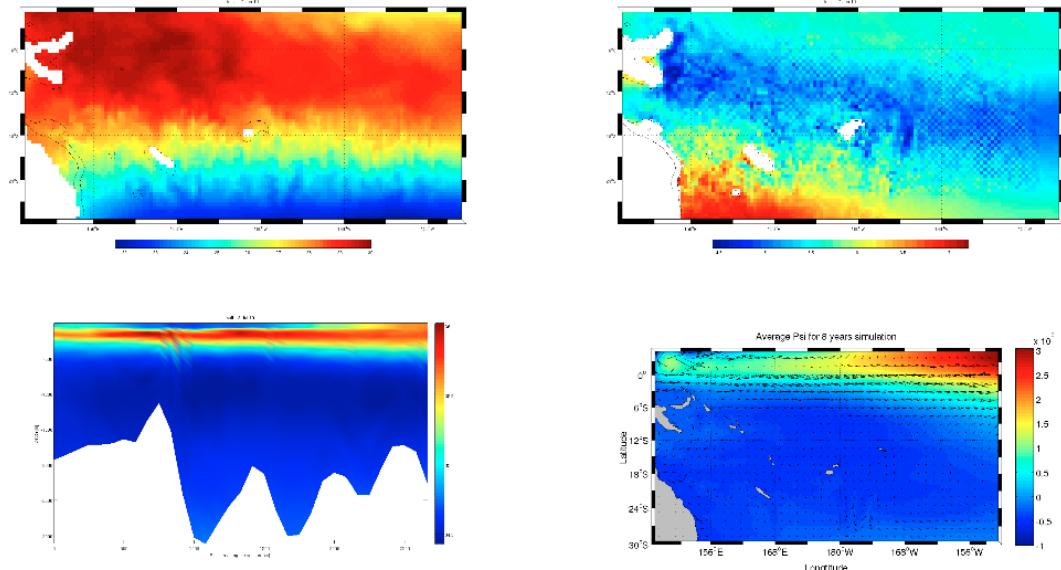


OPB205 : Etude des caractéristiques du Pacifique Sud avec le modèle ROMS

Auteur : Louise Rousselet



Master d'Océanographie Physique et Biogéochimique
Responsable : Mr A. DOGLIOLI

22 mai 2014

Table des matières

1	Introduction	3
2	Méthodes	3
2.1	Les équations	4
2.2	Les hypothèses	4
2.3	Fermeture de la turbulence et estimation des coefficients de viscosité turbulente	5
2.4	Les conditions aux limites et aux frontières	5
2.5	Implémentation du modèle à la zone d'étude	5
3	Résultats	6
3.1	Diagnostiques du modèle et stabilité	6
3.2	Caractéristiques des masses d'eau et variabilité spatiale	7
3.3	Circulation	8
4	Discussion	10
4.1	Les masses d'eau dans la Mer de Corail	10
4.2	Sea Surface Height	11
4.2.1	Sans les marées	11
4.2.2	Avec les marées	11
4.3	Circulation à grande échelle et transport	12
5	Conclusion	13
A	Circulation du modèle sur les 7 années stables	15
B	Circulation de la Mer de Corail (Cravatte et al. 2013)	15
C	Circulation du Pacifique Sud (Martinez et al. 2009)	15
D	Script Matlab pour calculer le transport moyen sur 7 ans de simulation	16
E	Script Matlab pour représenter la variable SSH moyenne sur un mois	18

Résumé

La modélisation numérique est aujourd’hui un outil efficace utilisé par les scientifiques pour représenter des processus physiques ou biologiques. En océanographie, elle permet la résolution des équations primitives du mouvement qui régissent la circulation océanique des masses d’eau (Equations de Navier-Stokes, équations de conservation etc.). Le modèle ROMS (Regional Ocean Modeling System), utilisé dans cette étude, est un modèle régional réaliste, développé par des chercheurs de l’IRD et INRIA. Le modèle, à partir de données d’atlas mondiaux, permet d’implémenter de nombreuses variables biogéochimiques ou physiques au modèle et d’étudier leur variation pour une durée de temps de simulation choisi par le modélisateur. Appliqué à la zone Ouest du Pacifique Sud, les sorties du modèle permettent de dégager des tendances générales de circulation du domaine. En effet l’étude de la température et de la salinité met en évidence une accumulation d’eaux chaudes et dessalées au Nord du domaine et plus froides et salées au Sud. Ces masses d’eaux sont séparées par un front à 16°S qui marque des changements rapides de température et salinité sur un gradient Nord-Sud.

Même à basse résolution la simulation fait apparaître deux courants principaux de la circulation du domaine : le Courant Sud Equatorial (SEC) et le Courant Sud Pacifique (SPC). La comparaison avec les données de la littérature montre que le modèle ROMS permet de faire une représentation, à grande échelle, réaliste du domaine même si le modèle semble sous-estimer les vitesses de courant et donne une estimation de la Sea Surface Height erronée. Le modèle ROMS, permettant l’ajout de nombreux processus physiques complexes et de nombreuses options, peut donc être complexifié en fonction des besoins de l’utilisateur.

Abstract

Numerical modelisation is an efficient tool used by world-wide scientists to represent physical or biological process. In oceanography, this tool permits to solve primitives equation of the movement which control the global oceanic circulation (Navier-Stokes equations, conservation equations, etc.). ROMS (Regional Ocean Modelling System) is a realistic regional model, developed by researchers of IRD and INRIA and used in this study. Parametrization permits to implement various biogeochemical or physical variables, from world oceanographic data atlas. In this study I used a ten years simulation for all variables. Applied to the South West Pacific, the model shows general tendencies of water masses circulation of the zone. Indeed an accumulation of hot and desalinated waters in the North, and warm and salty waters in the South is observed. These waters are separated by a front at 6°S representing quick changes of temperature and salinity on a North-South gradient. Even if it’s a low resolution model, it shows two of the principal currents of the domain : South Equatorial Current and South Pacific Current. Comparison with other studies permits to deduce that ROMS make a representative and realistic simulation of the circulation of the South Pacific even if it seems to under-estimate current velocities. ROMS also allow to add various complex processes depending on the needs of the user.

1 Introduction

Pour mieux comprendre les processus physiques et biogéochimiques de l'océan, la modélisation océanique reste un des outils les plus puissants notamment grâce à l'évolution de l'informatique, au XXème siècle, qui a permis d'optimiser le coût et la puissance de calcul. En effet, utilisés sur une zone océanique précise, les modèles permettent de prédire de façon plus ou moins réaliste l'évolution du comportement des paramètres biogéochimiques ou physiques de la zone d'étude.

L'objectif de l'étude, illustrée par ce rapport, est d'implémenter le modèle de circulation océanique régional réaliste ROMS (Regional Oceanic Modeling System) sur la zone du Pacifique Sud-Ouest. La version utilisée pour réaliser la simulation de ce rapport est la version française développée par l'IRD et l'INRIA, ROMS_AGRIF [<http://www.romsagrif.org/>].

Le Pacifique Sud-Ouest constitue une des zones oligotrophes, voire ultra-oligotrophe au centre de la gyre Sud-Pacifique, les plus intéressantes pour les biogéochimistes afin de comprendre comment des organismes peuvent se développer dans de telles zones très pauvres en nutriments. Ainsi il est indispensable de représenter et de comprendre les processus physiques et biogéochimiques mis en œuvre dans cette zone. Dans ce rapport la zone d'étude se réduira à une zone comprise entre 135°E et 160°O et entre 5°N et 30°S. Elle en effet sous l'influence du Courant Sud Equatorial (SEC) au sud de l'équateur qui transporte les masses d'eau de l'Est à l'Ouest du Pacifique mais aussi sous celle du Courant Pacifique Sud (SPC) (30°S) qui est un contre-courant situé au centre de la gyre et qui transporte les masses d'eau d'Ouest en Est du bassin. De plus, le Courant Est Australien (EAC) borde l'Est de l'Australie en direction du Sud. Ainsi il sera intéressant de mettre en évidence la circulation générale du Pacifique Sud-Ouest mais aussi d'étudier les caractéristiques des masses d'eau soumises à cette circulation. Les données de la littérature seront comparées aux résultats du modèle ROMS pour éventuellement mettre en évidence certaines anomalies du modèle appliqué à la zone d'étude.

2 Méthodes

Le modèle ROMS (Regional Ocean Modeling System) est un modèle, à surface libre, de nouvelle génération et a été créé pour effectuer des simulations réalistes de circulation océanique à échelle régionale qui permettent de calculer la vitesse des courants, l'élévation de la surface libre mais aussi l'évolution de grandeurs telles que la température ou la salinité. Pour cela le modèle résous plusieurs équations, dans un environnement en rotation, en se basant sur l'approximation de Boussinesq et sur l'équilibre hydrostatique. Ces équations sont discrétisées grâce à des schémas numériques qui utilisent une méthode à pas de temps séparés (time splitting). Les conditions initiales et aux frontières sont paramétrées en utilisant des données océanographiques mondiales (World Ocean Atlas (WOA), SeaWifs, QuickSCAT winds...) pour définir par exemple la tension du vent, la salinité ou la température à l'instant initial. Les conditions aux frontières sont re-calculées au cours de la simulation comme nous le verrons plus tard. Les résultats issus de la simulation peuvent ensuite être visualisés à l'aide de la toolbox ROMS_tools qui fournit un ensemble de scripts Matlab qui permettent le calcul de nombreuses variables.

Les équations résolues par le modèle sont donc les équations primitives du mouvement, l'équa-

tion de continuité, les équations de conservation de la chaleur et du sel ainsi que l'équation d'état de l'eau de mer.

2.1 Les équations

Equations du mouvement :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + U \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + fv + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + U \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} - fu + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \end{cases} \quad (1)$$

Equation de continuité :

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

Equation de conservation de la chaleur et du sel :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \cdot \nabla T = A_h \nabla_h^2 T + A_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_c}{\rho C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \cdot \nabla S = A_h \nabla_h^2 S + A_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (4)$$

Equation d'état de l'eau de mer (International Equation of State of Seawater) :

$$\rho = \rho(T, S, z) \quad (5)$$

Avec : u et v les vitesses horizontales, T la température, S la salinité, P la pression, ρ et ρ_o la masse volumique et la masse volumique à pression atmosphérique, A_h et A_v les coefficients de viscosité horizontaux et verticaux, et f la force de Coriolis.

2.2 Les hypothèses

Pour les résoudre, les équations précédentes sont basées sur les hypothèses et approximations suivantes :

- L'hypothèse de Boussinesq qui, en estimant les variations de masses volumiques négligeables, suppose la masse volumique constante (ρ_o).
- L'hypothèse hydrostatique qui suppose que la pression en un point est égale au poids de la colonne d'eau au-dessus.
- L'approche de Reynolds qui permet l'introduction du concept d'écoulement moyen et qui fait apparaître des termes turbulents dans les équations de Navier-Stokes qui peuvent alors être appelées Reynolds-Averaged Navier-Stokes équations (RANS equations).
- La proposition de Boussinesq qui permet de relier les tensions de Reynolds aux composantes du gradient des vitesses moyennes en faisant apparaître les coefficients d'échange turbulent (A_x, A_y, A_z).

-L'hypothèse de turbulence horizontale isotrope qui suppose que les coefficients d'échange turbulent horizontaux sont égaux ($A_x=A_y=A_h$).

2.3 Fermeture de la turbulence et estimation des coefficients de viscosité turbulente

Dans les équations primitives du mouvement apparaissent des termes de flux turbulent qui sont indéterminés et qui empêchent donc la résolution des équations. Il est donc nécessaire d'ajouter des équations de "fermeture" en utilisant l'hypothèse de fermeture newtonienne (relation entre les flux turbulents et les gradients verticaux des paramètres non turbulents). Les équations ainsi obtenues sont appelées les équations RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equation) car elles sont issues du concept d'écoulement moyen.

Dans le modèle ROMS, les coefficients horizontaux peuvent être estimés grâce à la formule de Smagorinski (1963) ou être choisis constants. Les coefficients verticaux peuvent être déterminés grâce à la méthode de Pacanowski et Philander (1981), qui se base sur la stabilité de la fréquence de Brunt-Väisälä, ou grâce à la méthode de Large et al. (1994) appelé KPP (K-profile parametrization).

2.4 Les conditions aux limites et aux frontières

Des conditions aux limites sont fixés pour la surface libre et pour le fond, pour chaque variables, afin de respecter les gradients verticaux et représenter plus fidèlement les processus qui en dépendent.

En $z=\eta$: le modèle prend en compte la tension de surface, dûs aux forçages du vent, pour calculer la vitesse du courant en surface. Le flux de chaleur et de sel sont déterminés en prenant en compte la chaleur massique et le transfert thermique, l'évaporation et les pluies respectivement. En $z=-h$: le calcul de la vitesse du courant au fond prend en compte les frictions de fond et les flux de chaleur et de sel sont considérés comme nuls.

Les conditions aux frontières doivent être spécifiées dans le modèle : ouvertes si il y a de l'eau et fermées aux côtes. En effet si la frontière est fermée le flux normal à la côte est annulé, et si la frontière est ouverte le modèle re-calcule des conditions à la frontière tous les 15 jours de simulation en utilisant les atlas de données océanographiques mondiales pour définir les nouvelles conditions de tension du vent à la surface par exemple.

2.5 Implémentation du modèle à la zone d'étude

En premier lieu les coordonnées de la zone d'étude doivent être paramétrées dans le script romstools_param.m ainsi que les conditions aux frontières et la résolution de la grille (Tab. 1). La simulation a été réalisée à basse résolution ($1/2^\circ \times 1/2^\circ$) pour avoir un temps de calcul plus rapide. Le script make_grid.m permet de calculer les informations de notre grille, en fonction des paramètres entrés dans romstools_param.m : le nombre de mailles dans les 3 directions : x (LLm), y (MMm) et z (N) (Tab. 1). Une grille Arakawa C décentrée est utilisée dans le modèle pour obtenir une résolution spatiale adaptée à la zone d'étude. Enfin pour lancer la simulation

il est nécessaire de calculer des pas de temps internes (Dt) et externes ($NDTFAST = Dt \times \Delta t_E$), adaptés à notre grille, à sa résolution mais aussi au temps de simulation et au temps de calcul désiré. Le script `ad_cfl.m` permet de déterminer ces deux paramètres sur la base du critère CFL qui permet de lier la résolution spatiale et temporelle pour éviter qu'un processus ne se propage de plus d'une maille à chaque pas de temps (Tab. 1). En général le pas spatial est déterminé en premier puis le pas de temps est calculé en utilisant la bathymétrie maximale du domaine de la façon suivante :

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{gh_{max}}} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-1/2} \quad (6)$$

TABLE 1 – Paramètres de la grille

Paramètres	Pacifique Sud
Longitudes min - max	150°E - 160°W
Latitudes min - max	5°N - 30°S
Frontières ouvertes	Nord-Sud-Est-Ouest
Résolution de la grille	1/2
LLm - MMm - N	194 - 97 - 32
NTIMES - Dt (s) - NDTFAST	600 - 4320 - 60

Il est ensuite possible de lancer des simulations annuelles ou pluriannuelles en changeant la durée de simulation (NTIMES) et la fréquence de sauvegarde des sorties instantanées et moyennées (NWRT et NAVG). Pour ce rapport la durée de simulation a été fixée à 30 jours sur 12 mois et sur 10 ans. La fréquence de sauvegarde des sorties moyennées est de 3 jours.

Une fois cette première simulation réalisée, une seconde simulation a été lancée en conservant les mêmes paramètres (Tab. 1) mais en ajoutant le phénomène des marées pour étudier les variations des différentes grandeurs entre une simulation sans marées et avec les marées. Il suffit alors de modifier la ligne `# undef TIDES` en `# define TIDES`. Cet ajout apparaît comme une nouvelle condition aux frontières, calculée à partir de données de marées issues de la base de données TPX07. Dans cette simulation toutes les ondes de marées sont prises en compte (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf et Mm).

3 Résultats

3.1 Diagnostiques du modèle et stabilité

Le diagnostique des paramètres moyennés permet de déterminer le "spin-up" du modèle c'est à dire le moment à partir duquel le modèle est stabilisé. Ainsi le modèle est considéré comme stable si après une légère variation d'un paramètre celui ci va tendre vers sa valeur moyenne d'équilibre. Les variables diagnostiques ont été représentées (Fig. 1) grâce au script `roms_diag.m`. L'énergie cinétique moyennée sur le volume montre une évolution jusqu'à la 3ème année avant de présenter des variations constantes jusqu'à la fin de la simulation. Ainsi il sera considéré que le modèle est stable à partir de la 3ème année de simulation.

Enfin il est à noter qu'avec ce diagnostique, il est possible à ce stade de dégager une tendance pour les variations temporelles de température et salinité moyennées sur le volume. En effet ces deux paramètres semblent suivre des variations saisonnières. Cependant l'amplitude de ces variations est faible, 0.4°C pour la température et 0.004 psu pour la salinité. Ces faibles variations sont expliquées par la latitude du domaine. En effet aux latitudes équatoriales les variations saisonnières de ces deux grandeurs sont de très faibles amplitudes. De ce fait, il est donc maintenant intéressant d'analyser ces paramètres en fonction de la zonalité et de la profondeur pour en tirer une répartition spatiale des masses d'eau.

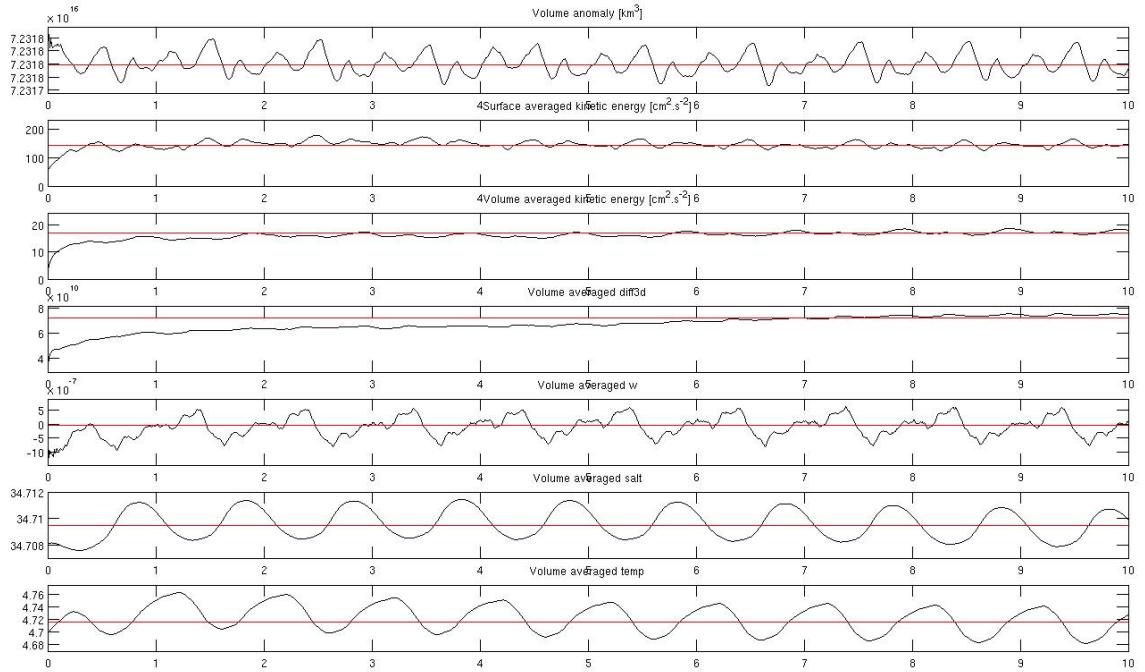


FIGURE 1 – Diagnostique du modèle. De haut en bas : (a) Volume total, (b) Energie cinétique moyenne en surface, (c) Energie cinétique moyennée sur le volume, (d) Moyenne volumique diff3d, (e) Moyenne volumique w , (f) Salinité moyennée sur le volume, (g) Température moyennée sur le volume.

3.2 Caractéristiques des masses d'eau et variabilité spatiale

La représentation de la température et de la salinité sur des cartes permet de mettre en évidence les caractéristiques des masses d'eau dans cette région. Aucune des deux variables ne présentent de variabilités saisonnières annuelles notables.

Cependant la région présente des gradients zonaux et verticaux représentatifs de la circulation de masses d'eau différentes. Pour représenter ces variations la température et la salinité de Janvier de l'année 10 ont été prises comme exemple aux vues de l'absence de variations saisonnières.

Un gradient de température Nord-Sud sépare des masses d'eau chaudes (jusqu'à 30°C au maximum) à l'équateur et des masses d'eau plus froides au Sud ($\sim 22^{\circ}\text{C}$) (Fig. 2). Cette séparation est marquée par un front à 16°S où la température varie fortement. De plus le modèle semble faire apparaître une accumulation d'eau chaude au Nord-Ouest du domaine.

A 800 m de fond le gradient de température Nord-Sud s'inverse et le front à 16° sépare une

masse d'eau plus froide au Nord ($\sim 4.5^{\circ}\text{C}$) et plus chaude au Sud ($\sim 8^{\circ}\text{C}$) (Fig. 2). Cette inversion indique une diminution verticale de la température plus rapide au Nord qu'au Sud.

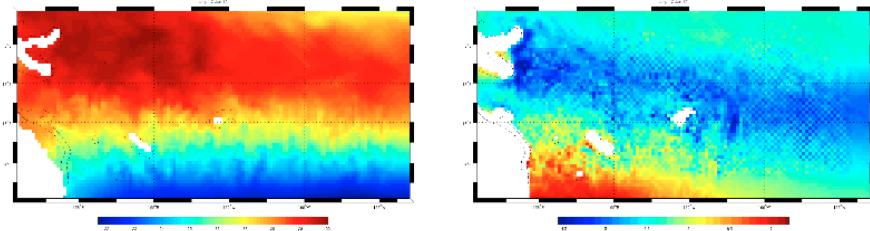


FIGURE 2 – Température de surface (à gauche ; colorbar : 30°C à 22°C) et à 800 m (à droite ; colorbar : 8°C à 4.5°C) pour le 2 janvier de l'année 10

La salinité ne varie pas de façon importante avec les saisons. Les gradients verticaux et horizontaux sont identiques tout au long de l'année. Seule une augmentation de la salinité en été est à indiquer, dans la partie Nord-Ouest du domaine. C'est pour cette raison que pour illustrer les observations suivantes la répartition de la salinité le 2 Janvier de l'année 10 de simulation sera présentée comme exemple.

La salinité présente aussi un gradient méridien Sud-Nord en surface à l'Ouest du domaine alors que la salinité de surface, au centre de la gyre pacifique présente une salinité homogène de 180°W à 156°W (Fig. 3). Le gradient méridien occidental met en évidence des eaux dessalées (~ 34 psu) au Nord et plus salées au Sud (~ 35.9 psu) suivant un front à 16°S . En observant un profil vertical réalisé entre l'équateur et 24°S , à longitude constante de 156°E , on remarque une inversion du gradient vertical de température à 150 m qui met en évidence la circulation d'une masse d'eau plus salées (Fig. 3). Cette masse d'eau présente la même salinité que les eaux de surface du Sud de la zone d'étude ce qui pourrait indiquer la plongée de ces eaux de surface salées au cours de leurs trajet Sud-Nord le long de la côte Est-Australienne.

3.3 Circulation

Pour l'interprétation de la circulation, il a été décidé de ne pas prendre en compte la zone entre l'équateur et 5°N qui montre une sortie d'eau au niveau de la frontière Nord (ANNEXE A). Cette erreur du modèle est sûrement dûe à la valeur du paramètre de Coriolis, considérée comme nulle à l'équateur, et qui peut induire des erreurs dans le calcul de certains paramètres (vitesses de courant, transport...).

Pour pouvoir mettre en évidence une circulation générale sur un aussi large domaine le transport moyen intégré entre 0 et 10 m pour les 7 années de simulation, où le modèle été stable, a été calculé et représenté sur une carte avec les vecteurs vitesses du courant (Fig. 4). Cette figure met en évidence la circulation du Courant Sud Equatorial (SEC) qui traverse le pacifique d'Est en Ouest permettant certainement l'accumulation d'eau plus chaude au Nord-Ouest qu'au Nord-Est mis en évidence par la FIGURE 2 (a). Il est aussi possible de remarquer un contre courant vers l'Est au Sud-Est du domaine. Malgré la basse résolution du modèle il est possible de distinguer une zone très turbulente à l'Est de l'Australie, au niveau des îles du Pacifique Sud et de l'entrée de la mer des Salomons, et une tendance des masses d'eau du Nord-Ouest à voyager vers le Sud le long de la côte Australienne. Enfin à partir de 170°W un courant vers l'Est est

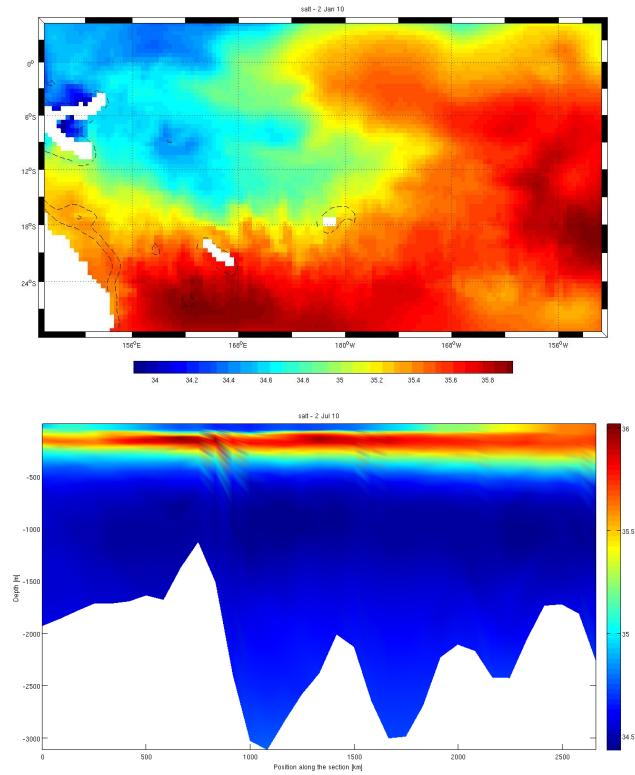


FIGURE 3 – En haut : Répartition de la salinité de surface en Janvier de l’année 10 (a). En bas : Profil vertical de salinité (psu) suivant le méridien 156°S, de la latitude 0° à 24°S (b).

mis en évidence à la latitude constante de 26°S. Il s’agit certainement du Courant Sud Pacifique (SPC).

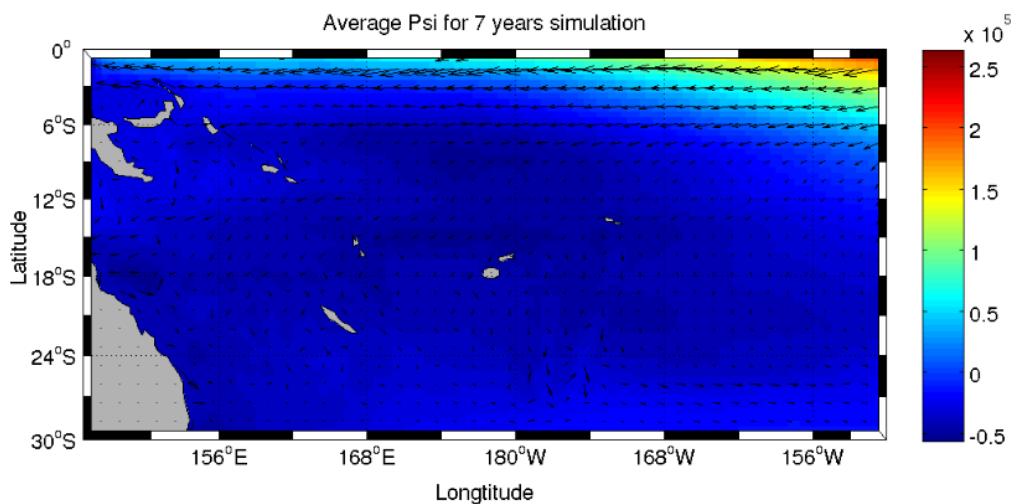


FIGURE 4 – Transport moyen calculé sur les 7 dernières années de simulation du modèle.

4 Discussion

Peu de campagnes océanographiques ont été menées sur l'ensemble de la zone d'étude, il a donc été difficile de comparer les résultats de cette simulation avec des données *in situ* sur l'ensemble du domaine. Ainsi seulement les caractéristiques des masses d'eau de la zone Ouest de la zone d'étude pourront être comparées aux données récoltées *in situ* dans la Mer de Corail. Les transports seront discutés en prenant en compte le travail de Martinez et al. (2009) qui ont étudié la circulation de l'ensemble du Pacifique Sud. Enfin grâce à des données altimétriques il sera possible de représenter la hauteur de l'eau (Sea Surface Height) moyenne pour Janvier 2013 et ainsi voir si les sorties du modèles sont cohérentes avec des données relevées par satellites.

4.1 Les masses d'eau dans la Mer de Corail

Cravatte et al. (2013) et Maes et al. (2013), en échantillonnant la Mer de Corail du Nord au Sud de la longitude 145°E à 170°E et 150°E à 165°E respectivement, ont mis en évidence l'existence d'un front à 16°S qui sépare des masses d'eau de surface chaudes et dessalés au Nord et plus froides et salées au Sud. Ces observations *in situ* correspondent aux tendances de surface dégagés par le modèle ROMS. En plus des données de surface Cravatte et al. (2013) ont réalisés des profils verticaux de salinité sur l'ensemble de leur zone d'étude. Ils ont observé une inversion, à 150 m, du gradient Sud-Nord de salinité de surface. Cependant à 400 m, ils ont aussi remarqué que le gradient méridien s'était une nouvelle fois inversé pour reprendre sa tendance d'origine. L'étude de la répartition de salinité des sorties du modèle ROMS est en adéquation avec ces observations (Fig. 5). En effet le profil vertical de salinité (Fig. 3) ainsi que les cartes de répartition de la salinité indiquent l'intrusion d'eaux salées venues du centre de la gyre pacifique et réfutent donc l'hypothèse selon laquelle des masses d'eau salées du Sud aurait plongé durant leur trajet de sub-surface Sud-Nord.

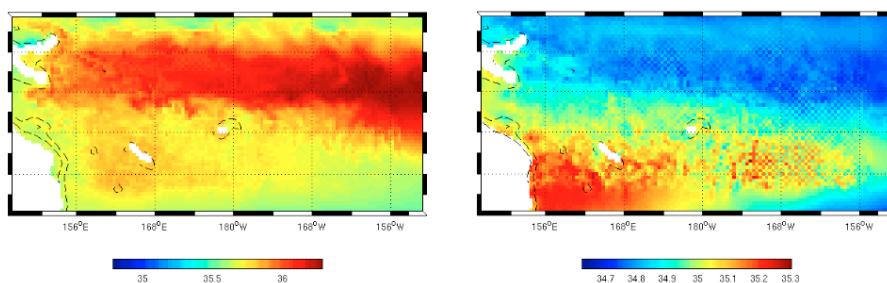


FIGURE 5 – Répartition spatiale de la salinité pour le 2 Janvier de l'année 10 de la simulation. A gauche à 150 m de profondeur, à droite à 400 m de profondeur.

De plus l'intégration du transport des masses d'eau, entre la surface et 1000m, a permis de mettre en évidence une circulation moyenne particulière dans la Mer de Corail (Cravatte et al., 2013) (ANNEXE 2). Les îles Fidjis séparent le SEC en deux "jet" : le "Jet" Nord du Vanuatu (NVJ) et le "Jet" Caledonien (CJ) qui est lui même séparé en deux par la Nouvelle-Calédonie, le "Jet" Nord Calédonien (NCJ) et le "Jet" Sud Calédonien (SCJ). Du fait de la basse résolution du modèle ces circulations à plus petite échelle ne sont pas visibles sur la (Fig. 4). Cependant Cravatte et al. (2013) ont émis l'hypothèse que la branche la plus au Sud de ces "jets" pouvait apparaître de manière épisodique en raison de la forte turbulence de la zone, ce qui est en

adéquation avec l'observation de la (Fig. 4) où de nombreux tourbillons apparaissent au Sud-Ouest du domaine. Enfin la présence du Courant Est Australien (EAC) dans la représentation de Cravatte et al. (2013) n'est que très peu visible dans la simulation en raison de la forte instabilité de la zone et de la basse résolution du modèle.

4.2 Sea Surface Height

4.2.1 Sans les marées

Des données filtrées de SSH du mois de Janvier 2013 ont été récupérées, avec une fréquence de 7 jours grâce au satellites TOPEX/POSEIDON, JASON 1 et ENVISAT à une résolution de $1/4^\circ \times 1/4^\circ$. Une moyenne de la SSH du mois de Janvier 2013 est calculée et comparée avec la moyenne de SSH du mois de Janvier de la dernière année de simulation (Fig. 6). Cette comparaison met en évidence une sous-estimation du modèle par rapport aux calculs des modèles des satellites. En effet sur la zone d'étude les données altimétriques présentent des élévations de la surface entre 40 et 140 cm alors que le modèle les estiment entre -30 et 10 cm.

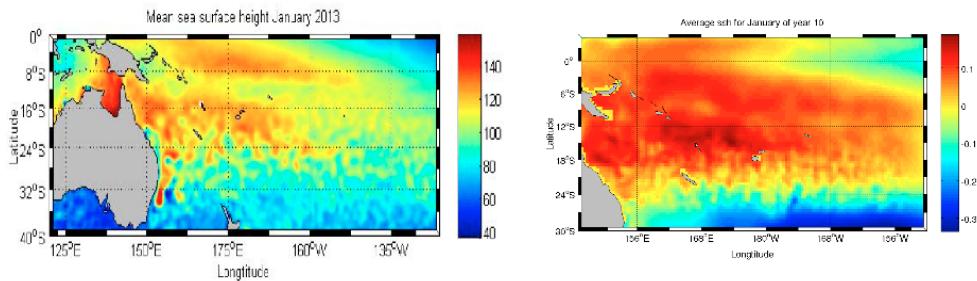


FIGURE 6 – A gauche : Moyenne de la Sea Surface Height pour le mois de Janvier 2013 (10^{-2} m). A droite : Moyenne de la Sea Surface Height pour le mois de Janvier de la dernière année de simulation (m).

Les autres mois de la dernière année de simulation présentent, à l'instar du mois de Janvier, les mêmes tendances que les données altimétriques AVISO mais sous-estimées d'un facteur 10. C'est pour cette raison qu'une nouvelle simulation a été lancée en prenant en compte les marées.

4.2.2 Avec les marées

Cette fois-ci les sorties du modèle font apparaître un résultat bien différent (Fig. 7). En effet il est possible de remarquer une surélévation de la surface libre plus grande au Sud-Ouest de la zone, au niveau des côtes Australiennes, et une surélévation négative tout au Nord du domaine. Ces résultats sont en contradiction avec la (Fig. 6) (a) réalisée avec des données altimétriques qui montre une élévation positive et globalement homogène sur l'ensemble du domaine. Cependant une amélioration est à noter par rapport à la première simulation : l'ordre de grandeur de l'amplitude de la surélévation est en partie en accord avec les résultats de l'étude altimétrique. En effet l'amplitude maximum calculée par le modèle est d'un peu plus d'1 m alors qu'elle n'était que de 10 cm lors de la première simulation. Malgré cela l'amplitude minimale atteint les -600 cm, ce qui paraît très élevé par rapport à l'amplitude minimale des observations satellites (40 cm). Le modèle semble donc avoir été amélioré sur ce point mais ne présente toujours pas de résultats extrêmement précis sur la SSH.

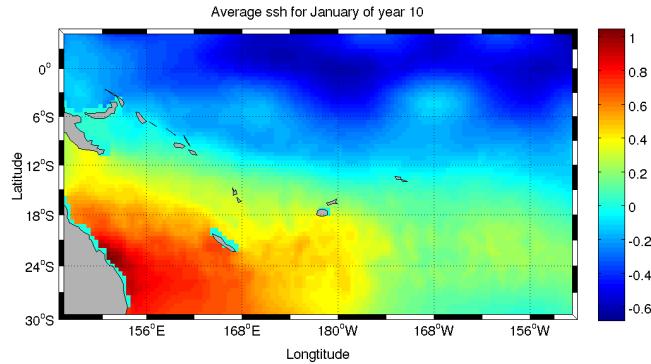


FIGURE 7 – Moyenne de la Sea Surface Height pour le mois de Janvier de la dernière année de simulation en prenant en compte les marées (m).

4.3 Circulation à grande échelle et transport

Martinez et al. (2009) ont publié une carte représentant les transports des masses d'eau en surface, en utilisant des données altimétriques hautes résolution de SSH et de forçage du vent à la surface. Le courant géostrophique a été calculé en approximation f -plan et β -plan à l'équateur (Fig. 10).

Ainsi sur la (Fig. 4) apparaît deux courants majeurs de la zone d'étude : le SEC et le SPC. Comme ces courants sont zonaux il a été choisi d'approximer la vitesse moyenne de ces deux courants comme étant la vitesse moyenne de la composante u de la vitesse entre l'équateur et la latitude 6° S pour le SEC et entre 26° S et 30° S et la longitude 165° W et 150° W pour le SPC. La moyenne est calculée entre la surface et 10 m de profondeur. Les résultats obtenus sont décrit dans le tableau suivant (Tab. 2)

TABLE 2 – Tableau récapitulatif des valeurs de vitesse pour les deux courants principaux. LR indique que la simulation du modèle ROMS a été faite à basse résolution.

Courants	Modèle ROMS (LR)	Martinez et al. (données satellitales)
SEC (South Equatorial Current)	20,51 cm/s	40-50 cm/s
SPC (South Pacific Current)	4,02 cm/s	10 cm/s
Résolution	(1/2) de degré	(1/4) à (1/6) de degré

La simulation semble donc sous-estimer la vitesse de ces deux courants, d'un facteur 2 pour le SEC et pour le SPC. Ainsi il est possible de penser que le modèle sous-estime d'un facteur 2 les vitesses de l'ensemble des courants de la zone d'étude.

Enfin l'ensemble des données de la littérature sont concordantes avec le modèle pour affirmer la présence d'un front à 16° S qui sépare deux ensembles de masses d'eau différentes au Nord de la zone et au Sud. Ce front correspond à la séparation du NCJ en une partie qui se dirige vers le Nord et le EAC qui longe l'Australie vers le Sud (Fig. 9)(Fig. 10).

5 Conclusion

Le modèle ROMS, grâce à sa puissance de calcul et à la résolution de nombreuses équations, a permis de faire une simulation réaliste de la zone d'étude. En effet les paramètres comparés à ceux de la littérature sont quasiment tous concordants. Le modèle semble donc bien représenter de la circulation du Pacifique Sud même si le modèle semble sous-estimer les vitesses des courants principaux. Les discordances entre la simulation et les données *in situ* peuvent être expliquées par la taille du domaine qui ne permet pas de faire une simulation à haute résolution avec un temps de calcul assez rapide. Ainsi il serait intéressant de lancer une simulation à haute résolution pour voir si il apparaît des courants secondaires, comme ceux de la Mer de Corail, et pour calculer les vitesses de chacun de ces courants et les comparer avec ceux de la littérature pour voir si ces valeurs se rapprochent plus de la littérature à haute résolution ou pas. Enfin les variations des profils verticaux des paramètres biogéochimiques peuvent être dûes à un manque de données *in situ*. En effet le modèle ROMS utilise des données océanographiques récoltées lors de campagne pour paramétriser la simulation donc si il existe dans notre domaine d'étude des régions où les données *in situ* sont peu abondantes le modèle risque d'introduire des paramètres erronés lors de la paramétrisation du modèle. Or la gyre du Pacifique Sud est une zone encore peu explorée par les scientifiques.

En conclusion le modèle ROMS donne de bons résultats pour la simulation d'une zone à grande échelle comme le Pacifique Sud. Cependant il faut garder en tête que certaines données peuvent être sous estimées, en particulier lorsque le modèle est à basse résolution, et qu'il faut que la zone possède déjà de nombreuses données disponibles pour paramétriser son modèle correctement notamment lorsque des processus complexes, tels que les marées, sont ajoutés au modèle. Cependant l'introduction de plus en plus de processus ne permet pas forcément d'avoir un modèle plus réaliste car elle peut amener à l'introduction de plus en plus de nouvelles erreurs et d'approximations. Ainsi avant de lancer une simulation il est nécessaire de cibler les besoins de notre étude. Pour le cas du Pacifique Sud une simulation à basse résolution semble toute à fait raisonnable pour voir apparaître les processus majeurs régulant la circulation de la zone.

Références

- KESSLER WS., CRAVATTE S., *Mean circulation of the Coral Sea*, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH : OCEANS, VOL. 118, 1–26, doi :10.1002/2013JC009117 (2013)
- MAES C., DEWITTE B., SUDRE J., GARCON V., VARILLON D., *Small-scale features of temperature and salinity surface fields in the Coral Sea* JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH : OCEANS, VOL. 118, 5426–5438, doi :10.1002/jgre.20344 (2013)
- MARTINEZ E., MAAMAATUAIAHUTAPU K., TAILLANDIER V., *Floating marine debris surface drift : Convergence and accumulation toward the South Pacific subtropical gyre*, Marine Pollution Bulletin 58 (2009) 1347–1355

A Circulation du modèle sur les 7 années stables

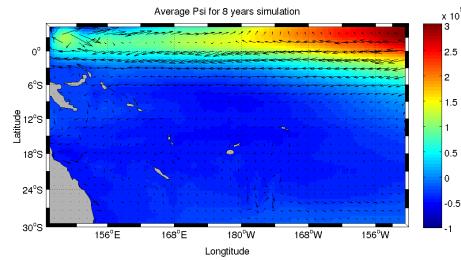


FIGURE 8 – Représentation de la circulation sur les 7 années stables du modèles.

B Circulation de la Mer de Corail (Cravatte et al. 2013)

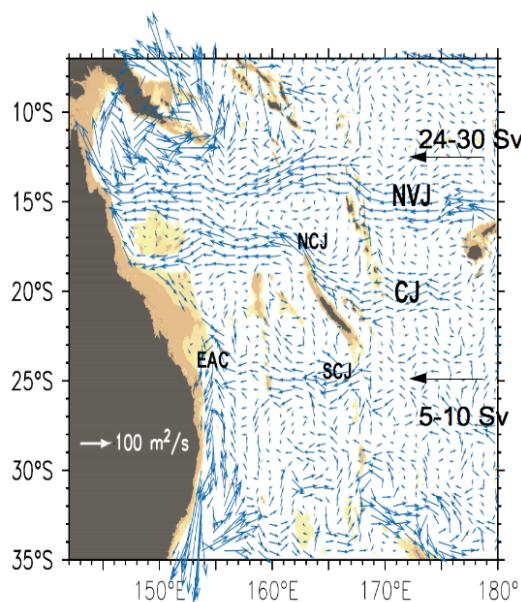


FIGURE 9 – Représentation du transport intégré à 1000 m de profondeur (Cravatte et al. 2013) en utilisant la dérive de bouée Argo comme niveau de référence connu pour le cisaillement géostrophique (obtenu à partir de l'Atlas CARS).

C Circulation du Pacifique Sud (Martinez et al. 2009)

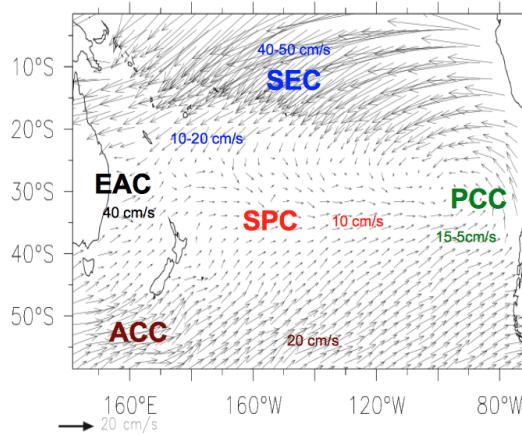


FIGURE 10 – Courant de surface moyen entre Janvier 1991 et Janvier 2001 (Martinez et al. (2009)).

D Script Matlab pour calculer le transport moyen sur 7 ans de simulation

Chargement des fichiers de sorties de la simulation extraction de la variable "psi" pour le transport :

```

1 %%%
2 % load Average psi variable
3 %
4 %% 30/04/2014: autoload of the variables
5 %%%
6
7 clear all;
8 close all;
9
10 grdfname='/filer/roms/r1003867/modelisation/MYROMS/Roms_tools/Run/ROMS_FILES/roms_grd.nc';
11
12 %% Moyenne annuelle
13
14 % Boucle pour charger tous les fichiers avg
15
16 for j=1:10 %boucle sur les années
17     for i=1:12 %boucle sur les mois
18         eval(['fname_Y' num2str(j) '_M' num2str(i) '=' '/filer/roms/r1003867/modelisation/
19             MYROMS/Roms_tools/Run/SCRATCH/roms_avg_Y' num2str(j) '_M' num2str(i) '.nc']);'])
20         eval(['[lat_Y' num2str(j) '_M' num2str(i) ',lon_Y' num2str(j) '_M' num2str(i) ',mask_Y'
21             num2str(j) '_M' num2str(i) ',psi_Y' num2str(j) '_M' num2str(i) ']=get_streamfunc(
22             fname_Y' num2str(j) '_M' num2str(i) ',grdfname,10,-10,1);'])
23         eval(['u_Y' num2str(j) '_M' num2str(i) '=get_hslice(fname_Y' num2str(j) '_M' num2str(i)
24             ',grdfname,' 'u' ',10,-10,' 'u' ');'])
25         eval(['v_Y' num2str(j) '_M' num2str(i) '=get_hslice(fname_Y' num2str(j) '_M' num2str(i)
26             ',grdfname,' 'v' ',10,-10,' 'v' ');'])
27         eval(['psi_Y' num2str(j) '_M' num2str(i) '(find(psi_Y' num2str(j) '_M' num2str(i) '==0)
28             =NaN;'])
29     end
30 end
31
32 save('psi_10Y.mat','lat*','lon*','mask*','psi*','u*','v*'); %enregistrement des variables dans
33 un fichier .mat

```

Plot du transport moyen et calcul des vitesses de courant :

```

1 %%%%%%
2 % Plot Average psi

```

```

3 %
4 %% 30/04/2014: plot map with average psi
5 %
6 % Variables names in 'psi_10Y.mat':
7 %
8 %% Latitude: lat_YIM1 % 1: year or month number
9 %% Longitude: lon_YIM1 % longitudes and latitudes are the same for each
10 % months and years
11 %% Mask: mask_YIM1
12 %% Average psi (3 days): psi_YIM1
13 %% U component of the velocity : u_YIM1
14 %% V component of the velocity : v_YIM1
15 %
16 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
17
18 clear all; close all;
19 %- Load variables -%
20 load 'psi_10Y.mat';
21
22 %- Area limits -%
23
24 lonmin = 145; % Minimum longitude [degree east]
25 lonmax = 210; % Maximum longitude [degree east]
26 latmin = -30; % Minimum latitude [degree north]
27 latmax = 5; % Maximum latitude [degree north]
28
29 %- Annual mean for each years beginning from year 3 -%
30
31 tot_psi_0=0;
32 tot_u_0=0;
33 tot_v_0=0;
34 avg_psi=0;
35 avg_u=0;
36 avg_v=0;
37
38 for j=3:10 % year loop (from year 3 -> modele stabilisation)
39 eval(['tot_psi_Y' num2str(j) '_0=0;']) % initialisation for tot_psi_Y3_M0=0
40 eval(['tot_u_Y' num2str(j) '_0=0;'])
41 eval(['tot_v_Y' num2str(j) '_0=0;'])
42
43 for i=1:12 % months loop
44 eval(['tot_psi_Y' num2str(j) '_' num2str(i) '=tot_psi_Y' num2str(j) '_' num2str(i-1) ' '
45 '+psi_Y' num2str(j) 'M' num2str(i) ';' ])
46 eval(['tot_u_Y' num2str(j) '_' num2str(i) '=tot_u_Y' num2str(j) '_' num2str(i-1) '+u_Y
47 ' num2str(j) 'M' num2str(i) ';' ])
48 eval(['tot_v_Y' num2str(j) '_' num2str(i) '=tot_v_Y' num2str(j) '_' num2str(i-1) '+v_Y
49 ' num2str(j) 'M' num2str(i) ';' ])
50 end
51
52 eval(['avg_psi_Y' num2str(j) '=tot_psi_Y' num2str(j) '_12/12;']) % annual mean for each
53 year (3-10)
54 eval(['avg_u_Y' num2str(j) '=tot_u_Y' num2str(j) '_12/12;'])
55 eval(['avg_v_Y' num2str(j) '=tot_v_Y' num2str(j) '_12/12;'])
56 eval(['avg_psi=avg_psi+avg_psi_Y' num2str(j) ';' ])
57 eval(['avg_u=avg_u+avg_u_Y' num2str(j) ';' ])
58 eval(['avg_v=avg_v+avg_v_Y' num2str(j) ';' ])
59
60 moy_psi_SEC2=0; %initialisation
61 moy_psi_SPC2=0;
62
63 eval(['moy_psi_SEC_Y' num2str(j) '=mean(mean(avg_u_Y' num2str(j) '(50:64,:)));']) %mean SEC
64 current velocity for each year
65 eval(['moy_psi_SEC' num2str(j) '=(moy_psi_SEC' num2str(j-1) '+moy_psi_SEC_Y' num2str(j) ');']) )
66 eval(['moy_psi_SPC_Y' num2str(j) '=mean(mean(avg_u_Y' num2str(j) '(1:10,111:end)));']) %mean
67 SPC current velocity for each year
68 eval(['moy_psi_SPC' num2str(j) '=(moy_psi_SPC' num2str(j-1) '+moy_psi_SPC_Y' num2str(j) ');']) )

```

```

65 end
66
67 moy_psi_SEC10=moy_psi_SEC10/8 %mean SEC current velocity for 8 years simulation
68 moy_psi_SPC10=moy_psi_SPC10/8 %mean SPC current velocity for 8 years simulation
69 avg_psi=avg_psi/8;
70 avg_u=avg_u/8;
71 avg_v=avg_v/8;
72
73 %- Plot average psi for 7 years simulation -%
74 figure; hold on;
75 m_proj('mercator','lon',[lonmin lonmax],'lat',[latmin latmax]);
76 m_pcolor(lon_Y1M1,lat_Y1M1,avg_psi)
77 m_quiver(lon_Y1M1(1:3:74,1:3:130),lat_Y1M1(1:3:74,1:3:130),avg_u(1:3:74,1:3:130),avg_v
    (1:3:74,1:3:130),4,'color','k') % 4 unit s par degr (unit des fl ches)
78
79
80 shading flat
81 colorbar
82 m_coast('patch',[.7 .7 .7],'edgecolor','k');
83 m_grid('box','fancy','tickdir','in');
84 xlabel('Longitude');
85 ylabel('Latitude');
86 title('Average Psi for 8 years simulation')
87 print -dpng

```

E Script Matlab pour représenter la variable SSH moyenne sur un mois

Données du modèle

```

1 %%%%%%
2 % Plot average ssh
3 %
4 %% 30/04/2014: autoload of the variables + plot
5 %%%%%%
6
7 addpath(' ../../m_map1.4f')
8
9 lon=ncread('../SCRATCH/roms_avg_Y10M1.nc','lon_rho');
10 lat=ncread('../SCRATCH/roms_avg_Y10M1.nc','lat_rho');
11 ssh=ncread('../SCRATCH/roms_avg_Y10M1.nc','zeta');
12
13 lon=double(lon); %convert variables to double class
14 lat=double(lat);
15 ssh=double(ssh);
16
17
18 %- Area limits -%
19
20 lonmin = 145; % Minimum longitude [degree east]
21 lonmax = 210; % Maximum longitude [degree east]
22 latmin = -30; % Minimum latitude [degree north]
23 latmax = 5; % Maximum latitude [degree north]
24
25
26 figure; hold on;
27 m_proj('mercator','lon',[lonmin lonmax],'lat',[latmin latmax]);
28 m_pcolor(lon,lat,ssh(:,:,1))
29
30 shading flat
31 colorbar
32 m_coast('patch',[.7 .7 .7],'edgecolor','k');
33 m_grid('box','fancy','tickdir','in');
34 xlabel('Longitude');
35 ylabel('Latitude');

```

```

36 title('Average ssh for January of year 10')
37
38 print -dpng

```

Données altimétriques (chargement + plot)

```

1 %%%%%%
2 %% Load ssh data from January to March 2013
3 %% 8/04/2014 : data autoload
4 %%%%%%
5 clear all;
6 close all;
7
8 date_ini=datenum('20130102','yyyymmdd');
9 date_final=datenum('20130327','yyyymmdd');
10
11 for i=date_ini:7:date_final
12
13 eval([ 'H_ ', datestr(i,'yyyymmdd'), '=ncread(''dt_upd_global_merged_madt_h\Jan_Feb_Mar_2013_h\'
14 dt_upd_global_merged_madt_h_qd_, datestr(i,'yyyymmdd'), '_', datestr(i,'yyyymmdd'), '
15 _20131002.nc'', 'Grid_0001' ); ])
14 eval([ 'lon_ ', datestr(i,'yyyymmdd'), '=ncread(''dt_upd_global_merged_madt_h\Jan_Feb_Mar_2013_h\'
15 dt_upd_global_merged_madt_h_qd_, datestr(i,'yyyymmdd'), '_', datestr(i,'yyyymmdd'), '
16 _20131002.nc'', 'NbLongitudes' ); ])
15 eval([ 'lat_ ', datestr(i,'yyyymmdd'), '=ncread(''dt_upd_global_merged_madt_h\Jan_Feb_Mar_2013_h\'
16 dt_upd_global_merged_madt_h_qd_, datestr(i,'yyyymmdd'), '_', datestr(i,'yyyymmdd'), '
17 _20131002.nc'', 'NbLatitudes' ); ])
18 end

```

```

1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 %% Plot ssh data %%
3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4 close all;
5
6 addpath('./m_map1.4/m_map')
7
8 %- area limits -(in degrees)
9 lon_min = 120;
10 lon_max = 240;
11 lat_min = -40;
12 lat_max = 0;
13
14 %- Get uv data -%
15 load h_2013.mat
16 lon=lon_20130102; %same longitudes for every day
17 lat=lat_20130102;
18
19 mean_ssh_jan=(H_20130102+H_20130109+H_20130116+H_20130123+H_20130130)/5;
20 mean_ssh_feb=(H_20130206+H_20130213+H_20130220+H_20130227)/4;
21 mean_ssh_mar=(H_20130306+H_20130313+H_20130320+H_20130327)/4;
22
23 %- Plot the figure
24 figure(1); hold on;
25
26 subplot(3,1,1)
27 m_proj('mercator','lon',[lon_min lon_max],'lat',[lat_min lat_max]);
28 m_pcolor(lon,lat,mean_ssh_jan);
29 shading flat
30 m_coast('patch',[.7 .7 .7],'edgecolor','k');
31 m_grid('box','fancy','tickdir','in');
32 colorbar;
33 xlabel('Longitude');
34 ylabel('Latitude');
35 title('Mean sea surface height January 2013')
36
37 subplot(3,1,2)
38 m_proj('mercator','lon',[lon_min lon_max],'lat',[lat_min lat_max]);
39 m_pcolor(lon,lat,mean_ssh_feb);
40 shading flat
41 m_coast('patch',[.7 .7 .7],'edgecolor','k');
42 m_grid('box','fancy','tickdir','in');
43 colorbar;
44 xlabel('Longitude');
45 ylabel('Latitude');
46 title('Mean sea surface height February 2013')
47
48 subplot(3,1,3)
49 m_proj('mercator','lon',[lon_min lon_max],'lat',[lat_min lat_max]);
50 m_pcolor(lon,lat,mean_ssh_mar);
51 shading flat
52 m_coast('patch',[.7 .7 .7],'edgecolor','k');
53 m_grid('box','fancy','tickdir','in');
54 colorbar;
55 xlabel('Longitude');
56 ylabel('Latitude');
57 title('Mean sea surface height March 2013')

```