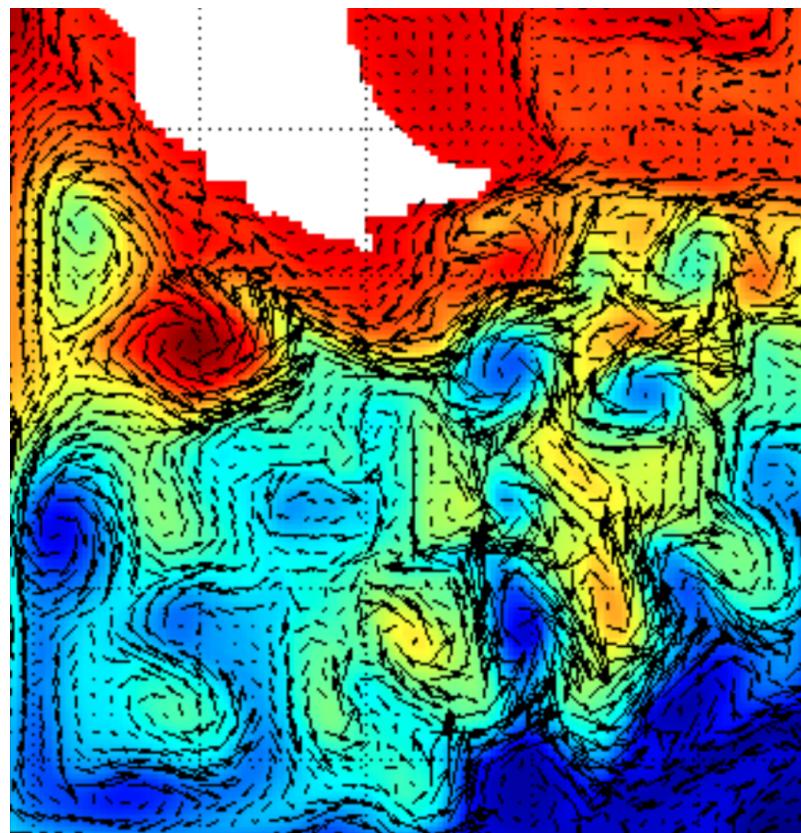


Master Sciences de la mer
OPB205 Modélisation 3D océanique

Responsable UE : A. Doglioli

**Modélisation 3D de la circulation océanique au
passage de Drake : interactions entre fronts,
eddies et propriétés thermohalines**



Guillaume HURUGUEN

Master 1 Sciences de la mer, parcours Océanographie Physique et Biogéochimique
Institut Pythéas, Aix-Marseille Université

Année académique : 2024/2025

Date de rendu : 25 Avril 2025

Résumé

Le passage de Drake est une région clé de l'océan Austral, caractérisée par le resserrement de l'océan entre la pointe de l'Amérique du Sud et la péninsule Antarctique. La canalisation de l'ACC et la topographie particulière en font une zone instable, marquée par de nombreux tourbillons. L'objectif de cette étude est la modélisation 3D de cette région à l'aide du modèle CROCO, afin d'analyser ses caractéristiques. Nous montrons que le modèle présente des variations saisonnières cohérentes avec les observations, avec une salinité plus faible en été, résultant de la fonte des glaces, et des eaux plus froides en surface qu'en profondeur en hiver. Cependant, le modèle présente des difficultés à reproduire le front polaire, caractérisé par un gradient thermique marqué. Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer ces résultats. Cela pourrait être dû à une homogénéisation accrue de la colonne d'eau par les tourbillons, empêchant le modèle de définir un gradient de SST. Une résolution horizontale insuffisante ou des conditions initiales et de forçage simplifiés pourraient également limiter la capacité du modèle à reproduire des variations fines de température à petite échelle, dans une zone aussi instable que le passage de Drake.

Abstract

The Drake Passage is a key region of the Southern Ocean, characterized by the narrowing of the ocean between the southern tip of South America and the Antarctic Peninsula. The channelling of the ACC and the particular topography make it an unstable area marked by numerous eddies. The objective of this study is the 3D modelling of this region using the CROCO model to analyze its characteristics. Here we show that the model exhibits seasonal variations consistent with observations, with lower salinity in summer due to ice melt and colder surface waters compared to deeper layers in winter. However, the model has difficulties reproducing the polar front, characterized by a marked thermal gradient. Several hypotheses have been proposed to explain these results. This could be due to increased homogenization of the water column by eddies, preventing the model from defining a SST gradient. Insufficient horizontal resolution or overly simplified initial and forcing conditions could also limit the model's ability to capture fine-scale temperature variations in such an unstable area as the Drake Passage.

Table des matières

1	Introduction	3
2	Matériels et Méthodes	4
2.1	Présentation des équations primitives	4
2.2	Le modèle CROCO : principe et caractéristiques	5
2.3	Etapes de configuration et paramétrage du modèle	6
3	Résultats	8
3.1	Diagnostics du modèle	8
3.2	Identification des fronts	9
3.3	Tourbillons	9
3.4	Variabilités saisonnières	10
4	Discussion	11
5	Conclusion	13

1 Introduction

L'océan Austral entoure le continent Antarctique sur 30° de latitude, faisant de lui le quatrième plus grand océan du monde. Il est dominé par la Circulation Circumpolaire Antarctique (ACC), considéré comme étant le courant océanique le plus puissant du globe. Ce courant, alimenté par les vents d'ouets, joue un rôle essentiel en connectant les bassins de l'Atlantique, du Pacifique et de l'océan Indien. Il est composé de plusieurs fronts qui délimitent des masses d'eau présentant des propriétés thermohalines distinctes. Les trois principaux fronts sont : le front subantarctique (SAF), le front polaire (PF) et le front sud de l'ACC (SACCF). Le SAF sépare les eaux relativement plus chaudes de l'océan Austral des eaux plus froides de l'Antarctique, tandis que le PF délimite les eaux subantarctiques des eaux polaires, avec un gradient thermique marqué.

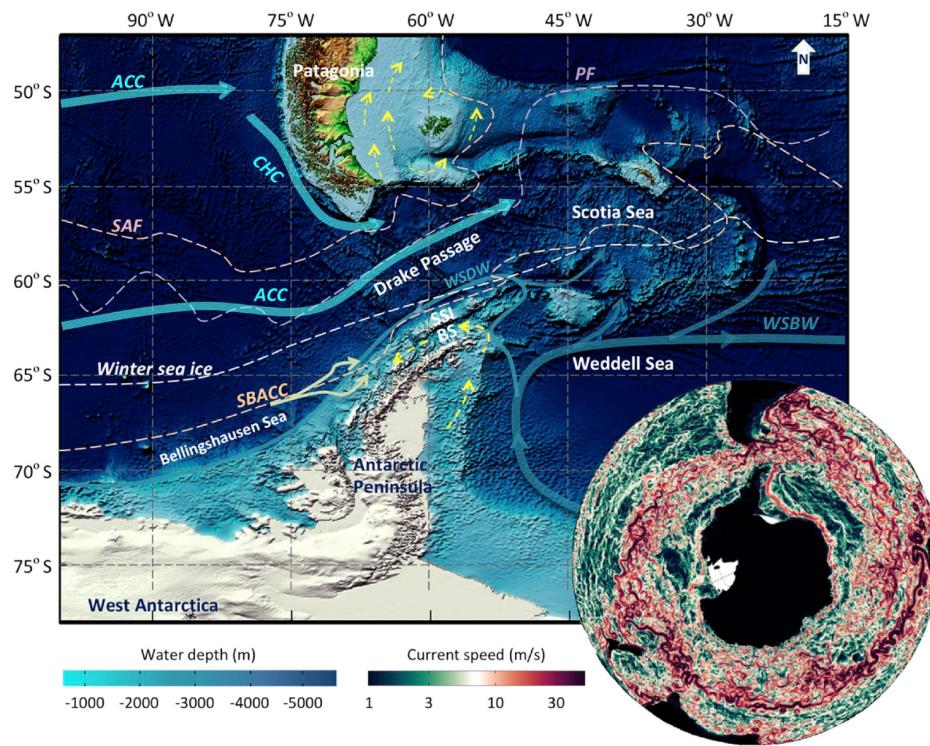


FIGURE 1 – Illustration de L'ACC et de ses fronts au passage de Drake (Shuzhuang Wu et al., 2019).

L'ACC et ses fronts se trouvent canalisés entre la pointe sud de l'Amérique du sud et la péninsule Antarctique. Ce resserrement, appelé passage de Drake, représente le point le plus étroit de l'océan Austral avec une largeur d'environ 7° de latitude. La canalisation d'un courant aussi puissant que l'ACC entraîne une dynamique complexe et de fortes instabilités faisant du passage de Drake une zone stratégiques pour les recherches océanographiques.

En effet, en raison de ses caractéristiques physiques extrêmes, le passage de Drake offre un cadre naturel pour étudier les phénomènes liés à la dynamique des courants, aux processus de mélange vertical, ainsi qu'à la circulation thermohaline. La modélisation de cette circulation océanique dans le passage de Drake a été réalisée à l'aide du modèle CROCO, permettant d'analyser et de visualiser les interactions entre les différents phénomènes dynamiques de cette région complexe.

2 Matériels et Méthodes

2.1 Présentation des équations primitives

L'élaboration d'un modèle numérique décrivant la circulation océanique se fait grâce à un système d'équation complexe. Afin d'obtenir des solutions, les équations doivent être discrétisées à l'aide d'un résolution optimale. Les équations primitives sont indispensables au bon fonctionnement de la majorité des modèles, car elles décrivent la dynamique d'une région océanique à travers le temps. Parmi celles-ci on retrouve tout d'abord les équations de Navier-Stokes qui décrivent le mouvement du fluide dans un repère cartésien, avec une simplification de l'équation sur la verticale par l'approximation hydrostatique (3).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + A_h \nabla_h^2 u + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + A_h \nabla_h^2 v + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$0 = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \quad (3)$$

Avec u, v, w les composantes de la vitesse selon les 3 dimensions de l'espace x, y, z , p la pression, ρ_0 la densité de référence de l'eau de mer selon l'approximation de Boussinesq, f le paramètre de Coriolis, A_h le coefficient de viscosité turbulente horizontale selon l'hypothèse de l'isotropie horizontale ($A_h = A_x = A_y$), A_z le coefficient de viscosité turbulente verticale et g la force de pesanteur.

Aux équations de Navier-Stokes s'ajoutent l'équation de conservation de la masse avec l'hypothèse d'incompressibilité (4), l'équation de conservation de la chaleur (5), l'équation de conservation de la quantité de sel (6) et enfin l'équation d'état de l'eau de mer établie par TEOS 10 (Thermodynamic Equation of SeaWater 2010) (7).

$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = K_h \nabla_h^2 T + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \cdot \nabla S = K_h \nabla_h^2 S + K_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S, z) \quad (7)$$

Avec T la température, S la salinité, K_h la diffusivité horizontale et K_z la diffusivité verticale (Les différences entre la salinité et la température des coefficients de diffusion horizontales et verticales sont négligées).

La discréétisation des équations dans un modèle océanique repose sur la définition d'une grille adaptée, c'est-à-dire un ensemble de points où la solution numérique sera calculée. Cette grille est essentielle pour déterminer l'approximation de la solution à chaque instant de temps. En plus de la grille, il est nécessaire de choisir des schémas numériques adéquats qui permettent de résoudre les équations discréétisées de manière stable et précise. Une fois ces éléments définis, les conditions initiales ainsi que les conditions aux frontières (à la surface et au fond) doivent être spécifiées à partir des données disponibles pour la région étudiée. Ces données servent de point de départ pour l'algorithme qui calcule l'état de l'océan au temps $t+1$. Grâce à cet algorithme, des simulations peuvent être lancées sur des périodes allant de quelques jours à plusieurs décennies, en fonction des objectifs de la modélisation. Ainsi, la discréétisation permet de représenter l'évolution de l'océan au fil du temps et d'obtenir des résultats pertinents pour l'étude de la circulation océanique.

2.2 Le modèle CROCO : principe et caractéristiques

CROCO (Coastal and Regional Ocean CCommunity) est un modèle océanique français, conçu pour simuler les dynamiques océaniques à des échelles régionales et côtières à l'aide d'une approche multi-échelle. Principalement basé sur le modèle ROMS AGRIF, il intègre également des éléments des codes MARS3D, HYCOM, SNH et SYCOM. Ce modèle est capable de résoudre les équations à très fines échelles, typiques des zones côtières, tout en prenant en compte leurs interactions avec des échelles plus larges. CROCO s'adapte à une variété de processus physiques, incluant l'atmosphère, les vagues de surface, les sédiments marins, la biogéochimie et les écosystèmes.

Le code source CROCO repose sur des routines en Fortran, des clés en langage C et des fichiers NetCDF pour les entrées et sorties de données. L'outil associé, CROCO TOOLS, fournit des scripts Matlab pour la paramétrisation, la préparation des simulations et la visualisation des résultats. Cette architecture permet de configurer le modèle pour des simulations adaptées aux spécificités des régions étudiées et de produire des analyses graphiques exploitables.

Pour résoudre numériquement les équations primitives, CROCO utilise une grille horizontale décalée de type Arakawa C. Cette grille permet de calculer les vitesses horizontales (u et v) aux faces des mailles, tandis que les autres variables sont calculées au centre des mailles. Sur la verticale, le modèle emploie des coordonnées sigma généralisées, qui ajustent la résolution verticale pour suivre la topographie variable de la région étudiée, tout en maintenant un nombre constant de mailles verticales. Ce système offre une meilleure précision près de la surface et du fond, grâce à des paramètres spécifiques permettant d'affiner la résolution dans ces zones clés.

Dans le modèle CROCO, la discréétisation temporelle est régie par le critère de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), qui assure la stabilité numérique des calculs. Ce critère impose que la distance parcourue par un processus physique durant un pas de temps soit inférieure à la distance séparant deux points de la grille. En d'autres termes, aucun processus ne doit traverser plus d'une maille par pas de temps. Pour une grille à une dimension, la condition CFL s'écrit :

$$u \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (8)$$

Avec u la vitesse du processus, Δt le pas de temps et Δx la taille d'une maille de la grille.

Cette contrainte est particulièrement critique pour les phénomènes rapides, tels que les ondes barotropes de gravité (mode externe). Ces ondes, décrites par les équations primitives intégrées sur la verticale, se propagent à des vitesses élevées et nécessitent un pas de temps très court. En revanche, les processus plus lents, comme les variations de température ou de salinité (mode interne), évoluent sur des échelles de temps plus longues.

Pour gérer cette différence d'échelle temporelle, CROCO utilise une approche de "time-splitting". Cette méthode sépare les calculs en deux étapes : d'abord, le mode externe est résolu sur une grille horizontale en deux dimensions avec un pas de temps court respectant le critère CFL. Ensuite, le mode interne est résolu en trois dimensions avec un pas de temps plus long. On recherche donc le pas de temps maximum qui respecte le critère CFL :

$$\Delta t_{\max} \leq \frac{1}{\sqrt{gH}} \cdot \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (9)$$

Avec \sqrt{gH} la vitesse des ondes barotrope et H la hauteur d'eau, Cette stratégie permet d'optimiser les calculs tout en maintenant la stabilité et la précision du modèle, même dans les zones à forts gradients, comme les environnements côtiers.

2.3 Etapes de configuration et paramétrage du modèle

Pour configurer le modèle CROCO et préparer la simulation, plusieurs scripts MATLAB du répertoire CROCO TOOLS ont été utilisés pour définir la grille, les conditions aux limites et les conditions initiales de la zone d'étude. Le script *make_grid.m* a permis de générer une grille bathymétrique en distinguant les zones océaniques et terrestres à l'aide du dataset ETOPO 2022, qui fournit des données de haute résolution sur la topographie et la bathymétrie. Le script *make_forcing.m* a ensuite été utilisé pour intégrer les forçages externes, basés sur des données de surface issues du dataset ICOADS, spécialisé dans les échanges océan-atmosphère. Enfin, *make_clim.m* a permis de paramétriser les conditions initiales à partir des profils CTD et biogéochimiques du World Ocean Atlas 2009 (WOA2009) en utilisant la méthode dynamique. Ces données couvrent l'océan global et sont utilisées pour estimer les courants initiaux par des calculs géostrophiques, notamment sur les 1000 premiers mètres de profondeur.

L'ensemble des scripts génère cinq fichiers NetCDF essentiels pour l'exécution de la simulation : *croco_grd.nc* (grille), *croco_frc.nc* (forçages), *croco_clm.nc* (climatologie), *croco_oa.nc* (analyse objective), et *croco_ini.nc* (conditions initiales). Ces fichiers constituent les inputs du modèle, qui peut alors simuler les interactions dynamiques et biogéochimiques de la région étudiée.

Afin de fixer les coordonnées du domaine de calcul choisi (**Tab.1**), il est nécessaire d'utiliser le script Matlab *ad_findgeocoord.m*. Une fois ces coordonnées obtenues, le fichier *crocotools_param.m* est édité

pour configurer les paramètres spatiaux du modèle, la résolution horizontale, le nombre de niveaux verticaux, et le nombre de frontières ouvertes (dans notre cas, elles le seront toutes).

Tab. 1. Coordonnées choisies pour l'étude du modèle.

Lat min	Lat max	Lon min	Lon max
-63	-52	-77	-57

Tab. 2. Paramètres de la grille calculés par *make_grid*.

Résolution	LLm	MMm	dxmin	dxmax	dymin	dymax	N
1/7°	139	144	7.2076	9.7784	7.2156	9.7496	32

LLm et MMm correspondent respectivement au nombre de mailles sur les axes x et y, tandis que dx et dy représentent la taille des mailles sur ces mêmes axes. Ces paramètres sont calculés par le script *make_grid* à partir de la résolution choisie. Dans notre modèle, en raison de la taille importante du passage de Drake, la résolution n'a pas pu dépasser 1/7. En effet, une résolution plus fine aurait entraîné des temps de compilation trop longs. Toutefois, cette résolution reste largement suffisante pour l'étude de la zone.

Une fois la grille configurée, la simulation est lancée en choisissant le schéma de turbulence KPP, basé sur le modèle de fermeture développé par Large et al. (1994) (fichier *cppdefs.h*). Les paramètres de la grille sont ensuite saisis dans le fichier *params.h*.

La dernière étape consistait à déterminer le pas de temps externe à l'aide du script MATLAB *ad_cfl.m* en respectant le critère CFL, comme défini par l'équation (9). Après avoir défini manuellement ce pas de temps externe (Δt_{ext}), le modèle calcule ensuite le pas de temps interne (Δt_{int}) en multipliant Δt_{ext} par une variable NDTFAST (**Tab.3**). Ensuite, dans le fichier *croco.in*, nous avons ajusté le nombre d'itérations nécessaires pour simuler un mois (NTIMES), défini la période de redémarrage du modèle après un mois (NRST), et fixé la fréquence de sauvegarde des résultats instantanés (NWRT) et moyennés (NAVG) à 3 jours.

Tab. 3. Paramètres temporels du modèle

Δt_{ext}	Δt_{int}	NDTFAST	NTIMES	NAVG	NWRT
10	600	60	4320	4320	432

Pour réaliser une simulation sur une période pluriannuelle de 10 ans, nous avons effectué des simulations mensuelles sur 120 mois. Ces simulations ont été réalisées en utilisant le cluster de calcul de l'OSUPytheas, ce qui a permis d'optimiser les calculs, de prévenir les risques de "crash" de la simulation et de réduire le temps de traitement. Les résultats ont ensuite été visualisés sur Matlab grâce au script *croco_gui*, qui exploite les fichiers NetCDF générés par le modèle pour chaque mois.

3 Résultats

3.1 Diagnostics du modèle

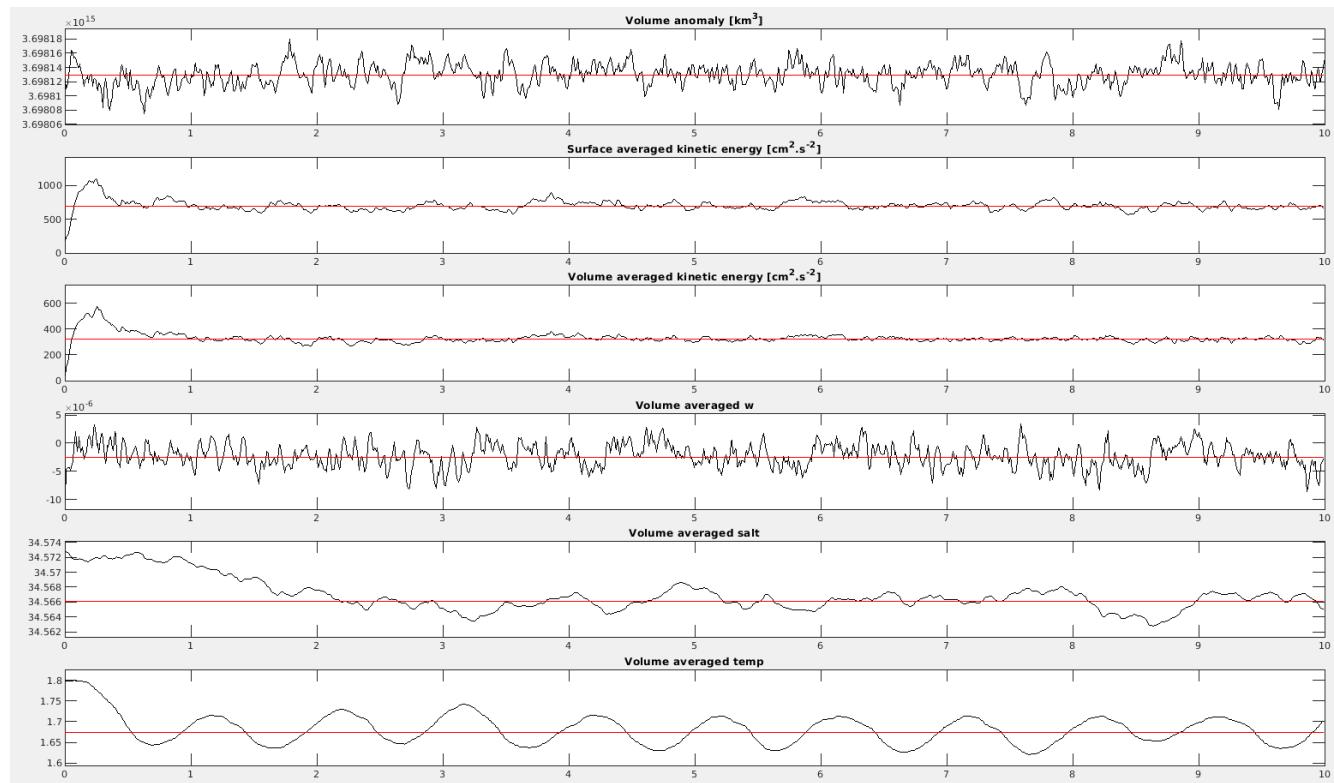


FIGURE 2 – Diagnostics du modèle représentées sur 10 années, les courbes rouges correspondent aux moyennes des différentes valeurs.

Les diagnostics représentent une étape essentielle dans l'analyse de la circulation au niveau du passage de Drake. Ils permettent notamment d'identifier à partir de quelle année le modèle devient indépendant des conditions initiales et commence à fonctionner de manière cohérente.

Pour que le modèle soit considéré comme stable et analysable, l'ensemble des variables doit atteindre un état stationnaire. Or, la salinité semble être la variable la plus lente à se stabiliser. Une hypothèse plausible est que la simulation ne prend pas en compte le modèle des glaces, dans une région où la glace peut avoir une influence significative sur la salinité. Néanmoins, on observe que cette dernière tend à se stabiliser autour de la sixième année.

Ce délai nécessaire à la stabilisation du modèle est ce qu'on appelle le temps de spin-up. C'est une période durant laquelle le modèle s'ajuste progressivement à partir de conditions initiales arbitraires jusqu'à atteindre un état d'équilibre réaliste.

Ainsi, on peut considérer que l'analyse du modèle devient pertinente à partir de cette sixième année.

3.2 Identification des fronts

Au niveau du passage de Drake, un gradient de température est clairement identifiable (**Fig.3**). Près de l’Amérique du Sud, les températures sont plus élevées qu’à proximité de l’Antarctique. Une zone de transition se dessine entre ces deux extrémités, reflétant une diminution progressive des températures en direction de l’Antarctique, principalement en raison du déficit d’insolation. Ce gradient thermique est particulièrement prononcé à certains endroits, permettant d’identifier les différents fronts océaniques de la région : le front subantarctique (SAF), le front polaire (PF) et le front sud de l’ACC (SACCF).

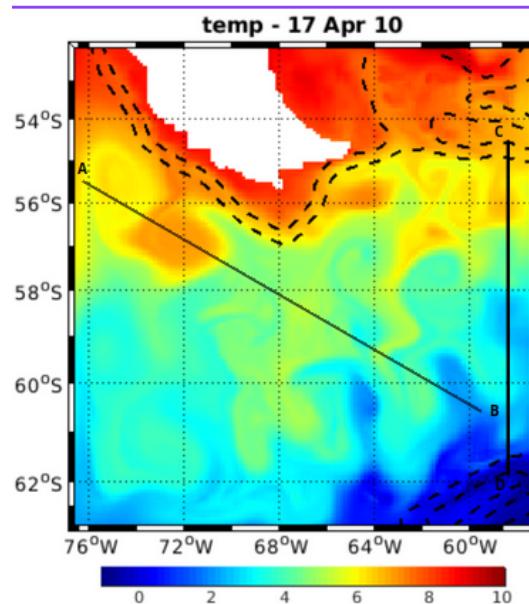


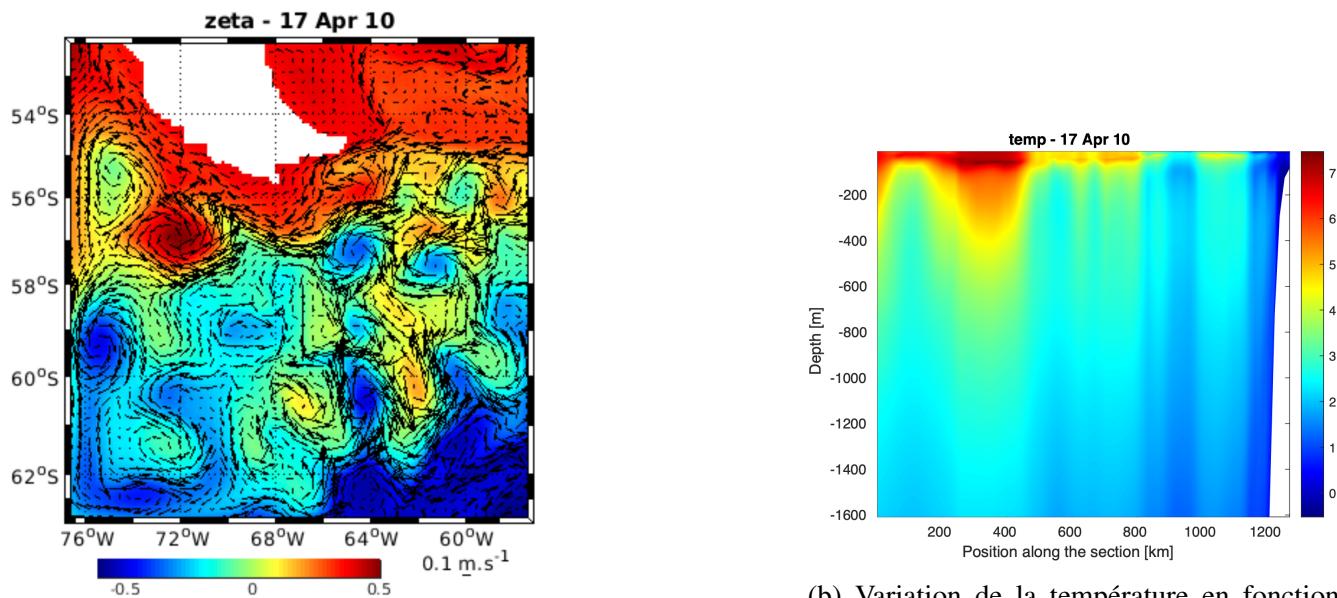
FIGURE 3 – Températures de surface dans le passage de Drake.

Le front subantarctique, situé entre 55°S et 58°S, est facilement repérable. Il marque la transition entre les eaux relativement chaudes des latitudes subantarctiques et les eaux plus froides associées au courant circumpolaire antarctique (ACC). Quant au front sud de l’ACC, bien qu’il soit moins visible en raison de la portée limitée de la simulation, une partie de celui-ci apparaît dans le coin inférieur droit de la figure. Ce front se prolonge vers le sud en s’étendant davantage à l’ouest.

Le front polaire, supposé se situer entre les deux fronts précédemment mentionnés, n’est pas identifiable sur la carte des températures.

3.3 Tourbillons

L’identification des tourbillons dans le passage de Drake repose sur les variations de l’élévation de la surface libre. Un zeta positif signale la présence d’un anticyclone, tandis qu’un zeta négatif correspond à un cyclone. La figure illustrant cette variable met en évidence l’instabilité caractéristique du passage de Drake, révélant de nombreux tourbillons (**Fig.4.a**).



(a) Variation de l'élévation de surface dans le passage de Drake.

(b) Variation de la température en fonction de la profondeur le long de la section A-B (**Fig.3**).

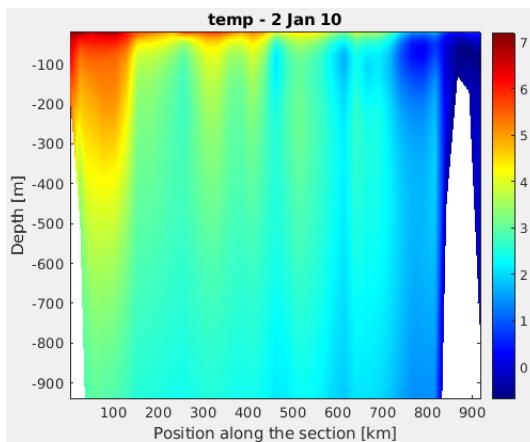
FIGURE 4 – Identification des tourbillons.

Un large tourbillon anticyclonique est identifié avec un centre situé à 57°S de latitude et 72°W de longitude, accompagné d'un tourbillon cyclonique à sa gauche. Afin de mieux visualiser les choses, une section verticale (A-B, **Fig.3**) a été réalisée, mettant en évidence la température (**Fig.4.b**). Cette analyse révèle clairement un upwelling au niveau du tourbillon cyclonique, où les eaux froides des profondeurs remontent vers la surface. À proximité, le tourbillon anticyclonique génère un downwelling, entraînant les eaux chaudes de surface en profondeur.

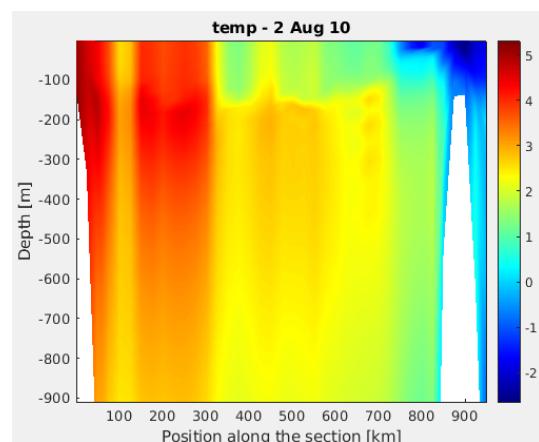
Ce downwelling influence significativement la structure thermique de la colonne d'eau. En s'étendant en profondeur, il modifie la distribution verticale de la température, entraînant des anomalies thermiques marquées jusqu'à plusieurs milliers de mètres.

3.4 Variabilités saisonnières

Les propriétés thermohalines des eaux du passage de Drake varient considérablement selon les saisons. Une section verticale de température réalisée en hiver et en été révèle des différences marquées : en été, les eaux chaudes se concentrent à la surface, tandis que les eaux froides dominent en profondeur. En hiver, la situation s'inverse, avec des eaux plus chaudes présentes en profondeur.



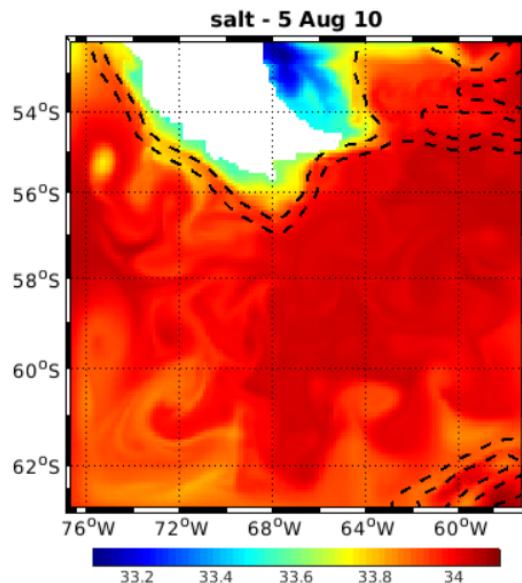
(a) Température en Été dans les 900 premiers mètres de la colonne d'eau le long de la section C-D.



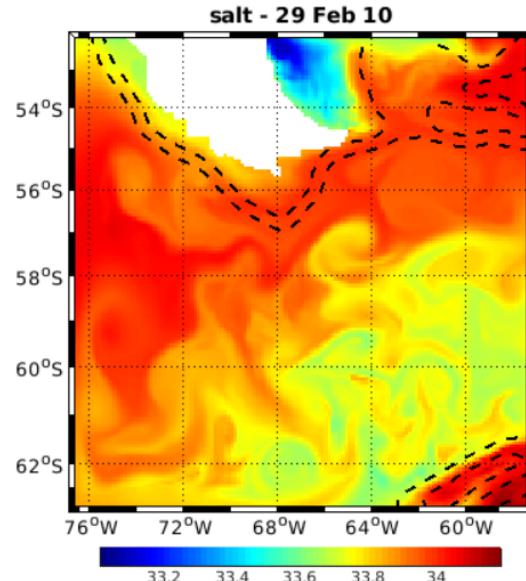
(b) Température en Hiver dans les 900 premiers mètres de la colonne d'eau le long de la section C-D.

FIGURE 5 – Variations saisonnières de la température dans les 900 premiers mètres de la colonne d'eau.

Concernant la salinité, celle-ci est relativement uniforme en surface durant l'hiver, mais diminue fortement en été, reflétant des variations saisonnières importantes.



(a) Salinité de surface en Hiver.



(b) Salinité de surface en Été.

FIGURE 6 – Variations saisonnières de la salinité en surface.

4 Discussion

Le resserrement de l'océan Austral au niveau du passage de Drake entraîne un rapprochement des différents fronts océaniques, ce qui peut rendre leur distinction plus difficile. De plus, cette région

présente une topographie sous-marine très accidentée (**Fig.7**). On y trouve notamment une faille majeure : la zone de fracture de Shackleton (SFZ), qui marque la frontière entre la plaque Scotia et la plaque Antarctique. Cette zone est caractérisée par la présence de nombreuses falaises sous-marines abruptes. Par ailleurs, on y observe les traces d'anciennes dorsales océaniques comme la dorsale ouest de Scotia (WSR) et la dorsale Phoenix-Antarctique (PAR), qui donnent naissance à d'innombrables chaînes de montagnes sous-marines, témoins de l'activité tectonique passée de la région (Barré et al., 2011).

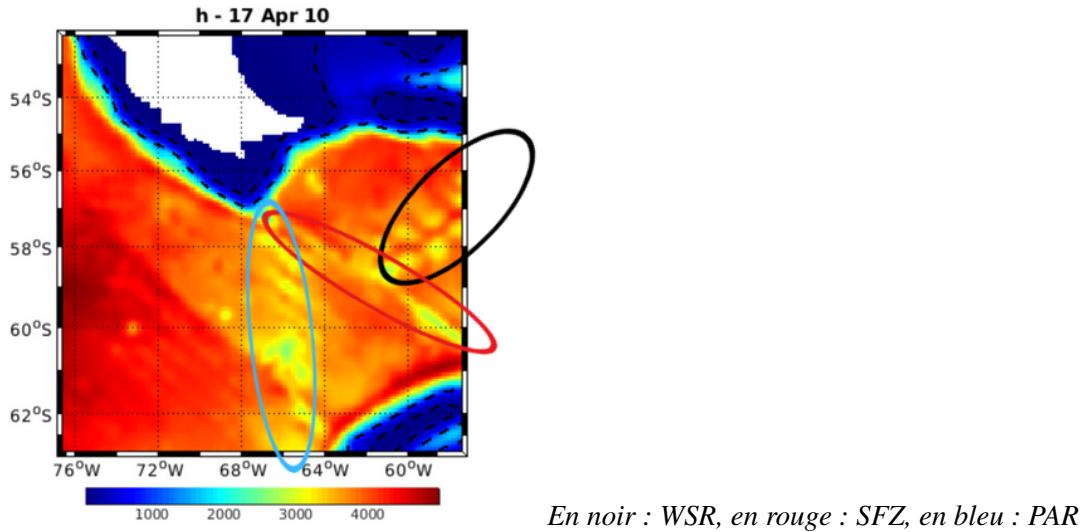


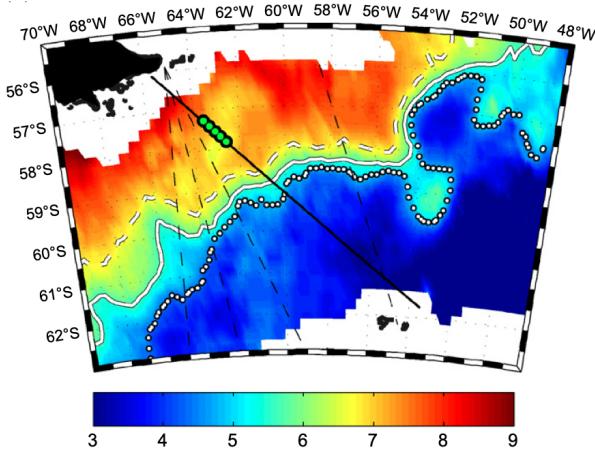
FIGURE 7 – Bathymétrie du passage de Drake.

La canalisation du Courant Circumpolaire Antarctique (ACC), combinée à la bathymétrie complexe de la région, engendre de fortes instabilités dynamiques responsables de la formation fréquente de tourbillons (Cunningham et al., 2003). Ces tourbillons contribuent à l'homogénéisation de la colonne d'eau (**Fig.4.b**), ce qui participe à la complexité de l'identification précise du front polaire.

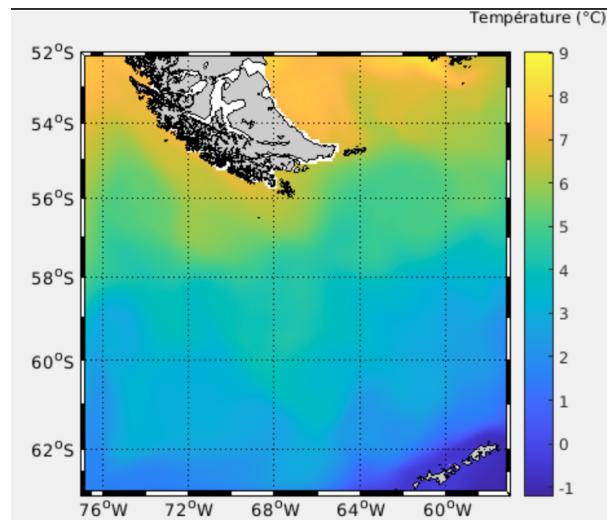
Cependant, les tourbillons cycloniques à noyau froid se forment généralement à partir des méandres orientés vers le nord du front polaire (PF), et renferment ainsi des masses d'eau d'origine antarctique. En revanche, les tourbillons anticycloniques à noyau chaud proviennent des extensions vers le sud du front subantarctique (SAF) et transportent des masses d'eau subantarctiques (Sprintall, 2003). Selon cette hypothèse, le front polaire est facilement identifiable sur notre modèle, mais il apparaît plus au sud que ce qu'indique la littérature, à une position qui correspondrait plutôt à celle du front sud de l'ACC.

Une comparaison entre les résultats du modèle, moyennant la SST des années 6 à 10 (**Fig.8.b**), et les données satellitaires de Barré et al., mesurant la SST dans le passage de Drake (**Fig.8.a**), révèle une différence significative. Contrairement au modèle, les données satellitaires mettent clairement en évidence la présence du front polaire, qui se distingue de manière flagrante.

Cette incohérence peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, une résolution horizontale insuffisante pourrait empêcher la capture précise de la structure fine des fronts océaniques ainsi que des petites échelles associées aux méandres et aux tourbillons. En effet, des résolutions trop faibles peuvent lisser les variations fines de température et de salinité, rendant difficile l'identification des zones de transition et des instabilités à petite échelle. Ensuite, une représentation simplifiée des forçages de surface, tels que les vents et les flux de chaleur, pourrait également jouer un rôle important. Ces forçages sont essentiels



(a) Données satellitaires présentées par Barré et al. La ligne blanche représente le front polaire et les lignes hachurées ses extrémités nord et sud.



(b) SST moyennées de l'année 6 à 10.

FIGURE 8 – Comparaison de données satellitaires avec le modèle.

pour déterminer la position et la dynamique des fronts océaniques, et une modélisation simplifiée peut nuire à la reproduction exacte de ces phénomènes, en particulier dans une région aussi dynamique que le passage de Drake.

Malgré ces divergences, le modèle reproduit globalement bien les variations saisonnières des propriétés thermohalines. En été austral, la fonte des glaces induit une diminution de la salinité des eaux de surface (**Fig 6.b**). En hiver austral, le modèle met en évidence des couches d'eau plus chaudes en profondeur qu'en surface (**Fig 5.b**), un phénomène dû aux températures atmosphériques extrêmement basses durant cette période qui refroidissent intensément la surface. Cependant, en raison de sa localisation dans une région reculée au sud de la planète, le passage de Drake subit une saisonnalité moins marquée par rapport à d'autres régions plus proches de l'équateur. En effet, aucune saisonnalité n'est présente dans les couches d'eau en dessous de 200 mètres (Sprintall, 2003).

5 Conclusion

Le resserrement de l'ACC, combiné à la bathymétrie unique du passage de Drake, font de cette région une zone particulièrement dynamique où se produisent des phénomènes océaniques complexes. Les résultats obtenus révèlent des dynamiques intéressantes, mais soulignent également certaines limites du modèle, en particulier en ce qui concerne la résolution et les conditions initiales ainsi que les forçages. En effet, ces facteurs pourraient rendre difficile la représentation de changements abruptes de température. Ces résultats ouvrent donc la porte à de futures améliorations, comme l'intégration de données plus précises et l'optimisation de la résolution du modèle, afin de mieux comprendre la circulation océanique et ses effets climatiques dans cette région essentielle de l'océan Austral.

Références

- Barré, N., Provost, C., Renault, A., and Sennéchael, N. (2011). Fronts, meanders and eddies in drake passage during the ant-xxiii/3 cruise in january–february 2006 : A satellite perspective. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, 58(25-26) :2533–2554.
- Cunningham, S., Alderson, S., King, B., and Brandon, M. (2003). Transport and variability of the antarctic circumpolar current in drake passage. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 108(C5).
- Lin, X., Zhao, H., Liu, Y., Han, G., Zhang, H., and Liao, X. (2023). Ocean eddies in the drake passage : Decoding their three-dimensional structure and evolution. *Remote Sensing*, 15(9) :2462.
- Sprintall, J. (2003). Seasonal to interannual upper-ocean variability in the drake passage.
- Toyos, M. H., Lamy, F., Lange, C. B., Lembke-Jene, L., Saavedra-Pellitero, M., Esper, O., and Arz, H. W. (2020). Antarctic circumpolar current dynamics at the pacific entrance to the drake passage over the past 1.3 million years. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35(7).
- Xu, X., Chassignet, E. P., Firing, Y. L., and Donohue, K. (2020). Antarctic circumpolar current transport through drake passage : what can we learn from comparing high-resolution model results to observations ? *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 125(7).