

Modélisation en 3 dimensions du Passage de Drake et utilisation du pack ROMS : Description et analyse du modèle

BRUNETEAU Ugo
M1 Sciences de la Mer
Parcours Océanographie Physique et Biogéochimique
Modélisation 3D - OPB205
Année 2018/2019

Key words : ROMS, Modeling, Passage, Drake

Abstract

During the last decades, the use of computers allowed the democratization of numerical modeling. Among them, ROMS, for Regional Oceanic Modeling System, allows the 2D and 3D modeling of the oceanic circulation, and discretizes the primitive and conservative equations. This report describes, validates, and criticizes a three-dimensional, ten years model of the circulation of the Drake Passage, comparing them to results available in the scientific literature. Comparative data seem consistent, and the model can be considered validated.

Mots clés : ROMS, Modélisation, Passage, Drake

Résumé

Au cours des dernières décennies, l'utilisation de supports informatiques a permis la démocratisation des modélisations numériques. Parmi eux, ROMS, pour *Regional Oceanic Modeling System*, permet la modélisation 2D et 3D de la circulation océanique, et discrétise les équations primitives et de conservation. Ce rapport décrit, valide et critique une modélisation en trois dimensions sur dix ans de la circulation du passage de Drake en le comparant aux résultats disponibles dans la littérature scientifique. Les données comparées semblent chacune cohérentes, et le modèle peut être considéré comme validé.

1. Introduction

Le courant circumpolaire Antarctique s'écoule sous la forme d'un grand anneau qui relie les bassins océaniques majeurs entre eux. Il joue également un rôle capital dans la redistribution des masses d'eaux profondes dans le globe. Ce courant, au débit important, connaît un resserrement important au niveau du passage de Drake, alors que la péninsule Antarctique et la pointe argentine de la Terre de Feu réduisent la section à l'ordre du millier de kilomètres seulement. Cette région présente une bathymétrie contrastée, et une section transverse du passage révèle la présence de reliefs, tel que la dorsale de Scotia, et de nombreuses zones de fractures tectoniques. Il s'agit du lieu de rencontre des océans Atlantique, Pacifique et Austral, et la présence du front polaire induit un régime de vents particulièrement intenses. Ainsi, le passage est connu pour son agitation de surface et sa vorticité très importantes. L'hydrologie de la région est caractérisée par un flux important s'écoulant d'Ouest en Est, et par la séparation de deux branches de courant due à la dorsale de Scotia Ouest. La branche de surface, plus chaude, va par la suite s'engouffrer dans le courant des Malouines le long de la côte Ouest de l'Argentine. L'autre branche plus profonde va continuer son trajet vers l'Est avant de déboucher dans l'océan Indien.

L'objectif de l'étude est la validation d'une modélisation en trois dimensions de la circulation du passage de Drake à l'aide de l'outil ROMS_AGRIF, pour *Regional Oceanic Modeling System, Adaptive Grid Refinement in Fortran*.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Caractérisation du système

L'évolution d'un système selon ses dimensions d'espace et de temps peut être approximée à partir de conditions initiales suffisamment précises et de la résolution discrète d'équations dites primitives. Pour l'outil ROMS, ces équations sont décrites par rapport à un repère cartésien (O, x, y, z) dont l'origine O est fixée à la surface de l'océan au repos. Le vecteur x est orienté vers le Nord, le vecteur y vers l'Est et la verticalité est orientée en direction du zénith grâce au vecteur z .

2.2. Approximations et hypothèses

Pour résoudre numériquement les équations primitives, des hypothèses et approximations doivent être formulées. L'approximation de l'hydrostatique énonce que les déplacements horizontaux sont la résultante de la conservation de l'équilibre entre gradient de pression vertical et force d'attraction de la gravité terrestre. La relation de Boussinesq simplifie le calcul des variations de masse volumique comme la somme simple d'une masse volumique moyenne et d'une différence. L'approximation numérique de la fermeture de la turbulence est le sujet de nombreuses études, et dans le cas du modèle ROMS, la méthode dite de profil K de Large et al. (1994) est sélectionnée, ou modèle KPP. Cette méthode dissocie les termes des mélanges verticaux des couches de surface, nommées OBL pour *Ocean Boundary Layer* et des couches dites internes de l'océan. Ainsi, l'épaisseur et le mélange turbulent de l'OBL sont calculés à partir des forçages atmosphériques et les processus de mélange de l'océan interne dépendent de l'instabilité du nombre de Richardson, de l'action des ondes internes et des phénomènes dits de double diffusion.

2.3. Équations primitives

Les équations qui caractérisent les mouvements des masses d'eau sont les équations de Navier-Stokes, adaptées aux mouvements horizontaux. Associées à l'équation de continuité et à l'approximation de l'hydrostatique pour les déplacements verticaux, elles permettent la modélisation des mouvements d'eau dans les trois dimensions de l'espace.

Eq.1 : Les équations du mouvement

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + fv - \frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - fu - \frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z} \\ 0 = \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \end{array} \right.$$

Les variations physico-chimiques sont obtenues après discréétisation des équations de diffusion de chaleur de sel

Eq.2 : Les équations physico-chimique de diffusion

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = \frac{\partial \overline{T' u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{T' v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{T' w'}}{\partial z} + \frac{H_c}{\rho_0 C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} S = \frac{\partial \overline{S' u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{S' v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{S' w'}}{\partial z} \end{array} \right.$$

Et enfin, la densité est calculée à partir de l'équation d'état de l'eau de mer.

Tab.1 : Légende des termes en Eq.1 et Eq.2

u, v, w	Vecteur vitesse en x , y et z
ρ	Masse volumique
f	Paramètre de Coriolis
P	Pression
g	Accélération de pesanteur
T	Température
S	Salinité
\vec{v}	Vecteur vitesse
H_c	Flux solaire incident
C_p	Coefficient de chaleur massique

2.3. Discréétisation

La résolution numérique des équations nécessite la discréétisation de celles-ci en chacun des points d'espace et de temps. Pour ceci, le modèle suit un schéma à différences finies, décalé avant en temps et arrière en espace, ou *upwind*. Sur le plan horizontal, c'est une grille de type Arakawa C qui est choisie par le modèle ROMS. Pour le maillage vertical, une grille σ généralisée permet de conserver pour chaque point du plan horizontal un nombre de mailles verticales constant.

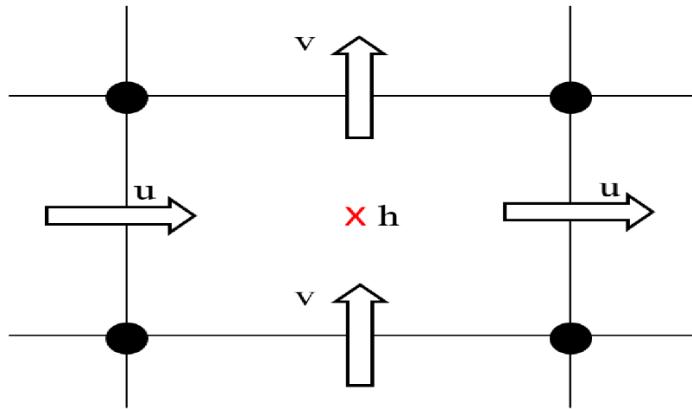


Fig.1 : Grille de type Arakawa C

Le choix du pas de temps et d'espace se fait en prenant en compte la relation qui les lie, le critère de stabilité de Courant-Friedrichs-Levy. Ce critère CFL n'est respecté que si un processus ne se propage pas plus vite qu'une maille d'espace par pas de temps. Les processus les plus rapides à prendre en compte sont sous la forme d'onde longue de gravité, dont la célérité est aisément obtenue comme étant la racine du produit de la profondeur et de l'accélération gravitationnelle.

2.4. Conditions limites et conditions aux frontières

Une résolution de système d'équations différentielles nécessite des conditions limites aux frontières bien posées, imposant une valeur ou un flux en ces points. Pour une modélisation en trois dimensions, les frontières sont les bords fermés, où transport et diffusion sont nécessairement nuls, et la surface, le fond et les bords ouverts. Pour la surface, le modèle ROMS considère la tension de surface du vent ainsi que les flux de chaleur et d'eau douce. Pour le fond, seule la tension de cisaillement des vitesses est prise en compte, et les échanges de sel et de chaleur sont nuls

Les conditions initiales proviennent des données du *World Ocean Atlas*.

2.5. Mise en place du modèle d'étude

La zone de calcul du modèle est délimitée de -69 à -44 degrés Est de longitude et de -63 à -54 Nord de latitude. La fenêtre ainsi dessinée comprend l'extrémité du cap Horn au Nord, et la bande des îles de Shetland du Sud au Sud. Elle encadre le Passage de Drake et la partie Ouest de la Mer de Scotia. Le courant de surface à l'entrée du courant de Malouine peut normalement être observé sous ces latitudes et longitudes. La zone est également assez septentrionale pour ne pas connaître des phénomènes de formation de glace de mer trop importants qui pourraient fausser le modèle. La résolution de la maille de grille horizontale est de 1/4 de degrés dans un compromis entre résolution fine et temps de calcul raisonnable. La taille en nombre de mailles de grille est ainsi sur la direction x de 99 cases et de 69 cases sur la direction y. Le nombre de niveaux verticaux est de 32 niveaux.

Tab.2 : Tableau des paramètres spatiaux

Nombre de maille Latitude, LLm	99
Nombre de maille Longitude, MMm	69
Taille de maille Latitude, Dx	16 km
Taille de maille Longitude, Dy	16 km
Hauteur maximum, Hmax	5000 m

Le critère CFL permet la détermination d'un pas de temps dt d'une valeur de 1440 secondes, soit 1800 itérations lors d'un mois de 30 jours. Une fois les 30 jours passés, la simulation est relancée à partir d'une nouvelle valeur initiale tirée des calculs de la simulation précédente.

Tab.3 : Tableau des paramètres temporelles

Pas de temps interne, dt ou DTI	1440 secondes
Pas de temps externe, NDTFAST	60 secondes
Itérations par simulation, NTIMES	1800 itérations (30 jours)
Fréquence de sauvegarde	180 itérations (3 jours)

Les conditions aux frontières ouvertes et à la surface, ainsi que les conditions initiales, sont obtenues à partir des données climatiques et de forçage du *World Ocean Atlas* à l'aide de scripts Matlab. Les quatre frontières sont pour cette modélisation ouvertes.

3. Résultats

3.1. Diagnostique du modèle

Un modèle ne peut être validé que si ses paramètres convergent chacun vers une valeur de stabilité. Un modèle pluriannuel permet de laisser au système le temps de se stabiliser autour de valeurs moyennes, avec la seule présence du signal oscillatoire des saisons.

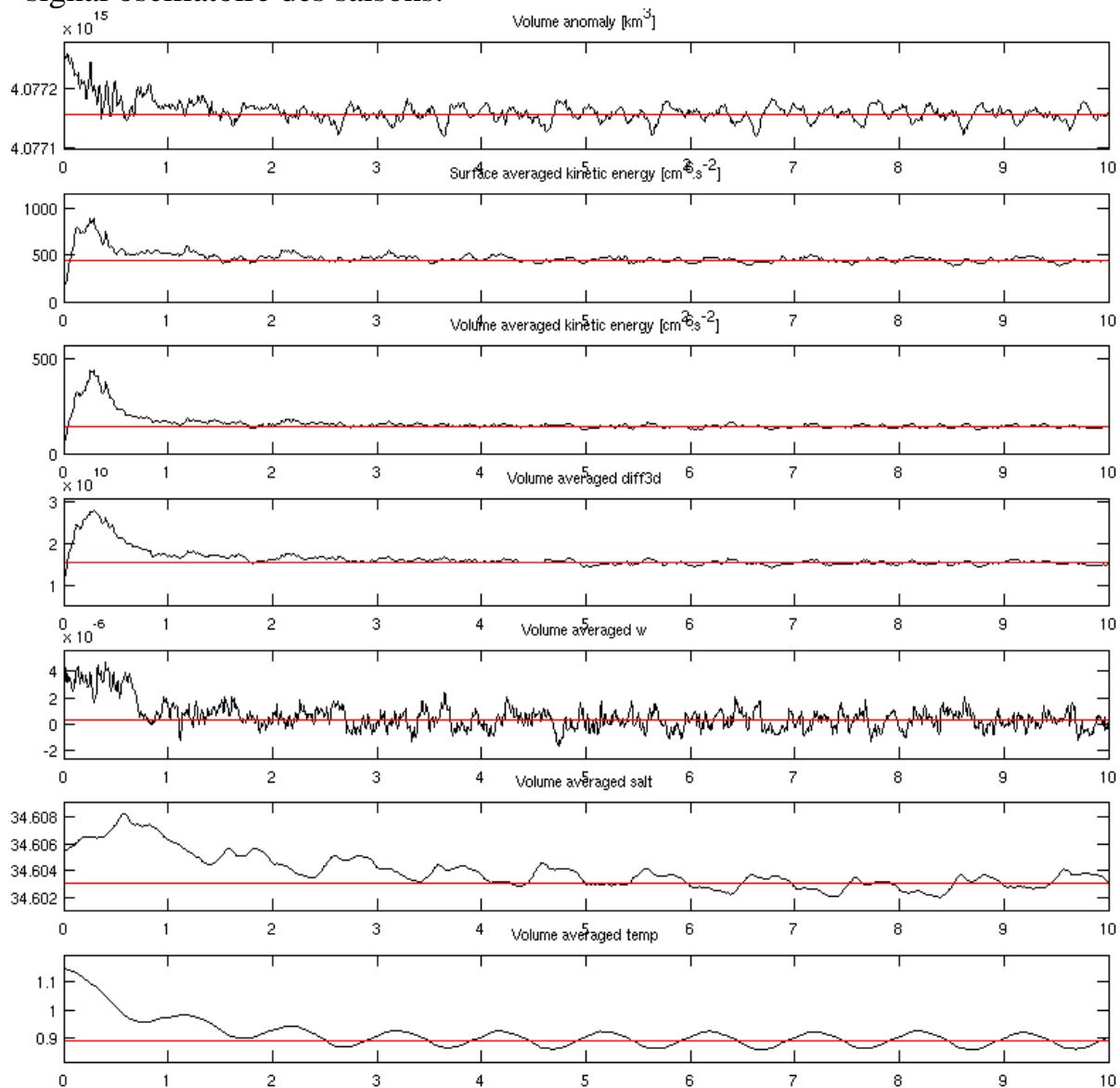
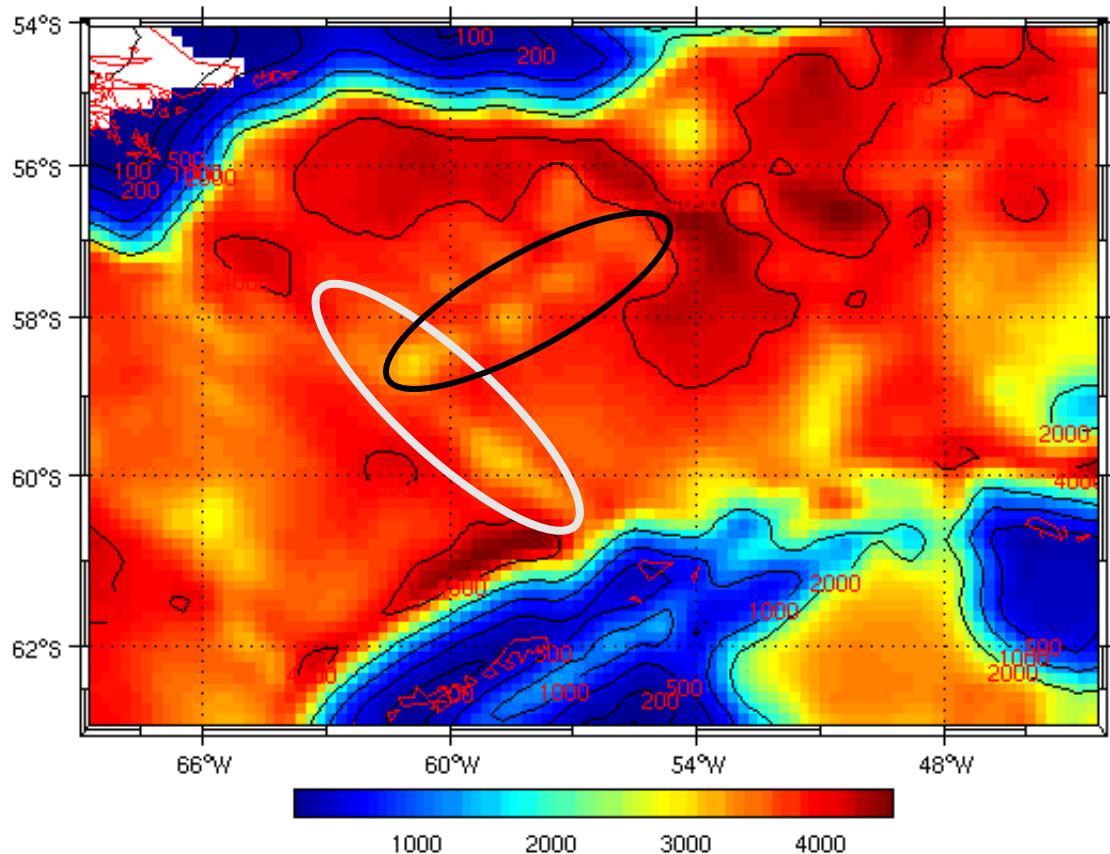


Fig.2 : Graphique diagnostique sur 10 ans. La stabilisation s'observe dès la quatrième année.

Il peut être observé que si certains paramètres se stabilisent dès la deuxième année, comme l'énergie cinétique ou l'anomalie de volume, les paramètres de température et de salinité tout particulièrement ont plus de difficultés à atteindre la stabilité.



*Fig.3 : Bathymétrie. En blanc : Shackelton fracture zone.
En noir :West Scotia Ridge*

La carte de la bathymétrie permet d'obtenir des informations sur les conditions de circulation du passage. Il peut y être observé les reliefs de la zone de fracture Shackleton, et de la dorsale de Scotia Ouest. Sur le bord Est, une ouverture bathymétrique peut être observée entre la péninsule Antarctique et le microcontinent des Orcades du Sud, et un mince col plus profond existe entre ce microcontinent et le talus sous-marin de Pirie.

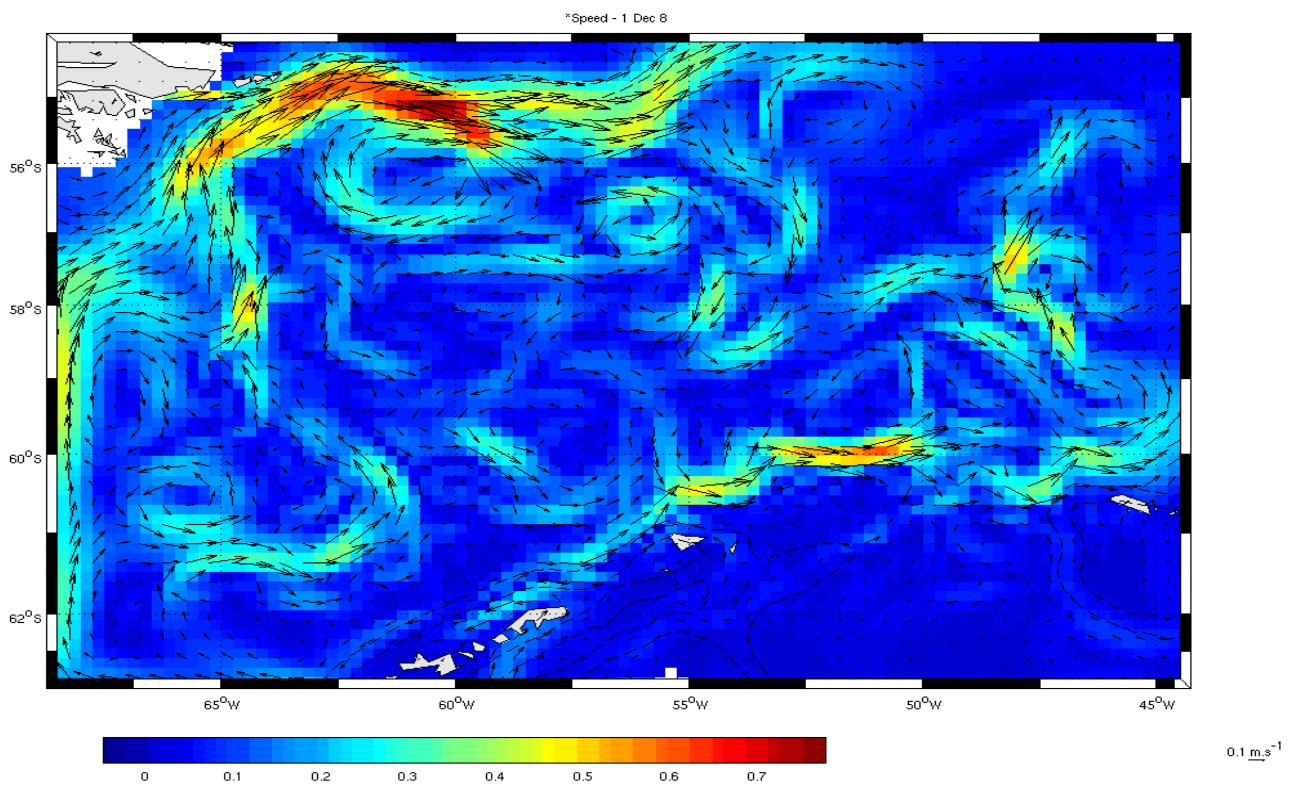


Fig.4 : Champs de vitesse à 100 mètres de profondeur. Année 8, Mois 12

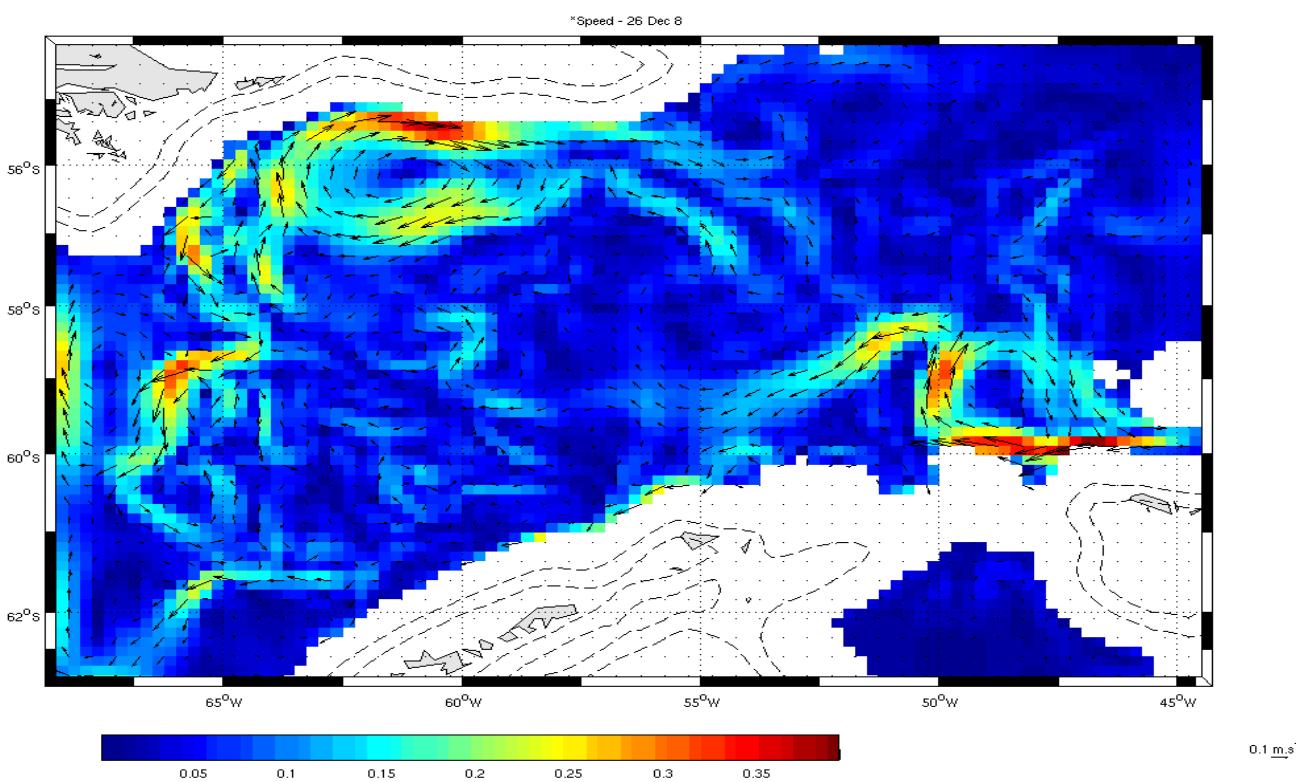


Fig.5 : Champs de vitesse à 2500 mètres de profondeur. Année 8, Mois 12

Les cartes de champs de vitesse du modèle sont en accord avec les courants intenses et fortement turbulents attendus. Dans la partie Nord, un courant peu profond dirigé vers l'Est, longeant le plateau continental Patagonien, peut être observé. Ce courant semble correspondre à la branche de courant circumpolaire supérieur, et nous pouvons supposer qu'il se prolonge en direction du Nord au travers du chenal des Malouines sous la forme du courant des Malouines. Un tourbillon cyclonique de grande taille peut également être observé au cours des années dans la continuité de ce courant.

Un autre courant peut également être observé en grande profondeur en région Sud Est de la fenêtre, le long du microcontinent des Orcades du Sud et du plateau de la péninsule Antarctique. Ce flux très sinueux se présente sous la forme de méandres et d'anneaux rapides, d'une vitesse d'environ 0.3 mètre par seconde, et étrangement dirigé dans le sens opposé au courant circumpolaire pourtant dominant de la région.

4. Analyse

Afin de pouvoir valider une modélisation numérique, il est nécessaire de comparer les résultats des calculs avec les données vérifiées de la littérature scientifique, qu'elles proviennent de campagnes *in situ* ou de modélisations ayant été préalablement validées. Dans un premier temps, la présence de l'important tourbillon cyclonique peut s'observer aisément dans l'article de R.Ferrari et al. (2013).

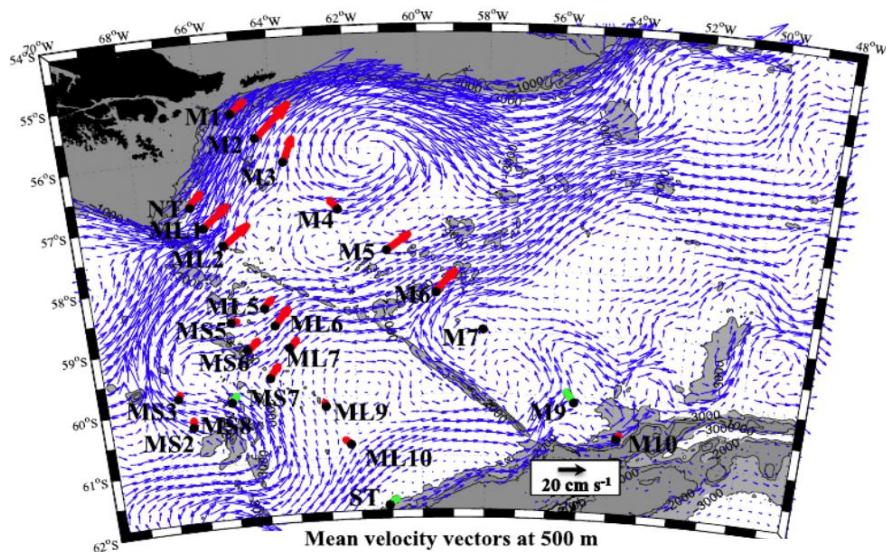


Fig.6 : Ferrari et al. (2013), vitesses moyennes obtenues par des mouillages ancrés à 500 mètres

Par la suite, l'article de A.C. Naveiro Garabato et al. (2002) permet de valider l'étrange courant profond dirigé vers l'Ouest comme une résultante de certaines des branches de courant d'Eau Profonde de Weddell (WSDW).

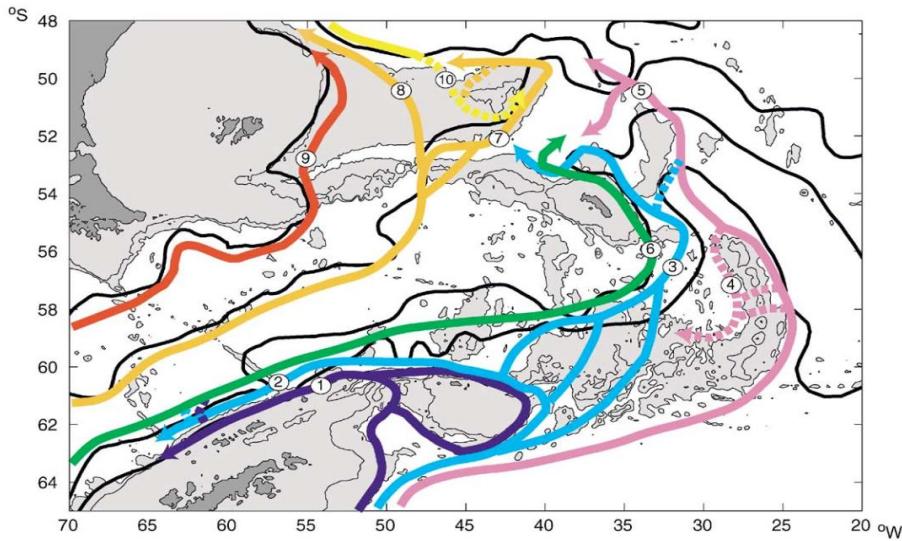


Fig.7 : A.C. Naveiro Garabato et al. (2002), routes principales d'Eau Profonde de Weddell au travers de la mer de Scotia

Enfin, afin de comparer quantitativement les données, un profil vertical de température et de salinité a été simulé, et un graphique température-salinité en un point précis du modèle, 56° Sud et $58^{\circ}53'$ Ouest, a été tracé. Ce graphique TS peut ainsi être comparé avec ceux de l'article de J.A. Brearley et al. (2013), provenant de plongées CTD effectuées entre 55° et $56^{\circ}06'$ Sud, et $58^{\circ}56'$ et $58^{\circ}50'$ Ouest.

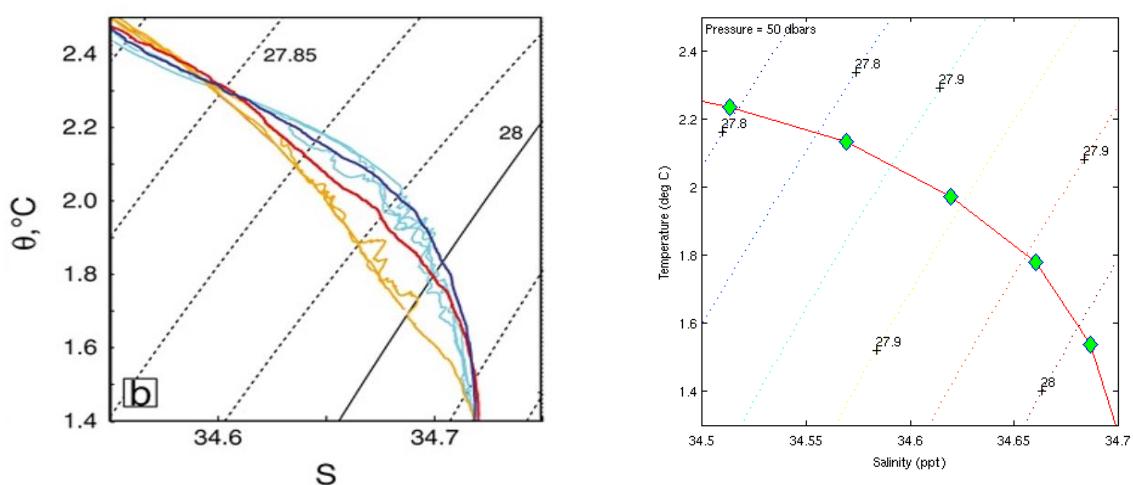


Fig.8 : A gauche, J.A. Brearley et al. (2013), diagramme TS provenant de plongées CTD. A droite, diagramme TS tiré d'une section verticale du modèle.

5. Conclusion

Le modèle pluriannuel semble juste et convergeant, et a été comparé tant qualitativement que quantitativement aux informations disponibles et avérées de la littérature scientifique à disposition, et peut donc être considéré comme validé. Le modèle pourrait cependant gagner en justesse et précision, en augmentant la résolution au détriment du temps de calcul, car la bathymétrie complexe de la région peut permettre des voies de circulation non prises en compte par le modèle actuel.

6. Bibliographie

Brearley, J. A. et al. Deep boundary current disintegration in Drake Passage: BOUNDARY CURRENT DISINTEGRATION. *Geophysical Research Letters* **41**, 121–127 (2014).

Ferrari, R. et al. Heat fluxes across the Antarctic Circumpolar Current in Drake Passage: Mean flow and eddy contributions. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **119**, 6381–6402 (2014).

Naveira Garabato, A. C., Heywood, K. J. & Stevens, D. P. Modification and pathways of Southern Ocean Deep Waters in the Scotia Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* **49**, 681–705 (2002).