

Master Sciences de la mer OPB205
Modélisation 3D océanique

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

Date : 28 Avril 2025

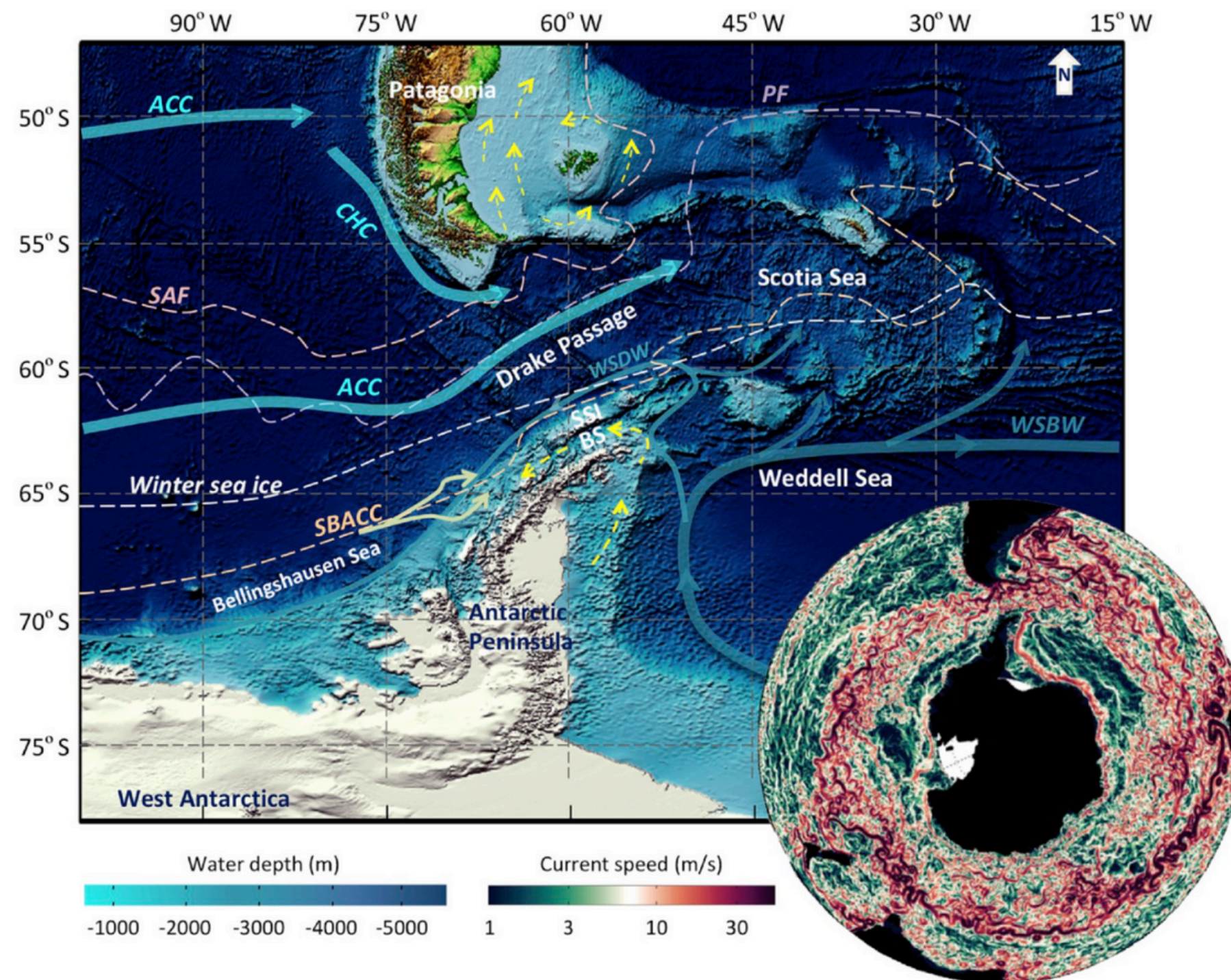


FIGURE 1 – Illustration de L'ACC et de ses fronts au passage de Drake (Shuzhuang Wu et al., 2019).

Le Courant Circumpolaire Antarctique (**ACC**) est composé de 3 fronts : Le **Front Subantarctique**, le **Front Polaire** et le **Front Sud de l'ACC**.

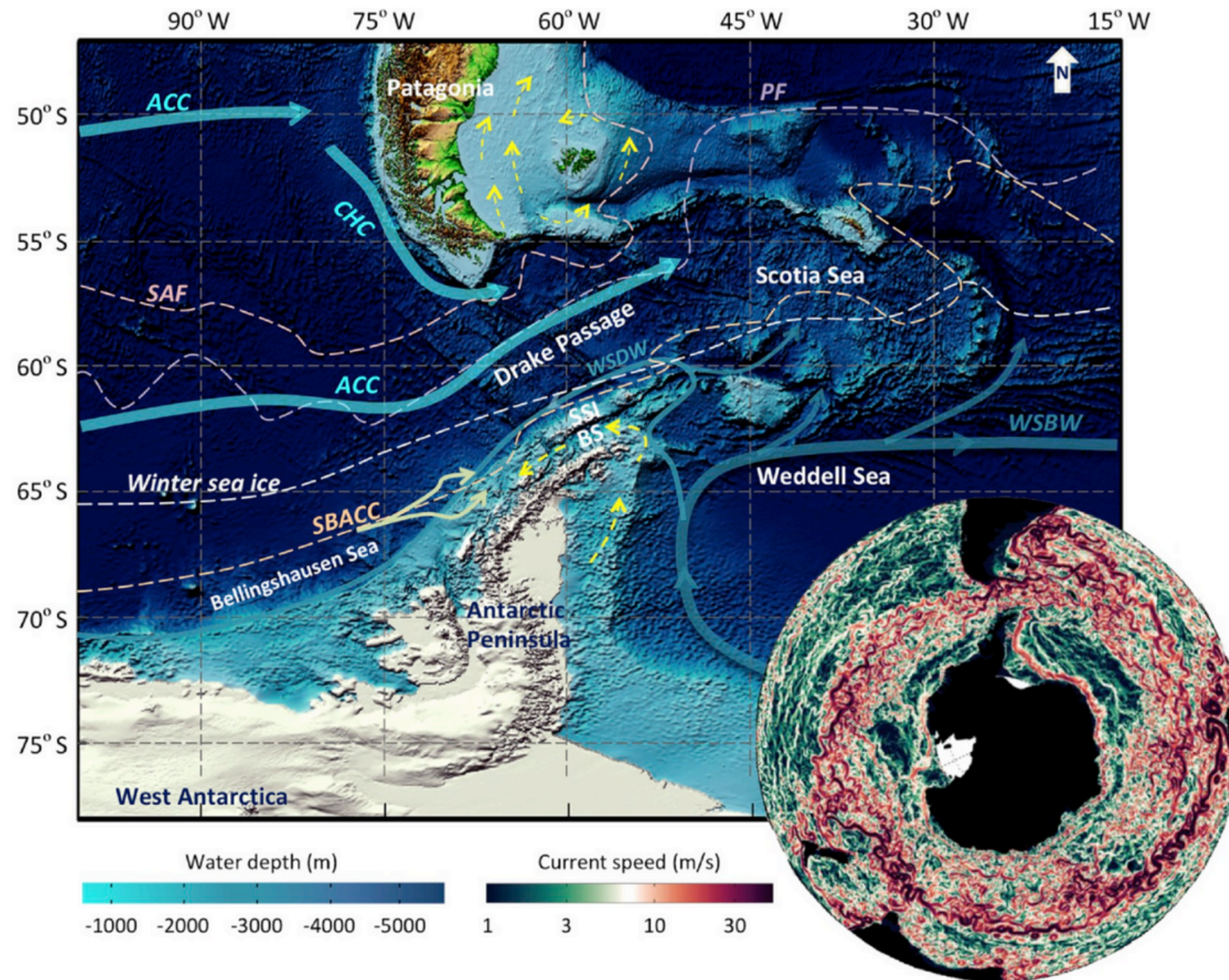
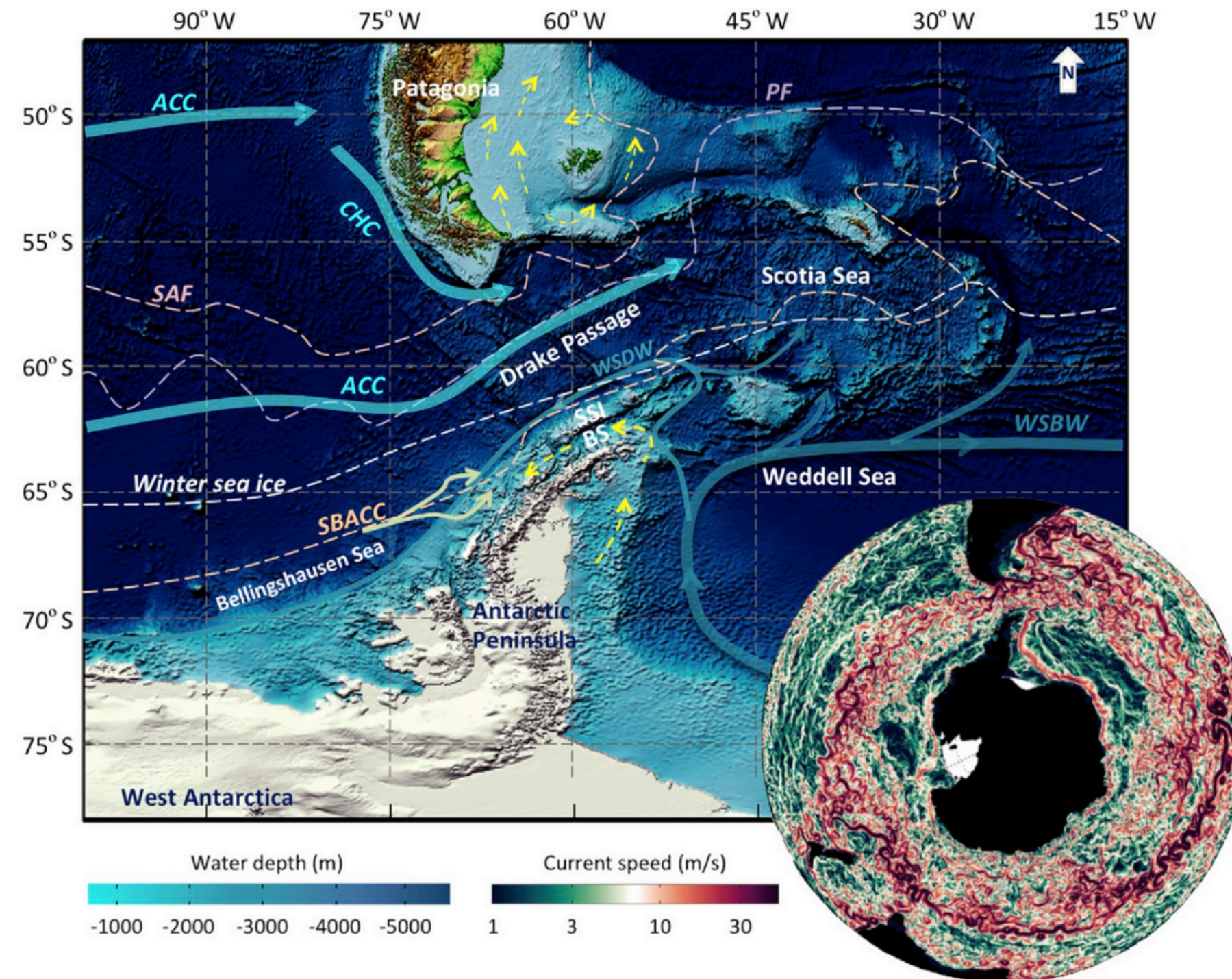


FIGURE 1 – Illustration de L'ACC et de ses fronts au passage de Drake (Shuzhuang Wu et al., 2019).



Le Courant Circumpolaire Antarctique (**ACC**) est composé de 3 fronts : Le **Front Subantarctique**, le **Front Polaire** et le **Front Sud de l'ACC**.

L'ACC et ses fronts se trouvent **canalisés** entre la pointe sud de l'Amérique du sud et la péninsule Antarctique. Ce resserrement, appelé le **passage de Drake**, est caractérisé par de fortes instabilités.

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

Modèle CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity)

Principalement basé sur le modèle **ROMS AGRIF**, CROCO 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.

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.

Présentation des équations primitives

Equations de Navier-Stokes :

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

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

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

Ces équations décrivent le **mouvement du fluide** dans un repère cartésien, avec une simplification de l'équation sur la verticale par l'approximation hydrostatique.

Présentation des équations primitives

$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

(4) Équation de conservation de la masse

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

(5) Équation de conservation de la chaleur

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

(6) Équation de conservation de la quantité de sel

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

(7) Équation d'état de l'eau de mer établie par TEOS 10

Discrétisation spatiale des équations :

Sur l'horizontale :

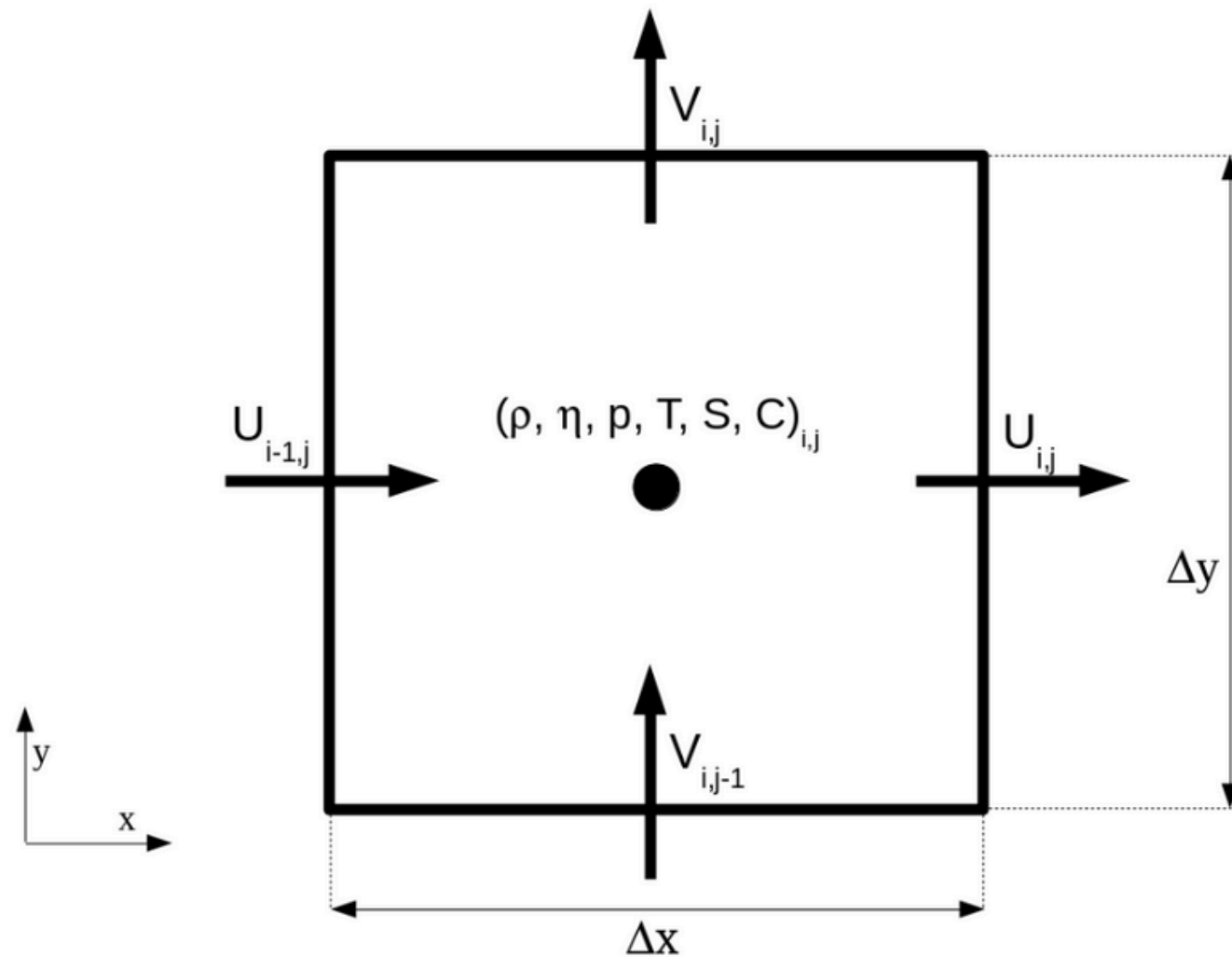


FIGURE 2 – Grille d'Akarawa C

Sur la verticale :

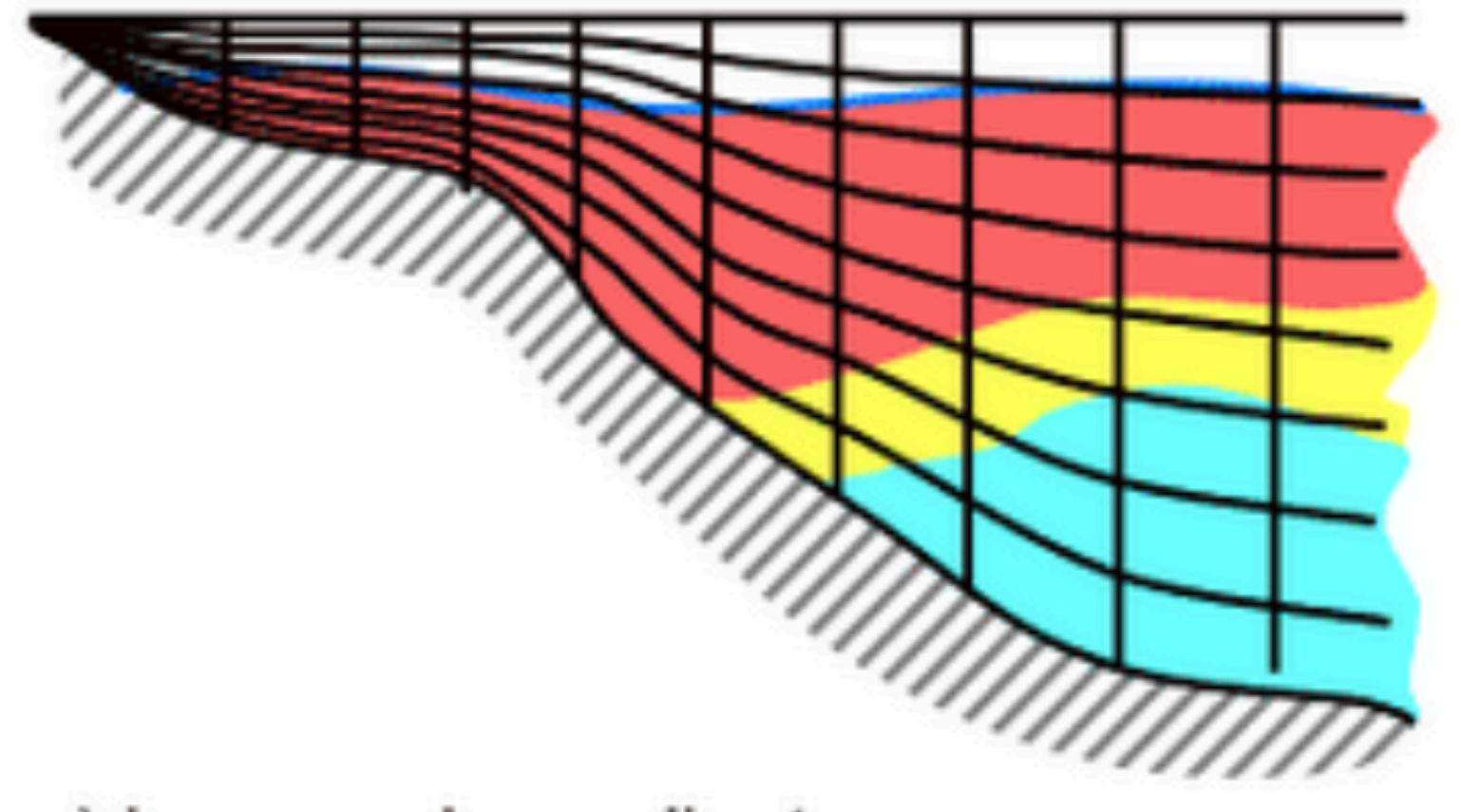


FIGURE 3 – Coordonnées sigma généralisées

Discrétisation temporelle des équations :

Le critère **CFL** (Courant-Friedrichs-Levy) assure la stabilité numérique des calculs. Il 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**.

$$u \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

Discrétisation temporelle des équations :

Le critère **CFL** (Courant-Friedrichs-Levy) assure la stabilité numérique des calculs. Il 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**.

$$u \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

Cela s'applique surtout phénomènes **rapides**, caractérisés par des **onde barotropes**. Pour ce type d'onde **le pas de temps doit être très petit**. En regroupant ces ondes avec les **ondes baroclines** associés à des phénomène **plus lents**, le calcul du pas de temps selon le critère CFL donnerait un pas de temps trop petit, qui résulterait en un temps de calcul trop élevé pour le modèle.

Discrétisation temporelle des équations :

Le critère **CFL** (Courant-Friedrichs-Levy) assure la stabilité numérique des calculs. Il 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**.

$$u \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

Cela s'applique surtout phénomènes **rapides**, caractérisés par des **onde barotropes**. Pour ce type d'onde **le pas de temps doit être très petit**. En regroupant ces ondes avec les **ondes baroclines** associés à des phénomène **plus lents**, le calcul du pas de temps selon le critère CFL donnerait un pas de temps trop petit, qui résulterait en un temps de calcul trop élevé pour le modèle.

Méthode du time-splitting : elle consiste à séparer le calcul du pas de temps, en calculant d'abord un pas de temps pour le mode externe en respectant le critère CFL, puis un autre pas de temps pour les processus plus lent (mode interne).

Pour une grille à 2 dimensions x et y ce calcul s'écrit :

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

Etapes de configuration et paramétrage du modèle

Le modèle CROCO s'appuie sur 3 bases de données :

- **ETOPO2022** : fournit des données de haute résolution sur la topographie et la bathymétrie (***make_grid***).
- **ICOADS** : spécialisé dans les échanges océan-atmosphère (***make_forcing***).
- **WOA2009** : fournit des données CTD et biogéochimiques qui permettent de mettre en place les conditions initiales (***make_clim***).

Etapes de configuration et paramétrage du modèle

Le modèle CROCO s'appuie sur 3 bases de données :

- **ETOPO2022** : fournit des données de haute résolution sur la topographie et la bathymétrie (***make_grid***).
- **ICOADS** : spécialisé dans les échanges océan-atmosphère (***make_forcing***).
- **WOA2009** : fournit des données CTD et biogéochimiques qui permettent de mettre en place les conditions initiales (***make_clim***).

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

Etapes de configuration et paramétrage du modèle

Le modèle CROCO s'appuie sur 3 bases de données :

- **ETOPO2022** : fournit des données de haute résolution sur la topographie et la bathymétrie (***make_grid***).
- **ICOADS** : spécialisé dans les échanges océan-atmosphère (***make_forcing***).
- **WOA2009** : fournit des données CTD et biogéochimiques qui permettent de mettre en place les conditions initiales (***make_clim***).

L'ensemble des scripts génère **cinq fichiers NetCDF** essentiels pour l'exécution de la simulation : *croco_grd.nc*, *croco_frc.nc*, *croco_clm.nc*, *croco_oa.nc*, et *croco_ini.nc*. 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, 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).

Etapes de configuration et paramétrage du modèle

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

Etapes de configuration et paramétrage du modèle

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.

Tab. 3. Paramètres temporels du modèle

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

Etapes de configuration et paramétrage du modèle

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.

Tab. 3. Paramètres temporels du modèle

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

Ces valeurs sont fixés dans le fichier ***croco_in***.

Lancement de la simulation sur le **cluster** de l'OSUpytheas.

Visualisation des résultats sur Matlab à l'aide du script ***croco_gui***.

Diagnostics du modèle

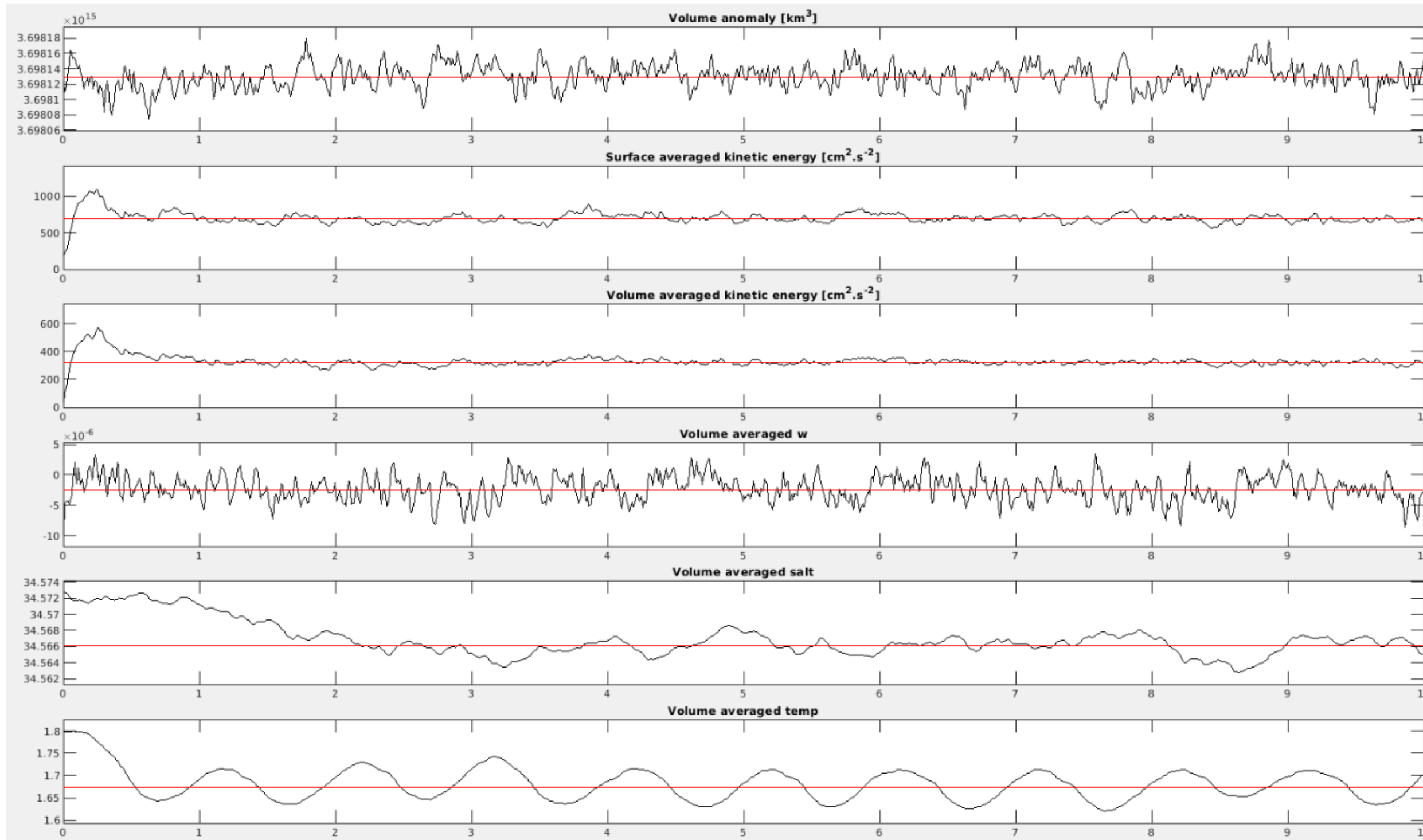
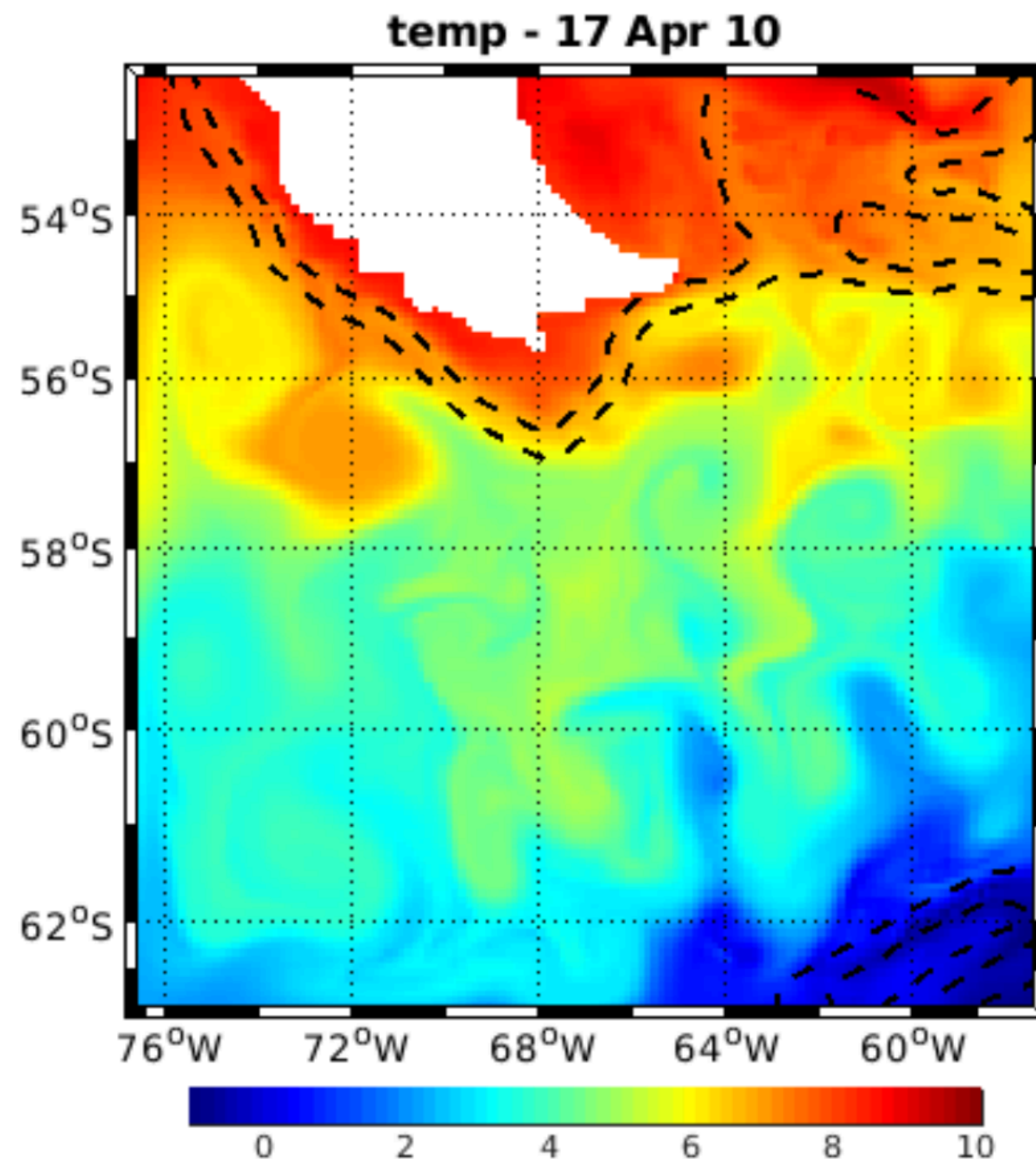


FIGURE 4 – Diagnostics du modèle representees sur 10 années, les courbes rouges correspondent aux moyennes des différentes valeurs.

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**.

Nous pouvons considérer que l'analyse du modèle devient pertinente à partir de la **sixième année**.

Identification des fronts de l'ACC



Des **gradients thermiques marqués** permettent d'identifier le **Front Subantarctique** et le **Front Sud de l'ACC**.

Le Front Polaire, supposé se situer entre les deux fronts précédemment mentionnés, n'est **pas identifiable** sur la carte des températures de surface.

FIGURE 5 – Températures de surface dans le passage de Drake.

Les Tourbillons

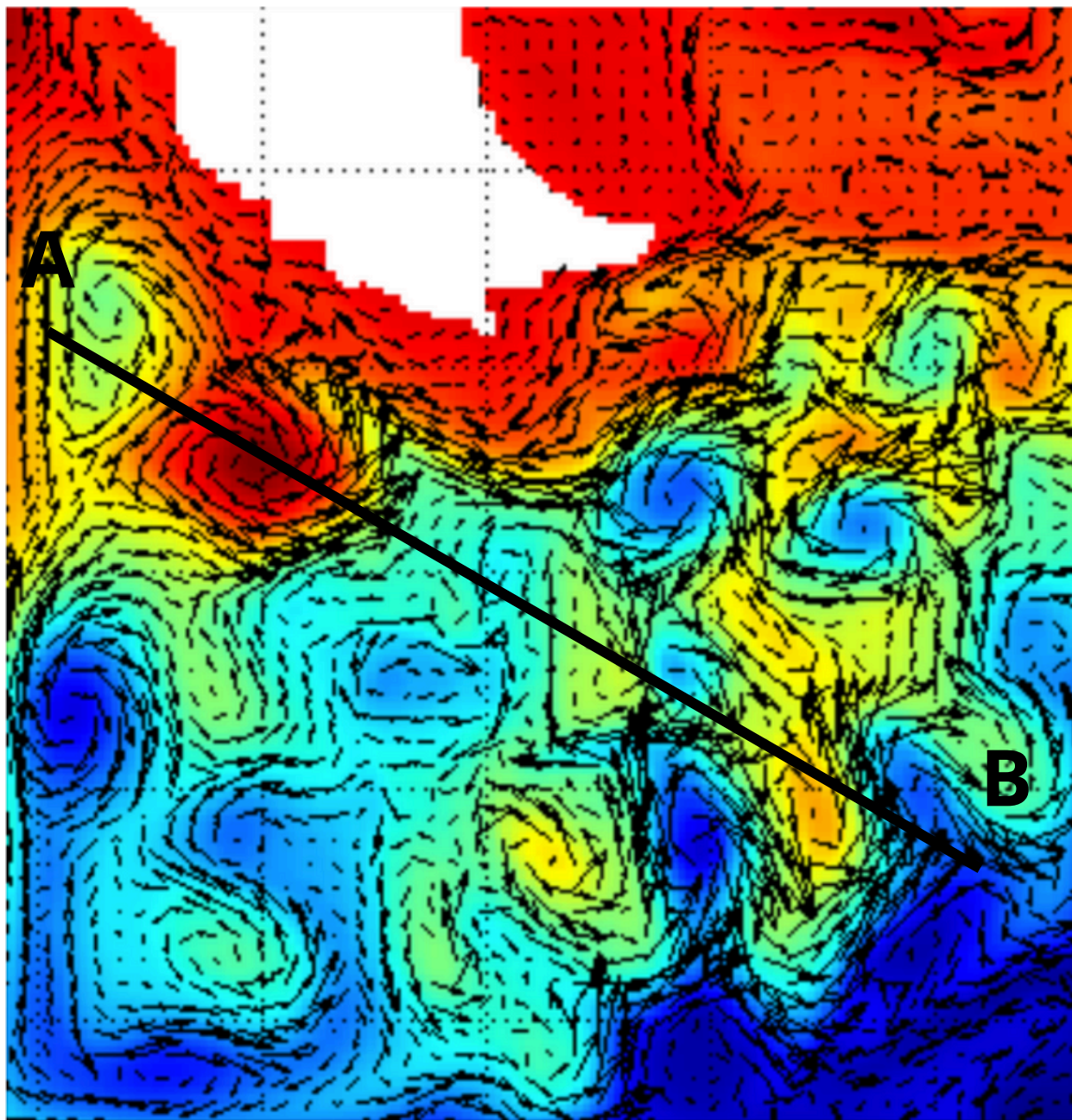


FIGURE 6 - Variations de l'élévation de la surface libre dans le passage de Drake

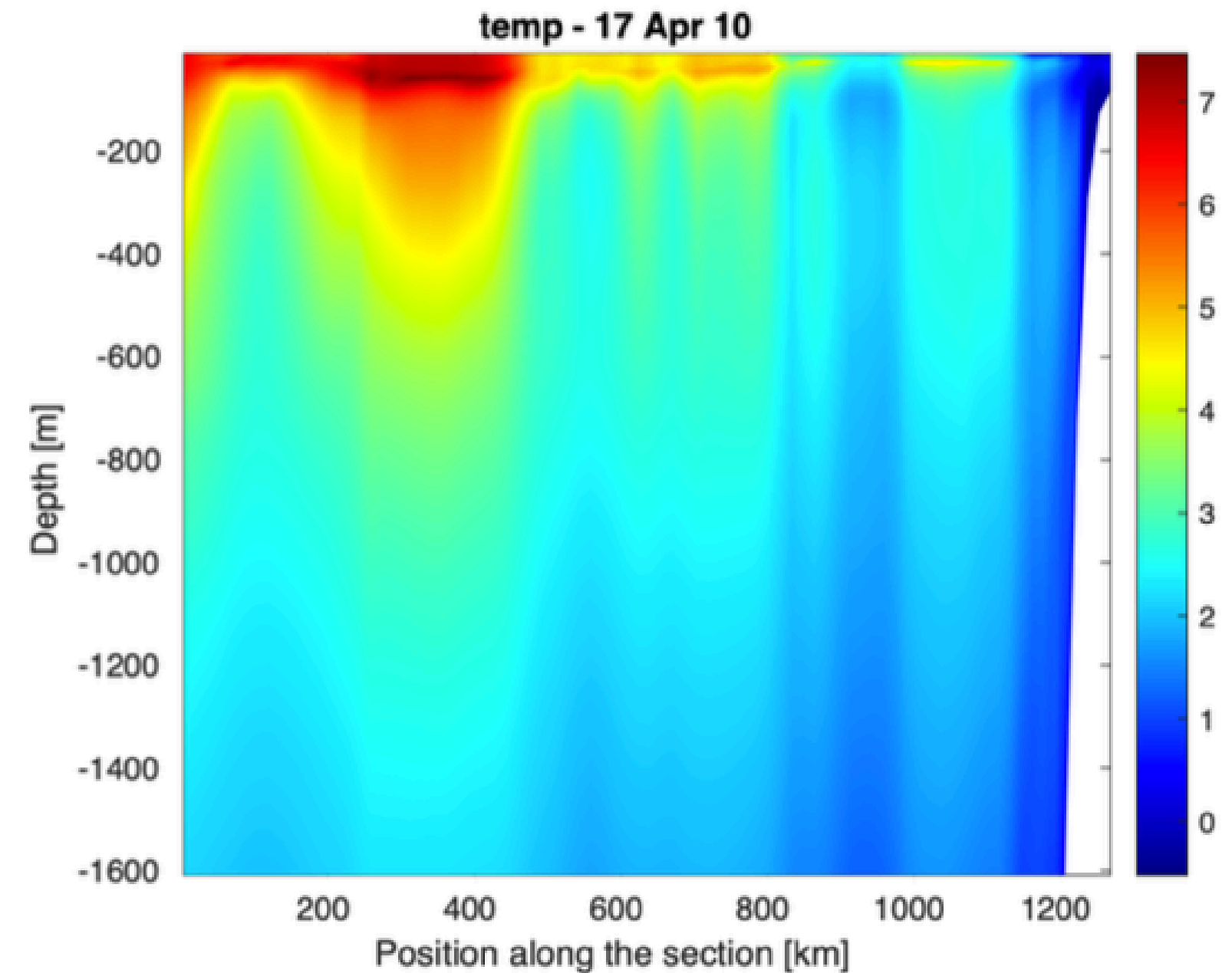


FIGURE 7 - Variations de la température en fonction de la profondeur le long de la section A-B.

Variabilités saisonnières dans le passage de Drake (Température) :

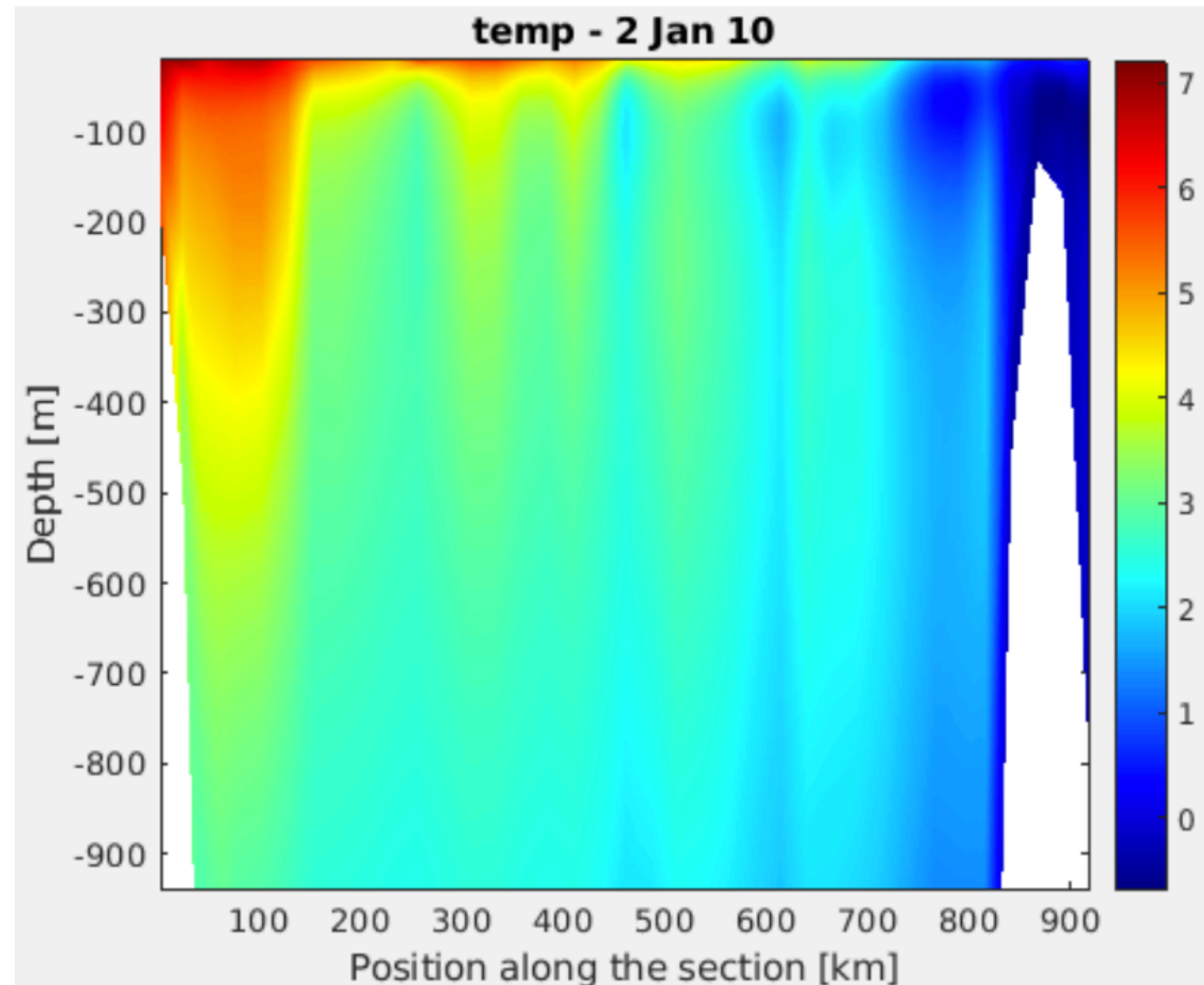


FIGURE 8 - Température en Été dans les 900 premiers mètres de la colonne d'eau le long de la section C-D

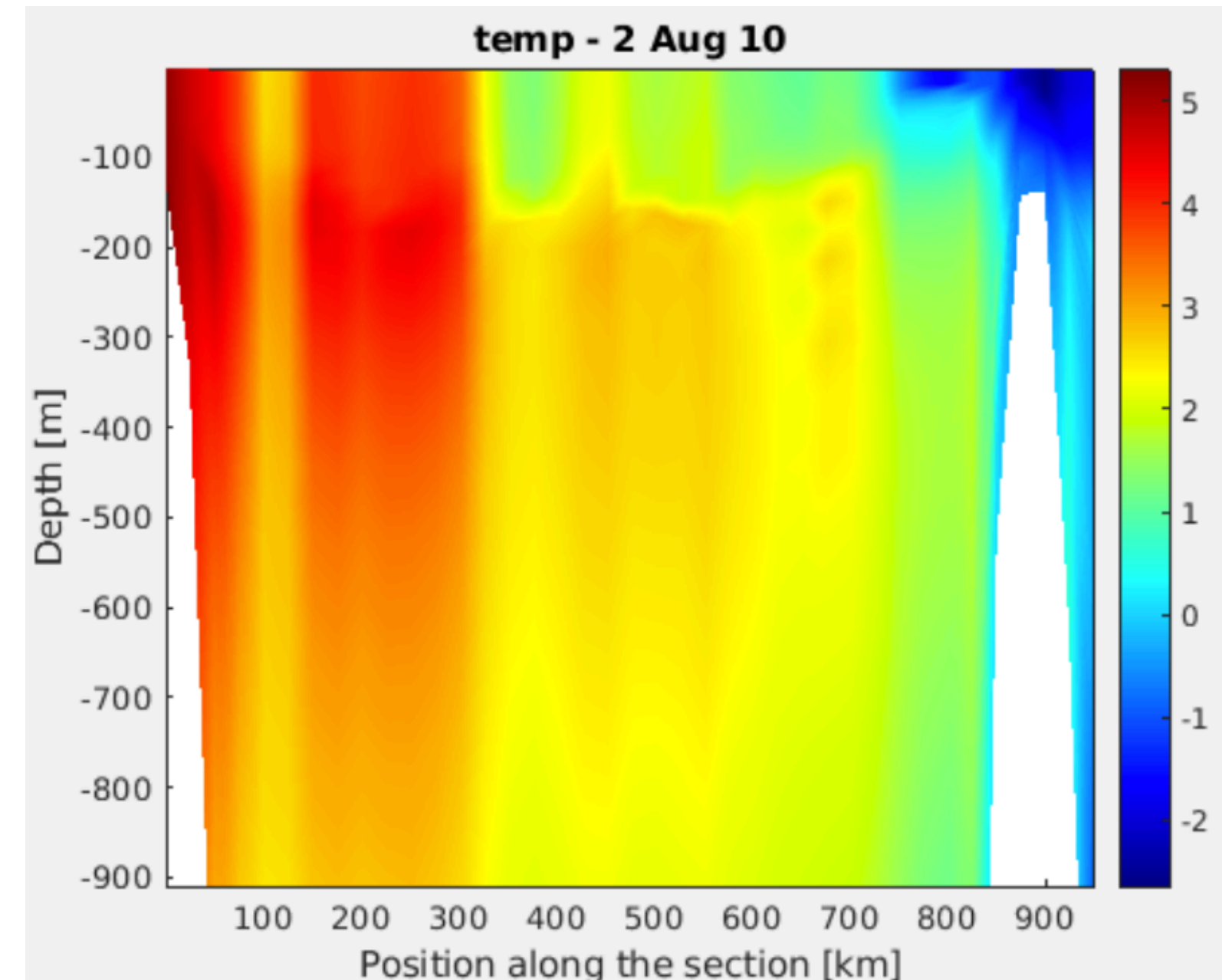


FIGURE 9 - Température en Hiver dans les 900 premiers mètres de la colonne d'eau le long de la section C-D

Variabilités saisonnières dans le passage de Drake (Salinité) :

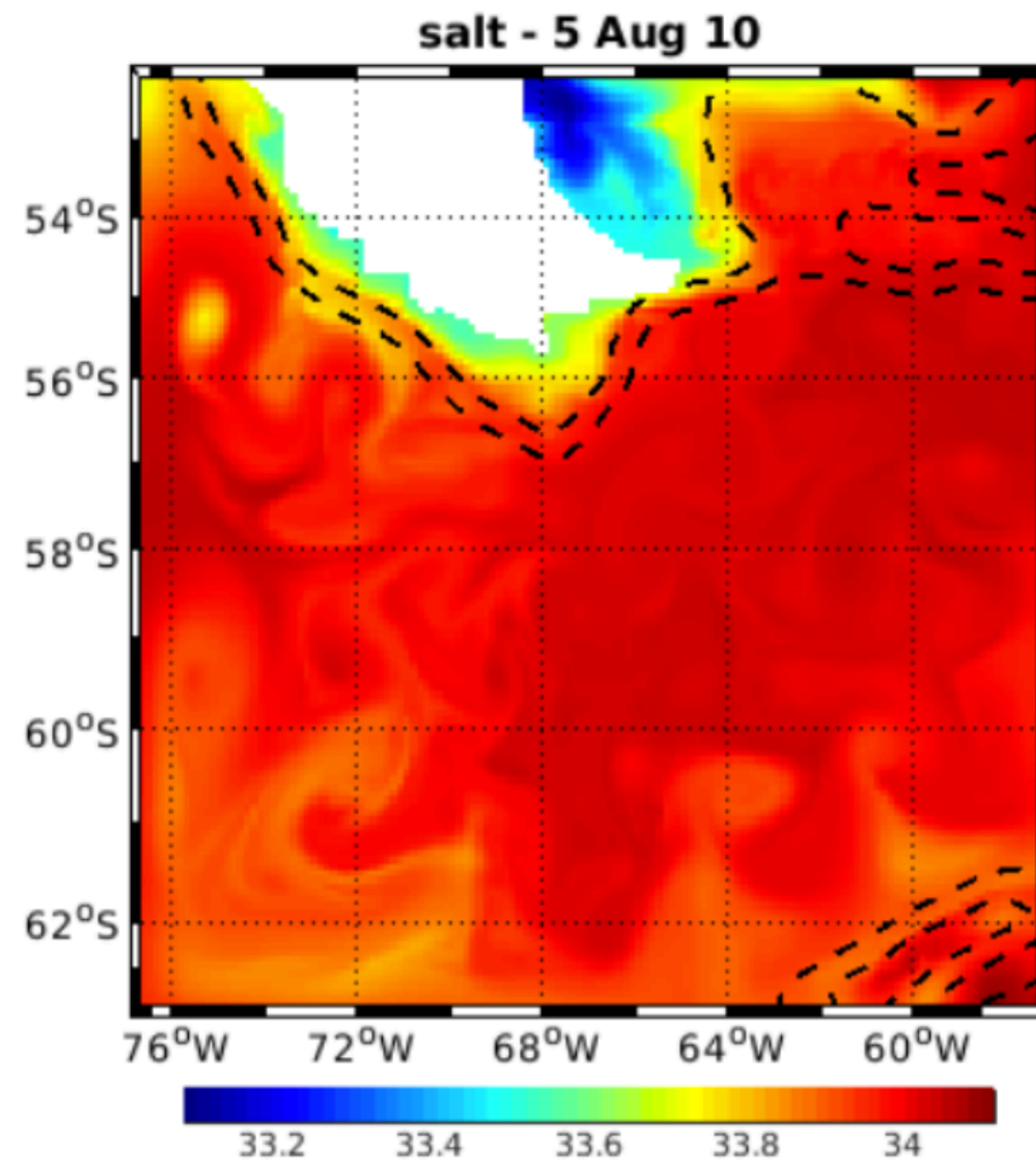


FIGURE 10 - Salinité de surface en Hiver.

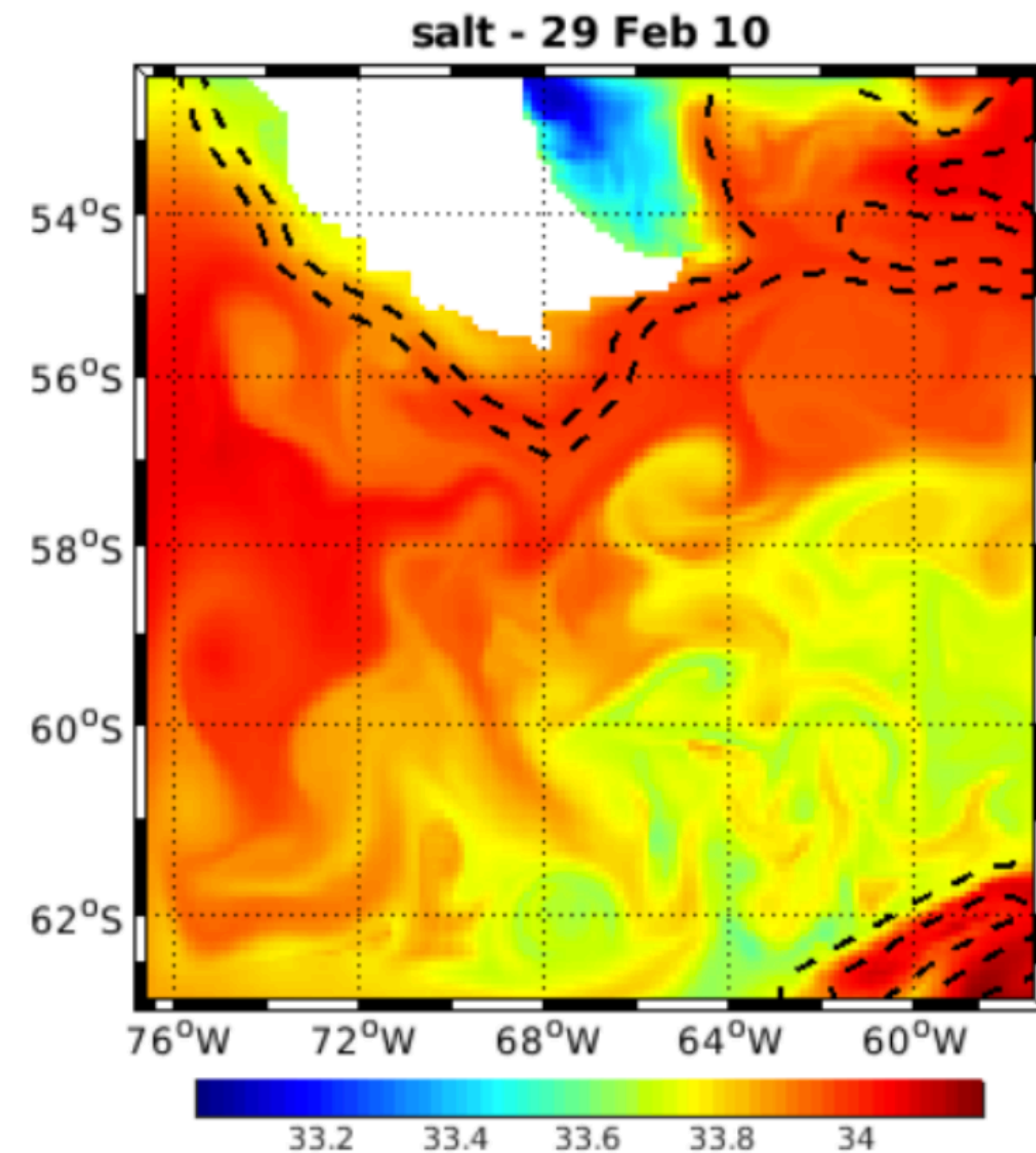
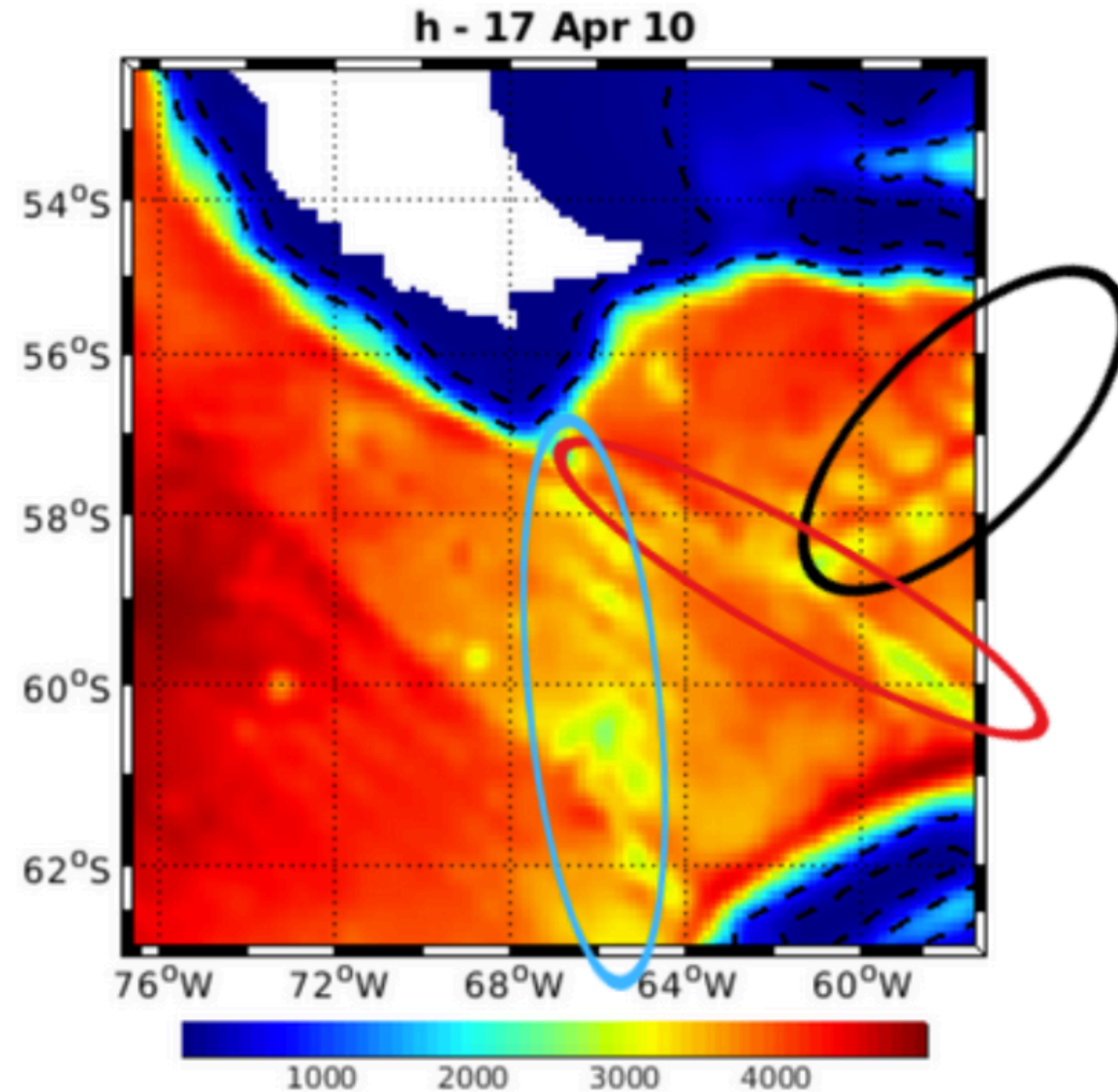


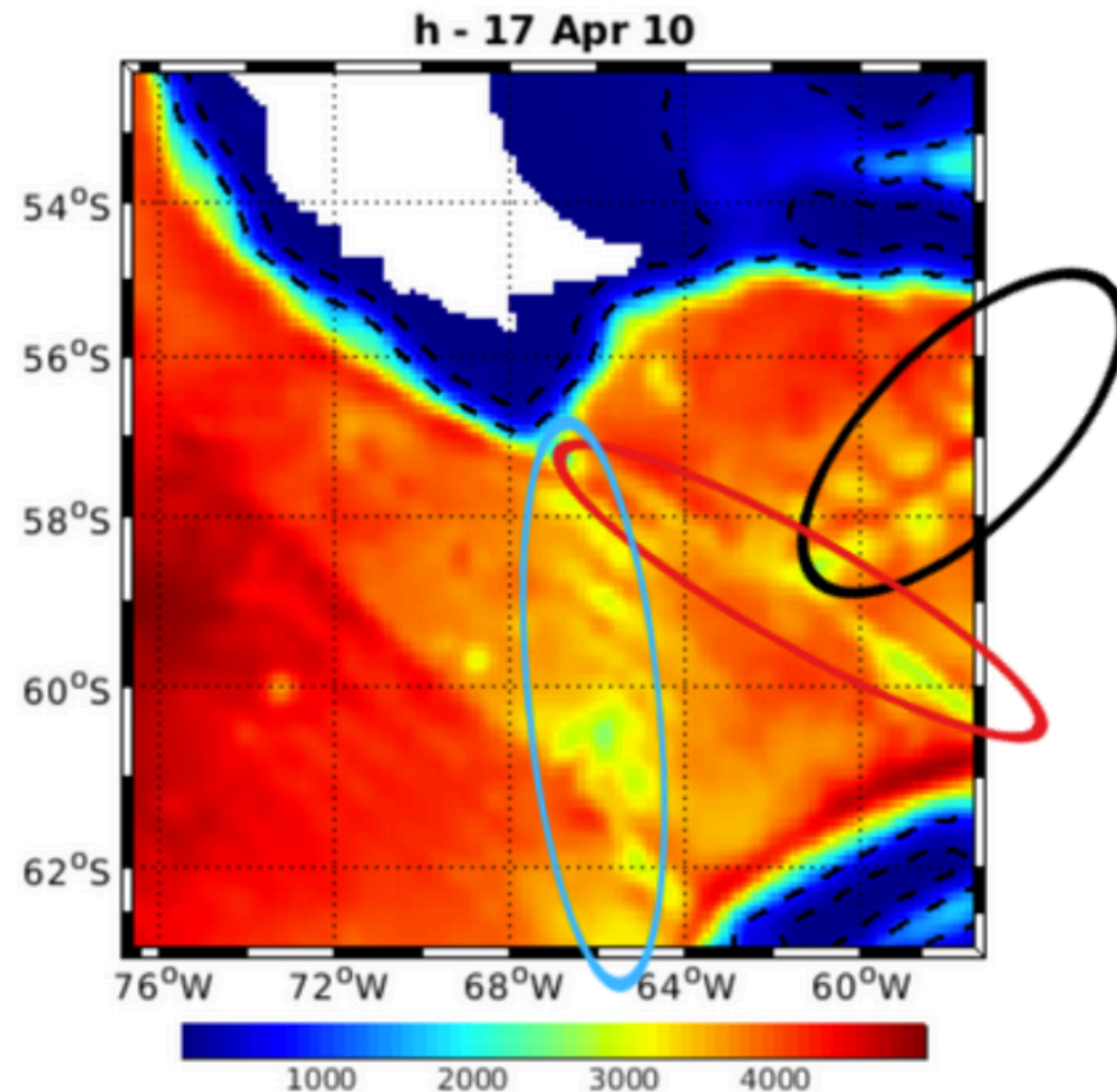
FIGURE 11 - Salinité de surface en Été.



La bathymétrie du passage de Drake présente de nombreuses structure accidentées :

- En rouge : **Zone de fracture de Shackleton**
- En noir : **Dorsale Ouets de Scotia**
- En bleu : **Dorsale Phoenix-Antarctique**

FIGURE 12 - Bathymétrie du passage de Drake



La bathymétrie du passage de Drake présente de nombreuses structure accidentées :

- En rouge : **Zone de fracture de Shackleton**
- En noir : **Dorsale Ouets de Scotia**
- En bleu : **Dorsale Phoenix-Antarctique**

La canalisation de l'ACC et la bathymétrie complexe du passage de Drake génèrent des tourbillons qui homogénéisent la colonne d'eau, rendant **difficile l'identification précise du Front Polaire.**

FIGURE 12 - Bathymétrie du passage de Drake

Comparaison des données satellitaires avec le modèle

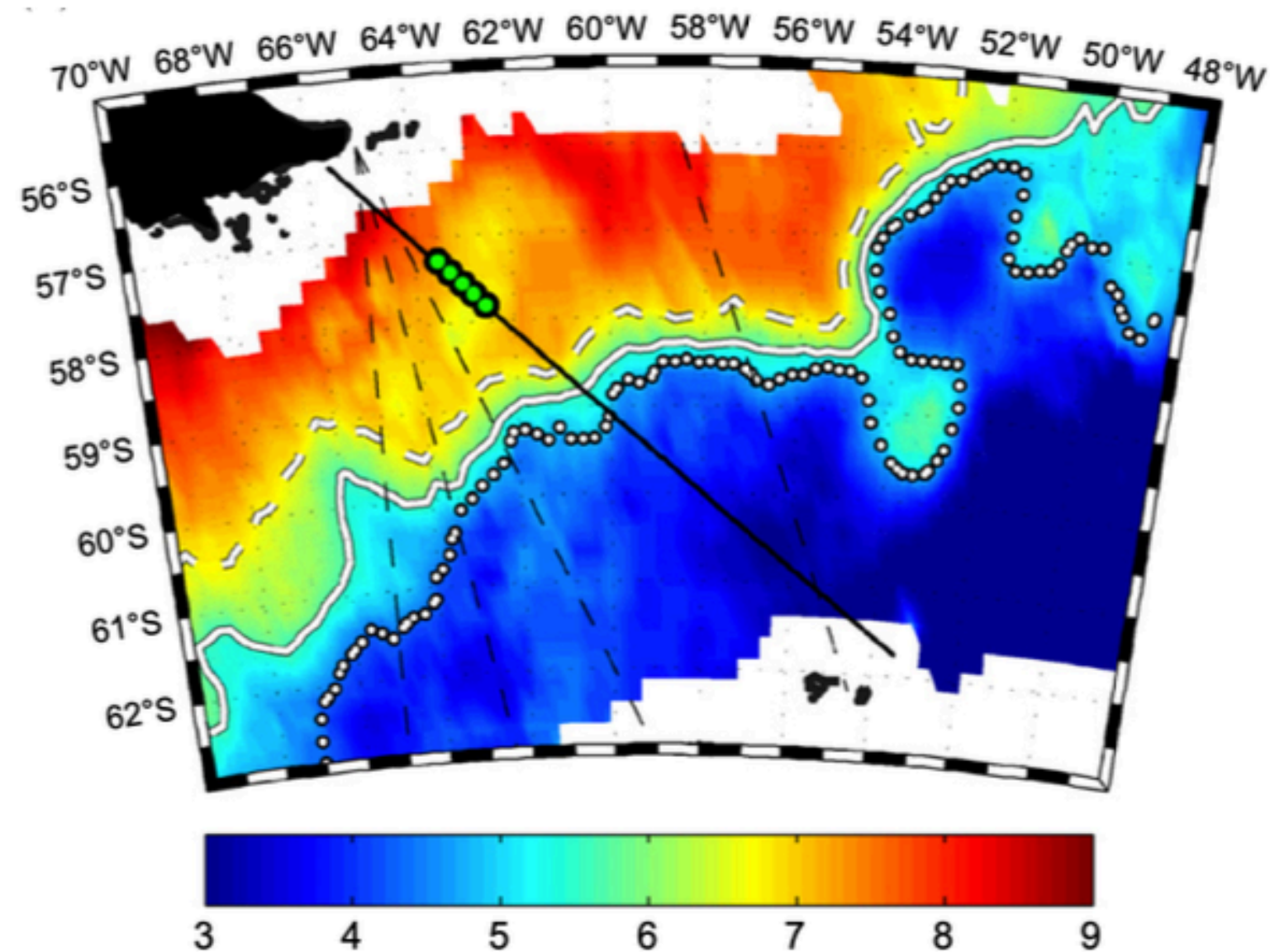


FIGURE 13 - Données satellitaires présentées par Barré et al. La ligne blanche représente le front polaire et les lignes hachurées ses extrémités nord et sud.

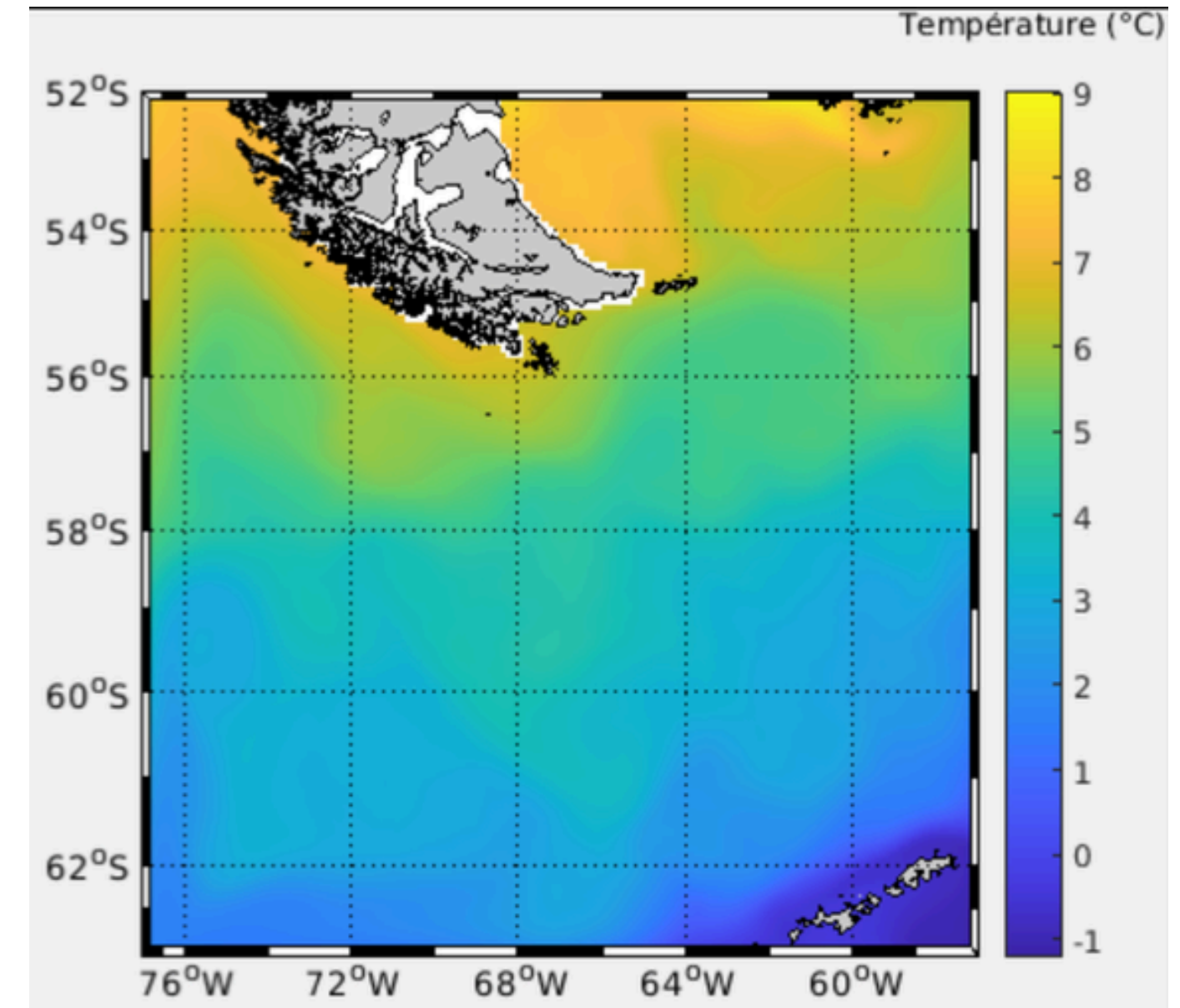
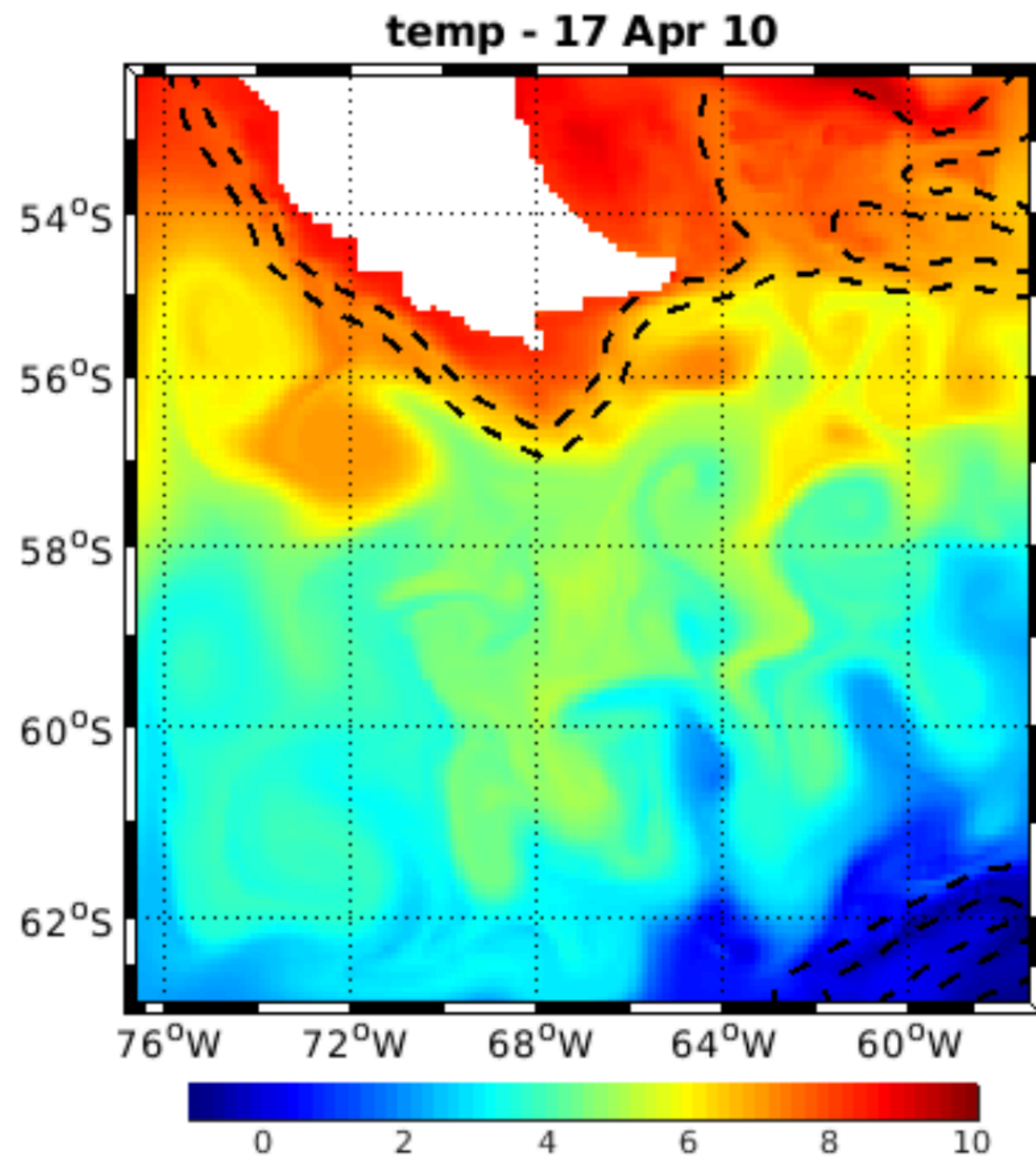


FIGURE 14 - SST moyennées de l'année 6 à 10.

Hypothèses sur l'absence du Front Polaire dans le modèle :

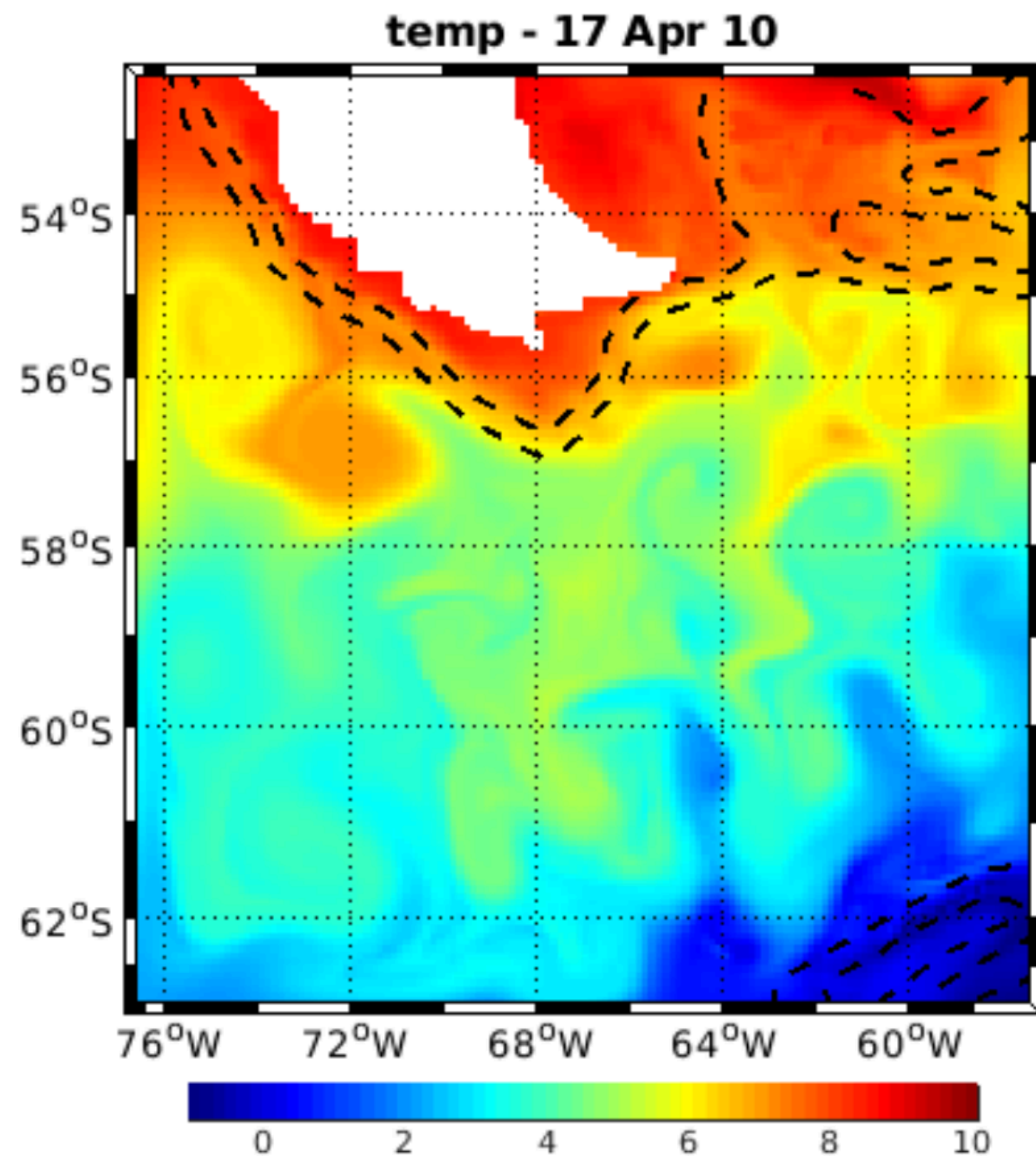
Une **résolution horizontale insuffisante** : limite la capacité à représenter avec précision les gradients thermiques qui se forment à des échelles fines.

Une **représentation simplifiée des conditions initiales et des conditions de forçage**.



Les tourbillons froids (cycloniques) proviennent des **méandres nord du Front Polaire**, tandis que les tourbillons chauds (anticycloniques) naissent des extensions sud du Front Subantarctique (Sprintall, 2003).

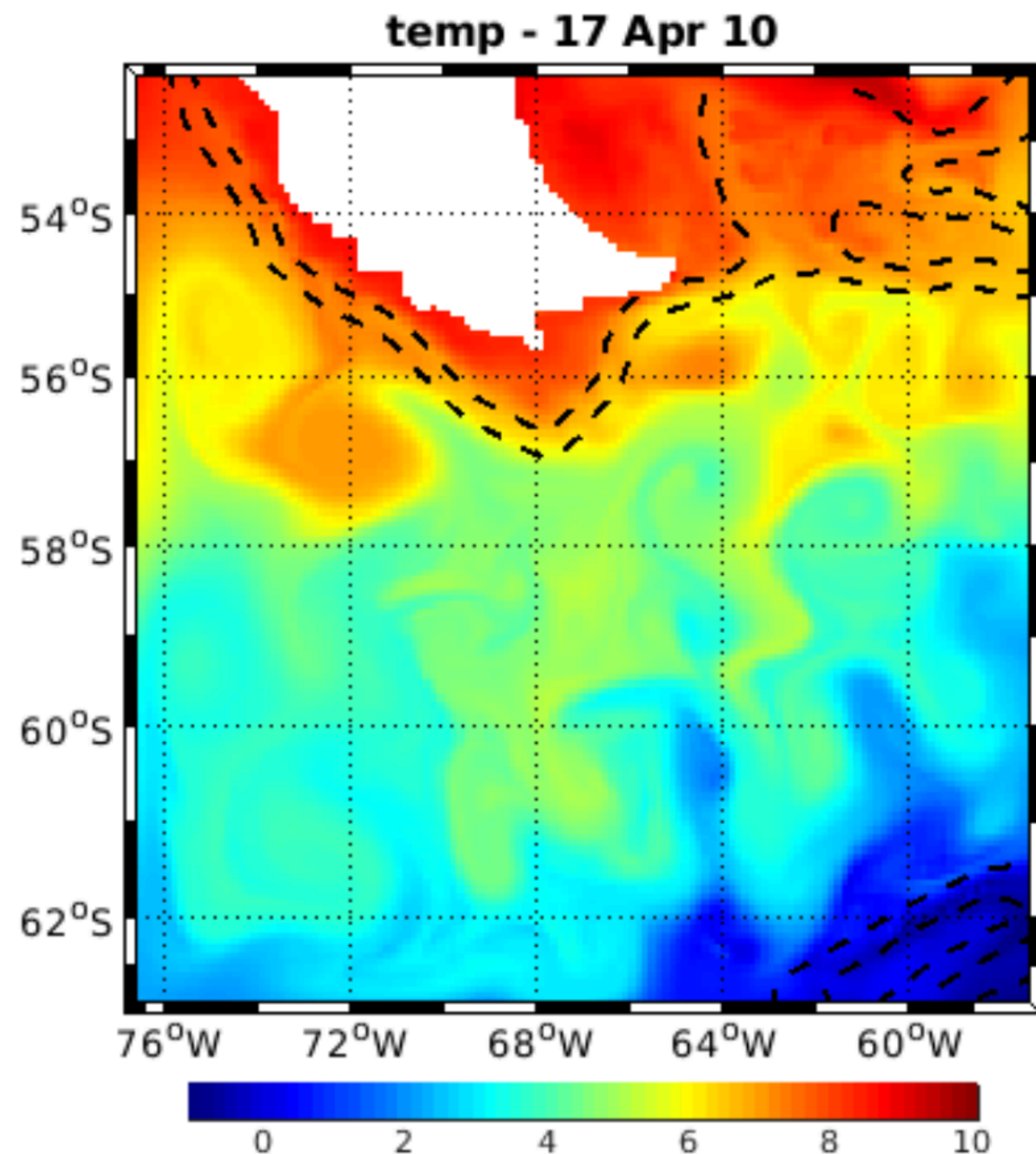
FIGURE 5 – Températures de surface dans le passage de Drake.



Les tourbillons froids (cycloniques) proviennent des **méandres nord du Front Polaire**, tandis que les tourbillons chauds (anticycloniques) naissent des extensions sud du Front Subantarctique (Sprintall, 2003).

Dans le modèle, le Front Polaire semble **déplacé plus au sud**, à l'endroit où devrait se situer le Front Sud de l'ACC.

FIGURE 5 – Températures de surface dans le passage de Drake.



Les tourbillons froids (cycloniques) proviennent des **méandres nord du Front Polaire**, tandis que les tourbillons chauds (anticycloniques) naissent des extensions sud du Front Subantarctique (Sprintall, 2003).

Dans le modèle, le Front Polaire semble **déplacé plus au sud**, à l'endroit où devrait se situer le Front Sud de l'ACC.

Il faudrait **agrandir** le domaine du modèle pour en avoir le cœur net. Cependant, le modèle a tendance à **crasher** lorsqu'il couvre des latitudes trop élevées. Peut-être que le passage de Drake se situe à des **latitudes trop basses** dans la simulation pour être modélisé avec justesse.

FIGURE 5 – Températures de surface dans le passage de Drake.

Variabilités saisonnières dans le passage de Drake :

Le modèle reproduit de manière **cohérente** les variations saisonnières dans le passage de Drake.

En été, la salinité est plus faible en raison de la **fonte des glaces**, entraînant une **dessalure**.

En hiver, la température de surface est plus froide qu'en profondeur, à cause des **températures atmosphériques extrêmement basses**.

Les variations saisonnières disparaissent en dessous de **200 m**, car le passage de Drake est proche des régions polaires.

Le resserrement de l'ACC, combiné à la topographie unique du passage de Drake, font de cette région une zone particulièrement dynamique où se forment de nombreux tourbillons.

Les résultats révèlent une **absence ou un déplacement du Front Polaire**, pouvant s'expliquer par plusieurs facteurs :

- **une résolution trop faible**
- **des conditions ou de forçages simplifiées**
- **une zone géographique choisie située à des latitudes trop basses**

Références

- Barré, N., Provost, C., Renault, A., and Sennéchaël, 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).