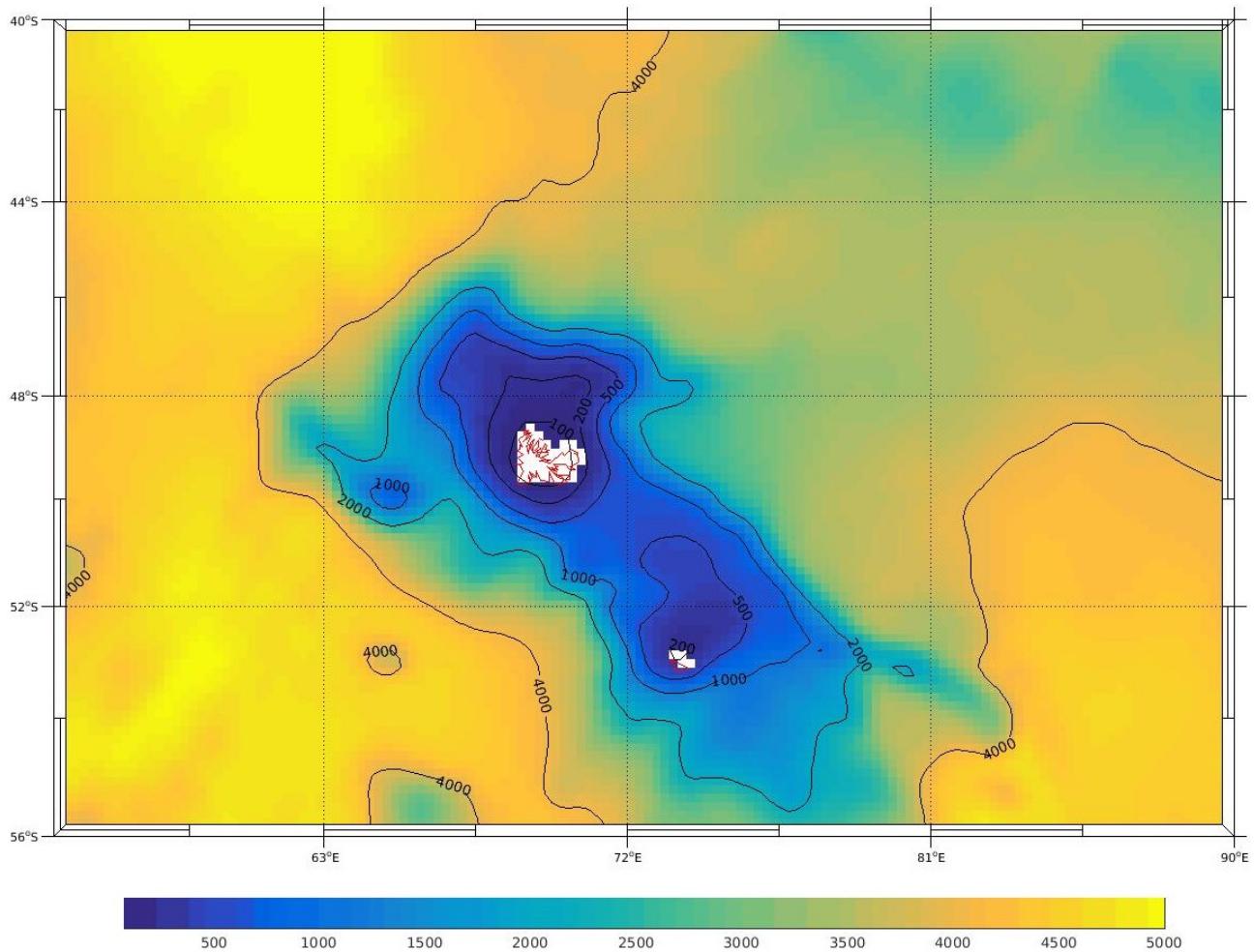


Étude du Front polaire aux alentours de Kerguelen à l'aide du modèle CROCO

Pierrick Lemasson

6 mai 2022



Master Sciences de la Mer
UE OPB205
MODÉLISATION 3D OCÉANIQUE

Encadrant : A.Doglioli

Résumé

Le plateau des Kerguelen est une région clé de l'Océan Austral, en effet outre l'obstruction du CCA (Courant Circumpolaire Antartique), cette région est marquée par une intensification de production primaire annuelle qui se met en place grâce à des apports de fer . La caractérisation des masses d'eau et fronts de la région est donc nécessaire pour mieux comprendre ces événements potentiellement cruciaux pour le climat.

Dans ce rapport l'objectif est de modéliser le front polaire au niveau de la région de Kerguelen avec le modèle océanique communautaire CROCO puis de discuter les simulations avec les conclusion de [Park *et al.*, 2014].

Globalement le modèle reste fidèle pour ce qui est des courants de surface (CCA), cependant pour le positionnement du front polaire on constate une dérive vers le Sud-Est de 5-6° vis à vis de [Park *et al.*, 2014]. Cela pourrait s'expliquer par un front polaire potentiellement sub-divisé en plusieurs branches au sud de Kerguelen, ou bien par une dérive du modèle due aux conditions initiales et de frontières dérivées de dataset globaux.

Abstract

There is a growing interest for the Kerguelen region due to a recurrent climatically important, and annually recurrent phytoplankton spring bloom enhanced by iron transfer. To better understand these process a precise determination of the water masses and fronts are necessary.

In this report the objective is to modelling the polar front (PF) around the kerguelen archipelago with the ocean community model CROCO in the aim to discuss the simulations with the conclusions of [Park *et al.*, 2014].

We find that overall the model remains faithful in terms of surface currents (CCA), however for the positioning of the polar front there is a drift towards the South-East of 5-6° with respect to [Park *et al.*, 2014]. This could be explained by a polar front potentially subdivided into several branches south of Kerguelen, or is due to initial and boundary conditions derived from global datasets.

Remerciements

Je tiens à remercier Mr. Andréa Doglioli pour nous avoir encadré dans cette initiation à la modélisation océanique malgré les difficultés rencontrées, ainsi que l'équipe informatique du MIO pour nous avoir laissé l'accès au cluster de calcul.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériels Méthodes	2
2.1	Le modèle CROCO	2
2.1.1	Les équations primitives	2
2.1.2	Méthodes numériques	3
2.2	Configurations	3
3	Résultats	5
3.1	Variations Annuelles et saisonnières	5
3.2	Comparaison avec Park et al 2014	6
3.3	Comparaison avec transects KEOPS2 (2011)	7
4	Conclusion	9
5	Annexes	10

1 Introduction

Le plateau de Kerguelen se situe dans l'océan Austral aux environs des 70°E, d'orientation quasi méridienne, il sépare les bassins Antarctico-Indien et Antarctico-Australien, et constitue un obstacle majeur au Courant Circumpolaire Antartique (CCA). Cet obstruction affecte de manière significative les voies de passage des masses d'eau, en cela la position du front polaire autour des Kerguelen a longtemps été débattu dans la littérature. Le front polaire se définit comme tel :

- •La limite nord du minimum de température de subsurface $\leq 2^{\circ}\text{C}$
- •Association avec une bande de courants forts du CCA

L'emplacement du front polaire est celui qui satisfait au mieux ces deux critères.

La détermination de sa position autour des Kerguelen est importante car cette région est marquée par des apports verticaux de fer, le tout dans un océan Austral à caractère HNLC (High nutrient Low chlorophylle) . Une production primaire intensifiée annuelle s'y développe alors pouvant avoir un rôle potentiellement important sur le climat. (Fig.1)

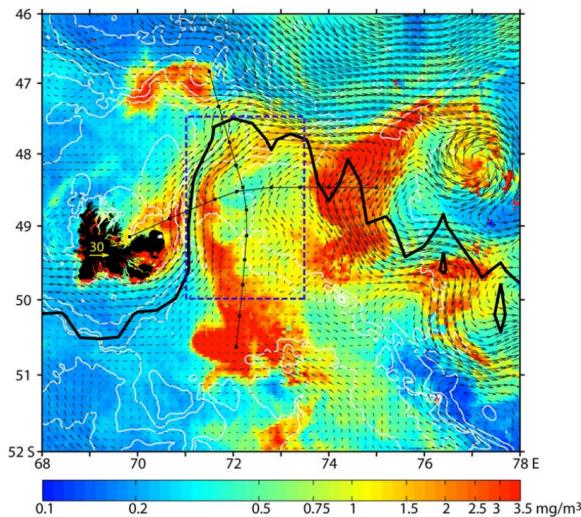


FIGURE 1 – Champs de vitesse de surface moyens sur une image satellite composite de chlorophylle α (en mg/m^3), observés lors de la campagne KEOPS2. Le Front polaire est représenté par la ligne noire.[Park *et al.*, 2014].

Dans le cadre de cette Unité d'Enseignement proposée par le master sciences de la mer d'Aix-Marseille Université, ayant pour objectif de familiariser les étudiants à la modélisation Océanique et plus particulièrement à la manipulation du modèle océanique CROCO¹ , j'ai fait le choix de me pencher sur la région de Kerguelen et notamment sur la position du Front Polaire. L'objectif de ce rapport est de discuter les résultats obtenus avec les conclusions avancées par [Park *et al.*, 2014] ainsi que sur les mesures *in-situ* de la campagne KEOPS2[B.Queguiner, 2011]

Le modèle CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity model) est un modèle numérique communautaire construit sur les bases de ROMS-AGRIF, et incluant le noyau non-hydrostatique de SYMPHONIE-NH, les algorithmes de MARS3D (sédiments) et HYCOM (coordonnées verticales). Les objectifs de CROCO sont de réunir une communauté de partenaires derrière un code pouvant résoudre des échelles très fines (zones cotières) et leurs interactions avec des échelles plus grandes.



1. « CROCO and CROCO-TOOLS are provided by <http://www.croco-ocean.org> ».

2 Matériels Méthodes

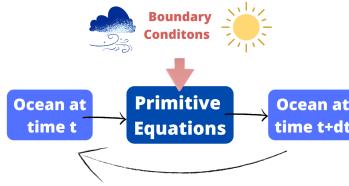


FIGURE 2 – Principe d'un modèle numérique océanique

2.1 Le modèle CROCO

2.1.1 Les équations primitives

Le modèle CROCO résoud les équations primitives dans les 3 dimensions :

- •1 Équations du mouvement de Navier-Stokes sur les composantes horizontales
- •2 Équation de la continuité sous l'hypothèse d'incompressibilité
- •3 Équations respectives de conservation de la température et la salinité
- •4 Équation d'état de l'eau de mer

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} u = fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \cdot \nabla_h^2 u + A_z \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} v = -fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \cdot \nabla_h^2 v + A_z \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T = K_h \nabla_h^2 T + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} S = K_h \nabla_h^2 S + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (4)$$

Avec **u, v, w** vitesses selon x, y et z ; **f** Le paramètre de Coriolis ; **ρ** La masse volumique ; **P** La pression ; **A_h, A_z** Coefficients de viscosité turbulente horizontale et verticale ; **g** L'accélération de la pesanteur ; **K_h, K_v** Coefficients de diffusion turbulente horizontale et verticale.

Pour la résolution de ces équations, plusieurs approximations sont réalisées : Fermeture Newtonienne de la turbulence (dont la méthode d'estimation du coefficient de viscosité turbulente verticale peut être définie : ici méthode KPP selon [Large *et al.*, 1994]) ; L'approximation hydrostatique et celle de Boussinesq ($\rho = \rho_0 + \rho'$) ; Et enfin les coefficients de diffusion turbulente horizontale et verticale sont obtenus en supposant les nombres de Prandtl et Schmidt égaux à 1 pour les phénomènes dus à la turbulence .

La hauteur dynamique est obtenue avec les équations "shallow water" (en supposant les composantes horizontales de la vitesse comme indépendantes de z.)

2.1.2 Méthodes numériques

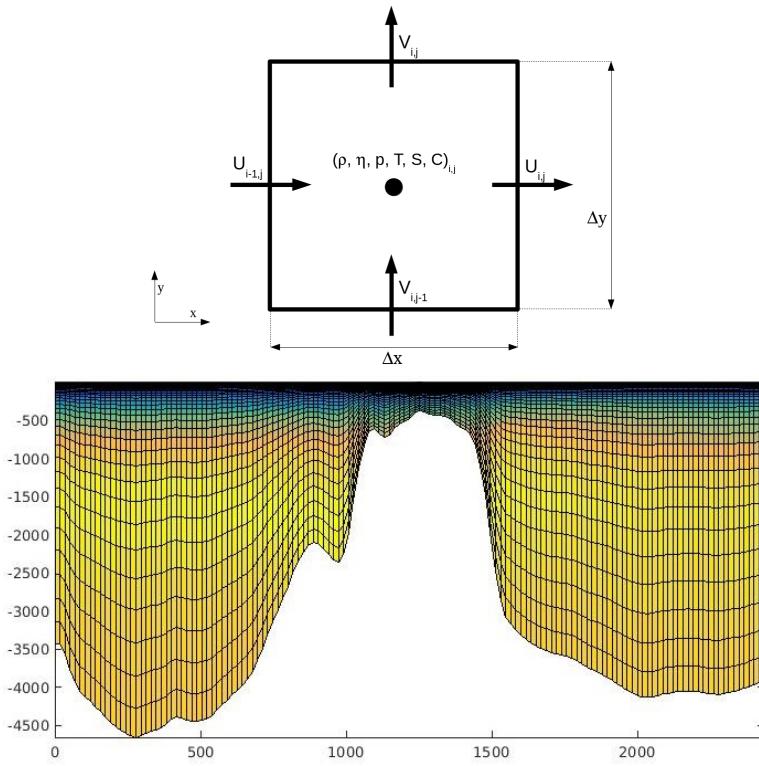


FIGURE 3 – **Haut** : Grille d’Arakawa-C. **Bas** : Représentation de 32 niveaux sur la verticale selon le modèle ‘*terrain-following*’

Comme illustré sur la Figure 3 le modèle utilise :

- •Une grille horizontale Arakawa-C permettant de faire un ‘bilan d’entrée-sortie’ pour chaque maille (Calcul des vitesses au niveau des faces de la maille et au centre pour les autres variables)
- •La coordonnée sigma (σ) (ou modèle dit de *terrain-following*) sur la verticale, permettant le suivi de la topographie du fond marin et d’avoir un nombre de niveaux verticaux constants.

CROCO est un modèle à surface libre, les ondes barotropes de gravité sont alors comprises dans les solutions, cependant compte tenu de leur vitesse de phase élevée ($C_0 = \sqrt{gH}$), l’échelle de temps nécessaire pour les décrire est très faible face à celle des autres processus. C’est pour cela que la technique dite du *time-splitting* est utilisée, elle consiste à résoudre les équations du mode ‘externe’ à des échelles de temps réduites Eq.(5) (*DTE*) face au mode ‘interne’(*DTI*) .

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{gH}} \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}\right)} \quad (5)$$

2.2 Configurations

Avant de lancer mes simulations j’ai déterminé une zone autour des Kerguelen de sorte à bien représenter le Front polaire (Selon les informations disponibles dans la littérature), le tout en faisant bien attention de ne pas aller plus au sud que -56°S pour ne pas atteindre les zones de formation de glace saisonnière.

La grille résultante est composée de $139 \times 96 \times 32 = 427\,000$ mailles et possède 4 frontières ouvertes.

Lat min	Lat max	Long min	Long max	LLm	MMm	Niveaux verticaux	Résolution
-56°N	-40°N	55°E	90°E	139	96	32	$\frac{1}{4}^\circ$

TABLE 1 – Configurations spatiales du modèle. LLm = nombre de mailles par grille u ; MMm = nombre de mailles par grille v

Avant de lancer la simulation, CROCO a besoin qu'on lui fournisse des conditions initiales et frontières, pour cela des '*global data set*' sont disponibles sur le site croco-ocean (WOA2009,Topo,COADS05), ces derniers contiennent des données atmosphériques, océaniques mais aussi topographiques. Ces données sont moyennées pour en sortir les conditions d'une année 'typique'. A l'aide des scripts matlab make-forcing et make-clim on charge pour chaque jour 'typique' : les conditions de vent , les flux de chaleur sensibles et latents à la surface, ainsi que la salinité et la température à l'horizontale et sur la vertical. Les courants de surface initiaux sont calculés au dessus d'une profondeur de *No-motion* par la méthode dynamique.

Durée	NTIMES	NTDFAST	DTE	DTI (NTDFASTxDTE)	AVG
10 ans	1800	60	24 sec	1440 sec	3j

TABLE 2 – Paramétrisation temporelle remplissant les conditions CFL (Courant-Friedrichs-Levy) de l'équation (5) . AVG représente la fréquence d'enregistrement des simulations moyennées sur le même temps

Avant d'exploiter les sorties de notre simulation il faut vérifier leur fiabilité ainsi que celle des conditions aux frontières mises en place, pour cela on réalise un diagnostic Fig.4 consistant en une vérification des règles de physique de bases : Conservation de la masse, de l'énergie, de la chaleur et du sel.

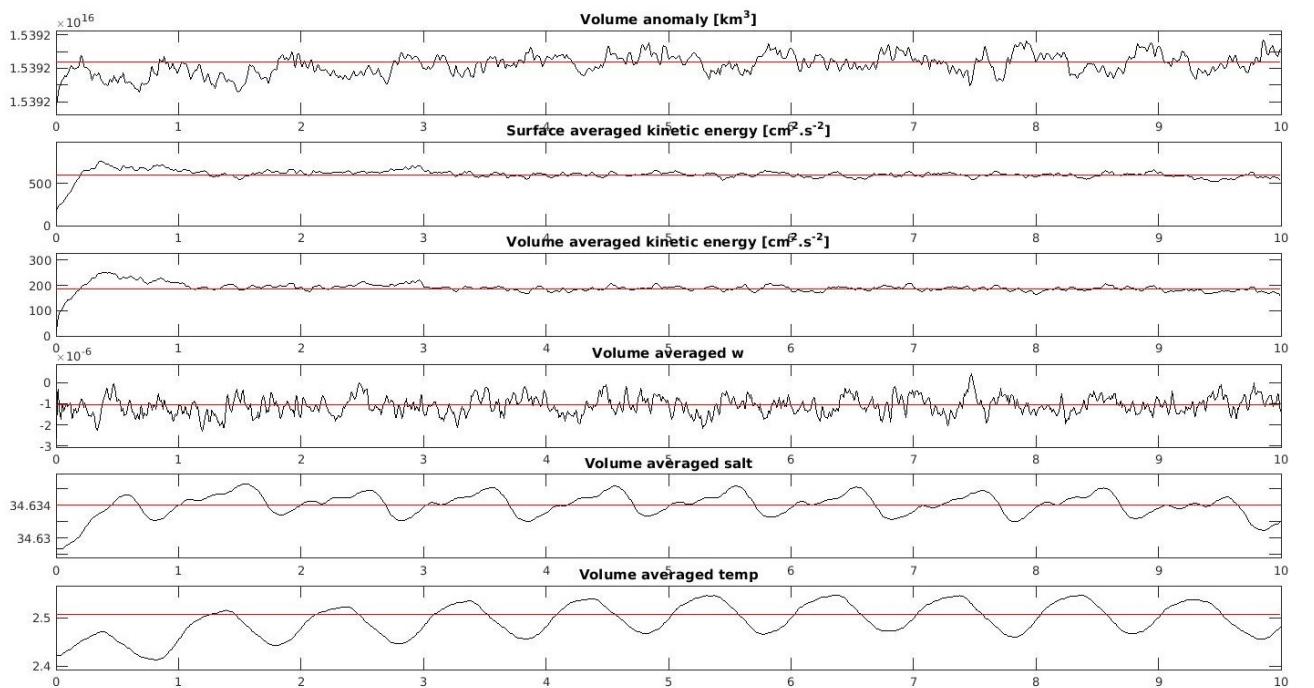


FIGURE 4 – Diagnostic de la simulation. La moyenne des oscillations est représentée en rouge

On remarque tout d'abord que l'énergie cinétique augmente fortement en début de simulation car les vitesses initiales calculées par la méthode dynamique sont nulles en dessous de la profondeur de no-motion (ici $z_{ref}=1000m$). Pour chacune des variables on remarque un temps de spin-up d'environ 3-4 ans (= temps pour que le modèle s'affranchisse des Conditions Initiales), ainsi qu'une certaine saisonnalité. Cependant entre la 9^{ème} et la 10^{ème} année on remarque une légère anomalie au niveau de la Salinité.

Finalement, pour l'exploitation nous utiliserons les années de simulation de la 5^{ème} à la 9^{ème}.

3 Résultats

En guise de comparatif nous utiliserons le papier de [Park *et al.*, 2014] à travers lequel ils souhaitaient mettre fin aux incertitudes concernant la position du front polaire, le tout sur la base de mesures *in-situ* et notamment avec celles collectées dans le cadre de la campagne KEOPS2.

3.1 Variations Annuelles et saisonnières

Dans un premier temps, j'ai voulu mettre en évidence si dans mes simulations apparaissait une variation inter-annuelle et/ou saisonnière des positions du front polaire ainsi que de celles des veines de courant du CCA. (Fig.5)

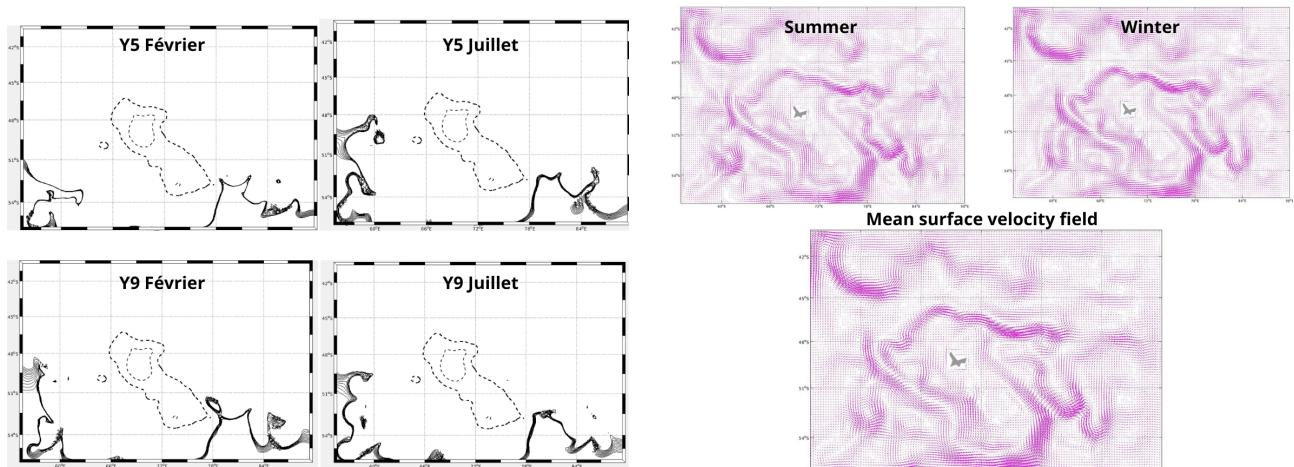


FIGURE 5 – Gauche : Variations inter-annuelles et saisonnières de la position du Front Polaire pour les années 5 et 9 aux mois de Février (été) et Janvier (hiver). Les isobathes sont de -200 et -1000m. **Droite :** Courant de surface moyen pendant les années 5 à 9 en été (Mois : Décembre, Janvier, Février) et en hiver (Juin, Juillet, Août) puis sur toute l'année.

J'ai démarqué le front polaire avec la fonction m-contour de croco-gui.m, en réalisant des isothermes entre 2 et 2.3°C, le tout à -200m de profondeur car c'est celle caractéristique des eaux hivernales de sub-surface présentent au sud du front polaire. On remarque avec la Figure 5, que le front polaire et les veines de courant du CCA varient peu le long des années typiques simulées.

3.2 Comparaison avec Park et al 2014

En accord avec la définition du front polaire donnée en début de rapport, j'ai fait le parallèle entre le champ de courant moyen (années 5 à 9) et la position du front polaire . J'ai ainsi pu comparer mes sorties de modèle avec les résultats présentés dans l'article de [Park *et al.*, 2014].(Fig.6)

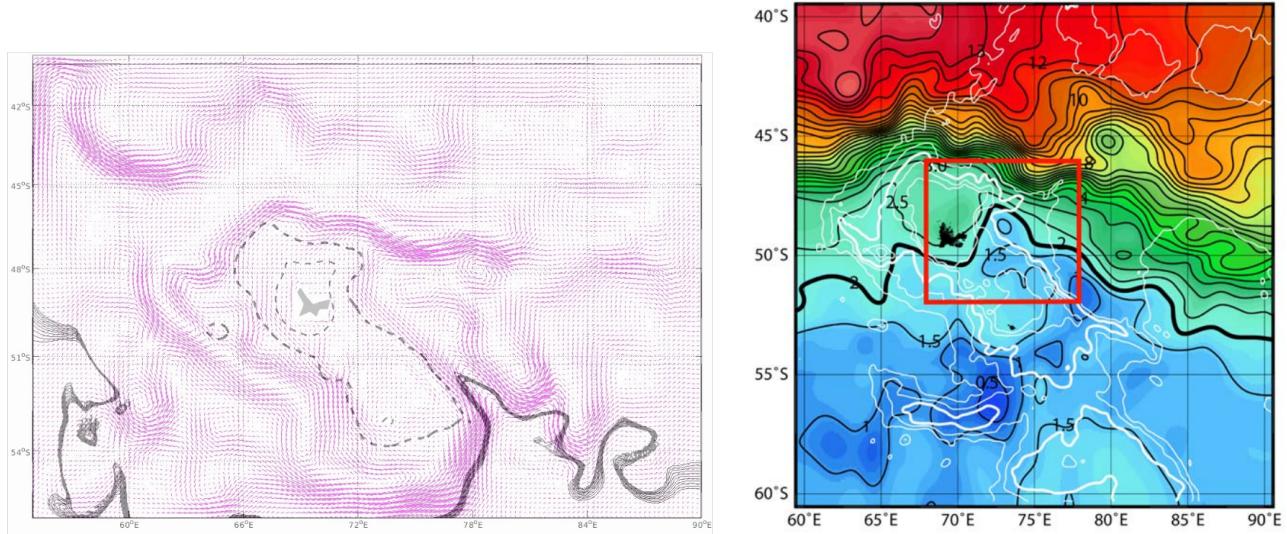


FIGURE 6 – Gauche Front polaire de l'année 8 en (été) superposé avec le champs de vitesses moyen. (Les isobathes, en pointillés sont de 200 et 1000m) . **Droite** Température à 200m de profondeur.Le Front polaire est représenté par la ligne noire.[Park *et al.*, 2014].

On remarque avec la Figure 6, que l'allure globale du front polaire semble correspondre mais par rapport aux conclusions de [Park *et al.*, 2014], il se retrouve environ 5° trop au Sud et 6° trop à l'Est. Comparatif déduit de la caractéristique remontée du front polaire par le sud de Kerguelen jusqu'à 47°S retrouvée normalement aux alentours des 70°E.

Concernant les courants de surface on remarque que notre front polaire est associé à une veine de courant contournant l'isobathe 1000m, cette dernière correspond à une branche du *Fawn Through* représentée sur la Figure 5 en Annexe.

On constate alors que notre modèle représente fiablement les différentes voies du passage du CCA à travers la topographie du plateau (Fig.5), cependant la position de notre front polaire quant à elle a dérivé de quelques degrés au sud-est. Cela peut trouver source dans plusieurs hypothèses : 1) Dans son livre "l'Océan planétaire" [M.Fieux, 2010] précise que le FP persiste de façon relativement continue tout le long du CCA mais se scinde parfois en plusieurs branches au sud de Kerguelen. Impliquant alors que les différences constatées ne seraient pas dues à une dérive du modèle. 2) Les conditions frontières et initiales utilisées proviennent de 'global data set', le modèle ne peut alors ressortir exactement les mêmes observations qu'in-situ. Pour éviter cette dérive vers le Sud-Est et correspondre parfaitement, il faudrait '*taper dessus à coup de données*'.

Enfin comme montré par la Figure 1 , le front polaire à l'est de kerguelen semble être associé à des concentrations en chlorophylle α particulières, il aurait été alors intéressant d'ajouter les composantes biogéochimiques et biologiques au modèle afin de voir si les mêmes dérives que le front polaire y sont associées. (Rq :La composante océanographique de CROCO peut être couplée avec des simulations des cycles biogéochimiques et des écosystèmes.)

3.3 Comparaison avec transects KEOPS2 (2011)

Afin de réaliser des comparaisons de température sur la verticale j'ai repris des transects obtenus en 2011 dans le cadre de la campagne KEOPS2. J'ai ainsi utilisé des parties des transects O-E et N-S présentés en rouge dans la Figure 7 afin de les comparer aux sections verticales présentent dans l'article de [Park *et al.*, 2014](Fig.8).

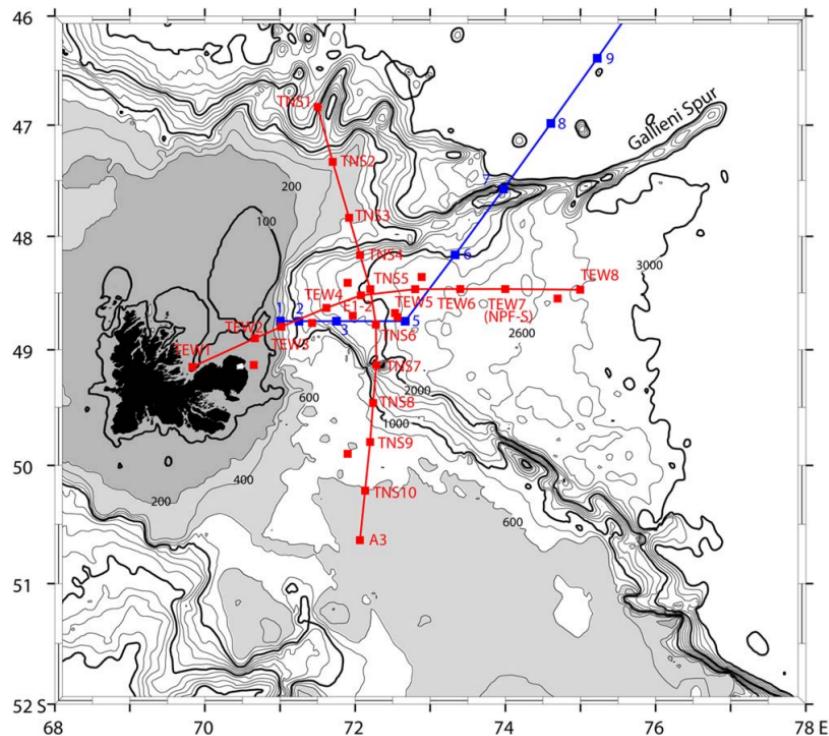


FIGURE 7 – En rouge les stations de CTD de la campagne KEOPS 2011 superposées sur les détails bathymétriques [Park *et al.*, 2014].

J'ai réalisé deux sections verticales, une entre les stations TNS5 à TNS1 pour celle Nord-Sud et entre les E1-2 à TEW8 pour celle Ouest- Est.(Les positions des stations sont disponibles dans la Tab.3 en Annexe)

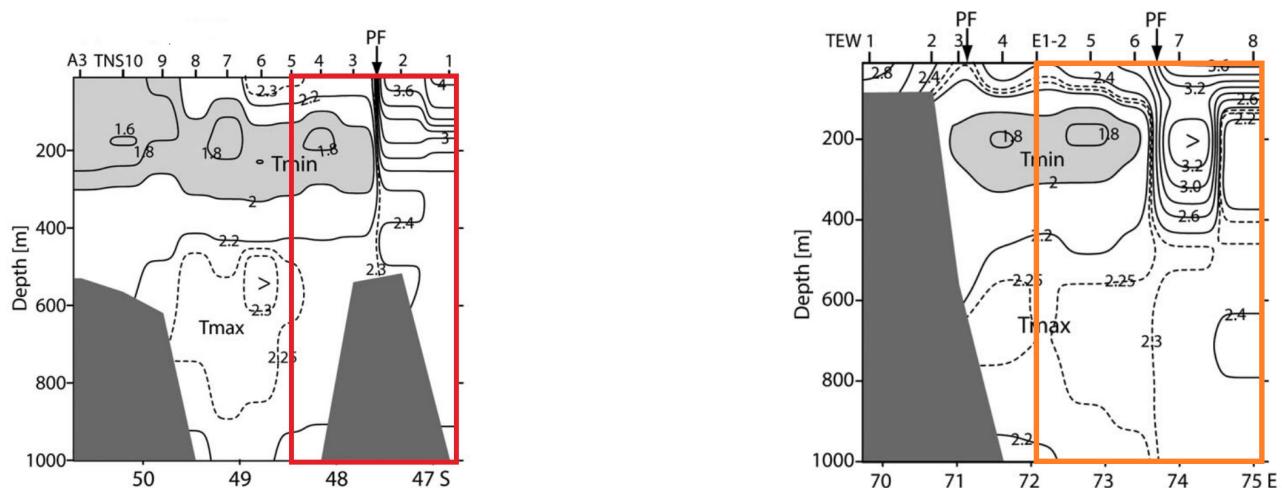


FIGURE 8 – Gauche Transect Sud-Nord. Droite Transect Ouest-Est [Park *et al.*, 2014].

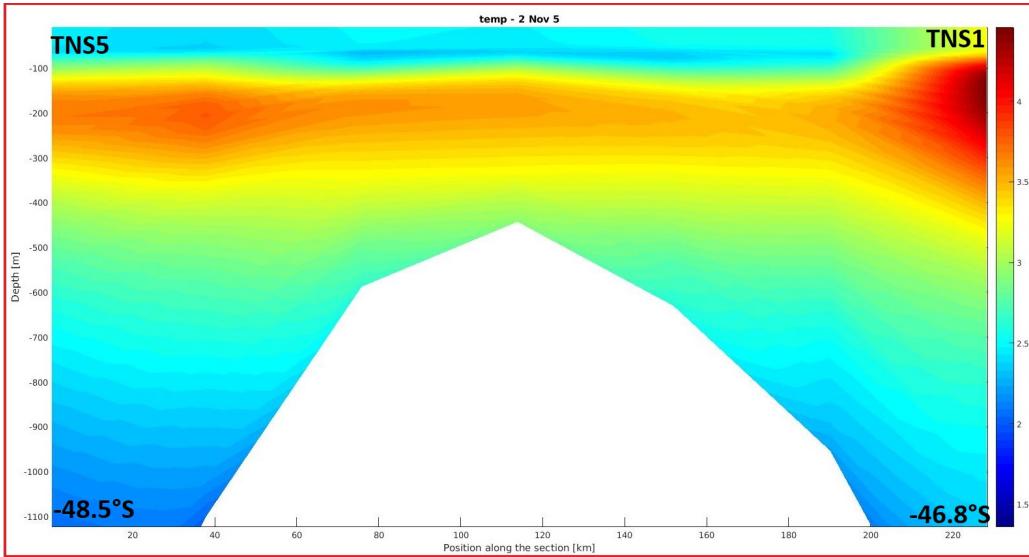


FIGURE 9 – La section verticale correspondant au rectangle rouge de la Figure 8, réalisée au mois de Novembre comme la campagne KEOPS

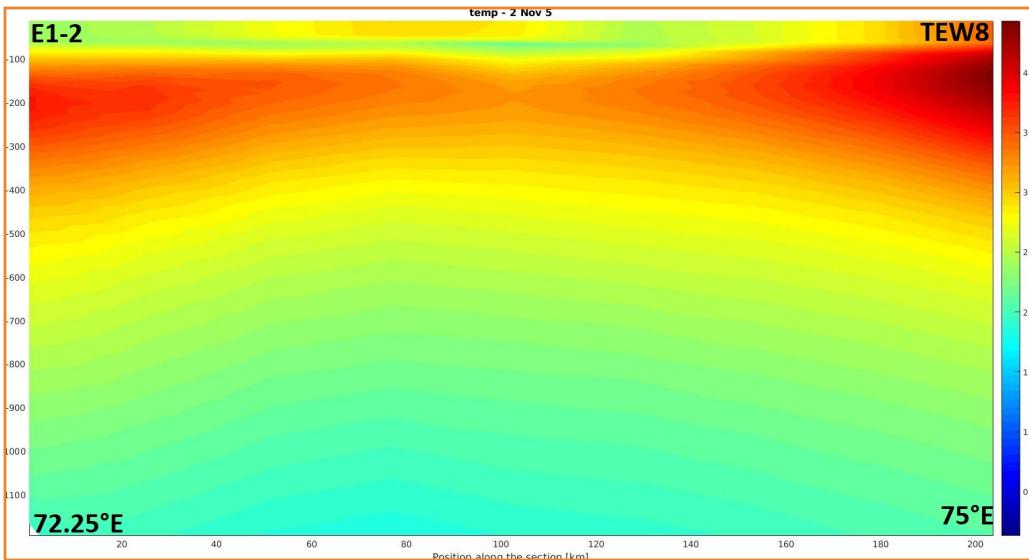


FIGURE 10 – La section verticale correspondant au rectangle Orange de la Figure 8 réalisée au mois de Novembre comme la campagne KEOPS

On ne retrouve pas du tout les mêmes sections verticales entre la simulation et les observations *in-situ*, on remarque que les températures sont globalement supérieures dans la simulation, en effet les eaux de subsurfaces entre 100 et 300m de profondeur présentent un maximum de température alors qu'elles sont censées représenter l'inverse. Cependant tout cela n'est pas étonnant aux vues de la dérive vers le Sud du front polaire simulé décrit précédemment. Compte tenu de leurs températures de 3-4°C et de la dérive sud apparente du modèle vis à vis des températures, la masse d'eau présente entre 100 et 300m de profondeur pourrait correspondre à l'eau antartique intermédiaire.

4 Conclusion

Pour conclure ce rapport nous avons tout d'abord vu que déterminer la position du Front Polaire est déterminant au niveau des Kerguelen, car cette région est associée à une intensification annuelle de production primaire liée à un apport de fer.

Dans ce rapport nous avons comparé des sorties du modèle CROCO centrées sur Kergulen avec des données provenant de la campagne KEOPS2011 ainsi qu'avec les conclusions de [Park *et al.*, 2014]. Nous avons alors pu constater que le modèle représentait assez fidèlement les veines de courant du CCA schématisées dans la Figure 5, cependant il en est tout autre pour la température. En effet, le front polaire simulé se trouve être davantage au Sud-Est en comparaison avec [Park *et al.*, 2014], de ce fait les sections verticales réalisées se trouvaient être plus chaude que celles obtenues in-situ.

A cela différentes hypothèses ont été posées pour tenter d'expliquer cette dérive Sud-Est, la première comme quoi au sud de Kerguelen le front polaire peut se subdiviser en plusieurs branches et que notre simulation et [Park *et al.*, 2014] en présentent tous deux une partie ; La seconde stipule que la dérive du modèle proviendrait des conditions initiales et aux frontières obtenues à partir des '*global set data*' utilisées.

Enfin pour terminer, la température et la vitesse étant toutes deux dépendantes de coefficients liés à la turbulence, il serait intéressant de réaliser les mêmes simulations mais avec une autre méthode de fermeture et ainsi voir si le front polaire simulé présente le même comportement.

Références

- [B.Queguiner, 2011] B.QUEGUINER (2011). Keops 2 cruise, marion dufresne.
- [Large *et al.*, 1994] LARGE *et al.* (1994). Oceanic vertical mixing :review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Reviews of Geophysics*, 32.
- [M.Fieux, 2010] M.FIEUX (2010). *L'océan planétaire*. La Presse de L'ENSTA.
- [Park *et al.*, 2014] PARK *et al.* (2014). Polar front around the kerguelen islands : An up-to-date determination and associated circulation of surface/subsurface waters. *Geophysical Research*, 119(10):6575–6592.

5 Annexes

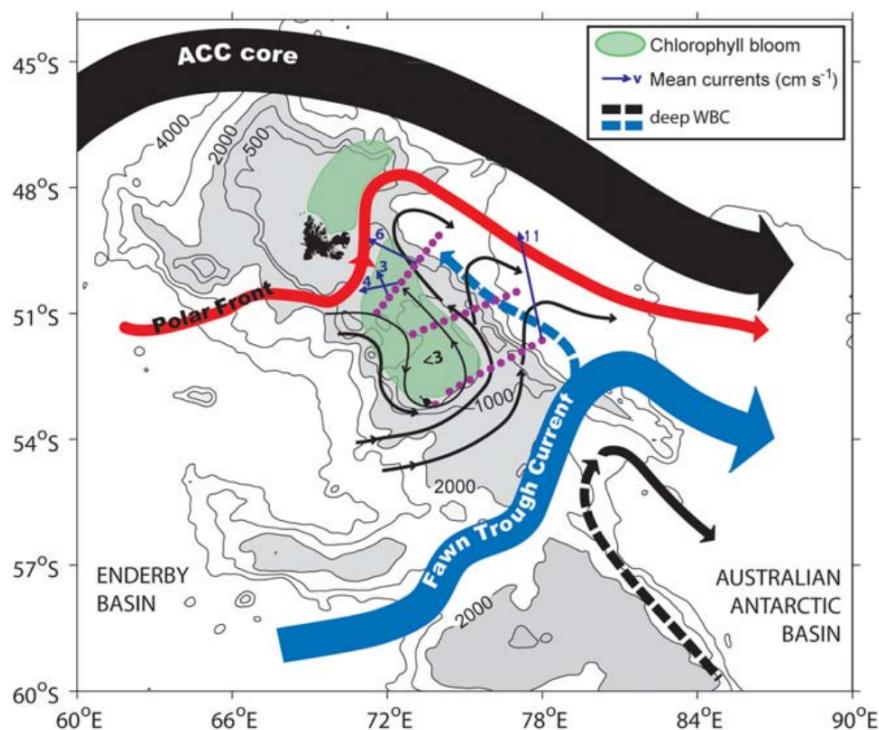


FIGURE 11 – Schéma de la circulation générale autour du plateau de Kerguelen.[Park *et al.*, 2014]

TNS5	TNS1	E1-2	TEW8
-48.5°S 72.25°E	-46.8 °S 71.5°N	-48.5°S 72°E	-48.47°S 74.9°E

TABLE 3 – Les coordonnées des Stations de début et fin de transect [B.Queguiner, 2011]