégradation de la résolution spatiale. Toutes les corrélations sont significatives à un seuil de 0.0001. L'échelle d'aggrégation indique la taille de la fenetre spatiale sur laquelle a été effectuée l'aggrégation (ie 5°: moyenne des valeurs sur une fenetre de 5° x 5°)

Covariogramme entre la concentration en chlorophylle a et la production secondaire simulée

Les précédents résultats montrent que malgré les processus de transports, production primaire et secondaire reste liées localement. En intégrant la structuration spatiale des variables, le variogramme expérimental et le variogramme théorique associé montre qu'il existe 2 échelles structurant les associations entre chlorophylle a et production secondaire (figure 4.1.8. Au-delà de 7000 km les processus ne sont plus liés. En deçà, 2 échelles spatiales structurent la covariance des 2 processus à 1400 km et 4500 km.

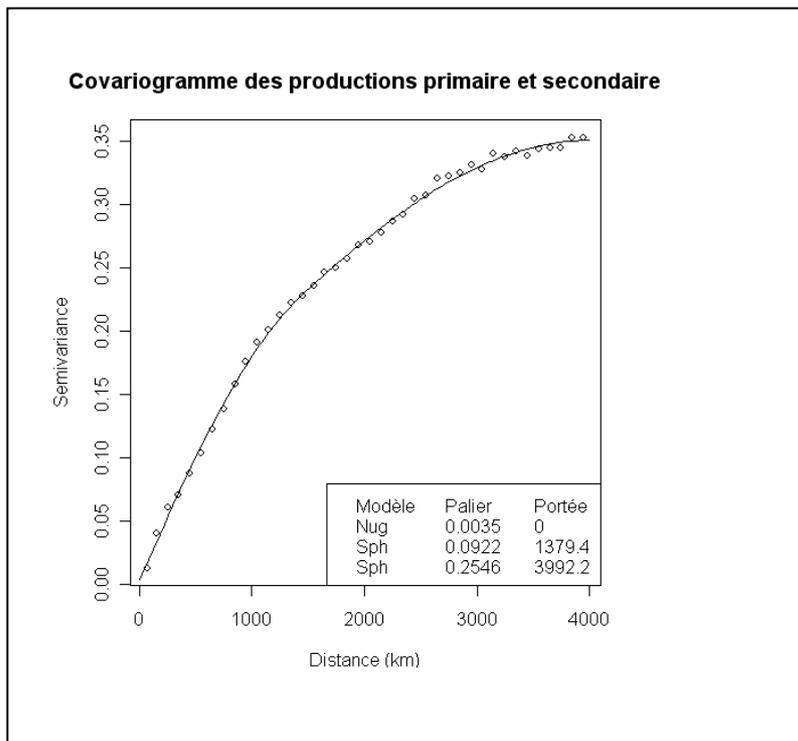


Figure 4.1.8 : covariogramme des productions primaire et secondaire

Axe 2 : Confrontation des séries simulées d'abondance de proies aux paramètres bio-indicateurs de prédateurs marins, situés au sommet des réseaux trophiques.

L'objectif de base était :

-d'établir les bases des relations existantes entre la variabilité de la structure hydrographique de la zone considérée et l'abondance, la biodiversité, la répartition spatio-temporelle, et la dynamique des populations de poissons océaniques, par l'intermédiaire du suivi de leurs prédateurs.

-de comparer les résultats de distribution "bio-indicateurs" avec des champs de paramètres issus d'habitats du zooplancton simulés par les modèles numériques. Il sera ainsi possible de comparer la distribution des proies pélagiques issues des données prédateurs et les distributions simulées des niveaux trophiques sous-jacents, pour différents niveaux de conditions environnementales.

-d'affiner à l'échelle régionale la modélisation de la distribution du zooplancton ("fourrage") et la compréhension de sa dynamique par l'apport d'observations sur la distribution et l'abondance de ses prédateurs.

de mesurer l'évolution des relations entre hydrologie régionale et ressources lors de phénomènes climatiques à moyen terme (5-10 ans, tels que l'ENSO et l'Onde Circumpolaire Antarctique).

A) Relations entre distribution des prédateurs supérieurs et conditions océanographiques

Une étape importante était d'établir les relations entre distribution des prédateurs supérieurs et conditions océanographiques pour les modèles d'étude dont l'étude débutait (éléphant de mer) ou bien dont les analyses étaient en cours (otaries). Ce travail a démontré l'importance de l'échelle spatiale au niveau des relations entre habitats des prédateurs consommateurs de poissons pélagiques (modèles otaries, éléphants de mer et manchots) et caractéristiques océanographiques, physiques et biotiques.

Modèle grands cétacés :

L'essentiel des captures de rorquals bleu (98.9%) et communs (93.5%) était localisé dans la zone saisonnière de glace. Les deux espèces présentaient une distribution circumpolaire hétérogène avec une plus forte abondance dans les secteurs atlantique et indien, et au nord de la mer de Ross (Fig. 4.2.1) deux espèces de baleines étaient globalement plus abondantes dans les secteurs où l'étendue saisonnière de glace est la plus importante. Une exception notable était une forte abondance de rorqual commun à l'ouest de la péninsule antarctique malgré la faible étendue saisonnière de glace. Peu de baleines ont été capturées dans la partie est de du secteur indien de l'océan austral et la plus faible abondance a été observée pour le secteur pacifique (zone Bellingshausen-Amundsen) où l'étendue de glace était la plus faible. Les rorquals bleus et communs présentaient une distribution globalement similaire à l'exception du secteur ouest atlantique où les rorquals communs étaient relativement plus abondants que les rorquals bleus. Cette différence pouvait être le résultats d'un biais car avant que ne débute la chasse baleinière océanique en 1931, les rorquals bleus ont été exploités de façon massive à partir des stations baleinières terrestres et tout particulièrement depuis la Géorgie du Sud. Cette exploitation antérieure à la chasse pélagique pourrait conduire à une sous estimation des effectifs de rorquals bleus historiquement présents dans cette zone.

La concentration de surface de chlorophylle_a en milieu pélagique est particulièrement forte au nord de la mer de Weddell, de la mer de Ross et dans la zone Kerguelen-Heard (Moore et Abbott 2000). Les plus fortes concentration de krill étaient localisées dans la zone atlantique (Atkinson et al., 2004) (figure 4.2.1 & 4.2.2). De fortes biomasses en krill sont aussi observées à l'ouest et dans la zone centrale de la partie indienne. La distribution longitudinale en krill et en chlorophylle_a océanique a été trouvée ($\chi^2 = 8.68$, $p < 0.01$). Cependant, et en accord avec les résultats de Constable et al. (2003) et Atkinson et al. (2004) les densité de Krill apparaissent indépendante de l'étendue saisonnière de glace à l'échelle circum-antarctique ($\chi^2 = 0.01$, $p > 0.05$). Compte tenu de la relation trouvée entre krill et la chlorophylle_a l'effet de ces facteurs sur la distribution passée du rorqual bleu et rorqual commun a été testé dans deux modèles séparés. Il ressort des analyses effectuées qu'aussi bien la distribution du rorqual bleu et du rorqual commun était très fortement reliées à l'étendue saisonnière de glace (χ^2 compris entre 7.4 and 19.2, tous les $p < 0.013$). Par ailleurs aucune relation significative n'a pu être établie entre les concentrations en chlorophylle_a et l'abondance passées des rorquals communs et des rorquals bleus, (tableau 4.2.1). La

relation avec la densité de krill atteignait tout juste le seuil de significativité une fois la correction de Bonferroni appliquée

Species	Explanatory variable(s)	χ^2	df	<i>p</i>	Goodness of fit
Krill	SIZ	0.01	1	0.954	1.200
	SOCC	8.68	1	0.005	
<i>Blue whale</i>	SIZ	11.31	1	< 0.001	1.323
	krill	7.14	1	0.009	
	SIZ	7.40	1	0.006	
	SOCC	1.72	1	0.189	
Fin whale	SIZ	19.22	1	< 0.001	1.209
	krill	6.31	1	0.012	
	SIZ	16.73	1	< 0.001	1.213
	SOCC	4.47	1	0.035	

Tableau 4.2.1. Résultats de l'analyse par Modèle Linéaire Généralisé utilisée pour tester l'influence de l'étendue saisonnière de glace (SIZ), de la concentration en chlorophylle_a en milieu océanique (SOCC) sur l'abondance de Krill, de rorqual commun et rorqual bleu. *p*-values sont pour des analyses de type III et sans présentées sans les corrections de Bonferroni.

La faible relation trouvée entre l'abondance de krill et la présence historique de rorquals bleus et communs pourrait être le résultat d'un biais dans l'estimation disponible des biomasses de krill malgré le fait que les données concernant les baleines et le krill ont été collectées de façon contemporaine. Malgré le développement de nouvelles techniques d'échantillonnage de krill telles que les méthodes hydro-acoustique (Secteur ouest Atlantique pour Hewitt *et al.* 2004; Secteur Est Indien pour Nicol *et al.* 2000), l'évaluation de l'abondance circumpolaire de krill demeure à ce jour encore incertaine.

L'hypothèse alternative pour expliquer la faible relation trouvées entre la biomasse de krill et l'abondance historique de rorquals bleus et communs, pourrait être que ces deux espèces ciblent le krill en fonction de l'habitat de glace de mer, et pas uniquement en fonction de l'abondance absolue de krill. Les baleines sont connues pour suivre le retrait de la bordure de glace où elles trouvent de forte densité de krill. Les essaims de krill associés à cette structure constituent une ressource abondante et spatialement prévisible et par conséquent un habitat de pêche très favorable pour les rorquals (Nemoto 1970). Plus l'étendue saisonnière de glace est importante plus la période et l'étendue du retrait de la banquise vont être importants. Par ailleurs la glace de mer constitue un habitat essentiel pour le recrutement du krill. En effet les algues épontiques (i.e. associées à la face inférieure de la banquise) constituent en période hivernale et début de printemps la principale source de nourriture pour les larves de krill qui représentent le stade de développement le plus vulnérable vis à vis du risque de sous-alimentation. Seule la région de Géorgie du Sud semble constituer une exception à la situation décrite ici, et où les fortes concentrations historiques de rorquals communs et de rorquals bleus sont à mettre en relation avec une concentration du krill par transport advectif (i.e. the "krill conveyor belt" ; Murphy *et al.* 1998).

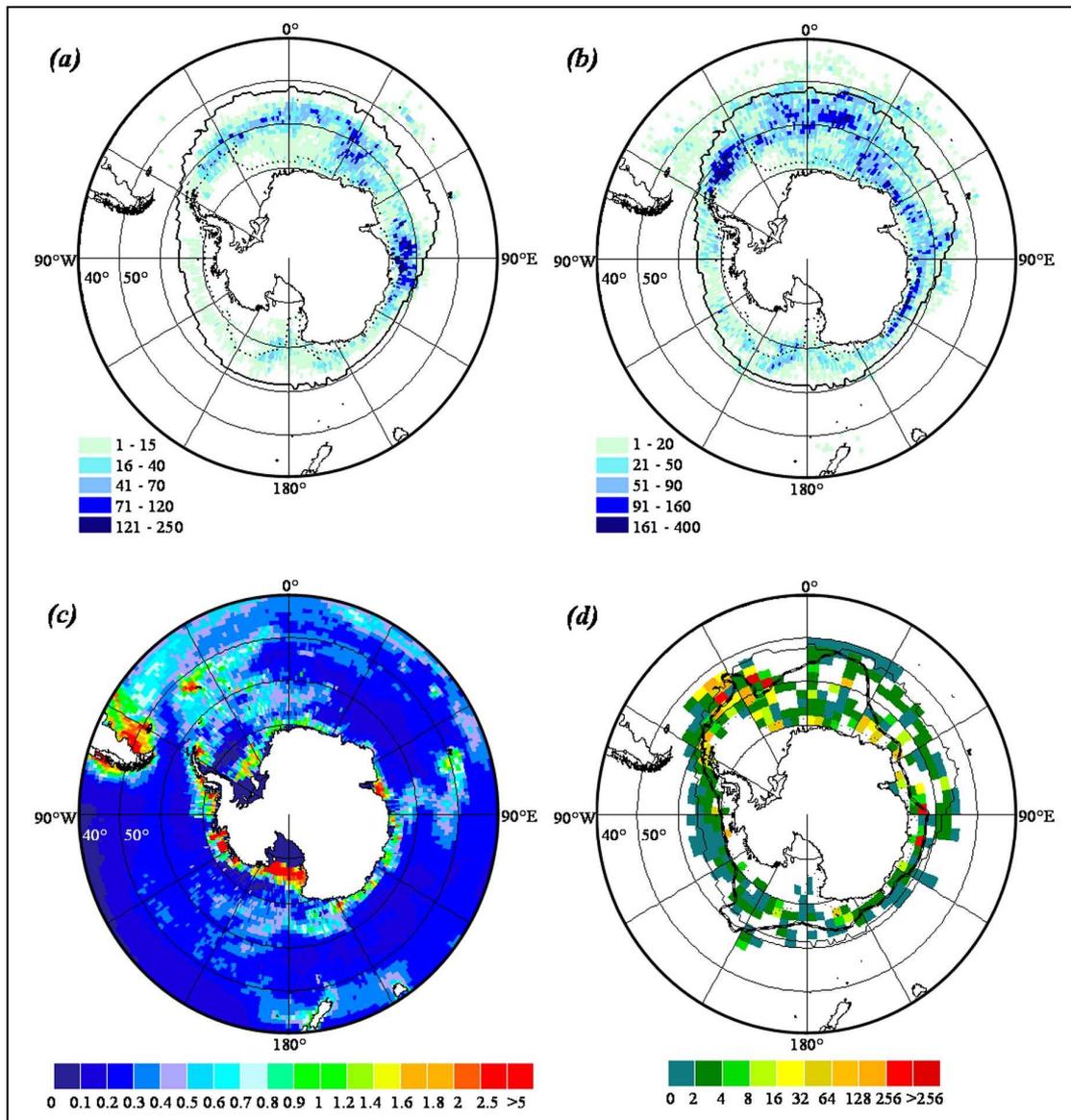


Figure 4.2.1. Distribution des captures pélagique de rorqual bleu (a) rorqual commun (b). la limite nord de l'étendue hivernale de la glace de mer est indiqué par une ligne continue et l'étendue minimale estivale par une ligne en pointillée dans les panneaux (a, b et d). La climatologie de la concentration estivale de chlorophylle est présentée dans le panneau (c) tandis que la concentration de krill (No.krill.m⁻², Atkinson *et al.* 2004) à partir des données historique de pêche est présentée dans le panneau (d). La représentation de la limite sud du courant circum antarctique (from Orsi *et al.* 1995) est indiquée par la ligne noir (trait épais du panneau d).

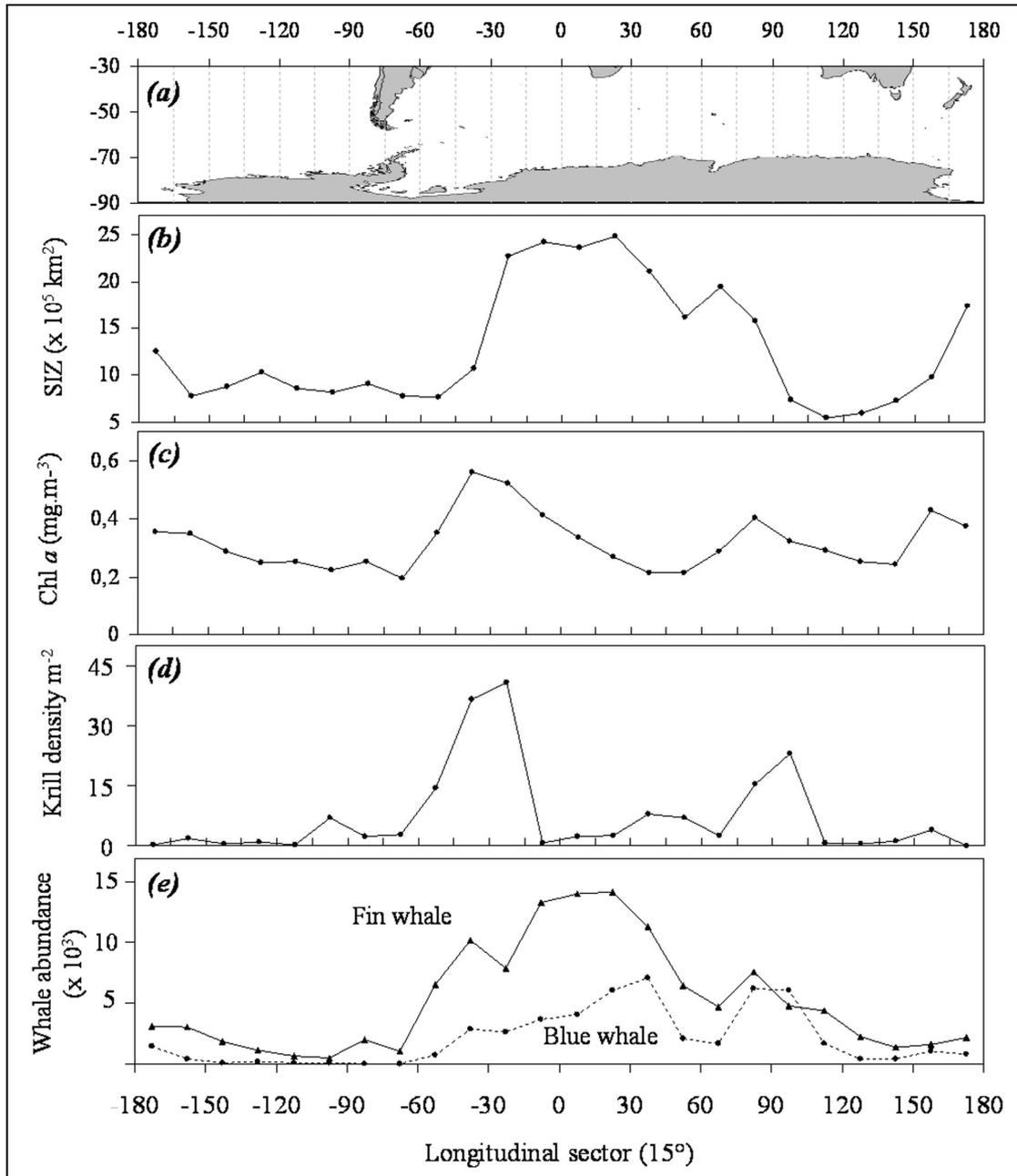


Figure 4.2.2 : zone d'étude (a) étendue saisonnière de glace (b) Concentration en chlorophylle – a océanique (c)Densité de Krill circum-antarctique (d) , et abondance des captures de rorquals communs et rorquals bleus (e) pour les 24 secteurs longitudinaux de 15° .

modèle éléphant de mer : lien avec les conditions hydrologiques à très grande échelle et glace de mer

Les travaux effectués en 2004 et 2005 (Fig. 4.2.3 gauche) ont révélé que la majorité des mâles

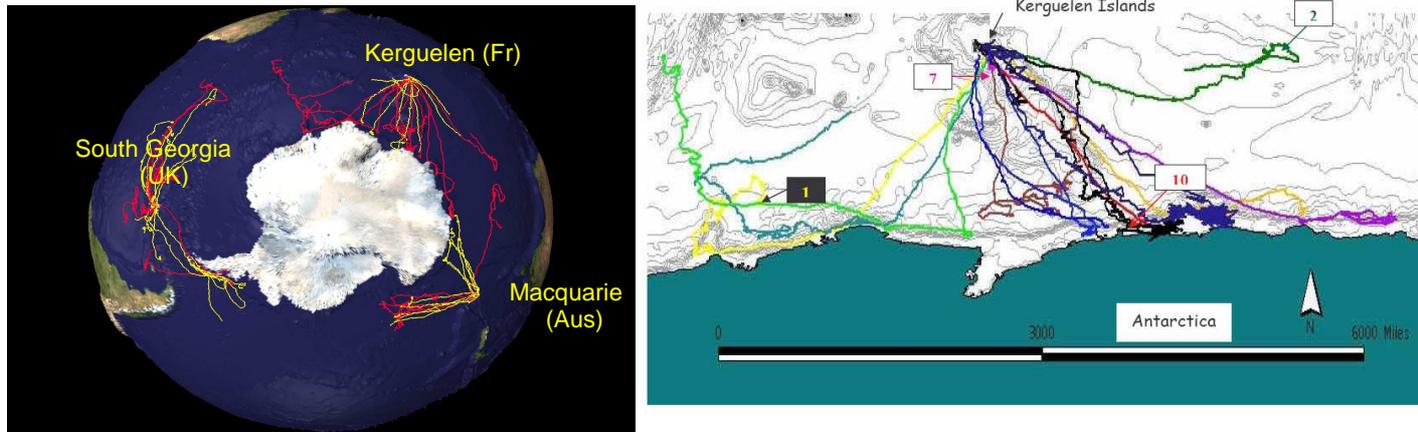


Figure 4.2.3 : (gauche) : voyages alimentaires des animaux suivis par balises argos-CTD dans le cadre du programme *Southern Elephant seals as Oceanographic Samplers* en 2004 (rouge) et en 2005 (jaune) ; (droite) détails des trajets des animaux de Kerguelen (Bailleul *et al.* 2006a).

éléphants de mer (9/10) et des femelles (8/9) de Kerguelen se sont dirigés vers le continent antarctique, mais que des différences inter-sexuelles se manifestaient en fonction des saisons (Bailleul *et al.* 2006 a).

En début d'automne, les mâles et les femelles partent vers la limite du continent antarctique alors que la banquise péri-antarctique présente une extension minimale. Ils effectuent alors des plongées benthiques sur le plateau péri-antarctique.

Les différences inter-sexuelles se sont manifestées lors de la formation de la glace de mer. Les mâles tendaient à se maintenir sur le plateau péri-antarctique dans des concentrations de glace de mer de 80 à 100%, parfois à plus de 600 km de la bordure de glace tandis que les femelles se maintiennent en bordure de banquise et se déplacent vers le nord avec l'extension de la banquise (Fig. 4.2.4, Bailleul *et al.* 2006 a). Les mâles sont néanmoins capables de traverser des zones de plusieurs centaines de kilomètres de banquise, et sont donc capable de trouver les fissures dans la glace de mer afin de pouvoir respirer (et transmettre leur données via Argos).

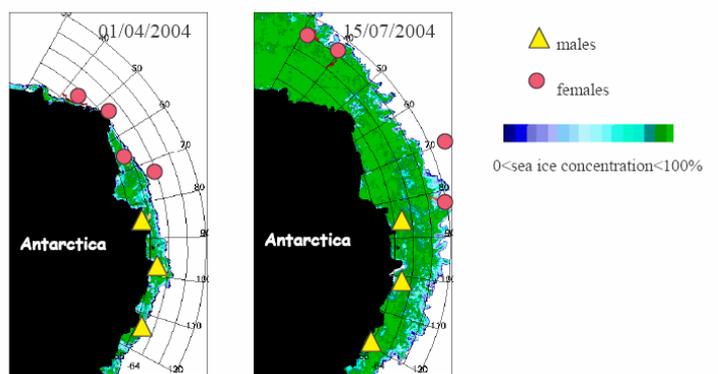


Figure 4.2.4 : Positions des éléphants de mer de Kerguelen à la fin de l'été et en hiver, et concentration de la glace de mer (mesurée par satellite) (Bailleul *et al.* 2006a).

Les variations du succès de la pêche en fonction des conditions océanographiques et des discontinuités environnementales ont été étudiées en détail (Bailleul *et al.* 2006 b). Les zones où les animaux se nourrissaient avec le plus de succès ont été déterminées à fine échelle ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) en combinant des données comportementales (sinuosité du trajet, nombre de plongée par unité de distance) et de changements de conditions physiques (i.e. état d'engraissement qui affecte le comportement de plongée-fig. 4.2.5). Les zones d'alimentation favorables se trouvaient sur le plateau péri-antarctique dans la zone des glaces, où les animaux se plongeaient jusqu'au fond en effectuant des plongées benthiques. Une minorité d'animaux se sont maintenus dans le courant antarctique circumpolaire et se sont nourris préférentiellement dans la zone du Front Polaire.

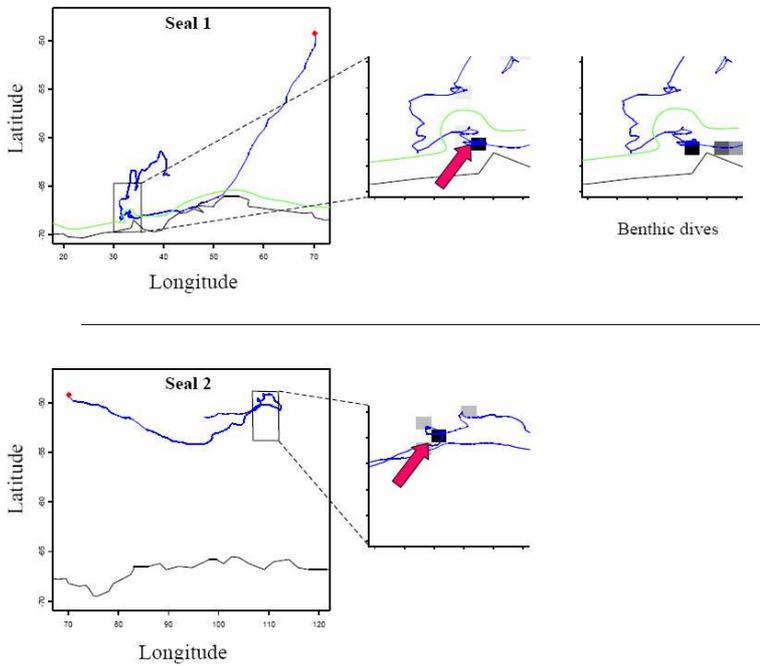


Figure 4.2.5 : Trajets alimentaires de 2 éléphants de mer de Kerguelen suivis par balise argos-CTD. L'animal # 1 a exploré le plateau peri-antarctique tandis que l'animal # 2 a exploité la zone océanique du Front Polaire. Les parties élargies des trajets indiquent les zones de recherche alimentaire les plus intenses et les flèches les zones les plus favorables. Pour le phoque # 2 les carrés indiquent les zones de plongé benthique (Bailleul et al. 2006b).

Grâce aux données de température enregistrées pendant les plongées, les caractéristiques hydrologiques des zones d'alimentation ont été déterminées (Fig. 4.2.5, Bailleul *et al.* 2006 b). Sur le plateau péri-antarctique, les éléphants de mer ciblaient des eaux plus froides que les eaux avoisinantes, tandis au Front Polaire, ils privilégiaient les zones d'anomalie chaude.

Ces données de température (et salinité) collectées par les phoques sont également de grande valeur pour l'étude des processus océanographiques présidant à la circulation du CCA. Ainsi les animaux se dirigeant depuis Kerguelen vers le continent antarctique réalisent des transects hydrologiques verticaux apportant des informations précises sur les masses d'eau traversées (Fig.4.2.6), et, pendant l'hiver, sur l'hydrologie de la zone des glaces. Dans ces régions où les données hydrologiques manquent cruellement, les éléphants de mer s'avèrent ainsi être de précieux auxiliaires océanographiques.

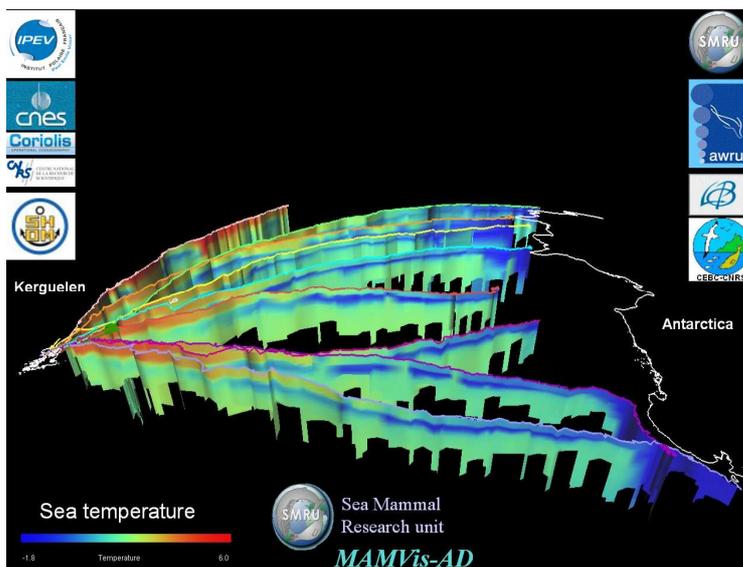


Figure 4.2.6: Section verticale de température obtenues à partir des données de température, profondeur, localisation, collectées entre le 1^{er} et le 31 mars 2004 par dix éléphants de mer équipés à Kerguelen et se dirigeant vers le continent antarctique.

En conclusion, les premiers résultats soulignent et confirment notamment l'importance du facteur physique « extension de la banquise » dans les changements trophiques ayant affectés l'océan Austral lors de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle (De la Mare 1997, *Nature* 389 :57-60). Ces changements pourraient être responsables d'une diminution des ressources disponibles (poissons et céphalopodes pélagiques), peut-être par une moindre abondance des stocks de zooplancton dont ils se nourrissent en partie - ou d'une augmentation de la densité d'éléphants de mer par Km de bordure de banquise - et par effet de densité dépendance, du déclin des effectifs de cette population pour la période correspondante (Guinet et al. 1999, *Ant.Sci* 11,193:197). Nos travaux sur les éléphants de mer et les phoques antarctiques se poursuivront pendant plusieurs années de manière à pouvoir relier variabilité climatique interannuelle, variabilités des paramètres hydrologiques, et performance alimentaire de ces prédateurs.

Modèle Otarie – zone polaire frontale –poissons myctophidés :

Nous avons effectué une analyse des variations de la distribution en mer, du comportement de plongée, de l'efficacité de la pêche des femelles *a. gazella* et les variations des performances de croissance de leur nouveau né entre 1998 et 2000 et qui illustre que cette espèce répond au variation inter-annuelle d'abondance et de distribution de la production primaire (Lea et al. 2005)

B1) Analyse rétrospective à l'échelle du siècle Glace de mer grand cétacés

Contexte

La glace de mer est le témoin des changements climatiques et ses variations au niveau des pôles influencent en retour la circulation océanique et atmosphérique et les écosystèmes marins. Les satellites permettent de suivre les fluctuations de l'étendue de la banquise tout autour de l'Antarctique depuis le début des années 1970 (Comiso 2003) mais peu de données existent en revanche pour la première moitié du 20^{ème} siècle. Plusieurs proxy de l'étendue de la glace de mer ont ainsi été mis en œuvre comme les mesures de concentration de gaz contenus dans les carottes de glaces (Curran et al., 2003). Une méthode originale, proposée par de la Mare en 1997, consiste à utiliser les positions de captures baleinières les plus méridionales comme indicateur de la position de la bordure de glace. En effet la glace est un élément crucial du cycle de vie du krill (Loeb et al., 1997) que l'on retrouve en fortes densités le long de la bordure de glace (Brierley et al., 2002). Ces agrégations de krill attirent ainsi les rorquals qui viennent s'en nourrir abondamment le long de la glace pendant l'été austral (Hjort et al., 1933; Shimadzu and Katabami 1984). Ce lien trophique est à l'origine de la chasse massive dont ont fait l'objet les rorquals par les bateaux-usines qui ont alors permis une chasse tout autour de l'Antarctique et particulièrement en bordure de glace, n'étant plus inféodés aux stations baleinières. Cette approche a permis de mettre en évidence un fort retrait de l'étendue de la glace de mer en Antarctique depuis les années 1950. Cependant aucune analyse, y compris l'analyse des captures baleinières de de la Mare (1997), n'a encore permis de savoir si cette diminution de la glace de mer était un phénomène global et homogène sur le pourtour de l'Antarctique, ou si le retrait de la glace était hétérogène, avec des variations marquées entre différentes régions de l'Antarctique. Nous proposons donc de reprendre l'approche de la Mare et d'utiliser cette base de données unique afin de démontrer si les variations de l'étendue de la glace de mer est un phénomène circumpolaire homogène ou alors s'il existe des variations inter-régionales.

Afin de tester l'efficacité de la méthode de reconstitution de l'étendue de la glace par les données de captures baleinières, on a directement comparé les captures les plus méridionales de petits rorquals après 1972 aux positions de la bordure de glace dérivée des satellites correspondant dans le temps (mois) et dans l'espace (secteur de 10° de longitude) à ces captures (Fig. 4.2.7). Cette validation révèle ainsi une très forte relation entre les positions des captures et la bordure de glace à 80% mesurée par les satellites ($r^2 = 0.81$, $p < 0.001$, $n = 352$). Cependant cette relation nous montre que la bordure de glace définie par les captures se trouve en moyenne 1.4° ($\pm 1.2^\circ$) au nord de la bordure de glace localisée par les satellites. L'existence de ce biais est à l'origine des critiques dont a fait l'objet cette méthode (Ackley et al., 2003), et nous prendrons donc en compte cette distance lors des calculs de comparaison entre la bordure de glace dérivée des captures et celle dérivée des satellites. Cette valeur est de plus très similaire à la distance qui existe entre la bordure de glace dérivée des mesures à partir des navires et celle dérivée des satellites (Worby and Comiso, 2004).

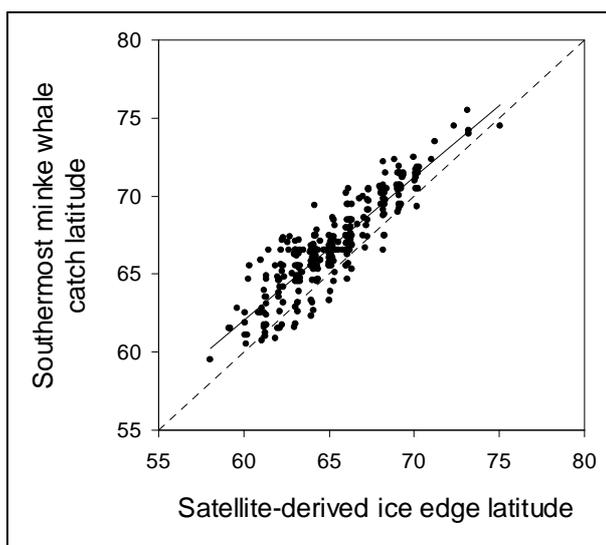


Figure 4.2.7: Relation entre les positions de captures les plus méridionales de petits rorquals de 1972 à 1987 et les mesures contemporaines de bordure de glace par les satellites pour les secteurs correspondants. La ligne pointillée indique la correspondance exacte entre les 2 mesures. Une distance moyenne de 1,4° sépare la droite de régression ($y=0,919x + 6,833$, $r^2=0,81$, $p<0,001$, $n=352$, écart-typé de la pente: 0,024) de cette droite théorique.

En utilisant cette distance captures de petit rorqual – satellite, qui est la même que navires – satellites, et en ajoutant la distance de 0,6° estimée par de la Mare (1997) entre la position moyenne des captures les plus méridionales de rorquals bleus et communs avant 1960 et la bordure de glace par les navires de l'époque (Mackintosh, 1940, dans *Discovery reports*), on peut ainsi comparer la bordure de glace dérivée des captures avant 1960 à celle dérivée des satellites après 1972. Cette distance supplémentaire de 0,6° s'explique par le fait que le petit rorqual se retrouve d'avantage dans la zone marginale de glace que les plus grands rorquals. En prenant comme référence les données satellites depuis 1972, la distance calculée précédemment de 2° doit être retirée aux positions des captures de rorquals avant 1960 pour recréer la bordure de glace telle que l'auraient mesuré les satellites s'ils avaient existé à cette époque. De la même façon, la distance de 1,4° doit être retirée aux positions des captures de petit rorqual.

Ces distance prises en compte, il est alors possible d'estimer l'étendue de glace moyenne pour chaque mois et pour chaque période, c'est à dire avant 1960 par les captures de rorquals bleu et commun et après 1972 par les captures de petit rorqual et les mesures des satellites (Fig. 4.2.8).

En raison d'une forte variabilité inter-annuelle de l'étendue de la glace, nous considérons comme significativement différente les étendues de glace dans les secteurs où les écarts-typés ne se chevauchent pas, à la fois entre la bordure de glace dérivée des captures mais aussi avec celle des satellites (voir Fig. 4.2.8). L'étendue de glace en Novembre (a) et Décembre (b) avant 1960 n'est ainsi pas significativement différente de celle depuis 1972. En revanche un net retrait de la glace s'est produit pour les mois de Janvier et Février dans la mer de Weddell entre 1960 et 1972. En Janvier, l'étendue de la glace a diminué de 6,8° en moyenne sur une zone comprise entre 30°W et 20°E (c). Le léger changement observé dans le secteur Bellingshausen-Amundsean (entre 140° et 90°W) reste relativement incertain en raison d'un faible nombre de captures réalisées dans cette région. L'étendue de la glace est à son minimum pendant Février, mais une diminution moyenne de 6° est également détectée dans la zone comprise entre 40°W et 10°W (Fig. d).

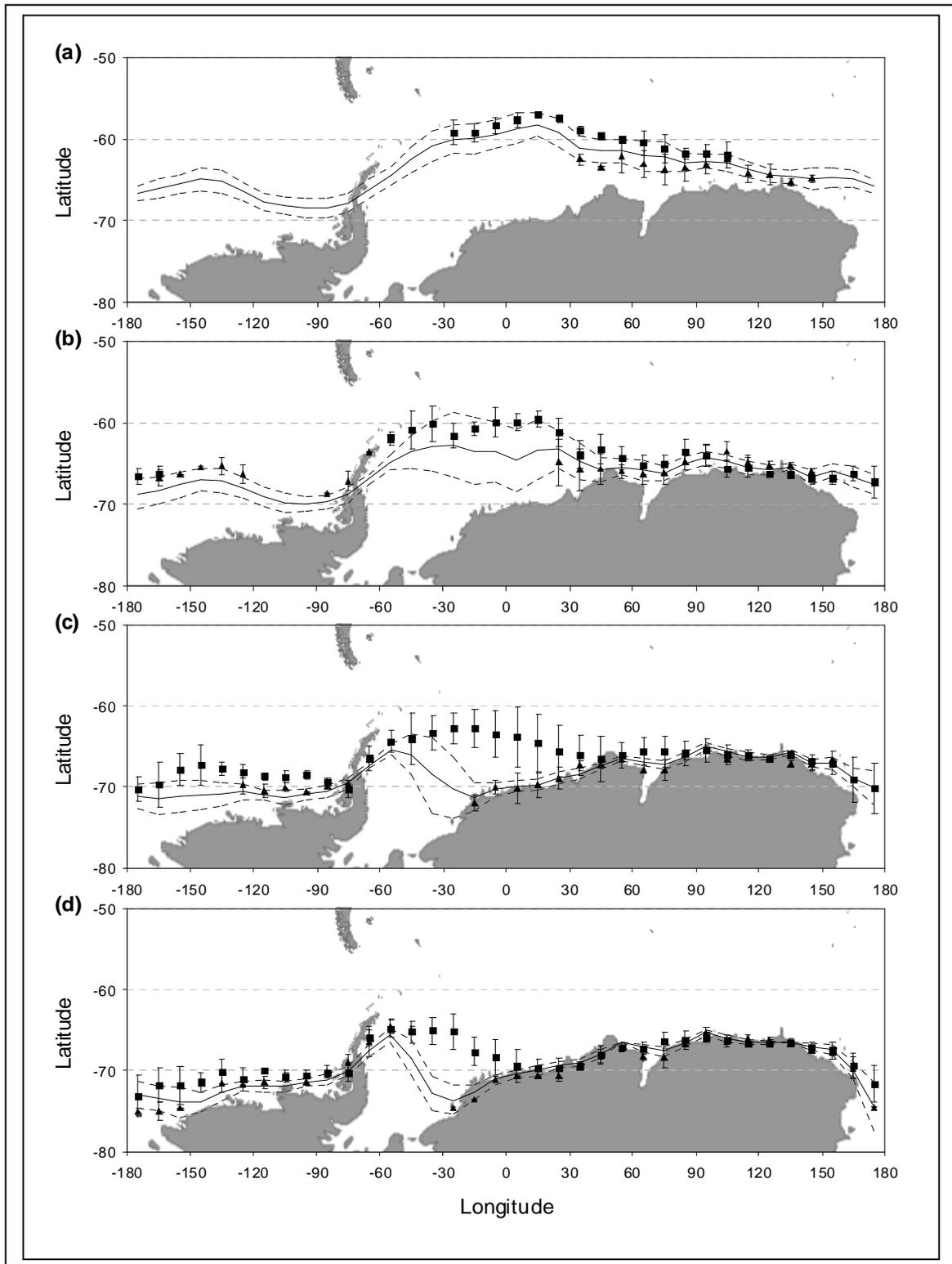


Fig. 4.2.8: Etendue de la glace de mer en Antarctique en (a) Novembre, (b) Décembre, (c) Janvier et (d) Février. Les carrés correspondent à la bordure de glace dérivée de la position des captures de rorquals bleus et communs avant 1960, une fois soustraite la distance de 2° ; les triangles correspondent à la bordure de glace dérivée de la position des captures de petits rorquals après 1972, une fois soustraite la distance de $1,4^\circ$. Les barres indiquent l'écart-type. La ligne continue représente la bordure de glace dérivée des satellites pour une concentration de glace de 80%, et les lignes pointillées indiquent l'écart-type.

Discussion

Même si cette méthode ne permet pas de mesurer les changements fins de l'étendue de la glace de mer (résultats non présentés dans ce rapport), elle reste néanmoins la seule approche autorisant une analyse des variations inter-régionales sur le pourtour de l'Antarctique avant la période des satellites. La conclusion principale de ce travail est donc le rejet de l'hypothèse d'une réduction homogène de la glace Antarctique. Le changement majeur de l'étendue de la glace mesurée par la méthode des captures baleinières est cohérent avec des résultats montrant un changement des conditions environnementales en mer de Weddell, comme la diminution de la durée d'englacement (Murphy et al., 1995), un réchauffement des eaux profondes particulièrement marqué dans cette zone (Robertson et al., 2002), et un réchauffement de la glace en surface depuis les années 1950 (Comiso 2000). Ces changements environnementaux peuvent avoir un impact important sur l'écosystème de la mer de Weddell qui contribue à la moitié de la production primaire associée à la glace de mer en Antarctique (Arrigo et al., 1997), et qui abrite également la majorité de la population de krill. Cette espèce majeure du réseau trophique marin Antarctique a vu sa population diminuer de moitié depuis les années 1970 dans ce secteur (Atkinson et al., 2004) et le retrait important de la glace que nous avons mis en évidence est cohérent dans l'espace et dans le temps avec la diminution des stocks de krill.

B2) analyse rétrospective des séries temporelles de distribution spatiale des prédateurs marins

1) à moyen terme (15 ans) : série des déplacements en mer des manchots royaux de Crozet et anomalies de températures de surface.

La série provient de déploiement d'appareils posés sur les manchots royaux de Crozet de Décembre 1991 à Février 2006, constituant ainsi la série à long-terme de suivie en mer d'oiseaux marins la plus importante à notre connaissance. Nos travaux avaient montré que **les manchots royaux se dirigent essentiellement vers une structures frontale à grande distance, le front polaire, présentant une disponibilité temporelle des ressources prévisibles (Bost et al 1997, Guinet et al. 1997)**. Sur le plan trophique, ces zones constituent des "barrières" biogéographiques, où les processus physiques favorisent la concentration des proies. D'autre part, elle présentent une disponibilité des ressources pélagiques plus élevée par rapport à la zone océanique environnante (Pahkomov et al 1994).

Dans ce travail, les anomalies de température (aSST) à l'année i et au mois m ont été calculées pour la zone comprise entre 50 et 54°E de longitude et entre 49 et 52° S de latitude, correspondant à la zone principale d'alimentation des manchots, selon la formule: $aSST_{i,m} = T_{i,m} / \Sigma T_m$

où T est la température moyenne dans la zone. La position du Front Polaire est calculée par la latitude moyenne de sa limite Nord, correspondant à l'isotherme de surface de 5°C, entre 50 et 54°E. Par la même méthode que les aSST, les anomalies de position du FP ont été estimées. Toujours en prenant comme référence la longitude de Crozet nous avons calculé la différence d'aSST moyenne de part et d'autre de cette longitude sur la zone comprise entre 48 et 56°E de longitude et entre 46 et 52° S de latitude, correspondant à la zone principale de prospection et d'alimentation des manchots.

Cette série comptabilise 113 suivis de trajets en mer parmi lesquels nous avons retiré les données issues des suivis d'animaux en échec de reproduction (16), et les trajets particuliers vers le front sub-antarctique (trajet nord-est) au nombre de 8. Nous nous sommes ainsi consacrés aux trajets « classiques » des manchots royaux de Crozet vers le front polaire, avec une direction majoritairement sud. La valeur prise en compte pour chaque trajet sera la latitude la plus méridionale atteinte par l'animal. Les stades d'incubation de l'œuf et d'élevage du poussin ont été analysés séparément. En prenant comme référence la longitude de l'archipel de Crozet et en calculant l'angle formé avec le segment entre Crozet et la localisation la plus méridionale du trajet du manchot, on estime l'orientation générale prise par l'animal.

Afin d'évaluer les impacts des fluctuations environnementales sur la population de manchots de Crozet, nous avons utilisé la série à long terme de taille de population reproductrice de l'île de la Possession (Delord et al., 2004). Pour analyser la tendance globale de la population, nous avons combiné les comptages avec les années manquantes des 2 colonies en utilisant un modèle de régression log-linéaire avec une erreur de type Poisson à l'aide du programme Trends and Indices for Monitoring Data (TRIM) (Pannekoek and van Strien, 1996).

Depuis les premiers déploiements de balises Argos sur les manchots de Crozet (décembre 1991) les données satellite révèlent une année anormalement chaude. Cette année 1997, où la SST est de 2°C supérieur à la normale, indique que nous sommes alors en présence d'un événement ENSO. Comparativement à la zone Pacifique, où sont habituellement répertoriés se type d'anomalie climatique (en prenant comme référence la zone NINO3, correspondant à la zone inter-tropicale de la partie ouest du Pacifique), l'ENSO enregistré à Crozet a eu lieu environ 1 an avant. Cette mesure est en accord avec les températures enregistrées à Kerguelen (Y.H. Park, communication personnel-figure 4.2.9).

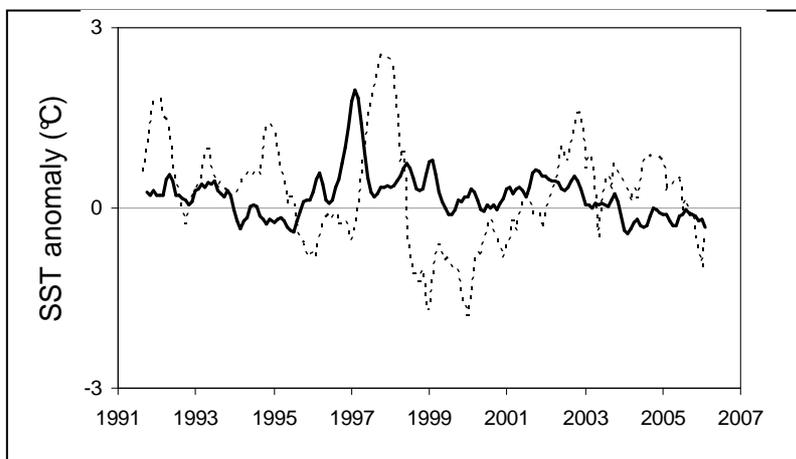


Fig. 4.2.9: Anomalies de température de surface (moyenne mobile effectuée sur 3 mois) dans la zone de Crozet (trait continu) et dans NINO3, dans le Pacifique (trait pointillé).

La position du FP et ses variations latitudinales d'une année à l'autre sont fortement reliées aux conditions de températures. La Figure 2 montre ainsi une position du FP particulièrement éloignée de Crozet pendant l'ENSO. Le FP était à 590km de Crozet en Janvier 1997 alors que la distance moyenne du FP en Janvier est de 270km, soit une distance multipliée par plus de deux. Les positions du FP « anormalement proches » de Crozet (représentées par les anomalies positives de la position du FP dans la Fig. 4.2.10) correspondrait à des conditions environnementales plus avantageuses pour les manchots qui pouvaient alors trouver une zone d'alimentation plus proche avec une dépense énergétique plus faible due à un trajet plus court.

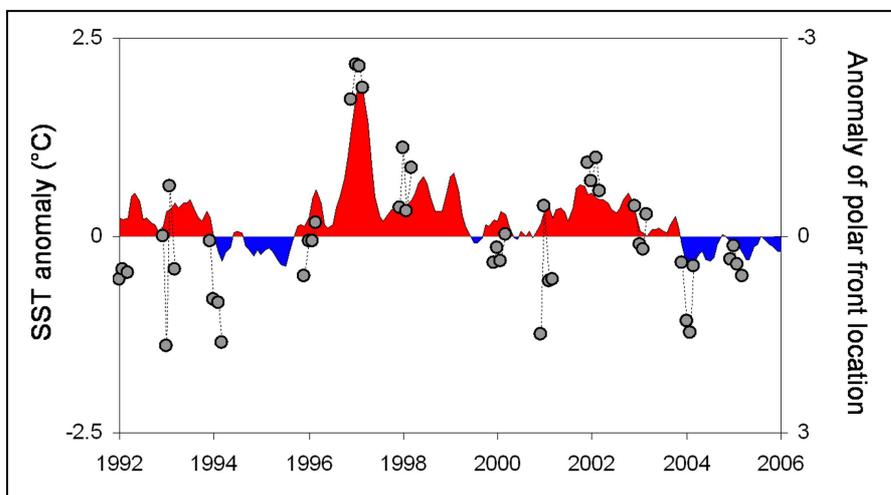


Fig. 4.2.10: Anomalies de température de surface dans la zone de Crozet et Anomalies de position du front polaire.

Les analyses portant sur la latitude la plus méridionale atteinte lors des trajets en mer des manchots et la position du FP révèlent une forte relation positive (Corrélation par rang de Spearman: $r = 0,63$, $p < 0,005$, $n = 20$ pour les manchots au stade d'incubation ; $r = 0,51$, $p < 0,05$, $n = 13$ pour les manchots au stade d'élevage) indiquant ainsi que plus le FP s'éloigne de Crozet, plus les manchots doivent aller loin pour s'alimenter. La Figure 4.2.11 indique que la position la plus méridionale atteinte par les manchots se situe à la limite du FP ou légèrement plus au sud, à l'intérieur même du FP (voir aussi la Fig. 4.2.12 pour un exemple de trajets Argos). Les positions de manchots localisées au nord du FP correspondent à des zones de fort gradient de SST révélant ainsi une zone frontale provenant probablement d'un méandre du FP, mais dont la signature thermique en surface est légèrement supérieure à 5°C (résultats non-montrés dans ce rapport).

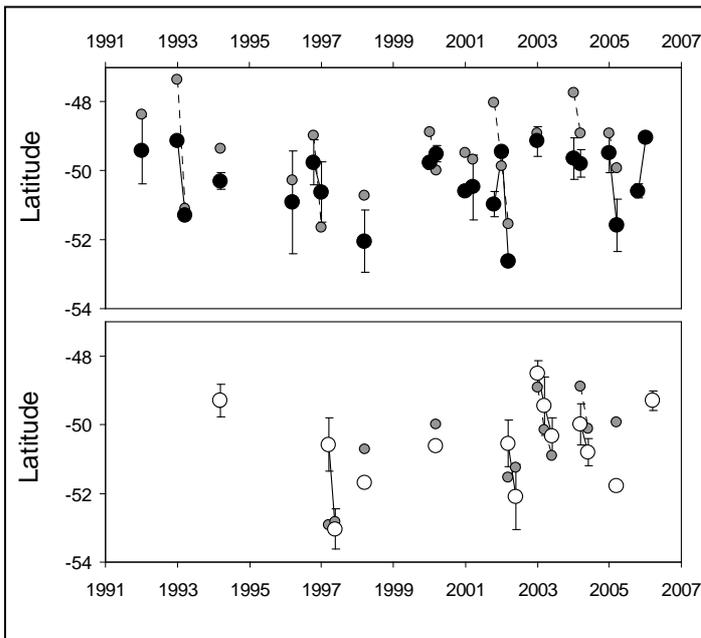


Figure 4.2.11: Position du front polaire (cercle gris) et latitude moyenne la plus méridionale atteinte par les manchots au stade d'incubation (cercle noir, panneau du haut) et en élevage (cercle blanc, panneau du bas). Les barres indiquent l'écart-type.

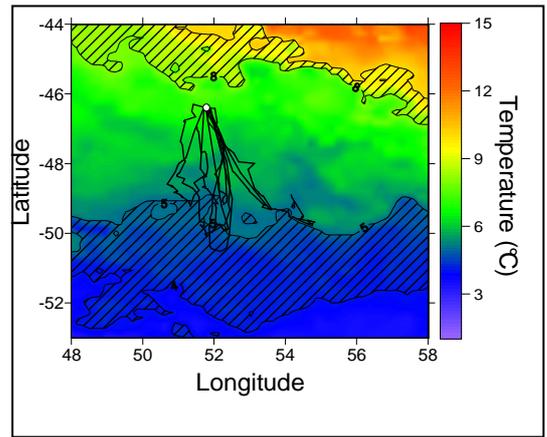


Figure 4.2.12: Suivi Argos de 7 trajets de manchots en février 1994 superposé à la carte de température de surface. Les fronts polaires (4-5°C) et subantarctique (8-11°C) sont représentés en hachuré.

Parallèlement aux ajustements de la distance des trajets des manchots par rapport à la position du FP, l'orientation de ces mêmes trajets ont montré une évolution progressive de 1992 à 2006. En effet la figure 4.2.13 montre clairement une réorientation progressive des trajets d'est en ouest, avec une période centrale dans la série, débutant par l'année durant laquelle s'est produit l'ENSO, où aucune direction préférentielle n'est prise par les animaux relativement à la longitude de Crozet. Simultanément à ce changement d'orientation s'est également produit un changement de distribution des conditions de SST avec des températures plus froides à l'est qu'à l'ouest à la période où les manchots se dirigent vers l'est, et inversement, des températures plus froides à l'ouest à la période où les manchots se dirigent vers l'ouest. Les analyses statistiques ressortent ainsi une forte corrélation entre la direction prise par les manchots jusqu'à leur zone d'alimentation, et la distribution des masses d'eau environnantes ($r = 0,79, p < 0,005, n = 13$).

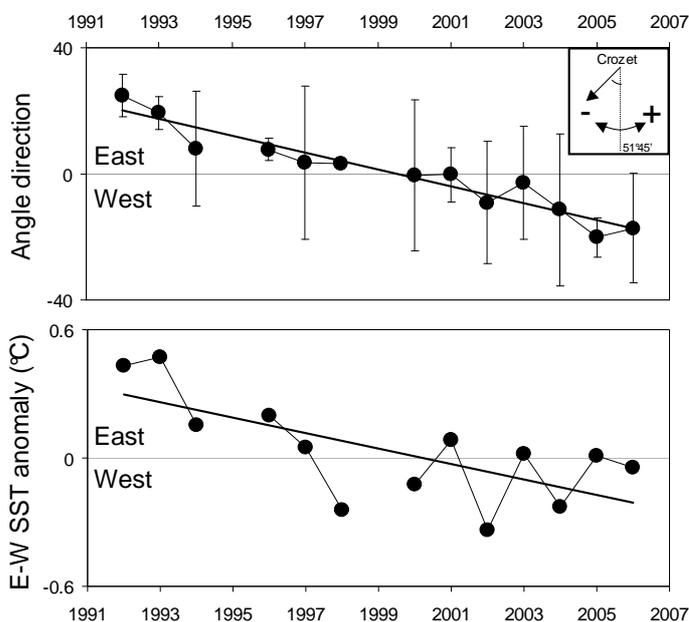


Fig. 4.2.13: Orientation moyenne des manchots (panneau du haut ; les barres indiquent l'écart-type) et différence entre les anomalies moyennes de température de surface à l'est et à l'ouest de la longitude de Crozet

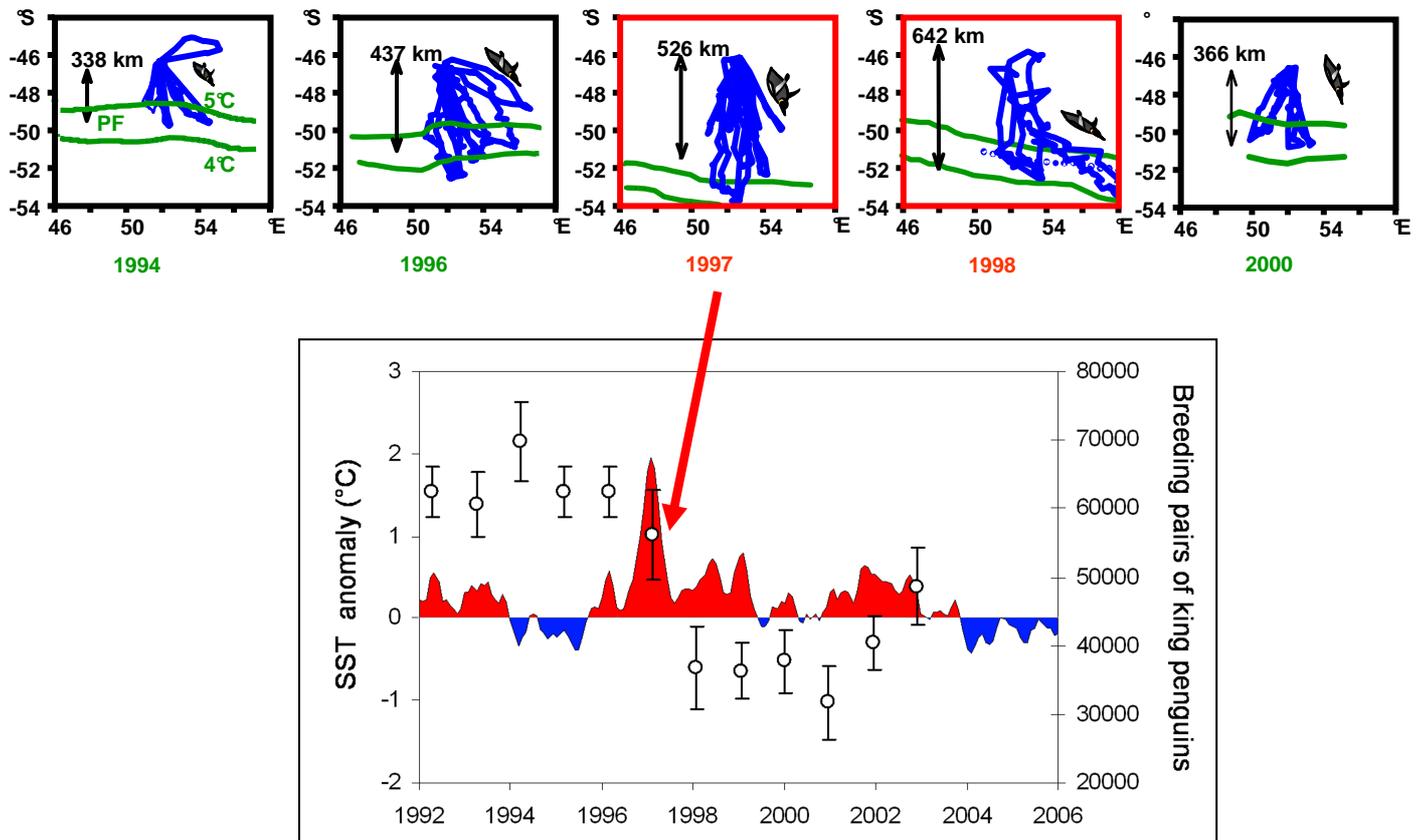


Figure 4.2.14: Anomalies de température de surface et population reproductrice de Crozet estimée à partir des 2 plus importantes colonies de l'île de la Possession par le programme TRIM. Les barres indiquent l'écart-type. D'après Bost, Cotté, Guinet et coll. en prep.

Le suivi des effectifs de manchots reproducteurs sur la même période que les suivis Argos révèle un effondrement de la population qui a vu le nombre de couples reproducteurs passer d'environ 60000 avant 1997 à moins de 40000 après 1997 (Fig. 4.2.14). Durant cette année charnière pendant laquelle s'est produit l'ENSO, les effectifs ont diminué de 35% en 1 an. La population semble en revanche s'être stabilisée depuis, et est même en augmentation depuis 2002.

En conclusion, ce jeu de données montre d'ores et déjà l'influence capitale de la variabilité climatique en termes d'anomalies de température sur la stratégie d'alimentation en mer des manchots et leurs proies, et leur ajustement remarquable par rapport au Front polaire P, et les effets d'un événement climatique exceptionnel sur la population de manchots de Crozet.

Dans l'Océan Austral, il n'existe malheureusement pas (à notre connaissance) d'autres d'information océanologique documentée vis à vis des réponses des stocks de poissons pélagiques (et des stocks de zooplancton) en cas de modifications hydrologiques/climatiques occasionnelles. Le réchauffement de la couche de mélange a pu entraîner la raréfaction du zooplancton dans la couche de mélange, habituellement prospectée par les poissons pour leur alimentation (Pakhomov et al. 1996). Par ailleurs, l'enfoncement de la thermocline a pu aussi entraîner un enfoncement en profondeur des poissons à la recherche de leur préférendum thermique durant la journée. Connaissant le rôle décisif de la couche de mélange pour la distribution des myctophidés, on peut raisonnablement envisager émettre l'hypothèse que ces poissons répondent au passage de l'anomalie chaude par une migration en profondeur (consécutif à une couche de mélange plus profonde) dans la zone océanique touchée entraînant les prédateurs à étendre considérablement leur rayon d'action en mer.

C. Relation entre la production secondaire simulée et la distribution des prédateurs marins supérieurs

C.1 Echelle globale : production secondaire et distribution historique des grands cétacés

Nous avons restreint la zone de distribution des cétacés pris en compte pour ces analyses (40 ° à 60° S) et représentées ci-dessous à celle de la production secondaire simulée sur le secteur correspondant (fig. 4.2.15).

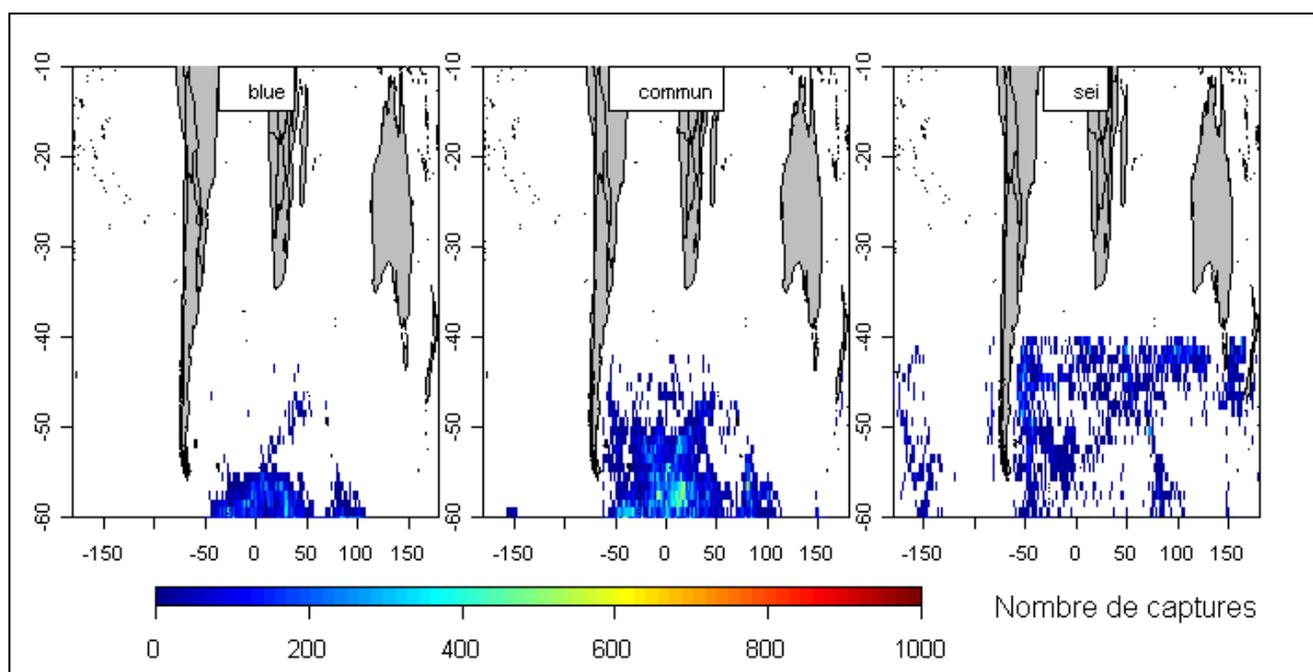


Figure 4.2.15. distribution des données de capture de rorquals bleus, rorquals commun et rorqual boréal (sei whales) prises en compte entre 40°S et 60° S pour l'analyse de la distribution de ces espèces en fonction des champs climatologique de chlorophylle et de production secondaire simulée

L'analyse détaillée des relations entre l'abondance historique de rorqual bleu et de rorqual commun (Figure 4.2.16) révèle une corrélation négative significative avec la climatologie de la concentration en chlorophylle_a à une résolution spatiale de 1° sur les secteurs compris entre 40°S et 60°S (rorqual bleu : $r_s = -0.21$, $S = 92446247$, $p < 0.0001$; rorqual commun : $r_s = -0.22$, $S = 982600636$, $p < 0.0001$). Lorsque la production secondaire simulée est prise en compte cette relation demeure négative mais non significative dans le cas du rorqual bleu ($r = -0.03$, $S = 78075783$, $p = 0.4$) et significative dans le cas du rorqual commun ($r = -0.07$, $S = 864176560$, $p < 0.01$).

Le rorqual boréal (ou de Sei) (figure 4.2.16 bas) est la seule espèce pour laquelle l'abondance est positivement corrélée à la concentration en chlorophylle a ($r_s = 0.18$, $S = 1134876979$, $p < 0.0001$) et à un degré moindre à l'abondance estimée de la production secondaire ($r_s = 0.07$, $S = 1282741507$, $p < 0.0001$)

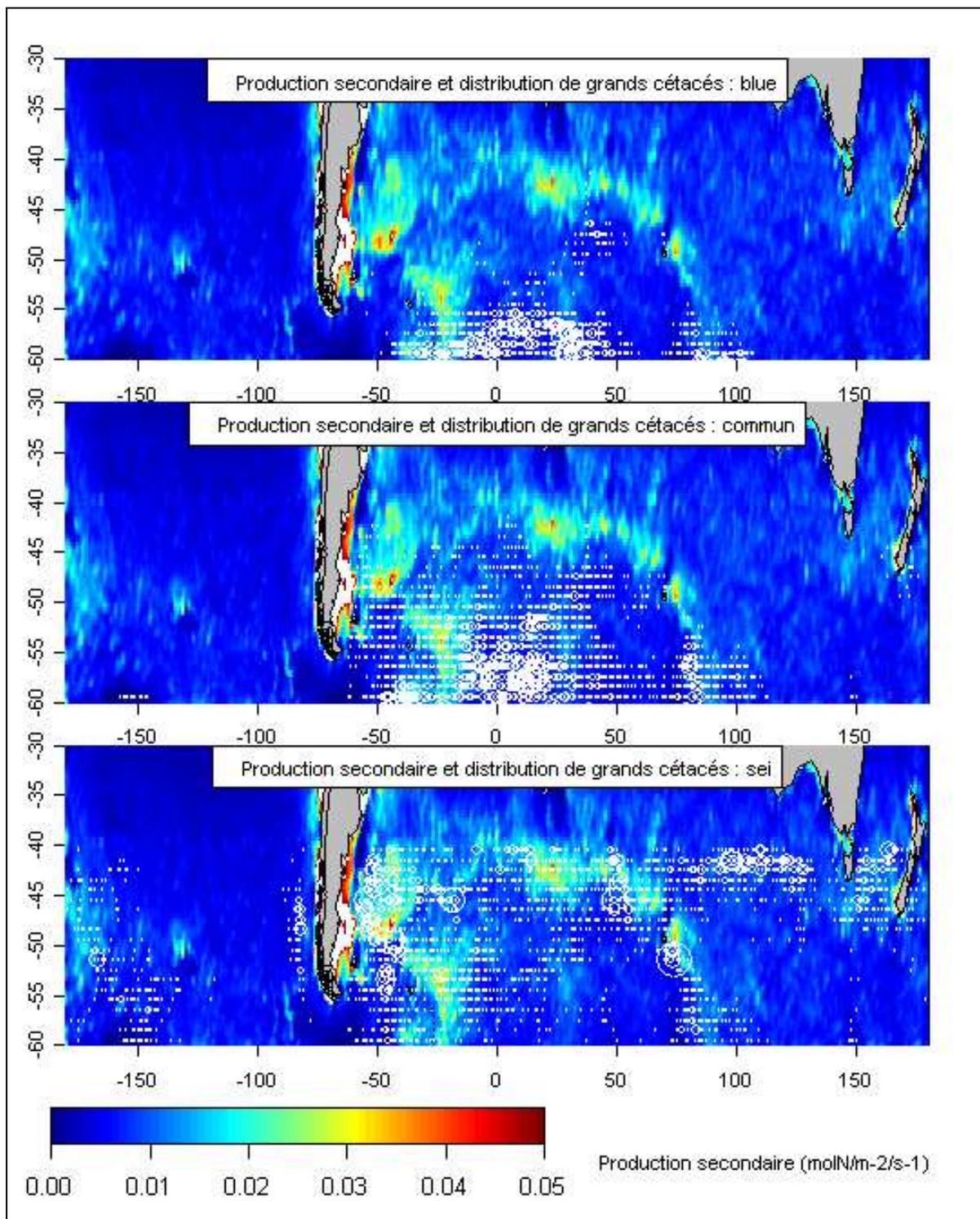


Figure 4.2.16 confrontation des champs climatologiques de production secondaire (mésoszoplancton) simulée par un modèle de transport advection des champs de production primaire aux données de capture de rorquals bleus, rorquals communs et rorqual boréal (sei whales)

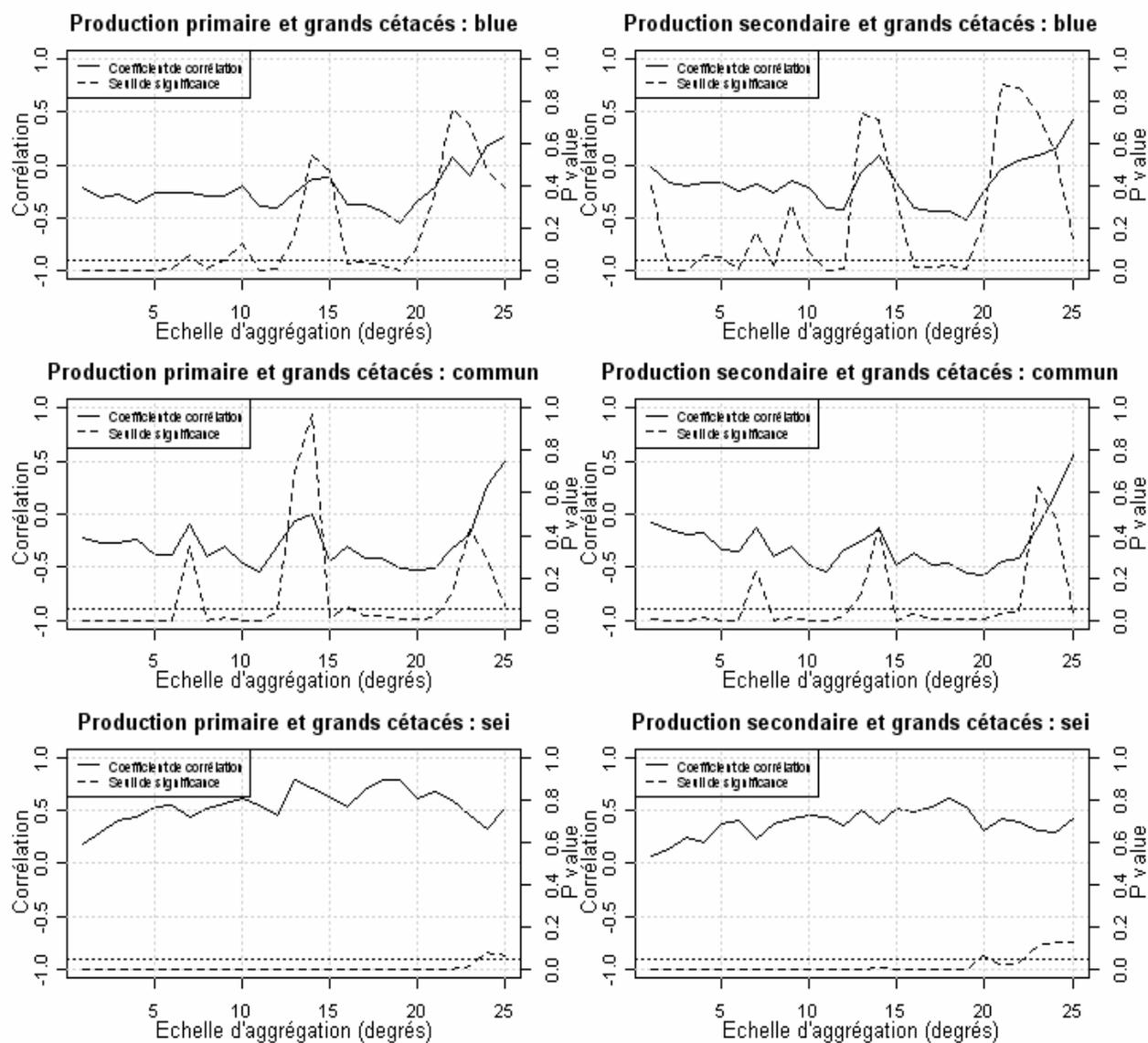


Figure 4.2.17: Coefficient de corrélation de Spearman et seuil de signification entre les 3 espèces de grands cétacés avec dégradation de la résolution spatiale (la ligne noire pointillée indique un seuil de 0.05). L'échelle d'agrégation indique la taille de la fenêtre spatiale sur laquelle a été effectuée l'agrégation (ie 5°: moyenne des valeurs sur une fenêtre de 5° x 5°)

Nous avons effectué une analyse échelle dépendante entre d'une part la distribution estivale historique de l'abondance de grands cétacés et 1) les concentration de surface en chlorophylle a (1ere colonne) et 2) les niveaux de production secondaire simulé par un modèle de transport advection (figure 4.2.17). Il ressort de cette approche que ni la prise en compte de la concentration en chlorophylle-a de surface ni le modèle utilisé n'améliore sensiblement à l'échelle globale (de notre zone d'étude (-10°S-60°S) notre compréhension de la distribution historique de ces grands cétacés à l'exception notable du rorqual boréal (sei whales). Ce dernier est positivement corrélé au champs de chlorophylle observé et de production secondaire simulée sur une gamme étendue d'échelle spatiale 1° à 20°.

Cette démarche a été approfondie par le calcul des covariogrammes expérimentaux qui permettent d'évaluer la portée des phénomènes étudiés. Pour les trois espèces étudiées le covariogramme expérimental a été calculé entre la concentration en chlorophylle a et le nombre de capture d'une part ; et entre la production secondaire simulée et le nombre de capture d'autre part.

Pour le rorqual bleu, l'ajustement d'un tel modèle de variogramme théorique sur le covariogramme (non présentés dans ce rapport) entre production secondaire simulée et le nombre de capture calculé permet de constater qu'il n'existe pas de covariation spatiale entre ces 2 paramètres.

En revanche le nombre de capture et la production primaire covarient selon deux structures imbriquées représentées par deux variogrammes, un modèle sphérique et un modèle gaussien de portées respectives de 341 et 684 km. Il semble donc que la distribution du rorqual bleu se structure selon des structures marquées de chlorophylle à 340 km (variogramme isotrope avec un palier), à l'intérieur de structures plus lâches à des échelles avoisinant 700 km (variogramme de type asymptotique). Dans le cas des rorquals communs un modèle sphérique et un modèle gaussien sont nécessaires pour ajuster d'une manière incomplète les covariogrammes expérimentaux. Les portées diffèrent : elles sont plus grande pour les associations avec la concentration en chlorophylle (650 et 1100km) qu'avec la production secondaire simulée (430 et 860 km). Les structures productives de niveaux trophiques supérieures semblent donc être de plus petite taille (hypothèse étant faite que les captures historiques de grands cétacés représentent un pattern de distribution moyen de la population). La structure de plus petite portée est de type sphérique, représentant une association marquée à l'inverse de la structure de plus grande taille de type asymptotique.

Nous interprétons ces résultats de la façon suivante : le fait de restreindre notre zone d'étude à 60°S (du fait des contraintes rencontrées dans le calcul du champ de courant) ne nous permet pas de couvrir les habitats préférentiels des rorquals bleus et communs antarctiques qui sont dans le cas présent en limite de leur aire de distribution. Inversement nous couvrons parfaitement bien l'aire de distribution du rorqual boréal (sei whales). La prise en compte de la production secondaire, bien que réduisant la gamme d'échelles pertinentes (1° à 19°) par rapport à la seule prise en compte de la concentration en chlorophylle a (1à 23°) n'améliore pas sensiblement, par rapport à la seule prise en compte des relations avec la chlorophylle, la compréhension des relations existant entre la distribution de ce rorqual et son environnement trophique. La deuxième interprétation est d'ordre fonctionnelle. L'analyse de variation longitudinale d'abondance de rorqual commun et de rorqual bleu avait déjà permis de mettre en évidence l'absence de relation forte entre la distribution de ces deux espèces et les concentrations de chlorophylle_a et dans une moindre mesure l'abondance estimée de krill. Elle soulignait cependant l'importance de l'étendue saisonnière de glace pour expliquer la présence de ces deux dernières espèces. Il est probable que le krill et notamment le recrutement larvaire du krill dépend en premier lieu des biomasses disponible d'algues épontiques directement associées à la glace de mer. Biomasse de phyto-plancton dont nous ne disposons d'aucune évaluation et qui par conséquent ne sont absolument pas prise en compte dans le modèle proposé. Cet aspect apparaît comme tout à fait critique pour toute étude du fonctionnement de l'écosystème marin antarctique. Nous nous affranchissons cependant de cette difficulté en travaillant en zone subantarctique. Par ailleurs comme évoqué précédemment il est possible que ces prédateurs ne ciblent pas uniquement leur proie en terme de biomasse présence mais en terme d'accessibilité et d'efficacité de pêche et par conséquent ne se concentre que dans les habitats leur permettant les performances de pêche les meilleures (bordure de la banquise par exemple pour le rorqual bleu et le rorqual commun). Ainsi toute modification de l'habitat glace de mer, telle que sa réduction est susceptible d'avoir un impact considérable sur les biomasse de krill (via la biomasse d'algues épontiques et son effet sur le recrutement des stades larvaires de krill) et via la réduction des habitats de pêche les plus favorables pour ces espèces.

C.2. A l'échelle de la zone atelier de Kerguelen

Modèle otarie

Biologie

La population actuelle de l'otarie à fourrure antarctique est estimée à 1.8 millions d'individus, distribuée dans tout l'hémisphère sud. Inféodés le reste de l'année au milieu marin, les individus investissent des sites terrestres (cotes rocheuses et plages, principalement) afin de se reproduire pendant l'été austral, de fin octobre à mi-avril. L'otarie antarctique femelle donne alors naissance à un petit unique entre mi-novembre et fin décembre. La période de lactation dure 4 mois, pendant lesquels les otaries alternent des séjours en mer sur les zones d'alimentation et des séjours à terre à la colonie où a lieu l'allaitement. Le rayon de prospection alimentaire est limité par les performances de nage individuelles et les besoins énergétiques du petit. Ces contraintes fortes pour l'acquisition des ressources, où les otaries sont assimilées à des « central place forager », ont fait l'objet d'un programme de recherche conduit pendant 3 ans sur la colonie de Cap Noir à Kerguelen (49°07'S, 70°45'E), où ont été recensées entre 400 et 750 femelles reproductrices. Les individus appartenant à cette colonie se nourrissent principalement de poissons mésopélagiques appartenant à la famille des myctophidés (Guinet et al. 2001).

Données

La distribution en mer de 11 animaux a été établie en février 1998, 1999 et 2000 à l'aide de l'usage conjoint d'une balise Argos (distribution en surface) et d'un enregistreur de pression (profil de plongée et température du milieu), déployés sur chaque animal le temps d'un trajet en mer. Le croisement des données issues de ces deux types d'appareils permet d'établir une carte de la distribution de l'activité de plongée des animaux. La résolution de cette carte est associée à celle du système Argos et correspond à une grille dont la taille des cellules est de 0.1° en longitude et 0.1° en latitude.

La prise en compte de la production secondaire, par rapport à la seule prise en compte de la production primaire dans l'analyse de la distribution spatiale du temps passé à pêcher par les femelles otaries améliore sensiblement la corrélation seulement une année sur trois (1998 : chlorophylle $r_s = -0.015$, $S = 7322079$, $p = 0.76$; Production secondaire simulée: $r_s = 0.12$, $S = 6318426$, $p = 0.02$). Les relations restent non significative en 1999 et 2000.

Le covariogramme expérimental a été calculé entre la concentration en chlorophylle a et le temps passé en mer des otaries d'une part ; et entre la production secondaire simulée et le temps passé en mer des otaries sur les séries climatologiques d'autre part (fig. 4.2.18). Ces calculs ont utilisé les séries climatologiques. La distance maximale est 100 km pour un *lag* de 5 km. L'objectif est d'identifier si le temps passé en mer et l'un ou l'autre des indicateurs de productivité du milieu sont structurés spatialement. Les 2 variogrammes ne présentent aucune structure nette. Cela justifie l'emploi du calcul de coefficient de corrélation puisque les données ne présentent pas d'autocorrélation à l'échelle de la zone avoisinant Kerguelen. Il apparaît aussi que le support des variables (en particulier le temps passé en mer) n'est pas suffisamment large en regard de la résolution spatiale pour permettre le calcul d'un covariogramme. De plus la contrainte de retour sur la colonie des individus pendant la reproduction réduit le champ de prospection alimentaire. Ainsi cette contrainte peut biaiser une relation directe entre production secondaire et temps passé en mer, au profit d'un compromis entre distance à la colonie et zone d'alimentation alternative (moins riche).

Variations inter-annuelle de production primaire et production secondaire simulée.

La production sur la zone d'étude était sensiblement plus importante en 1999-2000 comparé à 1998-1999 et 1997-1998 qui était le cycle avec la plus faible production primaire avec une variation globale de 20% entre les deux extrêmes. Ces variations de productions primaires sont reproduites dans les estimations de production secondaire et nous retrouvons une co-variation positive de la conditions physique des mères et des performances de croissance des nouveaux nés sur ces trois années (tableau 4.2.2 ; Lea et al. 2005)

		1998	1999	2000	df	F-ratio	P	Tukey HSD
Mothers	n	62	34	54				
Body mass (kg)		28.6 ± 0.6	30.6 ± 0.8	31.9 ± 0.7	2,147	7.129	<0.01	98<00
Length (cm)		113.8 ± 0.8	115.5 ± 0.7	115.0 ± 0.7	2,147	1.165	0.315	-
BCI		-1.09 ± 0.34	-0.21 ± 0.60	1.41 ± 0.42	2,147	10.182	<0.001	98,99<00
Body condition (kg cm ⁻¹)		0.250 ± 0.004	0.264 ± 0.006	0.276 ± 0.005	2,147	9.775	<0.001	98<00
Pups	n	23 (11/12)	30 (14/16)	18 (7/11)				
Body mass (kg)	Males	8.4 ± 0.5	12.1 ± 0.4	13.0 ± 0.6	2,29	24.65	<0.001	98<99,00
	Females	8.3 ± 0.6	10.7 ± 0.4	10.5 ± 0.5	2,36	8.49	<0.001	98<99,00
TBW (kg)	Males	5.3 ± 0.3	7.4 ± 0.2	7.6 ± 0.3	2,29	19.74	<0.001	98<99,00
	Females	5.1 ± 0.3	6.4 ± 0.2	6.2 ± 0.3	2,36	9.89	<0.001	98<99,00
TBW (%)		62.4 ± 1.0	60.8 ± 0.6	59.0 ± 0.5	2,65	4.62	<0.05	98>00
TBL (%)		13.9 ± 0.9	15.3 ± 0.5	16.8 ± 0.5	2,65	4.24	<0.05	98<00

Tableau 4.2.2 : comparaison inter-annuelle de la conditions physique des femelles et des nouveaux nés (les effectif de mâles/femelles sont indiqués entre parenthèse). BCI – Index de condition corporelle, TBW – total body water; TBL – total body lipid.

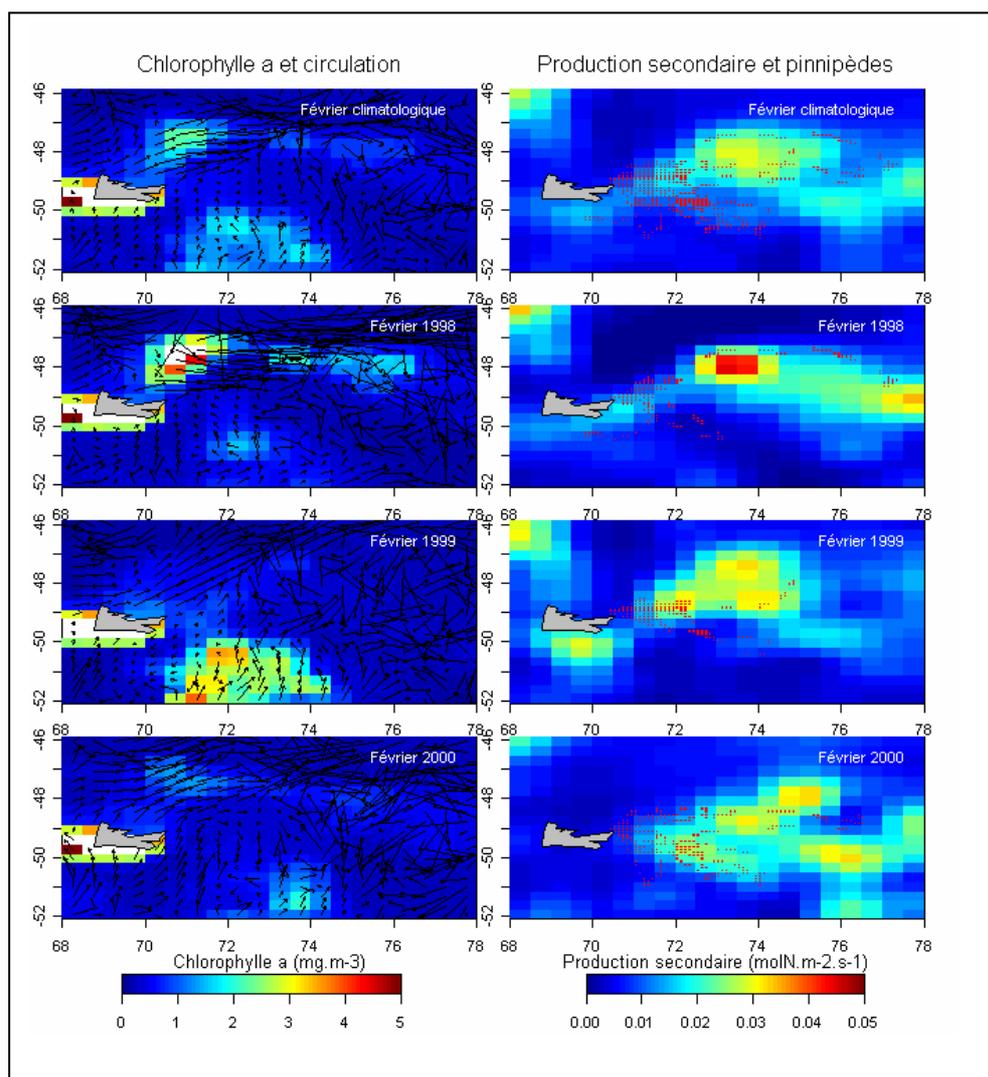


Figure 4.2.18 : concentration en chlorophylle a, production secondaire et zone de pêche des otaries. Les points rouges indiquent les zones prospectées par les otaries.

Cas du manchot royal

Dans le cas du manchot royal la distribution en mer de ce prédateur est beaucoup mieux expliquée en terme climatologique par la production secondaire simulée ($r_s=0.25$, $S= 189470224$, $p<0.0001$) par rapport à la seule prise en compte de la concentration en chlorophylle a ($r_s=0.05$, $S= 237602870$, $p=0.06$ – figure 4.2.19). Cependant la variation inter-annuelle de la distribution de la production secondaire n'explique que très partiellement les variations de distribution observées de ce prédateur sur la ZA de Kerguelen sur la période considérée.

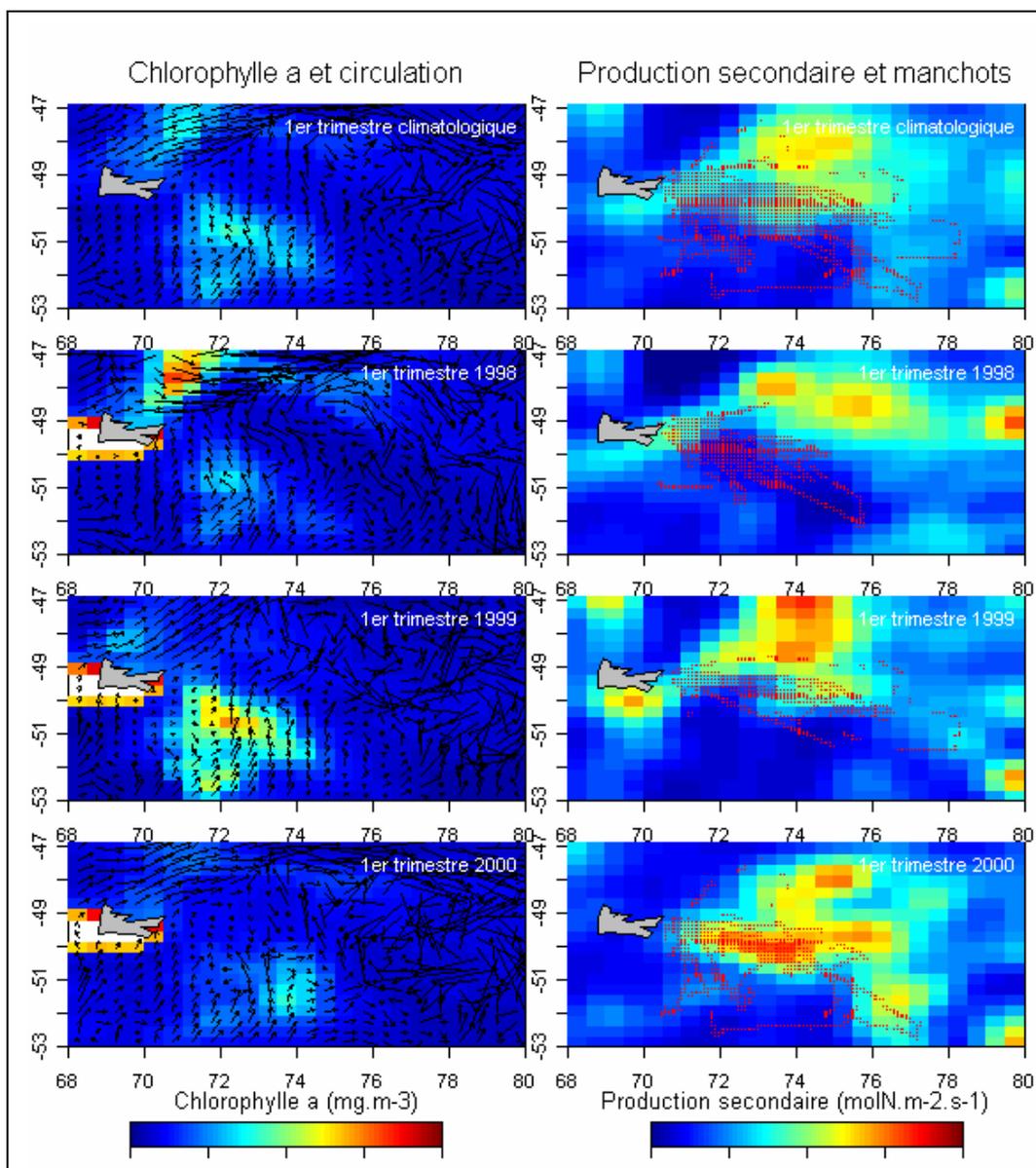


Figure 4.1.19 : Concentration en chlorophylle a, circulation, production secondaire et zone de pêche des manchots. Les points rouges indiquent les zones prospectées par les manchots.

Le covariogramme expérimental (Fig 4.2.20) a été calculé entre la concentration en chlorophylle a et le temps passé en mer des manchots d'une part ; et entre la production secondaire simulée et le temps passé en mer des otaries sur les séries climatologiques d'autre part, l'ensemble sur les séries climatologiques. Relative à la dispersion en mer des manchots, la distance maximale est de 300 km pour un *lag* de 10 km.

L'objectif a été d'identifier si le temps passé en mer et l'un ou l'autre des indicateurs de productivité du milieu sont structurés spatialement. Les 2 variogrammes présentent des structures nettes (fig. 4.2.20). Nous

avons ajusté un variogramme théorique à chaque variogramme expérimental. La covariance entre temps passé en mer et chlorophylle est modélisée par un variogramme composé de deux structures. Même si ces deux variogrammes de type sphérique (donc associé à des processus isotropes bornés dans l'espace) ont des portées similaires : 207 et 231 km, les paliers sont de signes opposés. Il est difficile d'interpréter écologiquement cette structure imbriquée. Il est probable que la dispersion des manchots est liée à des structures de gradients de chlorophylle a, mais la limite du support spatial ne permet pas de trancher.

Le covariogramme de la production secondaire simulée avec le temps passé en mer associe deux variogramme théoriques : un variogramme de type pépite, associé aux processus spatiaux non résolus à notre échelle d'étude (Wackernagel 1995), et un variogramme sphérique d'une portée de 279 km. Ainsi il apparaît que la distribution des manchots au sein de la production secondaire simulée s'organise à des échelles de l'ordre de 300 km. La représentation graphique de la distribution des manchots avec la production secondaire met en évidence la présence de zones de forte concentration en production simulée sur lesquelles se superpose la distribution des manchots. Le covariogramme théorique objectivise cette analyse cartographique et permet d'inférer un comportement de recherche alimentaire lié à la présence de production secondaire de type krill (supportant dans ce secteur les échelons trophiques supérieurs).

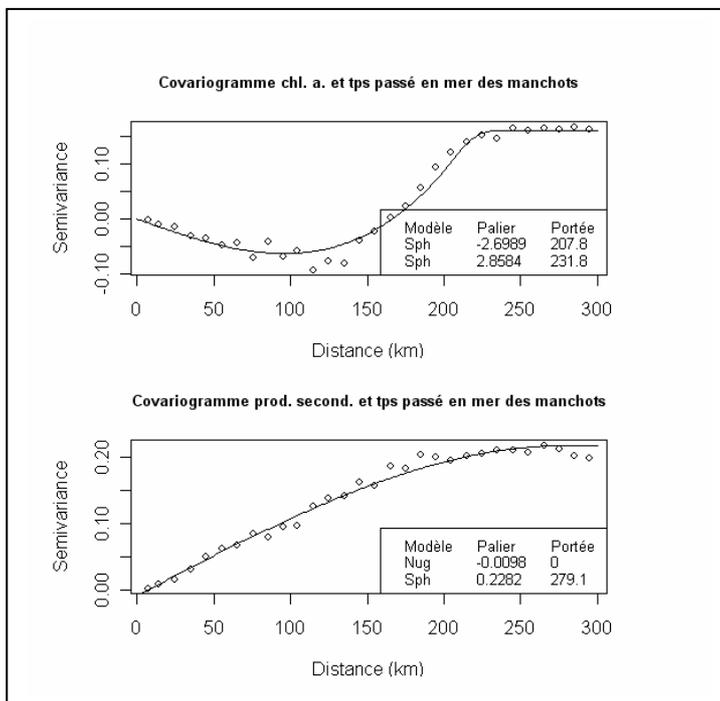


Figure 4.2.20. Covariogramme entre la chlorophylle a, la production secondaire simulée et temps passé en mer des manchots

V. Conclusion indiquant, par rapport aux objectifs initiaux, les résultats obtenus et les perspectives à développer

Un des intérêts du programme est qu'il repose sur la coopération entre des communautés scientifiques qui travaillent en général indépendamment les unes des autres. C'est l'un des premiers programme mettant en place des relations-interdisciplinaires en milieu austral pour étudier des relations à différents niveaux d'échelles entre l'environnement marin, les ressources et les prédateurs supérieurs, en associant une démarche observation in situ à une démarche modélisation.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce programme permettent d'établir très clairement que les prédateurs répondent en modifiant leur distribution en mer aux variations inter-annuelles des conditions océanographiques. Ainsi ils cherchent à atteindre les structures océanographiques leur permettant de maximiser leur efficacité de pêche comme cela a pu être très clairement établi pour le manchot royal et dans une moindre mesure pour les otaries.

Le développement de l'approche bio-indicateurs et animaux plate-formes mise en œuvre dans ce programme a été riche d'enseignement. La distribution passée et récente de ces prédateurs constituent une source importante d'information sur les changements ayant affecté les milieux marins (i.e. grands cétacés et changements des conditions de glace de mer). Cela concerne aussi la collecte de données océanographiques in situ pouvant être utilisées pour des applications océanographiques et climatiques très importantes (programme éléphant de mer)

Le plus fréquemment seule la dimension temporelle des variations environnementales est en général prise en compte. L'intégration de l'information spatiale dans les modèles modifie profondément cette dynamique (Steinberg & Kareiva 1997). La composante spatiale est d'autant plus importante pour les prédateurs marins tels que les oiseaux ou les mammifères marins que les sites de reproduction et d'alimentation sont spatialement déconnectés et peuvent être situés à des distances considérables. Un tel découplage entre zones d'alimentation et de reproduction est également observé à des degrés divers chez les thonidés des zones tropicales et subtropicales. Ce programme a montré en quoi la prise en compte de la dimension spatiale est indispensable dans les études cherchant à lier variabilité environnementale et dynamique des populations et des communautés.

Cependant les résultats de la confrontation entre production secondaire simulée et distribution des prédateurs marins sont mitigés et globalement n'améliorent pas sensiblement notre compréhension du système et des relations spatiales entre les prédateurs et leur environnement. Compte tenu des résultats obtenus, il semble illusoire d'espérer simuler dans l'état actuel des choses, la réponse en terme de distribution en de réponse bio-démographique de prédateurs marins à différents scénarios de changements climatiques avec un modèle simple de simulation de la production primaire et les résultats obtenus dans cette étude suggère que de tels travaux dans tous les cas ne pourront être conduits qu'à grandes échelles. Il ne serait pas réaliste d'essayer de mettre en évidence à partir de ces outils, des variations à fine échelle spatiale de la distribution de prédateurs marins supérieurs qui doivent répondre à d'autres contraintes pour exploiter efficacement les ressources marines, comme par exemple la relation étroite existante entre les grands cétacés et la bordure de glace antarctique (habitat favorable en terme d'accessibilité et de densité des patch de proies). Ceci concerne aussi l'éloignement de la ressource par rapport au site de reproduction pour les prédateurs marins exploitant leur proie à partir d'une place centrale.

La prise en compte du transport de la chlorophylle par des champs de courants (qu'ils soient observés ou simulés) ne parvient pas à dé-corréler très sensiblement les zones de production secondaire des zones de production primaire. Les corrélations deviennent très fortes pour des échelles spatiales supérieures à 5°.

Il est néanmoins intéressant de noter que, que si la distribution spatiales des espèces de prédateurs prise en compte dans cette étude ne sont que peu ou faiblement reliées à la distribution spatiale des ressources en zoo-plancton et à leur variation inter-annuelle, les variations de conditions de ces prédateurs et leur performances démographiques semblent répondre aux variations inter-annuelle et locale de la concentration en chlorophylle_a (cas des otaries à Kerguelen).

Le modèle de transport advection utilisé dans cette étude se focalise sur l'influence de la circulation sur la structuration spatiale de la production secondaire. La complexité des relations trophiques et des réponses biologiques des différents maillons est très (trop) largement simplifiée. Même si le modèle biologique choisi reste relativement simple, le krill antarctique n'est qu'une étape trophique menant aux proies consommées par les différents prédateurs supérieurs. Le caractère eulérien du modèle ne permet pas d'intégrer des subtilités comportementales (migration, comportement agrégatif...) ou des paramètres de dynamique des populations plus fins. Un formalisme lagrangien dans un modèle individu centré serait une alternative telle que l'étude de Murphy et al. (2004) le propose. Une alternative différente peut être le développement d'une approche écosystémique proposé par des outils tels que ECOPATH-ECOSIM (Christensen et Walters 2004.). La paramétrisation de ces modèles reste problématique, les valeurs numériques des paramètres biologiques étant relativement peu connue (dynamique des poissons myctophidés par exemple).

Les modèles d'écosystème s'appuyant sur un formalisme biogéochimique proposent un compromis intéressant. A travers le modèle PISCES (Aumont et al. 2003) la distribution des premiers niveaux trophiques devient plus accessible : zooplancton, phytoplancton dans différentes classes de taille. De plus ce formalisme permet de s'affranchir de l'utilisation de la production primaire satellitale et donc de garantir une couverture temporelle plus large des processus étudiés.

Nous avons pu procéder à la fin de ce programme à la mise en place de l'utilisation d'un tel modèle. A un stade de développement, la figure 5.1.1 illustre les capacités du modèle PISCES. Deux classes de zooplancton (micro et méso zooplanctons) sont représentées intégrés sur les 200 premiers mètres pour les mois de février et de septembre d'une simulation climatologique. Il apparaît que la distinction spécifique conduit à des distributions spatiales différentes. De plus les sorties du modèle incluent la profondeur. Une extraction fine en fonction des capacités de plonger d'un prédateur peut donc être conduite ce qui est déterminant en milieu océanique. Ces possibilités offrent un champ d'investigation très prometteur pour pouvoir mener des simulations réalistes des changements à venir de la distribution et de l'abondance des ressources dans l'océan Austral.

Nous comptons poursuivre nos travaux dans ce domaine en confrontant les simulations PISCES aux distributions observées de grand cétacés et autres prédateurs à l'échelle de l'océan austral et les premiers résultats climatologique semblent spatialement cohérent à grande échelle avec la distribution connu du rorqual bleu (figure ci-dessous). Le modèle PISCES pouvant être forcé par des champs météorologique (température, vent) nous permettra d'aborder sous peu la question de simulation des réponses attendues à grande échelle de l'océan austral sous différents scénarios de changement climatique.

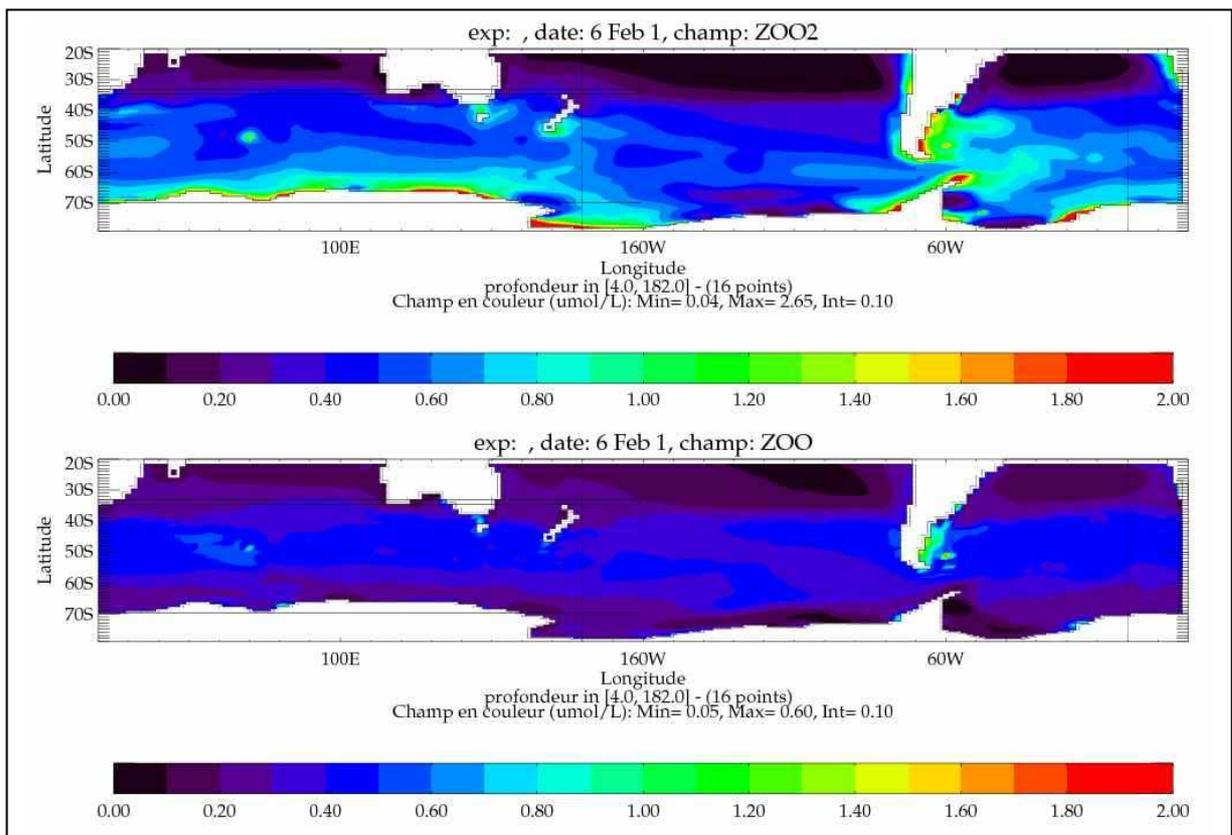
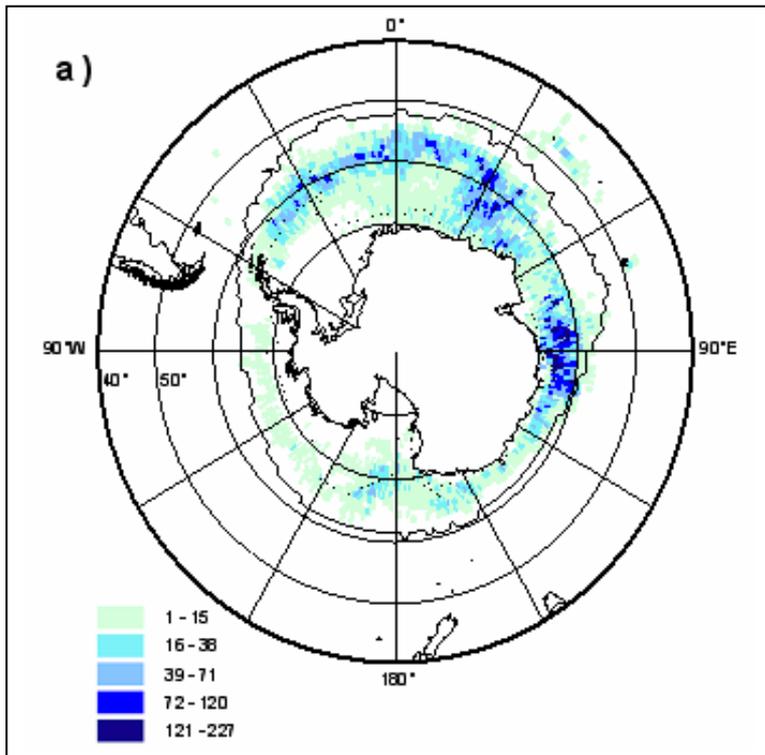


Figure 5.1.1 : distribution d'un mezo-zooplancton (ZOO2) et d'un micro-zooplancton (ZOO) deux classes de zooplancton (février climatologique) intégré de 4 à 182 m issue du modèle PISCES et confrontation à la distribution historique des captures de rorqual bleus antarctiques (haut)

Références Bibliographiques citées

- Ackley, S., Wadhams, P., Comiso, J.C., Worby, A.P., 2003. Decadal decrease of Antarctic sea ice extent inferred from whaling records revisited on the basis of historical and modern sea ice records. *Polar Research* 22, 19–25.
- Arrigo, K.R., Worthen, D.L., Lizotte, M.P., Dixon, P., Dieckmann, G., 1997. Primary production in Antarctic sea ice. *Science* 276, 394–397.
- Atkinson A., Siegel V., Pakhomov E., Rothery P. (2004). Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature* 432, 100-103.
- Bailleul, F., Luque, S., Dubroca, L., Arnould, J., Guinet, C. 2005. Differences in foraging strategy and maternal behavior between two sympatric fur seal species at the Crozet Islands. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 293 : 273-282
- Bonjean, F., Lagerloef, G.S.E. (2002). Diagnostic model and analysis of the surface currents in the tropical Pacific ocean, *Journal of Physical Oceanography*, 32, 2938-2954.
- Boris J.P., Book D.L. (1976) Flux corrected transport: I: SHASTA a fluid transport algorithm that works. *Journal of Computational Physics*, 11, 38-69.
- Bost C.A., Zorn, Le Maho Y., Duhamel G. (2002) Feeding of diving predators and diel vertical migration of prey: King penguin 'diet versus trawl sampling at Kerguelen islands. *Marine Ecology Progress Series* 227: 51-62.
- Bost CA, Georges JY, Guinet C, Cherel Y, Pütz K, Charrassin JB, Handrich Y, Zorn T, Lage J, Le Maho Y, 1997. Foraging habitat and food intake of satellite-tracked king penguins during the austral summer at Crozet Archipelago. *Mar Ecol Prog Ser.* 150: 21-33.
- Brierley, A. S., Fernandes, P.G., Brandon, M. A., Armstrong, F., Millard, M. W., McPhail, S. D., Stevenson, P., Pebody, M., Perrett, J., Squires, M., Bone, D. G. & Griffiths, G. 2002 Antarctic krill under sea ice elevated abundance in a narrow band just south of ice edge. *Science* 295, 1890–1892.
- Brown, S. G. & Lockyer C.H. 1984 Whales. In *Antarctic ecology* (ed. Laws, R. M.) pp. 717–782. London: Academic Press.
- Charassin JB, Bost CA, 2001 Utilisation of the oceanic habitat by king penguins over the annual cycle. *Mar Ecol Prog Ser.* 221: 285-298.
- Christensen, V., Walters, C., 2004. Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations. *Ecological Modelling* 172 (2-4), 109–139
- Comiso, J. C, 2000. Variability and trends in Antarctic surface temperatures from in situ and satellite infrared measurements. *Journal of Climate* 13, 1674–1696.
- Comiso, J. C, 2003 Large scale characteristics and variability of the global sea ice cover. In Thomas, D., and Dieckman, G. (Eds.), *Sea ice—an introduction to its physics, biology, chemistry, and geology*. Blackwell Science, Oxford, UK, pp 112–142.
- Constable, A., Nicol, S. & Strutton, P. G. 2003 Relating productivity in the Southern Ocean to spatial and temporal variation in the physical environment. *J. Geophys. Res.* 108. (DOI 10.1029/2001JC001270).
- Curran, M.A.J., van Ommen, T.D., Morgan, V.I., Phillips, K.L., Palmer, A.S., 2003. Ice core evidence for Antarctic sea ice decline since the 1950s. *Science* 302, 1203–1206.
- De la Mare, W. K. 1997 Abrupt mid-twentieth century decline in Antarctic sea ice extent from whaling records. *Nature* 389, 57–60.
- Delord K, Barbraud C, Weimerskirch H, 2004. Long-term trends in the population size of king penguins at Crozet archipelago: environmental variability and density dependence. *Polar Biol.* 27: 793-800.
- Duhamel, G. 1998. The pelagic fish community of the Polar Frontal Zone off the Kerguelen Islands. in: *Fishes of Antarctica. A biological overview*, di Prisco, G., Pisano, E., Clarke (Eds), Springer-Verlag Italia.
- Eckman, J.E. (1994) Modelling physical-biological coupling in the ocean: the U.S. GLOBEC Program. *Deep-Sea Res.* II 41:1-5.
- Everson I. (2000). Role of krill in marine food webs, the Southern Ocean. In: *Krill: Biology, Ecology and Fisheries – (I. Everson, ed.) Fish and Aquatic Resources, Series 6*. Blackwell Science, Oxford: 194-201
- Guinet C, Koudil M, Bost CA, Durbec JP, Georges JY, Mouchot MC, Jouventin P, 1997. Foraging behaviour of satellite-tracked king-penguins in relation to sea-surface temperatures obtained by

- satellite telemetry at Crozet Archipelago, a study during three austral summers. *Mar Ecol Prog Ser.* 150: 11-20.
- Hamner, W. M.; Hamner, P. P.; Strand, S. W.; Gilmer, R. W. (1983) Behavior of Antarctic Krill, *Euphausia superba*: Chemoreception, Feeding, Schooling and Molting; *Science* 220, pp. 433 – 435.
- Hewitt, R. P. Watkins, J., Naganobu, M., Sushin, V., Brierley, A. S., Demer, D., Kasatkina, S., Takao, Y., Goss, C., Malyshko, A. et al. 2004 Biomass of Antarctic krill in the Scotia Sea in January/February 2000 and its use in revising an estimate of precautionary yield. *Deep-Sea Res. II* 51, 1215–1236. (DOI 10.1016/j.dsr2.2004.06.01 1)
- Hjort, J., Lie, J., Ruud, J.T., 1933. Norwegian pelagic whaling in the Antarctic III. *Hvalradets Skrifter* 8, 4–36.
- Iverson, R.L. (1990) Control of marine fish production. *Limnology. Oceanography.* 35(7): 1593-1604.
- Johannessen O.M., Stein Sandven, Alastair D. Jenkins, Dominique Durand, Lasse H. Pettersson, Heidi Espedal, Geir Evensen, Torill Hamre (2000) Coastal Engineering 412000.155–176 Satellite earth observation in operational oceanography
- Kasamatsu, F., Joyce, G. G., Ensor, P. & Mermoz, J. 1996 Current occurrence of baleen whales in Antarctic waters. *Rep. Int. Whal. Commn.* 46, 293–304.
- Kawamura, A. 1994 A review of baleen whale feeding in the Southern Ocean. *Rep. Int. Whal. Commn.* 44, 261–271.
- Lagerloef, G.S.E., G. Mitchum, R. Lukas and P. Niiler (1999) Tropical Pacific near-surface currents estimated from altimeter, wind and drifter data, *J. Geophys. Res.*, 104, 23,313-23,326
- Laws, R. M. 1977 Seals and Whales of the Southern Ocean. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 279, 81–96.
- Lea, M.A., Guinet, C., Cherel, Y., Duhamel, G., Dubroca, L., Pruvost, P., Hindell, M. 2005. Impacts of climatic anomalies on provisioning strategies of a Southern Ocean predator. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*
- Lehodey P., André J.-M., Bertignac M., Hampton J., Stoens A., Menkes C., Memery L. and Grima N., 1998. Predicting skipjack tuna forage distributions in the equatorial Pacific using a coupled dynamical bio-geochemical model. *Fish. Oceanogr.* 7, 3/4, 317–325.
- Levy M., Estubier A., Madec G. (2001). Choice of an advection scheme for biogeochemical models. *Geophysical Research Letters.*
- Lizotte, M. P. 2001 The contributions of sea ice algae to Antarctic Marine Primary Production. *Amer. Zool.* 41, 57–73.
- Loeb, V., Siegel, V., Holm-Hansen, O., Hewitt, R., Fraser, W., Trivelpiece, W. & Trivelpiece, S. 1997 Effects of sea ice extent and krill or salp dominance on the Antarctic food web. *Nature* 387, 897–900.
- Mackintosh, N.A. 1972 Biology of the populations of large whales. *Science prog.* 60, 449–464.
- Mackintosh, N.A., Herdman, H.F.P., 1940. Distribution of the pack-ice in the Southern Ocean. *Discovery Reports* 19, 285-296.
- Madec, G., P. Delecluse, M. Imbard, and C. Lévy (1998) OPA 8.1 Ocean General Circulation Model reference manual. Note du Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL),
- Monfray P. (2003) An ecosystem model of the global ocean including Fe, Si, P colimitations. *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 17, no. 2, 1060–, doi:10.1029/2001GB001745, 2003
- Morel A., André J.-M. (1991) Pigment distribution and primary production in the western Mediterranean, as derived from space (czcs) observations. *Journal of Geophysical Research*, 96(C7) :12685–12698.
- Morel A., Maritorena S. (2001) Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *Journal of Geophysical Research* Vol. 106, No. C4, pp 7163–7180.
- Murphy E.J., Thorpe S.E., Watkins J.L., Hewitt R. (2004) Modeling the krill transport pathways in the Scotia Sea: spatial and environmental connections generating the seasonal distribution of krill *Deep-Sea Research II* 51 1435–1456.
- Murphy, E.J., Clarke, A., Symon, C., Priddle, J., 1995. Temporal variation in Antarctic sea-ice: analysis of a long-term fast-ice record from the South Orkney Islands. *Deep-Sea Research Part I* 42, 1045–1062.
- Nemoto, T. 1970 Feeding pattern of baleen whales in the ocean. In *Marine food chains* (ed. Steele, J. H.) pp. 241–252. Berkeley: University of California Press.
- Nicol S., Endo Y. (1997) Krill Fisheries of the World. Series title: FAO Fisheries Technical Papers - T367 100 pg ISBN: 9251040125W5911/E.

- Nicol, S., Pauly, T., Bindoff, N. L., Wright, S., Thiele, D., Hosie, G. W., Strutton, P. G., Woehler, E., 2000 Ocean circulation off east Antarctica affects ecosystem structure and sea ice extent. *Nature* 406, 504–507.
- Okubo A. (1980). Diffusion and Ecological Problems: Mathematical Models. In: Biomathematics, Vol. 10. New York: Springer-Verlag, 254 pp.
- Orsi, A. H., Whitworth, T. III & Nowlin, W. D. J. 1995 On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Res. I* 42, 641–673.
- Pakhomov, E.A., Perissinotto, R., & Mc Quaid, C.D. (1994). Comparative structure of the macrozooplankton/micronecton communities of the subtropical and Antarctic Polar Fronts. *Marine Ecol. Progr.Ser.*111: 155-169.
- Pannekoek J, van Strien AJ, 1996. TRIM- trends and indices for monitoring data. Research paper no. 9634. Statistics Netherlands, Voorburg.
- Park, Y.-H., Gambéróni, L.(1997) Cross-frontal exchange of Antarctic Intermediate Water and Antarctic Bottom Water in the Crozet Basin. *Deep-Sea Research II* 44, 963–986.
- Pedlosky J. (1996) Ocean Circulation Theory. Berlin: Springer–Verlag.
- R Development Core Team (2004) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 3-900051-00-3. <http://www.R-project.org>.
- Reid, K. & Croxall, J. P. 2001 Environmental response of upper trophic-level predators reveals a system change in an Antarctic marine ecosystem. *Proc. R. Soc. Lond. B* 268, 377–384. (DOI 10.1098/rspb.2000.1371.)
- Robertson, R., Visbeck, M., Gordon, A.L., Fahrbach, E., 2002. Long-term temperature trends in the deep waters of the Weddell Sea. *Deep-Sea Research Part I* 49, 4791–4806.
- Saporta G. (1990) Probabilités Analyse de données et Statistiques. Editions TECHNIP, first edition.
- Shimadzu, Y., Katabami, Y., 1984. A note on the information on the pack ice edge obtained by Japanese catcher boats in the Antarctic. *Report International Whaling Commission* 34, 361–363.
- Stemacek, V. & Nicol, S. 2005 Polar ocean ecosystems in a changing world. *Nature* 437, 362–368. (DOI 10.1038/nature04161)
- Thiele, D., Chester E. & Gill, P. 2000 Cetacean distribution off Eastern Antarctica (80-150°E) during the Austral summer of 1995/1996. *Deep-Sea Research II* 47, 2543–2572.
- Tourre YM, White WB, 1995. ENSO Signals in Global Upper-Ocean Temperature. *J Phys Oceanogr.* 25:1317-1332.
- Tynan, C. T. 1998 Ecological importance of the Southern Boundary of the Antarctic Circumpolar Current. *Nature* 392, 708–710.
- Wackernagel H. (1998) Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, second edition. Aumont O., Maier-Reimer E., Blain S.,
- Worby, A.P., Comiso, J.C., 2004. Studies of the Antarctic sea ice edge and ice extent from satellite and ship observations. *Remote Sensing Environment* 92: 98-11.

6-Les rapports, publications, thèses, sites Internet, et autres valorisations de l'étude

mars 2003-mars 2006

Thèses

Soutenues

L. Dubroca : « *Champs prédits d'habitats des prédateurs supérieurs et d'abondance des ressources* ». Université de Marseille. A soutenir au cours de l'été 2004.

En cours

C. Cotté (2005-2008): distribution en mer des prédateurs marins et sélection des habitats océaniques

Articles soumis, sous presse ou publiés dans le cadre du projet (revues « A »)

Publiés

2004

Beauplet, G., Dubroca, L., Guinet, C., Cherel, Y., Dabin, W., Gagne, C., Hindell, M., 2004. Foraging ecology of subantarctic fur seal (*Arctocephalus tropicalis*) breeding at Amsterdam island: seasonal change in relation to maternal characteristics and pup growth. *Marine Ecology Progress Series*.

-Bost, C.A., Charrassin, J.B., Clerquin, Y., Ropert-Coudert, Y., Le Maho, Y. (2004) Exploitation of the marginal ice zone by king penguins during winter. *Mar.Ecol. Progr. Ser.* 283 : 293-297

-Charrassin J.B., Park, Y.H., Le Maho, Y., Bost, C.A. (2004). Fine resolution 3-D temperature fields off Kerguelen from instrumented penguins. *Deep Sea Research I* 51 : 2091-2103

-Delord K., Barbraud C., Weimerskirch H. Long-term trends in the population size of king penguins at Crozet archipelago: environmental variability and density dependence? *Polar Biology*. 2004, 27, 793-800

-Dubroca, L., Guinet, C., Monestiez, P., Andre, J.M., Durbec, J.P., 2004 Scale dependant correlation between the occurrence of fin whales (*Balenoptera physalus*) sightings and oceanographic parameters: a geostatistical approach.

-Lecroël, A., Ridoux, V., Bost C.A. (2004). Spatial and temporal variations in the diet of the Gentoo penguin (*Pygoscelis papua*) at Kerguelen Islands. *Polar Biology* 27: 206- 216

-Park, Y.H.,& Roquet, F. 2004. Quasi stationary ENSO wave signals versus the Antarctic Circumpolar Wave scenario. *Journal Geoph. Research*.

-Sato, K., Charrassin, J.B., Bost, C.A. & Naito, Y. (2004). Macaroni penguins adjusted body angle to optimize time allocation of foraging dive cycle. *J. Exp. Biol* 207 :4057 -4065.

2005

Cherel, Y., Bost, C.-A., Guinet, C., Weimerskirch, H. 2005. Feeding habits of seabirds and marine mammals of the Kerguelen Archipelago, p. 28-33. *In*: Palomares, M.L.D., Pruvost, P., Pitcher, T.J.,

Pauly, D. (eds.) Modeling Antarctic marine ecosystems. Fisheries Centre Research Reports 13(N). Fisheries Centre, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Jenouvrier S., Weimerskirch H., Barbraud C., Park Y.H., Cazelles B. Evidence of a shift in cyclicity of Antarctic seabirds dynamics link to climate. *Proceedings of the Royal Society*, 2005, 272, 887-89

Lea, M.A., Guinet, C., Cherel, Y., Duhamel, G., Dubroca, L., Pruvost, P., Hindell, M. 2005. Impacts of climatic anomalies on provisioning strategies of a Southern Ocean predator . *Mar. Ecol. Progr. Ser.*

Lescroël, A. & Bost, C.A. (2005). Foraging under contrasted oceanographic conditions: the Gentoo Penguin at Kerguelen Archipelago. *Marine Ecology Progress Series* 302 : 245-261.

Pinaud D., Cherel Y., Weimerskirch H. Effect of environmental variability on habitat selection, diet, provisioning behaviour and chick growth in yellow-nosed albatrosses. *Marine Ecology Progress Series*. 2005, 298, 295-304

Sous presse

Bailleul, F., Charrassin, J.B., Ezraty, R., Girard-Ardhuin, F., McMahon, C.R., Field, I.C. and C., Guinet. Southern elephant seals from Kerguelen Islands confronted by Antarctic sea ice. Changes in movements and in diving behaviour. *Deep Sea Research II* (accepted).

Bailleul, F., Charrassin, J.B., Monestiez, P., Roquet, F., Biuw, M. and C., Guinet. Successful foraging zones of southern elephant seals from Kerguelen Islands in relation to oceanographic conditions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* (in press)

Bost, C.A., Handrich, Y., Butler, P.J., Fahlman, A., Halsey, L.G., Woakes, A.J. & Ropert-Coudert, Y. (sous presse)- Change in dive profiles as an indicator of feeding success in king and Adélie penguins. *Deep –Sea Research II*.

Lescroël A. & Bost, C.A. (sous presse)- Recent decrease in the population size of the Gentoo Penguin: threats at their northern range?" *Antarctic Science*.

Articles de vulgarisation

Bost, C.A. & Weimerskirch, H. (2005) – Les oiseaux de mer, baromètres des changements climatiques. *Le Courrier de la Nature* 220, 30 :38

Guinet C., Charrassin J.-B., Bost, C.-A. (2003) Eléphants de mer océanographes. Lettre d'information des Terres Australes et Antarctiques Françaises.

Guinet C., Bailleul F., Biuw M., Bost C.-A., Charrassin J.-B., Fedak M., Field I., Hindell M., Lovell P., McMahon C., Monks F., Park Y.-H., Roquet F. (2004) Les éléphants de mer prédateurs et océanographes de l'Océan Austral. *Argos Forum* 61

Charrassin J-B. (2006) Phoques et oiseaux marins antarctiques, auxiliaires et prédateurs des océanographes. *Bulletin de la Société des Amis du Muséum National d'Histoire Naturelle et du Jardin des Plantes*

Communications Orales

- Bailleul F., Barbraud C., Biuw M., Bost C.-A., Charrassin J.-B., Dubroca L., Lea M.-A., Roquet F., Park Y.-H., Fedak M., Hindell M., Weimerskirch H., Guinet C. What can top marine predators tell us about the Southern Ocean? National Conference of the Australian Marine Sciences Association, Hobart - 2004.
- Bailleul F., Charrassin J.-B., Ezraty R., Guinet C. Foraging in antarctic sea ice by southern elephant seals: a compromise between food and breeding constraint Annual conference of the European Cetacean Society, La Rochelle – 2005
- Bailleul F., Charrassin J.-B., Ezraty R., Guinet C. Foraging in Southern Ocean by southern elephant seals: importance of antarctic sea-ice. Second International Bio-Logging Science Symposium, St Andrews – 2005
- Bailleul F., Charrassin J.-B., Ezraty R., Guinet C. Foraging behaviour of elephant seals according to oceanographic conditions. Society for Experimental Biology annual main meeting, Barcelone – 2005.
- Bailleul F., Pinaud D., Charrassin J.-B., Guinet C. Another approach to determine the scale-dependent foraging behaviour of southern elephant seals (*Mirounga leonina*). 2^{ème} Rencontre SERL « Ecologie et Comportement », Strasbourg – 2006
- Biuw M., Meredith M., Rintoul S., Park Y.-H., Bradshaw C., Charrassin J.-B., Guinet C., Hindell M., Fedak M. The SEaOS project: Southern Elephant seals as Oceanographic Samplers. Challenger Conference for Marine Science, Liverpool - 2004
- Biuw M., Boehme L., Guinet C., Charrassin J.-B., Hindell M., Costa D., Fedak M. Oceanographic influences on animal behaviour: The movements and diving behaviour of Southern elephant seals in a physical context 2006 Ocean Sciences Meeting, Honolulu – 2006
- Biuw, E. M., Fedak, M. A., Hindell, M., Charrassin, J.-B., Bailleul, F., Costa D., Guinet, C. : Down to detail: the movement and diving behaviour of southern elephant seals in a physical context revealed by new oceanographic instruments. The 16th Biennial Conference on the biology of marine mammals, San Diego – 2005.
- Bost, C.A., Handrich, Y., Butler, P.J. Charrassin J.B., Ropert-Coudert, Y., Naito, Y. «Feeding behaviour of penguins detected by oesophageal temperature: a three dimensional approach ». 2nd International Bio-logging Science Symposium, Université de St Andrew, GB, 13–16 Juin 2005.
- Mitani Y., Sato K., Biuw M., Charrassin J.-B., Field I., Costa D.P., Le Boeuf B.J., Naito Y. Stroking pattern and body angle in diving elephant seals. Second International Bio-Logging Science Symposium, St Andrews - 2005
- Roquet F., Charrassin J.B., Bailleul F., Bost C.-A., Guinet C., Park Y.H. Strong topographical control of circulation over the Kerguelen Plateau revealed from elephant seal-borne miniaturized CTD. 2006 Ocean Sciences Meeting, Honolulu - 2006
- Fedak M., Biuw M., Meredith M., Rintoul S., Park Y.-H., Charrassin J.-B., Costa D., Hindell M., Guinet C. The SEaOS project: Southern Elephant seals as Oceanographic Samplers. 2006 Ocean Sciences Meeting, Honolulu - 2006
- Lescroël A., Bost C.A. «Microgeographic variation in the foraging behaviour of two coastal seabirds». 2nd International Bio-logging Science Symposium, Université de St Andrew, GB, 13–16 Juin 2005.

Posters

- Bost, C.A., Park, Y.H., Cherel, Y., Guinet, C., Duhamel, G. & Charrassin, J.B. (2004)- “*Inter-annual changes in the foraging success of King Penguins in relation to oceanographic conditions at Kerguelen Islands, South Indian ocean*”. Fifth International Penguin Conference, Ushuaia, Argentine, 6-10 septembre 2004.
- Charrassin J.-B., Roquet F., Park Y.-H, Bailleul F., Bost C.-A, Biuw M., Fedak M., Field I., Hindell M., McMahon C., Guinet C. Elephant seals-borne miniaturized CTDs provide an unprecedented number of temperature and salinity profiles for the poorly known Southern Indian Ocean. Second International Bio-Logging Science Symposium, St Andrews – 2005
- Charrassin J.B., Roquet F., Guinet C., Park Y.H. Validation of temperature and salinity data collected by instrumented elephant seals in the Southern Ocean. 2006 Ocean Sciences Meeting, Honolulu - 2006
- Fedak M ., Biuw M., Meredith M., Rintoul S., Park Y.-H., Charrassin J.-B, Costa D., Hindell M.; Guinet C. The SEaOS project: Southern Elephant seals as Oceanographic Samplers. The 16th Biennial Conference on the biology of marine mammals, San Diego – 2005.

Annexe au programme éléphant de mer : Contribution des données éléphant au suivi des conditions océanographiques.

En 2004, 10 éléphants de mer à Kerguelen, 7 en Géorgie du Sud et 4 à Macquarie ont été équipés de ces balises, en 2005 14 éléphants de mer seront équipés à Kerguelen, 10 en Géorgie du Sud et 10 à Macquarie. Une moyenne de 1.9 profils de température et de salinité a été obtenue par jour et par balise en temps quasi-réel, et ce pour une région où il y a un réel déficit de données. Un total de 3090 profils CTD et 803 profils TD (total : 3893 ; profondeur max : 1500 m, moy 590 ± 205 m) ont été collectés entre février et septembre 2004 (figure 2). Ces données ont été corrigées, validées et transmises à CORIOLIS. Pour la région située au Sud de 60°S entre 30°E et 140°E , 182 profils CTD étaient précédemment répertoriés dans la BD Coriolis, essentiellement en période estivale, et 2260 ont été obtenus en 2004 par les éléphants de mer de Kerguelen, principalement pour les périodes automnale et hivernale. La précision des mesures après les corrections établies à partir des opérations d'étalonnage au SHOM et des validations *in situ* sur la CTD du Marion Dufresne était de 0.003 ± 0.05 °C et de 0.02 ± 0.04 psu.

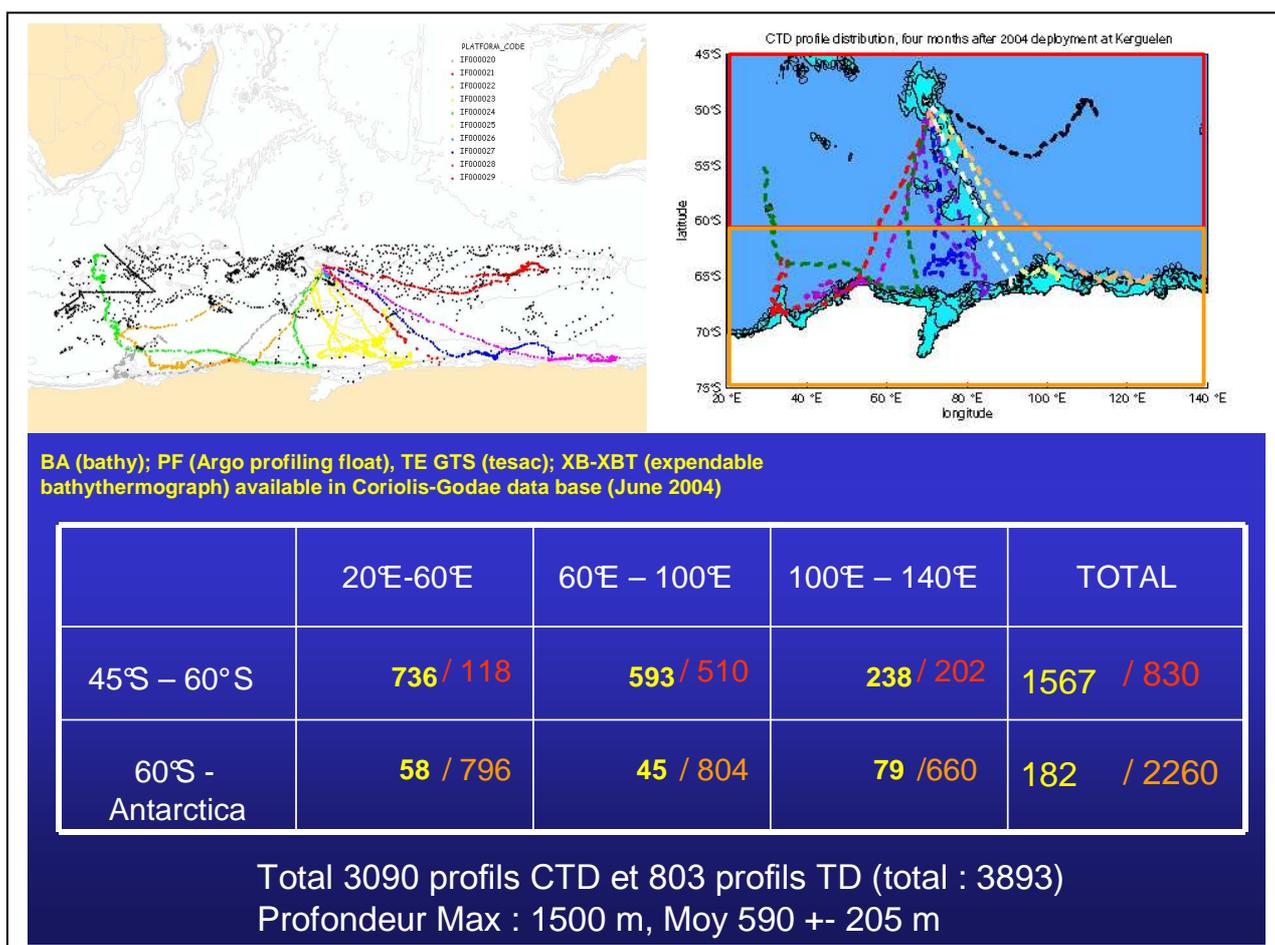


Figure 10 : Répartition temporelle du nombre de profils XBT-CTD pour le secteur 20°E 140°E et 45°S et le continent Antarctique répertoriées dans CORIOLIS.

Ces travaux ont par ailleurs permis d'obtenir des résultats uniques d'un point de vue océanographiques et permettent de décrire la structure verticale des masses d'eau le long de la dorsale du plateau de Kerguelen et dont les principales caractéristiques sont présentées ci-dessous.

En mars durant l'été austral (**Fig.11 haut**), trois masses d'eau sont présentes au nord de 64°S: la couche mélangée de surface, la couche du minimum de température de subsurface représentant le résidu de l'eau formée durant l'hiver précédent appelée l'Eau d'Hiver, et l'Eau Profonde Circumpolaire dont la partie supérieure est marquée par un maximum de température de subsurface. Cette structure des trois couches d'eau disparaît brusquement au sud de 64°S et est remplacée par l'Eau du Plateau Antarctique qui est la plus froide et qui pénètre profondément vers la couche inférieure. L'isotherme quasi-vertical de 1.5°C ou 1°C juste au sud de 64°S représenterait la démarcation entre l'eau plus au large et l'eau côtière Antarctique.

Durant l'hiver austral en juin (**Fig. 12**), l'Eau d'Hiver est intégrée dans la couche de mélange de surface en raison de l'approfondissement de cette dernière, sauf au nord de 57°S où il subsiste une faible mais distincte couche de minimum de température de subsurface. Cette dernière pourrait indiquer l'advection vers le nord des masses d'eau qui n'ont pas été intégrées au mélange turbulent hivernal de la couche de surface. Une autre possibilité est simplement que le mélange hivernal n'était pas achevé lors de l'échantillonnage des données.

Il faut noter que la profondeur de l'Eau d'Hiver montre la plus forte variation latitudinale entre 56° et 57°S (à 73°E) correspondant aux latitudes du Fawn Trough; elle est autour de 200 m au nord de 56°S mais remonte vers 100 m au sud de 57°S. La section de salinité correspondante (**Fig. 11 bas**) confirme ce fort gradient latitudinal, ce qui signifie qu'il existe un courant important vers l'est (voir plus bas). La circulation générale près du continent Antarctique est orientée vers l'ouest, ce qui est également en accord, du point de vue géostrophique, avec les pentes d'isothermes et d'isohalines au sud de 64°S qui s'inclinent vers le bas en s'approchant de l'Antarctique. Cette dernière latitude correspond à l'axe du Princess Elizabeth Trough.

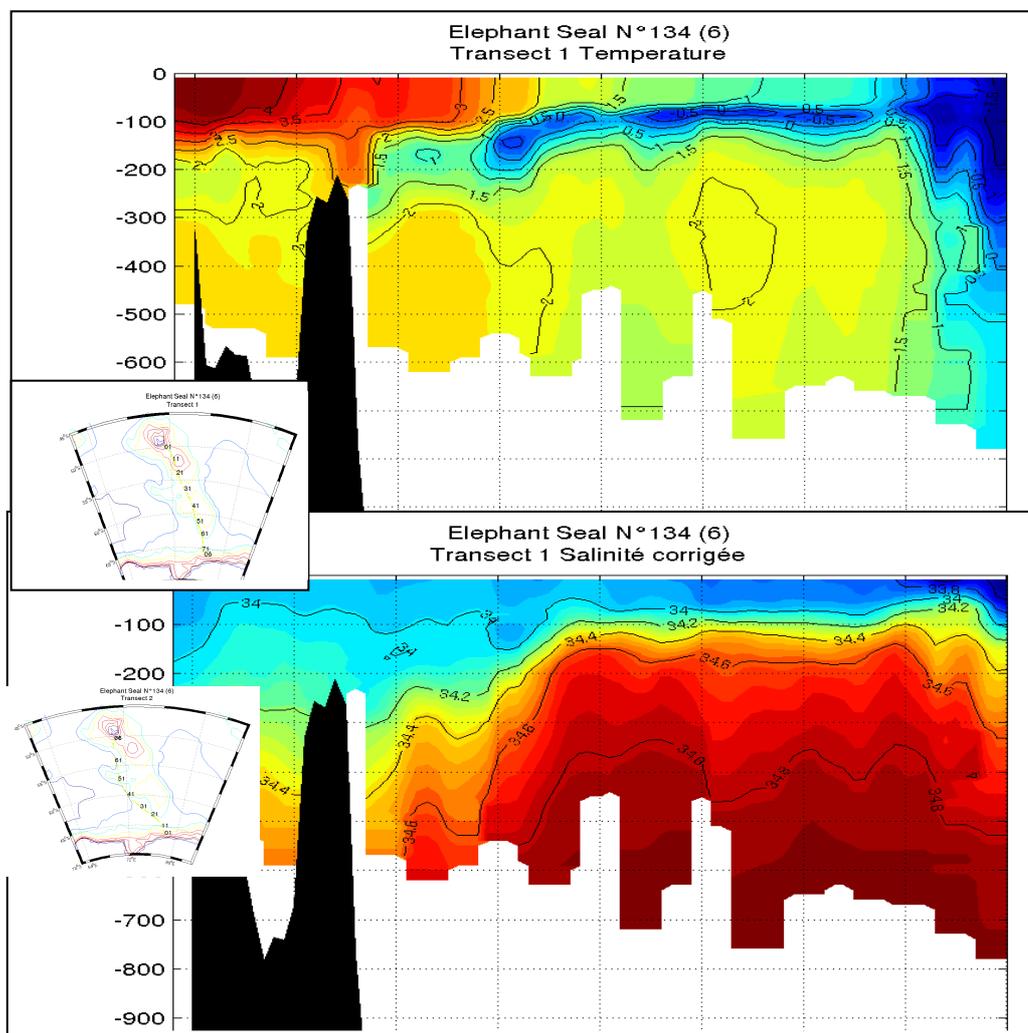


Figure 11 : Exemple de transect effectué par l'un des éléphant de mer Guillaume (N°134) entre Kerguelen et le continent antarctique du 1^{er} au 25 mars 2004 (représenté dans l'image du centre).

Profils de température et salinité interpolés à partir des données collectées le long du trajet. Le plateau de la zone Kerguelen-Heard sous la trajectoire apparaît en noir.

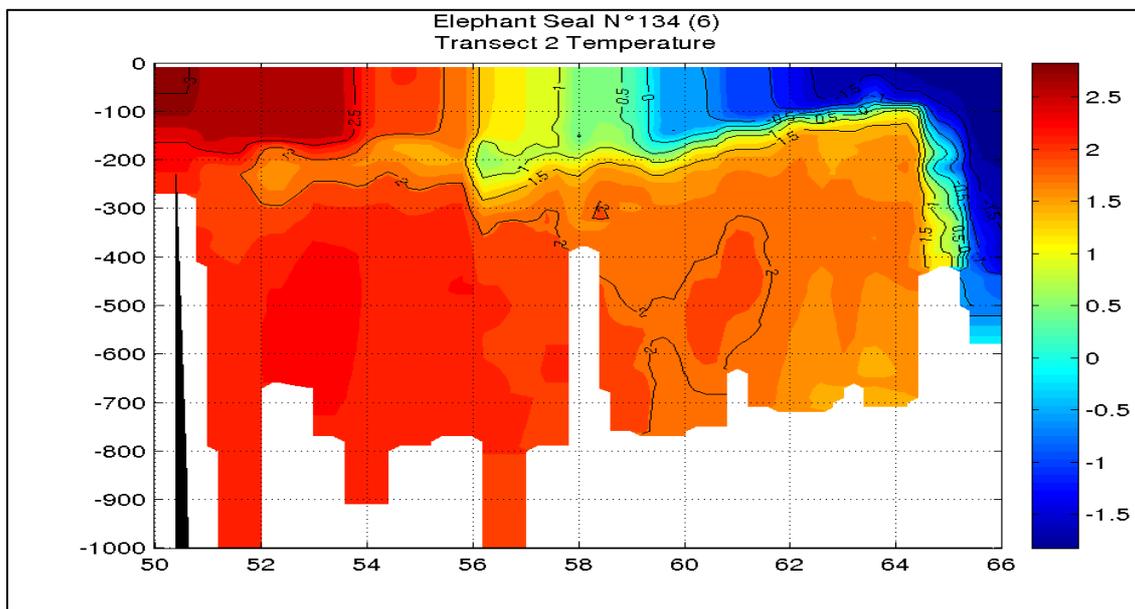


Figure 12 : Transect retour effectué par l'individu Guillaume entre le continent Antarctique et Kerguelen entre le 23 mai et le 17 juin 2004, et section verticale de température le long de ce transect.

Distribution spatiale des fronts de subsurface et la circulation inter-bassin associée

Les champs de température estivale à 100 m et à 200 m (Fig. 13) sont particulièrement instructifs pour mettre en évidence la présence de deux zones frontales bien distinctes, une le long du Fawn Trough et l'autre le long du continent Antarctique. La première apparaît comme le passage principal trans-plateau reliant le bassin d'Enderby à l'ouest et le bassin Antarctico-Australien à l'est. Il est fortement guidé par la topographie au fond et s'incurve vers le nord en allant vers l'est. Il est fort probable que ce courant du Fawn Trough soit la source du sous-courant froid portant vers le nord-ouest le long du flanc nord-est du plateau mis en évidence à l'aide des données des manchots instrumentés (Charrassin et al. 2004). Le front le long du continent Antarctique, également très apparent à 200 m, marque la transition du régime du CCA au nord vers le régime du courant côtier Antarctique orienté vers l'ouest dans le sud. Ainsi, cette première analyse des données éléphants de mer nous permet de dégager les grandes lignes de la circulation autour du plateau de Kerguelen, ce qui doit être poursuivi par des analyses plus fines et plus quantitatives.

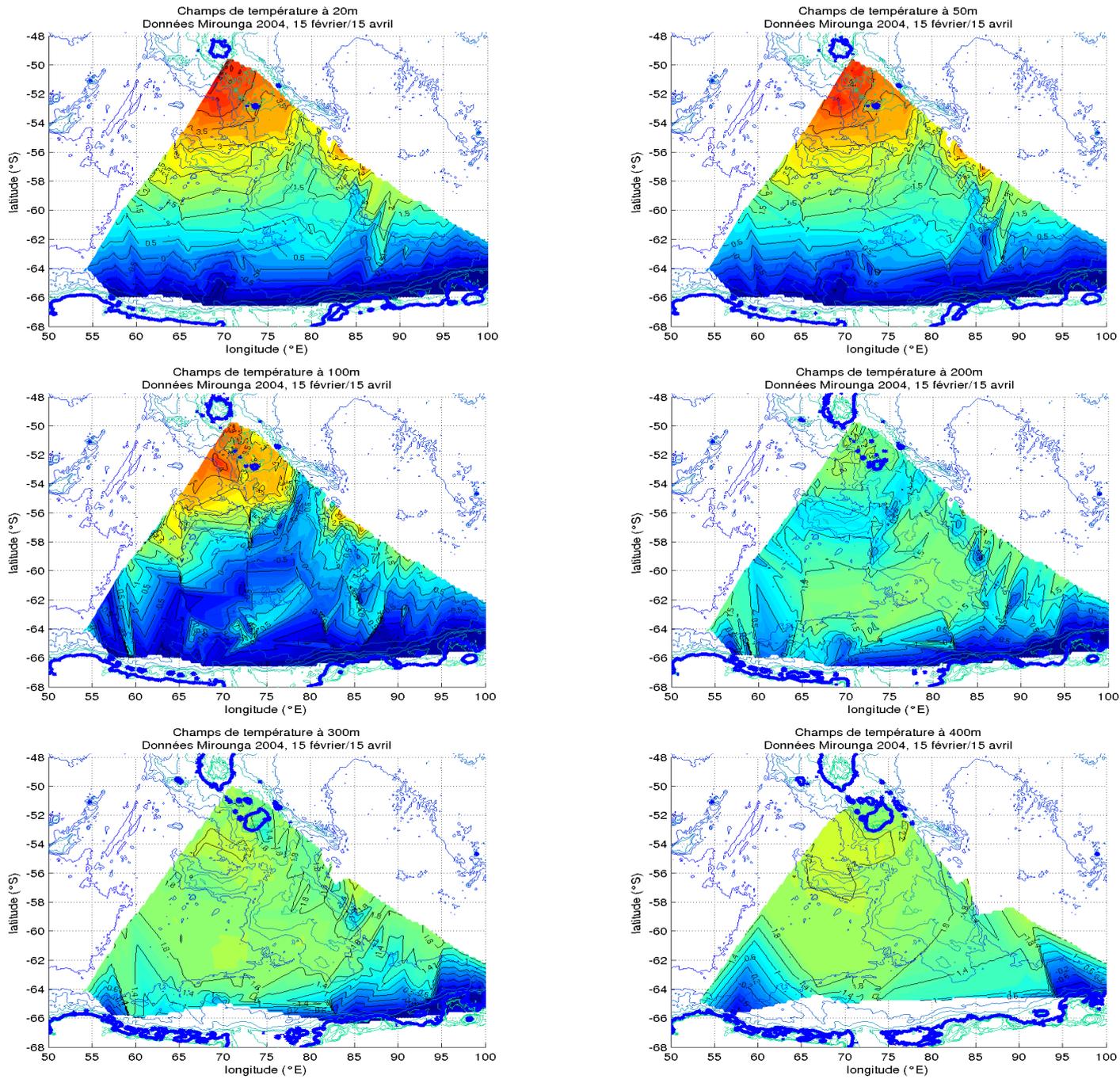


Figure 13 : Coupes horizontales à 20, 50, 100, 200, 300, et 400 m à partir des données de température collectées par les éléphants de mer le long des 8 transects antarctiques et interpolées par un modèle linéaire simple. La bathymétrie est tirée des données Smith & Sandwell (TOPO2). Pour chaque niveau, l'isobathe associée est représentée en trait bleu épais.