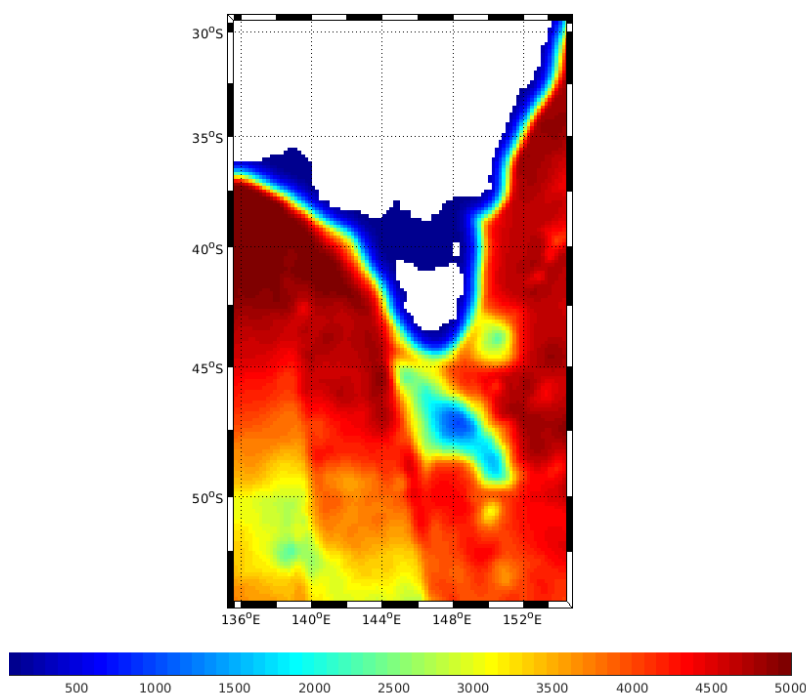


Modélisation de la circulation océanique autour de la Tasmanie



Alexandre Le Hen

Master 1 - Sciences de la Mer, option OPB année 2021-2022

**OPB 205 : Modélisation 3D Océanique encadré par Andrea
Doglioli**

6 Mai 2022

Résumé

L'objectif de ce travail a été de modéliser la circulation océanique autour de la Tasmanie, résultant d'un résidu du courant Est Australien (EAC) et du courant de Zeehan (ZC). Cette zone est intéressante pour son cycle saisonnier distinctif et clair : l'EAC est plus fort en été austral (de décembre à mars) alors que le ZC a un débit maximal en hiver austral (de juin à septembre). La modélisation contient également une partie du courant Circumpolaire Antarctique pour observer s'il influence les courants autour de la Tasmanie et inversement. Ce modèle a été créé grâce au système de modélisation océanique régional en trois dimensions CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity model), et implémenté sur 10 ans.

Abstract

The objective of this work was to model the ocean circulation around Tasmania, resulting from a residual of the East Australian Current (EAC) and the Zeehan Current (ZC). This area is interesting for its distinctive and clear seasonal cycle: the EAC is strongest in the austral summer (December to March) while the ZC has a maximum flow in the austral winter (June to September). The model also contains a portion of the Antarctic Circumpolar Current to see if it influences the currents around Tasmania and vice versa.

This model was created using the three-dimensional regional ocean modelling system CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity model) and implemented over 10 years.

Sommaire

I/ Introduction **p.5**

II/ Matériels et méthodes **p.6**

1/ CROCO et les équations de la circulation océanique p.6

2/ Discrétisation p.7

3/ Paramétrisation de la simulation p.8

III/ Résultats et discussion **p.9**

1/ Diagnostiques du modèle p.9

2/ Température en surface et variation saisonnière p.9

3/ Salinité de surface p.10

4/ Vitesse des courants p.11

IV/ Conclusion **p.13**

V/ Bibliographie **p.14**

VI/ Annexes **p.15**

Table des figures

Fig.1 : Circulation océanique autour de la Tasmanie montrant à la fois les principales caractéristiques bathymétriques et des caractéristiques géographiques. L'encart de droite montre la côte sud-est de façon plus détaillée. L'encart de gauche montre un schéma des principaux systèmes de courants dans la région. p.5

Fig.2 : Grille d'Arakawa C. La masse volumique ρ , la déformation de surface libre η , la pression p , la température T , la salinité S et les concentrations de traceurs C sont calculées au centre de la maille alors que les vitesses U et V sont calculées aux faces de ces mêmes mailles. p.7

Fig.3 : Diagnostiques de la simulation où la ligne horizontale représente la moyenne (A : Le volume totale en km³ ; B : L'énergie cinétique moyennée sur la surface ; C : L'énergie cinétique moyennée sur le volume ; D : La vitesse verticale moyennée sur le volume ; E : Salinité moyennée sur le volume ; F : La température moyennée sur le volume). p.9

Fig.4 : Température de surface en été austral (Janvier), modélisé avec CROCO à gauche et modélisé en 1999 à droite (Ridgway, K.R., 2007). p.10

Fig.5 : Température de surface en hiver austral (Juin), modélisé avec CROCO à gauche et modélisé en 1999 à droite(Ridgway, K.R., 2007). p.10

Fig.6 : Variation de la salinité de surface en fonction des saisons, l'été austral (Janvier) est représenté à gauche et l'hiver austral (Juin) est représenté à droite. p.10

Fig.7 : Modélisation de la vitesse du courant Circumpolaire de surface au sud de la Tasmanie en décembre 1990 à gauche et mars 1988 à droite (Langlais, C., et al.,2007). p.11

Fig.8 : Variation des vitesses des courants de surface au Sud-Est de l'Australie et au Sud de la Tasmanie en décembre à gauche et en mars à droite. p.11

Fig.9 : Variations du champ de hauteur de surface moyen pour la région située au sud et à l'ouest du continent australien (Ridgway, K.R., 2007). p.12

Liste des tableaux

Tab.1 : Paramètres de la grille du modèle. p.8

Tab.2 : Paramètres temporels de la simulation. p.8

I/ Introduction

La région de la Tasmanie est située au sud-est de l'Australie et elle est caractérisée par des courants présentant un cycle saisonnier distinctif. Il résulte de l'influence du courant Est Australien (EAC) arrivant du Nord-Est et du courant de Zeehan arrivant de Nord-Ouest (Fig.1). Ce cycle montre un EAC plus fort en été et un débit maximum pour le ZC en hiver (Ridgway, K.R., 2007).

Cette région est aussi particulière pour être une des rares zones de connexion entre deux bassins océaniques : l'océan Pacifique et l'océan Indien. Les circulations de moyenne latitude des gyres des deux océans se rejoignent au sud de la Tasmanie. Il est important de connaître les variations de ce transport car ils sont susceptibles d'avoir d'importants effets sur le climat australien et même mondial (Harris et al., 1987). Malgré l'importance de la région à cause de la possibilité de phénomènes de poids, cette circulation a reçu assez peu d'attention.

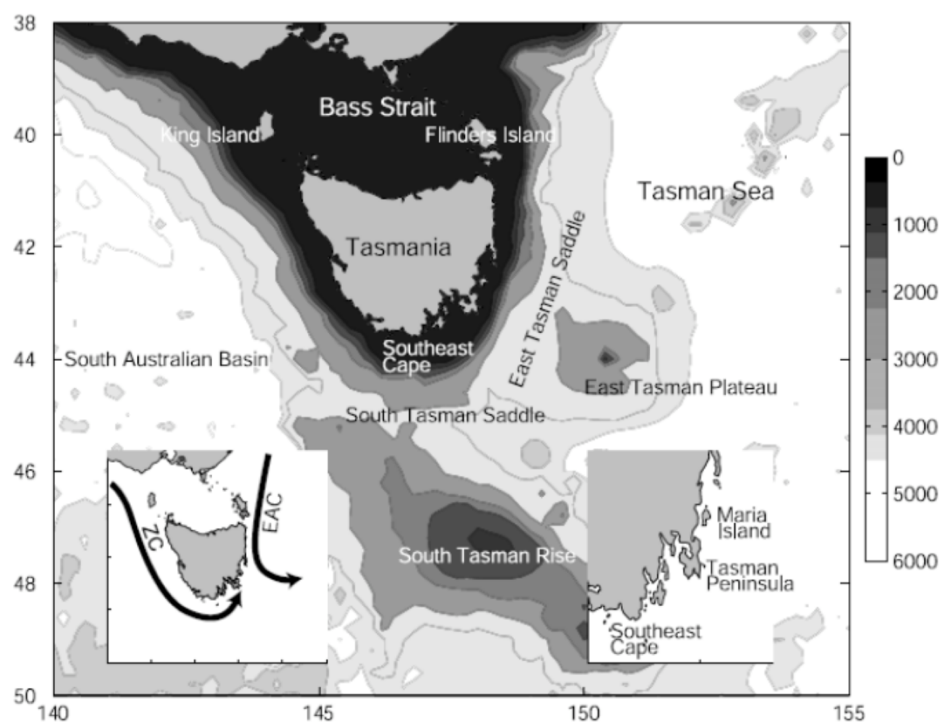


Fig.1 : Circulation océanique autour de la Tasmanie montrant à la fois les principales caractéristiques bathymétriques et des caractéristiques géographiques. L'encart de droite montre la côte sud-est de façon plus détaillée. L'encart de gauche montre un schéma des principaux systèmes de courants dans la région.

La Tasmanie est une île éloignée à 500km au Sud-Est de l'Australie. L'étendue d'eau la séparant du continent est le détroit de Bass. Au large Sud-Est de la Tasmanie, le plateau Est de la Tasmanie orientale s'élève à moins de 2500m de profondeur et est suivi par une structure plus importante appelée le South Tasman Rise (STR) qui s'étend de 45°S à 50°S avec une profondeur minimale de 1000m. Des cheneaux de 3500m de profondeur vont séparer le STR et le plateau Est Tasmanien du talus continental de la Tasmanie.

Au sud de la Tasmanie se trouve le courant Circumpolaire connu pour son débit important (150 Sverdrup) et qui est un courant qui parcourt l'océan Antarctique sans interruption. Ce courant est en partie dû aux forts vents d'Ouest et va se déplacer d'Ouest en Est en surface.

La zone de simulation a été fixée entre les longitudes 135°E et 155°E et les latitudes 29°S et 54°S pour observer la zone de Tasmanie ainsi qu'une partie du courant Circumpolaire.

II/ Matériels et méthodes

1/ CROCO et les équations de la circulation océanique

Le modèle CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity model) est un modèle océanique régional en trois dimensions ainsi qu'une plateforme communautaire. C'est une version améliorée du précédent modèle ROMS (Regional Ocean Modeling System) doté d'une grille raffinée par méthode AGRIF proposant une boîte à outils puissante pour le traitement de CROCO : CROCO_TOOLS. Ce nouveau code a été développé en collaboration avec de nombreux partenaires français : UPS, IFREMER, SHOM, CNRS, INRIA et IRD ainsi que les protagonistes historiques de ROMS (UCLA et DGEO). CROCO permet des couplages avec des modèles biogéochimiques, d'écosystèmes, de simulation de courant ou encore de mouvements de sédiments.

Le modèle CROCO va résoudre les équations primitives de Navier-Stokes. Le modèle va également utiliser les équations d'état de l'eau de mer de TEOS-10 (Thermodynamic Equation Of Seawater 2010). De nombreuses hypothèses et approximations sont utilisées dans le modèle CROCO :

- L'approximation de Boussinesq qui suppose que la masse volumique d'un fluide est le résultat d'une densité de référence (ρ_0) et d'une fluctuation ρ' (Eq.1).

$$\text{Eq.1} \quad \rho \equiv \rho_0 + \rho'(x, y, z, t) \quad \text{avec} \quad \rho' \ll \rho_0$$

- L'hypothèse hydrostatique où la composante verticale du mouvement devient l'équilibre hydrostatique (Eq.2).

$$\text{Eq.2} \quad \frac{dp}{dz} = -\rho g$$

- L'hypothèse d'incompressibilité où on considère que la masse volumique de l'eau ne varie pas avec la pression.

- L'hypothèse de fermeture Newtonienne de la turbulence de Reynolds.

CROCO va ensuite résoudre certaines équations :

Les équations du mouvement

L'évolution de la vitesse horizontale moyenne (au sens de la turbulence) des particules du fluide géophysique est décrite par les équations de Navier-Stokes :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + f v - \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - f u - \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \end{aligned}$$

Où u , v et w sont les composantes horizontales et verticale non turbulentes ou « moyennes » de la vitesse du mouvement ;

u' , v' et w' sont les composantes turbulentes de la vitesse du mouvement ;

f est le paramètre de Coriolis ;

P est la pression ;

ρ_0 est la densité de référence de l'eau de mer au sens de l'hypothèse de Boussinesq.

Les équations de conservation de la chaleur et du sel

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = -\frac{\partial(\overline{T'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{T'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{T'w'})}{\partial z} + \frac{H_c}{\rho_o C_p} \frac{\partial I}{\partial z}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} S = -\frac{\partial(\overline{S'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{S'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{S'w'})}{\partial z}$$

Où H_c est le flux solaire incident.

C_p est le coefficient de chaleur massique: $C_p = 3950 \text{ J/kg.K}$

$I(z)$ est la fraction de ce flux qui parvient au niveau z : $I(z) = \exp(-\lambda z)$ avec $\lambda = 0.05 \text{ m}^{-1}$

L'équation d'état de l'eau de mer

$$\text{TEOS 10} \Rightarrow \rho \equiv \rho(T, S, p)$$

L'équation de continuité

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

2/ Discrétisation

La résolution de ces équations se fait par discrétisation sur le maillage. Pour la grille horizontale, c'est celle d'Arakawa-C. Elle consiste à calculer les vitesses au niveau des faces de la maille, et les autres variables au niveau du centre de la maille (Fig.2). Pour la grille verticale, les coordonnées sigma sont utilisées permettant de suivre la topographie du fond marin et d'augmenter la résolution proche de la surface et du fond.

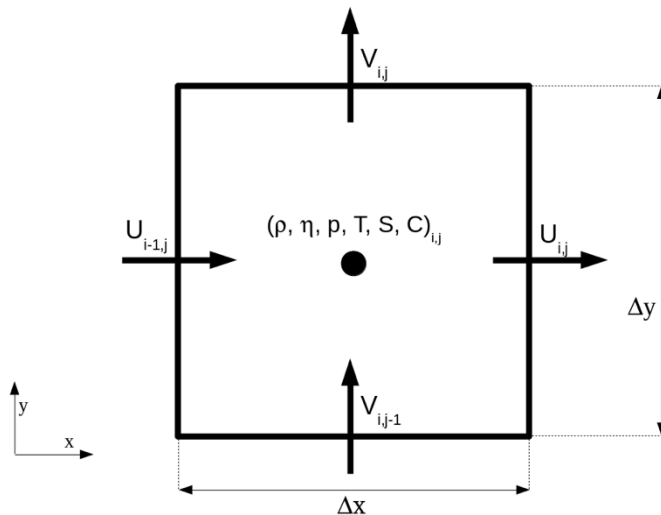


Fig.2 : Grille d'Arakawa C. La masse volumique ρ , la déformation de surface libre η , la pression p , la température T , la salinité S et les concentrations de traceurs C sont calculées au centre de la maille alors que les vitesses U et V sont calculées aux faces de ces mêmes mailles.

Ensuite un critère de stabilité est fixé : le critère CFL (Courant- Friedrichs-Levy). Ce critère empêche qu'un processus (courant, onde...) ne se propage pas à plus d'une maille à chaque pas de temps (Eq.3).

$$\text{Eq.3} \quad \Delta t \leq \frac{1}{c} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

Où $c = \sqrt{gh}$

3/ Paramétrisation de la simulation

La première étape a été de fixer les coordonnées géographiques de la zone d'étude. La zone choisie est située au sud de la Tasmanie et contient une partie du courant Circumpolaire. Ces données sont fixées grâce au script Matlab `ad_findgeocoord.m` pour définir le domaine de calcul et former les frontières de la grille.

Ensuite, ces coordonnées ainsi que la résolution horizontale (Tab.1) ont été changées dans le fichier `crocotools_param.m` où on vérifie le nombre de mailles pour éviter les simulations trop longues et on vérifie également si les frontières sont ouvertes (Tab.1).

Par la suite, le programme `make_grid.m` est utilisé pour obtenir les tailles de la grille (Tab.1) ainsi qu'une figure de la bathymétrie (utilisée pour la page de couverture).

Longitude min	135°
Longitude max	155°
Latitude min	-54°
Latitude max	-29°
Taille de la grille en latitude	MMm=170
Taille de la grille en longitude	LLm=99
Taille de la grille verticale	32
Résolution	1/5°
Frontières ouvertes	4

Tab.1 : Paramètres de la grille du modèle.

L'étape suivante est d'utiliser `make_forcing.m` et `make_clim.m` pour obtenir les forçages ainsi que les conditions initiales.

La dernière étape avant le lancement de la simulation est de calculer les pas de temps interne et externe de la simulation (Tab.2) sur la base du critère CFL (Eq.3) grâce au script `ad_cfl.m` et de les rentrer dans le fichier `croco.in`. Les données rentrées sont les pas de temps interne et externe (variables `Dt[s]` et `NDTFAST`), la durée de la simulation (variable `NTIMES`), la fréquence de sauvegarde des sorties instantanées et moyennées (variables `NWRT` et `NAVG`) et les sorties pour relancer le modèle (variable `NRST`) qui sont explicitées dans le tableau 2.

Temps de simulation (ans)	10
NRST (itérations)	1800
NAVG et NWRT (itérations)	180
NTIMES (itérations)	1800
Dt (s)	1440
NDTFAST (s)	60

Tab.2 : Paramètres temporels de la simulation.

Enfin, la simulation peut être lancée, après avoir été compilée sur le cluster avec la commande `./jobcomp`, grâce à la commande « `sbatch ./slurm_run_croco.sh` » qui a permis de faire une simulation pluriannuelle (Tab.2).

III/ Résultats et discussion

1/ Diagnostiques du modèle

La première chose à regarder avant d'observer les résultats de la simulation sont les diagnostics du modèle pour vérifier sa stabilité avec l'aide de croco_diags.m. Ces diagnostics permettent de voir la variation de certains paramètres (Fig.3) pendant les 10 années de simulation.

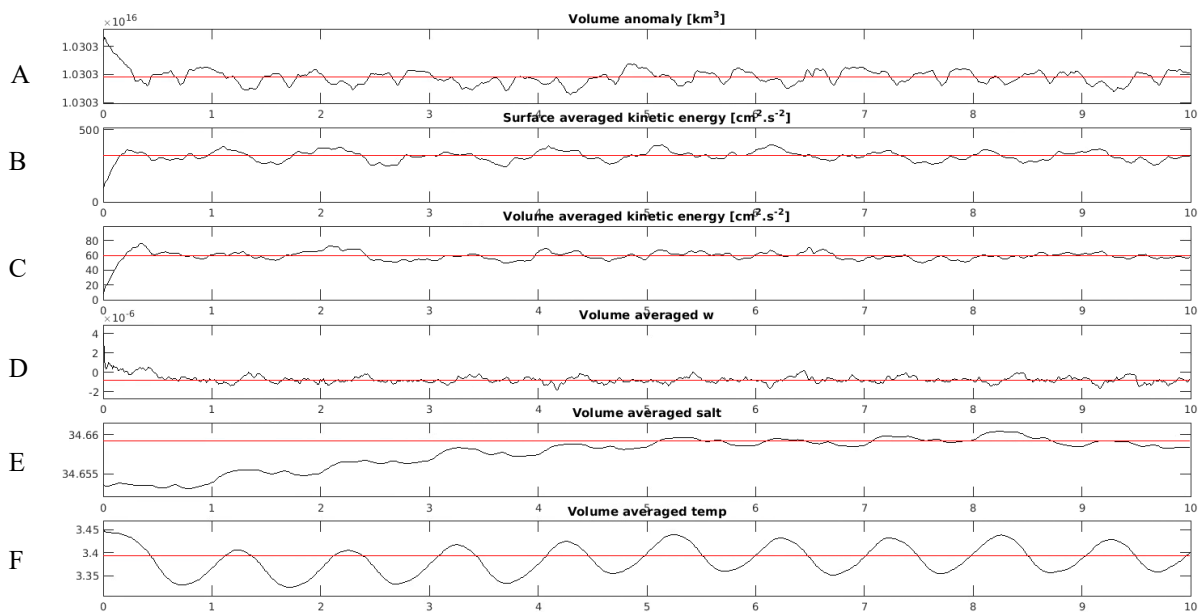


Fig.3 : Diagnostiques de la simulation où la ligne horizontale représente la moyenne (A : Le volume totale en km³ ; B : L'énergie cinétique moyennée sur la surface ; C : L'énergie cinétique moyennée sur le volume ; D : La vitesse verticale moyennée sur le volume ; E : Salinité moyennée sur le volume ; F : La température moyennée sur le volume).

On observe sur ceux-ci que le modèle se stabilise à partir de la quatrième année, c'est-à-dire que le modèle n'est plus influencé par les conditions initiales à partir de cette année. La période précédant cette année est alors appelée spin-up. On s'est alors intéressé aux dernières années.

2/ Température en surface et variation saisonnière

La température de surface nous montre clairement le courant Est Australien qui apporte de la chaleur des basses latitudes que ce soit en été austral (Fig.4) ou en hiver austral (Fig.5). Grâce aux précédentes modélisation (Ridgway, K.R., 2007) de cette région, on peut comparer les variations saisonnières avec notre modèle. On observe que les apports de chaleur de l'EAC au Nord-Est de la Tasmanie est présente dans les deux modèles ainsi que pendant toute l'année. Même si notre modèle est à une échelle plus importante, les résultats de la température de surface restent proches de ceux du modèle datant de 1999. Ces modèles sont proches grâce à la résolution importante de 1/5 de degré.

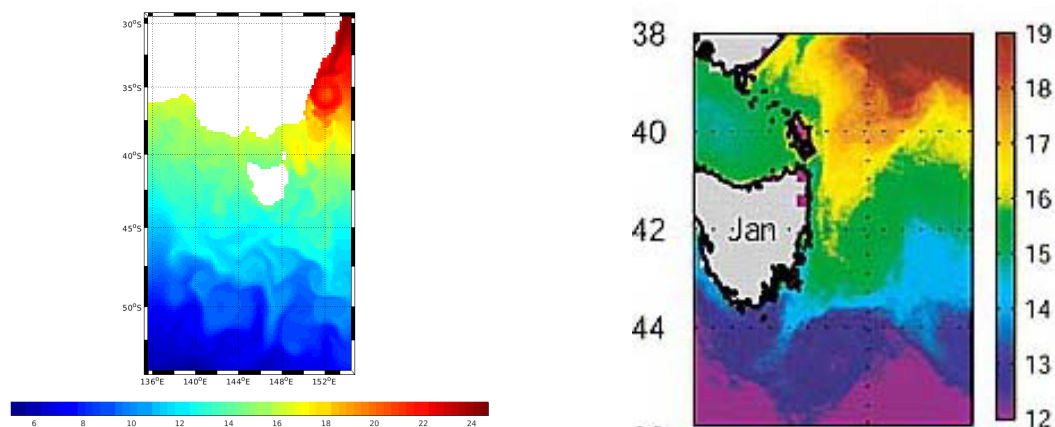


Fig.4 : Température de surface en été austral (Janvier), modélisé avec CROCO à gauche et modélisé en 1999 à droite (Ridgway, K.R., 2007).

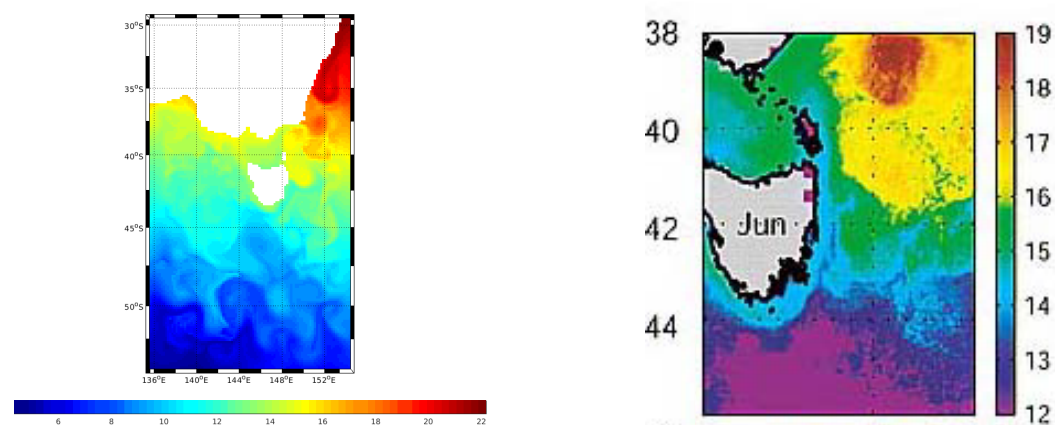


Fig.5 : Température de surface en hiver austral (Juin), modélisé avec CROCO à gauche et modélisé en 1999 à droite (Ridgway, K.R., 2007).

3/ Salinité de surface

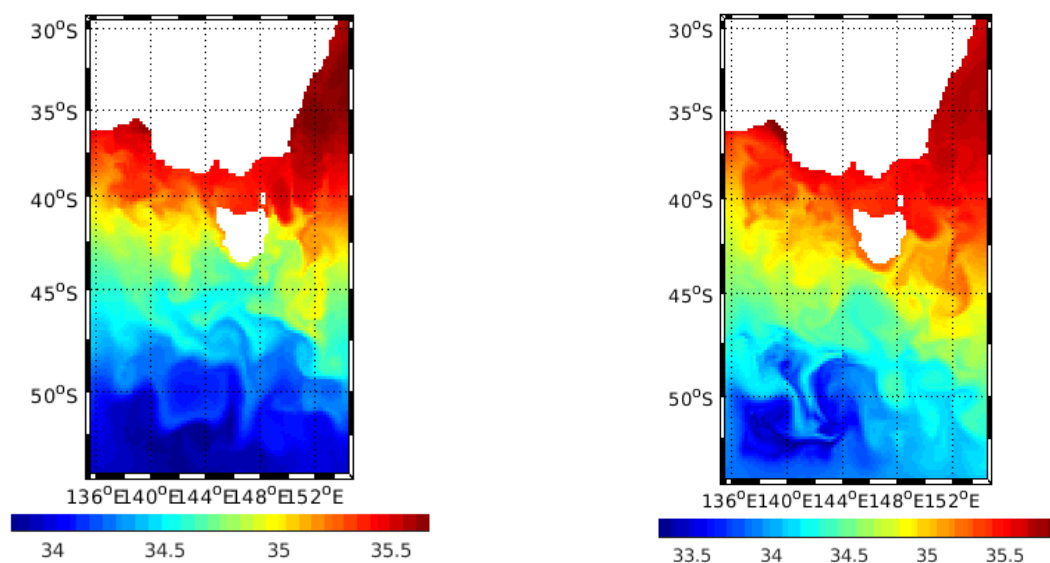


Fig.6 : Variation de la salinité de surface en fonction des saisons, l'été austral (Janvier) est représenté à gauche et l'hiver austral (Juin) est représenté à droite.

La figure 6 montre la salinité de surface pendant l'été ainsi que l'hiver austral qui vont présenter une variabilité saisonnière avec une salinité plus forte au niveau de la Tasmanie en hiver et une salinité plus forte pour le courant Circumpolaire en été. Le maximum de salinité se trouve dans l'EAC et le minimum dans le courant Circumpolaire. Ces valeurs semblent correspondre aux observations de Ridgway et Condie (2004) qui ont trouvé une salinité entre 35 et 36. Pour le cas du courant Circumpolaire, la salinité va correspondre aux dires de Pichat, Thomas et Minster (2001) définissant la salinité entre 34 et 35.

4/ Vitesse des courants

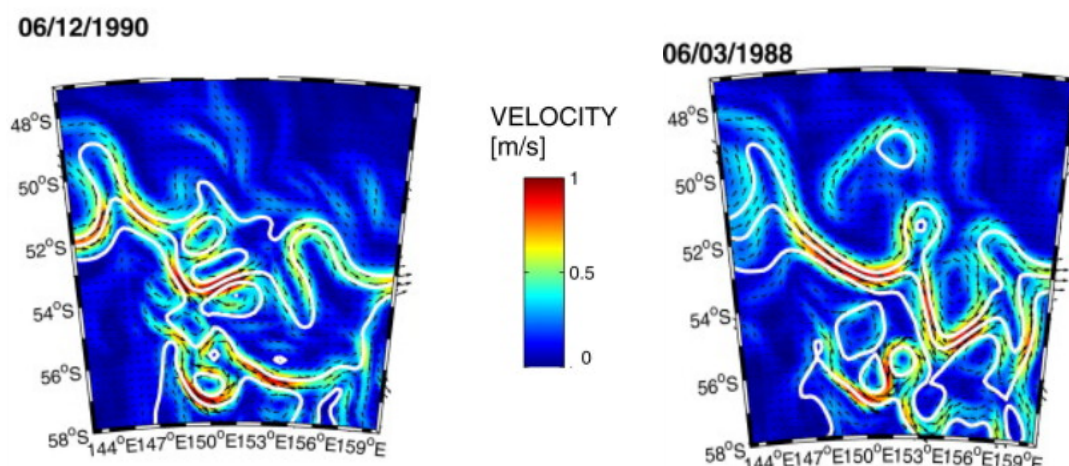


Fig.7 : Modélisation de la vitesse du courant Circumpolaire de surface au sud de la Tasmanie en décembre 1990 à gauche et mars 1988 à droite (Langlais, C., et al.,2007).

Cette figure nous permet d'observer les courants de surface du courant Circumpolaire. La figure 7 nous montre avec précision les différents chemins qu'emprunte ce courant ainsi que l'intensité de chaque trajet. On y observe un changement des trajets entre décembre et mars où les courants plus intenses vont être déplacés vers l'Est en mars.

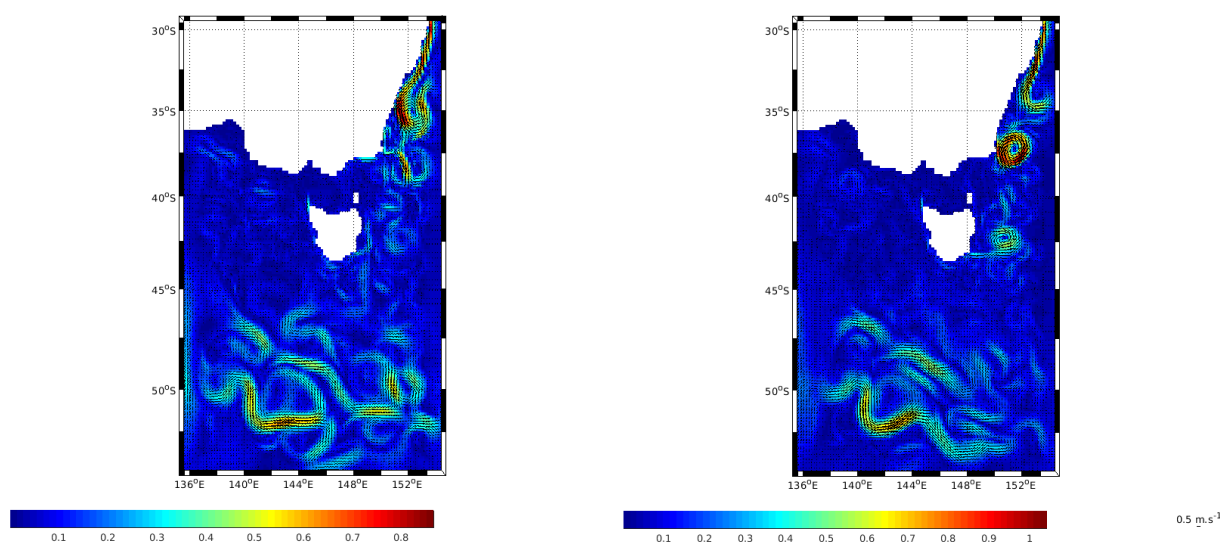


Fig.8 : Variation des vitesses des courants de surface au Sud-Est de l'Australie et au Sud de la Tasmanie en décembre à gauche et en mars à droite.

En comparaison, les vitesses des courants modélisés sur CROCO sont du même ordre de grandeur que ceux décrits par Langlais et ses collègues (2011). Cependant, la figure 8 nous montre une variation saisonnière avec une diminution de l'intensité des courants en décembre mais aussi une augmentation du nombre des courants de forte intensité. On ne sait pas si cette différence est dû à une erreur dans la modélisation, une résolution trop faible ou encore une différence importante car les modèles ont plus de 10 ans de différence.

Enfin, la dernière chose qu'on peut tirer de la figure 8 est la formation de tourbillons en mars au Sud-Est de l'Australie et à l'Est de la Tasmanie qui sont due à l'EAC. Ces tourbillons sont plus intense en automne comme on peut le voir sur l'anomalie de la surface de la figure 9 qui est plus intense à cette époque de l'année.

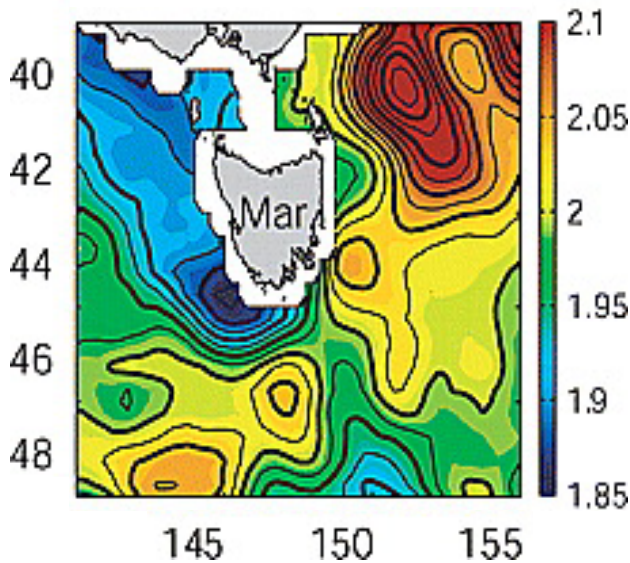


Fig.9 : Variations du champ de hauteur de surface moyen pour la région située au sud et à l'ouest du continent australien (Ridgway, K.R., 2007).

IV/ Conclusion

Le modèle CROCO est un puissant outil de modélisation pouvant représenter des zones à grande échelle comme des petites échelles en augmentant la résolution. Il nous a permis de trouver des valeurs assez semblables à celles des articles scientifiques et même de produire des figures assez similaires.

Cependant, d'autres simulations auraient pu être intéressantes pour avoir une meilleure représentation de la zone d'étude.

Dans un premier temps, il aurait été avantageux de faire une simulation sur une plus petite zone entre la Tasmanie et l'Australie pour observer en détail la circulation et voir si les îles Flinders et King (Fig.1) affectent la circulation et quels phénomènes elles peuvent créer.

Dans un second temps, une autre simulation plus centrée sur le courant Circumpolaire aurait pu être profitable pour observer en détail les variations de l'intensité et directions des courants ainsi que trouver des études plus détaillées et récentes sur ce courant Circumpolaire au Sud de la Tasmanie pour pouvoir mieux les comparer avec nos modélisations.

Toutes ces simulations supplémentaires auraient pu amener des précisions sur la zone d'étude et ainsi mieux comprendre comment sont régis les courants Sud Australien.

V/ Bibliographie

Baklouti, M., Initiation aux méthodes numériques de résolution des équations aux dérivées partielles, 2022, Aix-Marseille Université.

Doglioli, A., and Mazoyer, C., Notes de cours et travaux dirigés de modélisation 3D océanique, 2022, Aix-Marseille Université.

https://people.mio.osupytheas.fr/~doglioli/TEACHING_Modelisation3DOceanique/poly_Modelisation3DOceanique_openoffice_V3_CM2022.pdf

Harris, G., et al., The water masses of the east coast of Tasmania: Seasonal and interannual variability and the influence on phytoplankton biomass and productivity, Aust. J. Mar. Freshwater Res., 1987, 38, 569–590.

Langlais, C., et al., Variability and mesoscale activity of the Southern Ocean fronts: Identification of a circumpolar coordinate system, Ocean modelling, 2011, 39, 1.

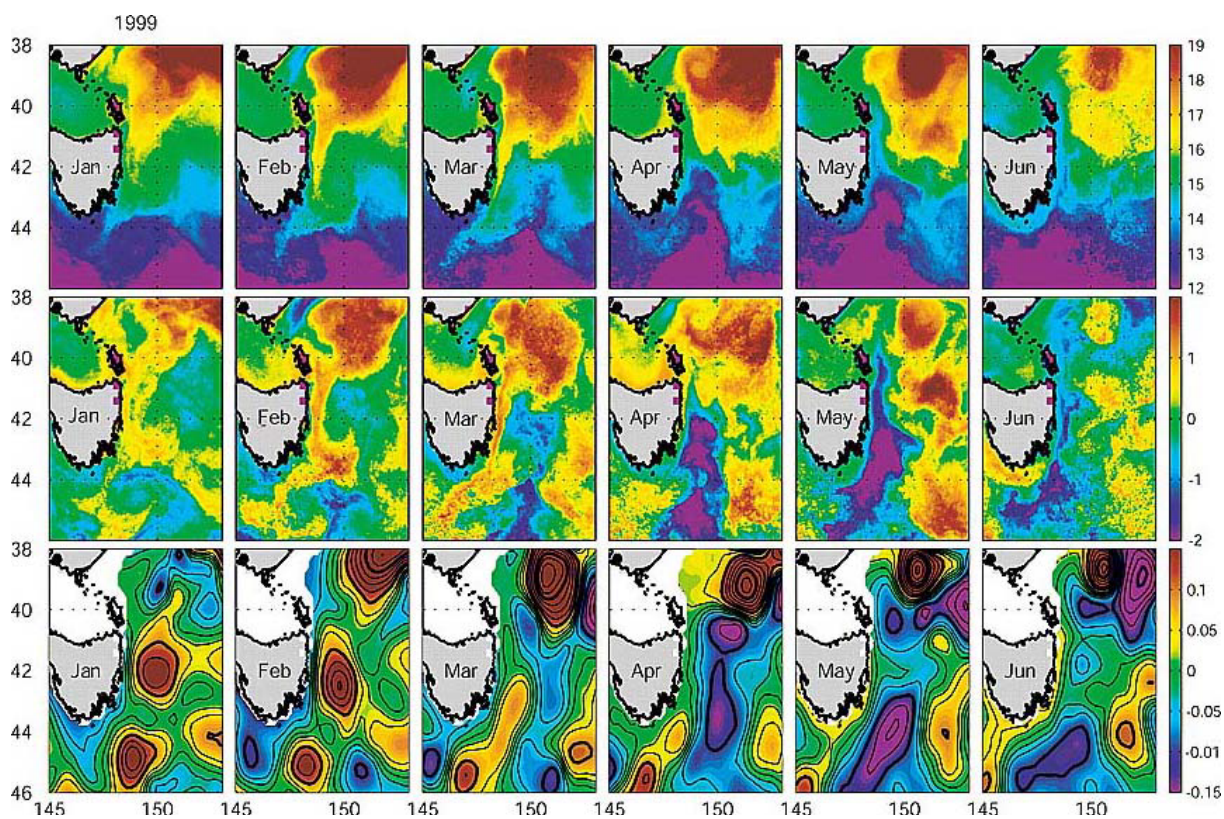
Pichat, S., et al., Les courants thermohalins et les eaux océaniques profondes, Planet terre, 2001.

Ridgway, K.R., Seasonal circulation around Tasmania: An interface between eastern and western boundary dynamics, Journal of geophysical research, 2007, 112, C10016.

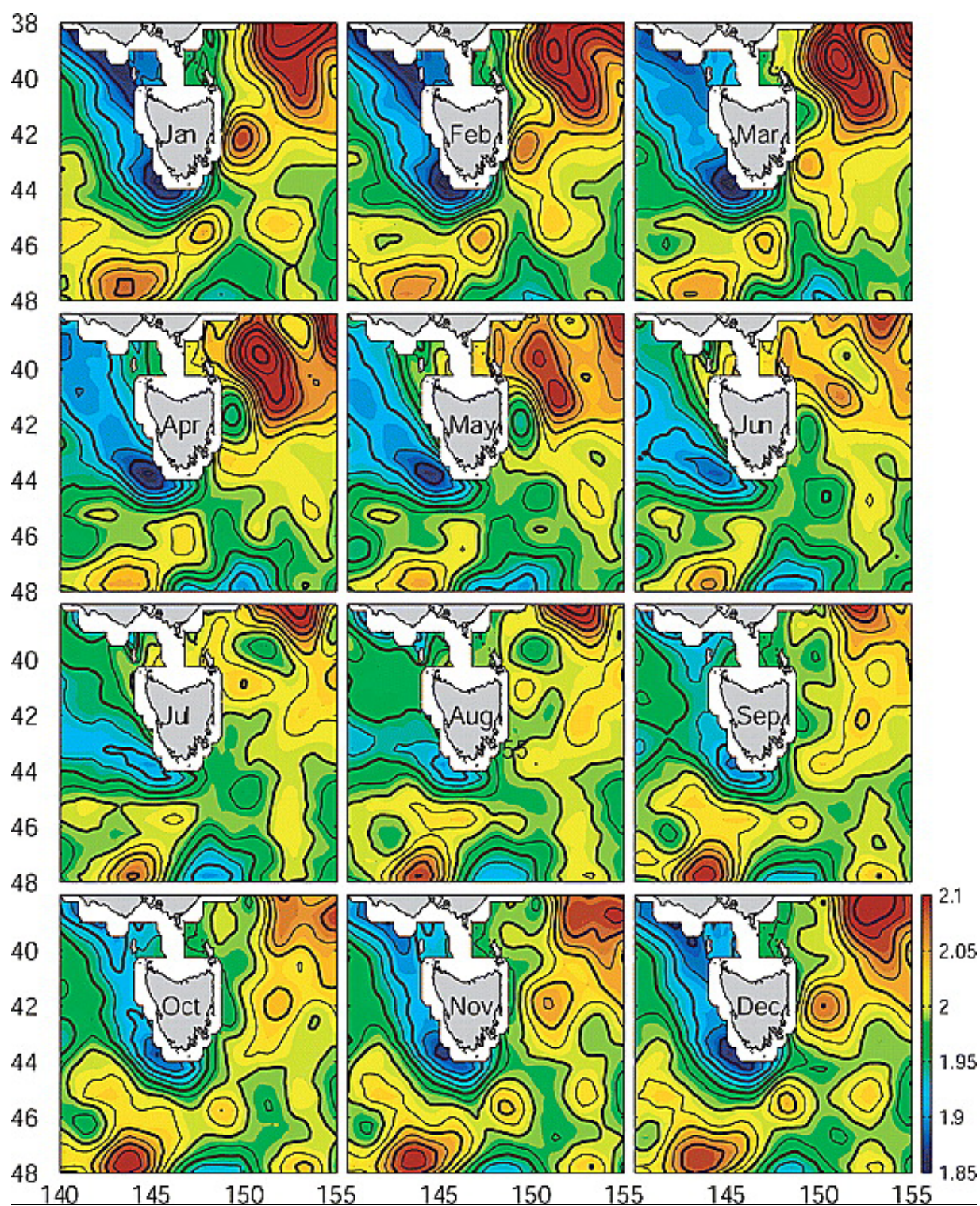
Ridgway, K.R., and Condie, S.A., The 5500-km-long boundary flow off western and southern Australia, Journal of Geophysical Research, 2004, 109, C04017.

VI/ Annexes

Ces figures sont celles qui ont été modifiées pour obtenir les figures 4, 5 et 9.



Annexe 1 : Modèles mensuels pour 1999 de janvier à juin, SLA provenant d'une interpolation fusionnée de l'altimètre et du marégraphe côtier (m) (en bas), anomalie de la SST (milieu) et SST (°C) (haut) (Ridgway, K.R., 2007).



Annexe 2 : Cartes mensuelles du champ moyen de hauteur de surface pour la région située au Sud et à l'Ouest du continent australien(Ridgway, K.R., 2007).