

## **GRAPELOUP Cécile**

1ère année **Master d'Océanographie Physique et Biogéochimique**

Projet Modélisation de la Circulation Océanique OPB205

### **Modélisation de la Circulation Océanique de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie**



Année universitaire 2015-2016

## Résumé

L'implémentation du modèle ROMS dans la ZEE calédonienne a permis de mettre en évidence le courant Jet Nord Calédonien issu de la circulation générale de la mer de Corail et de l'upwelling côtier de bordure Ouest de la Grande Terre. La fiabilité des résultats de ces simulations sur 10 années avec une résolution de  $1/10^\circ$  a été validée par les données d'une étude menée dans cette région et ouvrant de nouvelles perspectives sur l'étude de l'origine et de la variation spatio-temporelle de cet upwelling dans une zone plus grande de l'Océan Pacifique Sud Ouest.

## Abstract

The implementation of ROMS model in New Caledonian ZEE allowed to highlight the North Caledonian Jet stemming from the general circulation of the Coral Sea and the coastal upwelling of the West border of the « Grande Terre ». The reliability of the simulation results over 10 years with a resolution of  $1/10^\circ$  was validated by the data of a study led in this region and opening new perspectives on the study of the origin and the spatiotemporal variations of this upwelling in a bigger zone of southwest Pacific Ocean.

# SOMMAIRE

1. Introduction: zone d'étude et modélisation numérique

2. Matériel et méthodes

2.1. Présentation du modèle ROMS

2.2. Implémentation du modèle à la zone d'étude

3. Résultats numériques

3.1. Diagnostiques

3.2. Front thermohalin

3.3. Jet Nord Calédonien

3.4. Upwelling de bordure ouest

4. Discussion

5. Conclusion

# 1. Introduction

La Nouvelle-Calédonie est un archipel de l'océan Pacifique sud situé à 1500 km à l'est de l'Australie, 2 000 km au nord de la Nouvelle-Zélande, et à quelques degrés au nord du tropique du Capricorne. L'archipel calédonien est centré autour d'une île principale, la Grande Terre. Plusieurs ensembles de petites îles entourent cette dernière dont les îles Belep au nord, l'île des Pins au sud, les îles Loyauté à l'est et bien d'autres encore.

L'étude de la ZEE (Zone Exclusive Économique) calédonienne, s'étendant à 188 milles au delà des eaux territoriales, n'a cessé de croître depuis la fin du XX siècle avec le développement de programme pour répondre aux objectifs de ZoNéCo visant à faire l'inventaire, la valorisation et la gestion des ressources minérales et vivantes de cette zone.

Plus de 10 ans d'observations de température de surface de la ZEE par le satellite NOAA14 ont montré l'apparition régulière d'une vaste zone, jusqu'à 50 km au large, d'eau froide, 2 à 3 °C plus froides que les eaux environnantes, pendant plusieurs semaines voir mois, sur la bordure Ouest de la Grande Terre. Cette émergence d'eau froide, qui n'est autre qu'un upwelling, est généralement accompagnée d'un apport conséquent d'éléments nutritifs engendrant de fortes variabilité de l'activité biologique et halieutique dans la ZEE qui est considérée de façon générale comme une région oligotrophe.

La dynamique de la circulation océanique de cette zone engendre des fronts thermiques, des tourbillons d'une taille de 50 à 100 km, des courants en surface et au fond, ayant potentiellement un effet important sur les concentrations de poissons et la biologie marine. D'autres aspects, comme le transport des particules, le mélange par les ondes internes, les champs de courant, influent sur la dispersion de rejets côtiers, les échanges avec le lagon et le potentiel cyclonique local. L'upwelling côtier est un signal majeur de la variabilité océanique proche de la Nouvelle-Calédonie. Toutes ces caractéristiques ont conduit à une importante mobilisation scientifique afin de développer des modèles d'estimations, de modélisation numériques et de prévision de l'état océanique (projet MERCATOR).

La modélisation est la représentation d'un système par un autre, plus facile à appréhender. La capacité de modéliser et de simuler numériquement des phénomènes physiques de grande ampleur a induit une révolution scientifique et technique importante. Le calcul parallèle et le rendu graphique de ces simulations sont deux éléments clés de la modélisation, mais le cœur scientifique du problème réside dans le choix de modèles physiques, dans la conception de méthodes numériques et dans la façon de les implémenter efficacement en machine.

L'objectif de mon travail a été de comprendre le fonctionnement et le maniement du modèle ROMS afin de l'implémenter à la ZEE de la Nouvelle-Calédonie. Ce travail m'a apporté la capacité de mieux appréhender l'évolution des paramètres physiques dans cette zone océanique. La comparaison de mes résultats avec les données de la littérature m'a amené à discuter les améliorations possibles à apporter à ce travail et les perspectives que ce genre de modèle nous offre dans l'étude de telles zones océaniques.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Présentation du modèle ROMS

ROMS (Regional Ocean Model System) est un modèle tridimensionnel numérique d'hydrodynamique côtière. Il permet le calcul des variables physiques de l'océan tel que la température, la salinité, les vitesses de déplacements, l'élévation du niveau de la surface libre mais aussi des variables dérivées comme l'énergie cinétique, la densité, la vorticité, et bien d'autres. Pour réaliser cela, il résout un système d'équations en se basant sur une série d'hypothèses et d'approximations. La discrétisation de ces équations passe par l'utilisation de schémas numériques à pas de temps séparés. Concernant les conditions initiales et aux frontières, elles sont paramétrées par l'utilisation de données océanographiques mondiales. Par exemple l'utilisation de World Ocean Atlas (WOA), qui est constitué de données climatologiques *in situ* moyennées pour l'océan planétaire des 50 dernières années environ, permet de définir la tension de vent. La tool-box Roms\_tools contient un ensemble de script matlab permettant notamment le calcul de nombreuses variables ainsi que leurs sorties graphiques.

Le modèle ROMS se base sur la résolution des équations primitives de Navier-Stokes et de continuité couplées aux équations Advection – Diffusion pour la conservation de la température et de la salinité, ainsi qu'à l'équation d'état non-linéaire de l'UNESCO, TEOS-10, pour l'eau de mer.

La première approximation utilisée par le modèle est celle de l'hydrostatique : la pression en un point donné dépend de l'épaisseur de la colonne d'eau qui se trouve au-dessus. La deuxième approximation utilisée par le modèle est celle de Boussinesq : la densité est supposée constante si ses variations sont petites, et cela dans tous les termes des équations hormis pour le terme de gravitation.

L'hypothèse de fermeture newtonienne est utilisée afin de lever l'indétermination qui réside dans les termes de flux turbulents des équations primitives et ainsi pouvoir résoudre ces dernières.

Les phénomènes physiques tels que les forçages pouvant agir sur la circulation des masses d'eau sont pris en compte dans le modèle, soit de manière directe à travers les équations, soit dans l'établissement des conditions initiales ou aux limites.

Pour la verticale, le modèle s'appuie sur l'utilisation des coordonnées sigma généralisées qui sont fonction des variations de la topographie des fonds marins. Dans les couches de surface ces coordonnées se transforment en coordonnées géopotentielles. Pour l'horizontale, le modèle utilise des coordonnées curvilignes afin de pouvoir traiter précisément les frontières et d'optimiser la résolution. Que ce soit pour la verticale ou l'horizontale le modèle se base sur des schémas aux différences finies sur des grilles décalées. Pour l'horizontale c'est une grille d'Arakawa C qui est utilisée.

La méthode utilisée pour la discrétisation temporelle est celle de séparation des modes barotropes, rapides, et baroclines, lents. De cette façon il y a couplage d'un modèle 2D de surface à un modèle 3D afin de séparer les ondes de gravité de surface et les ondes internes.

## 2.2. Implémentation du modèle dans la zone d'étude

La première étape que nous avons réalisé a été de s'inscrire comme utilisateur ROMS <http://www.myroms.org/> puis de télécharger, dans le répertoire de travail *modelisation* créé pour cette UE : ROMS\_Agrif ; ROMSTOOLS ; ROMSTOOLS UTILITIES ; les DATASETS (COADS05\_2006\_10\_25.tar.gz ; Topo\_26\_05\_2044.tar.gz ; WOA2009\_24\_06\_2011.tar.gz ; GSHHS\_coastline\_05\_02\_2013.tar.gz).

Une fois cette étape accomplie il a fallu rendre exécutable ces fichiers téléchargés et pour ce faire commencer par les décompresser. Nous avons effectué un test de compilation qui consistait à exécuter et compiler le fichier *jobcomp* (*modelisation/MYROMS/Roms\_tools/Run*). Pour rendre exécutable le script de ce fichier il a fallu utiliser la commande *chmod a+x*. Si il y a création d'un fichier exécutable nommé *roms* alors il y a validation de notre test de compilation.

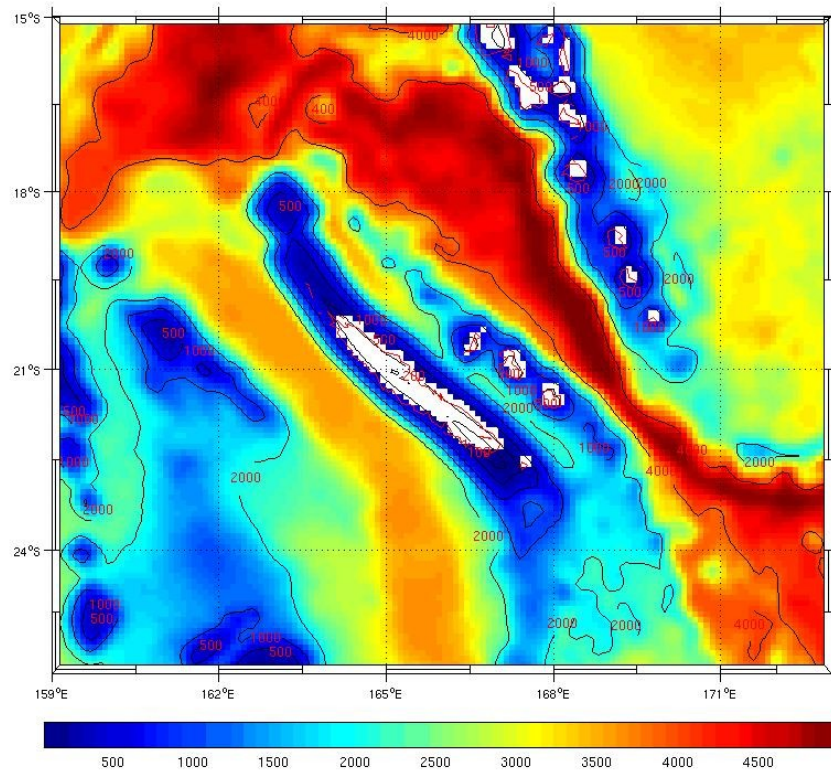
Avant de commencer notre travail à proprement parlé sur la zone d'étude choisie, nous avons du télécharger le fichier [http://mio.pytheas.univ-amu.fr/~doglioli/OPB205/ad\\_tools.tar.gz](http://mio.pytheas.univ-amu.fr/~doglioli/OPB205/ad_tools.tar.gz) qui contient des outils complémentaires. Nous avons sauvegarder et décompacter ce fichier dans le répertoire *MYROMS*.

J'ai commencé mon implémentation en définissant les coordonnées de mon domaine de calcul/d'étude grâce au script Matlab *ad\_findgeocoord.m*. J'ai par la suite reporté les coordonnées choisies dans *romstools\_param.m*. Le choix de la résolution est lui aussi très important car c'est ce qui nous permet d'éviter une simulation trop longue. C'est aussi dans ce fichier que nous devons définir les frontières ouvertes. Dans ma zone d'étude toutes mes frontières sont ouvertes sur l'océan Pacifique.

<b>Longitude minimum</b>	159° Est
<b>Longitude maximum</b>	173° Est
<b>Latitude minimum</b>	-26° Nord
<b>Latitude maximum</b>	-15° Nord
<b>Résolution grille (dl)</b>	1/10°

**Tab.1:** Paramètres de définition de la grille de calcul

Par la suite, en lançant et exécutant *make\_grid.m*, j'ai pu créer ma grille de calcul, obtenir ces paramètres utiles au calcul du critère CFL, et la figure de bathymétrie de ma zone d'étude. L'option *editmask* m'a permis de modifier le masque du modèle.



**Fig.1:** Carte de la bathymétrie (en m) de la zone d'étude

Llm=L-1	139
Mmm=M-1	117
N	32
dxmin	9.9886 km
dymin	9.9924 km
dxmax	10.736 km
dymax	10.7287 km

**Tab.2 :** Paramètres de la grille de calcul

Concernant les calculs des forçages et des conditions initiales et aux frontières les scripts `make_forcing.m` et `make_clim.m` les fournissent au modèle pour la simulation.

Le script `ad_cfl.m` m'a ensuite permis de calculer le pas de temps interne et externe de ma simulation sur la base du critère CFL (Courant-Friedrichs-Lewy). C'est un critère permettant de stabiliser le modèle lors de la résolution des équations différentielles partielles de manière numérique.

NTDFAST= DTI/DTE	60
DTE	12
DTI = dt (sec)	720
NTIMES	3600
NRST	3600
NWRT	360
NAVG	360

**Tab.3** : Paramètres temporelles de simulation

DTI représente le pas de temps interne et NTDFAST le pas de temps externe. NTIMES représente la durée de la simulation que nous avons choisi de 10 ans soit 3600 jours. NWRT et NAVG sont respectivement la fréquence des sauvegardes des sorties instantanées et moyennées, ce qui signifie des sauvegardes une fois par mois de mes données moyennées calculées tous les trois jours. Au premier jour, du premier mois, de la première année, le modèle utilise les conditions initiales de forcing. A la fin de la simulation du premier moi, le modèle passe au mois suivant et se sert des données calculées au mois précédent pour poursuivre la simulation. Le modèle enregistre un résultat moyenné tous les trois jours de chaque mois sur 10 ans ce qui revient à 10 sorties par mois donc 120 sorties par an donc 1200 sorties sur 10 ans.

Avant compilation j'ai vérifié les clé correspondantes aux frontières ouvertes dans *cppdefs.h* ainsi que les valeurs de la grille verticale dans *roms.in*, *roms\_inter.in* et *run\_roms.csh*.

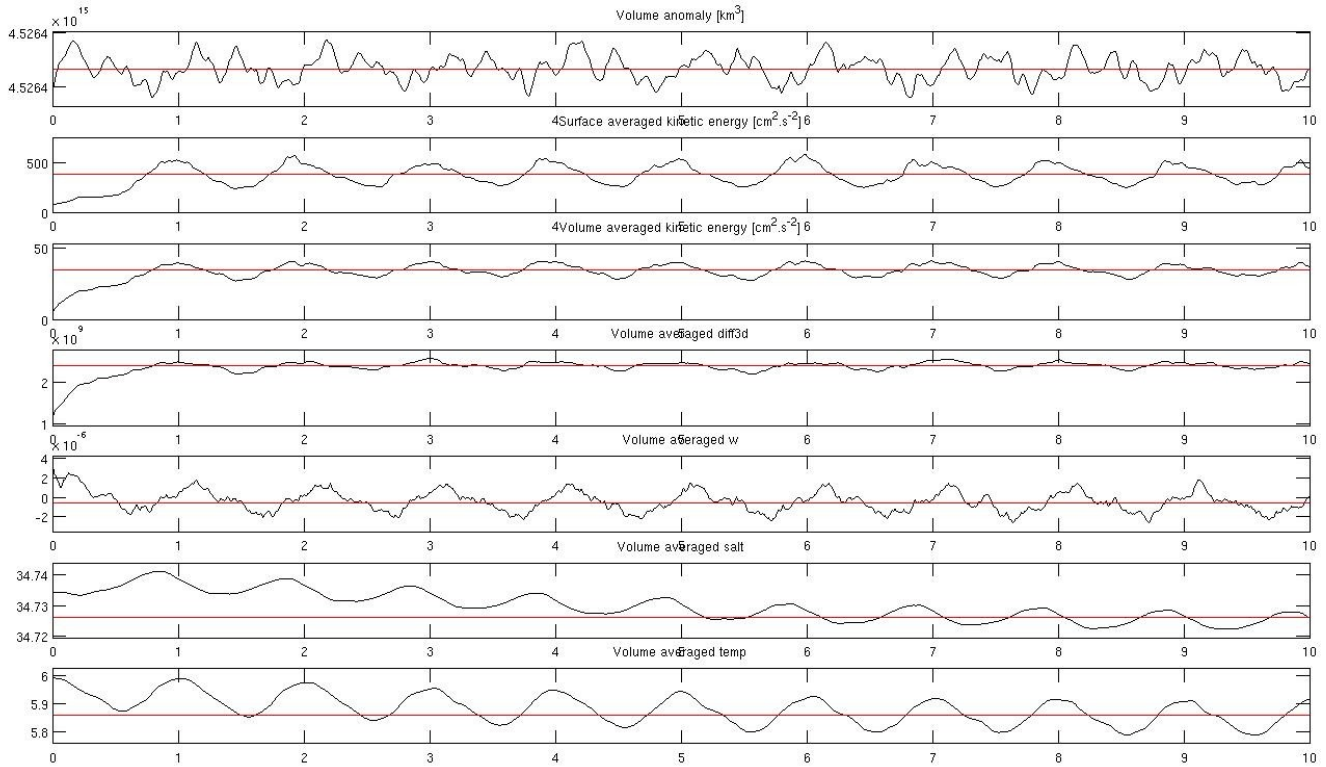
J'ai pour finir compilé et lancé mon modèle pour ma simulation pluriannuelle.

Afin d'étudier la stabilité du modèle j'ai utilisé les scripts *roms\_diags.m* et *plot\_diags.m* pour obtenir un graphique des variables diagnostiques moyennées telles que les anomalies de volume, les énergies cinétiques moyennes, vents moyens et d'autres et déterminer à partir de quelle date mon modèle se stabilise, et de ce fait quelle période choisir pour mes résultats et leurs analyses.



## 3. Résultats

### 3.1. Diagnostiques

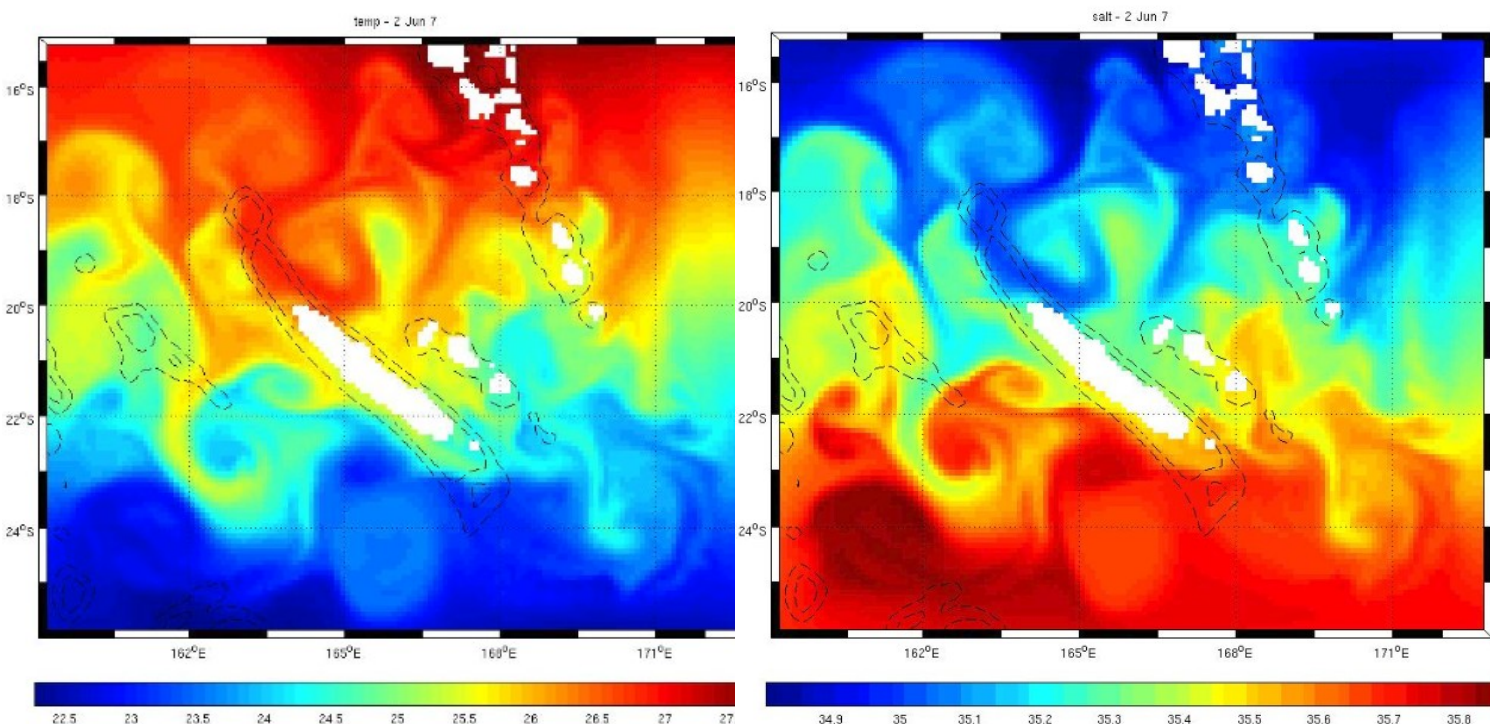


**Fig.2 :** Graphique des diagnostics du modèle

D'après la Fig.2 on s'aperçoit que les valeurs moyennes de sel et de température mettent le plus longtemps à se stabiliser, environ 4 à 5 ans et que ce sont donc elles qui limitent notre temps d'interprétation sur la durée totale de la simulation. Notons aussi la perte de sel sur les trois dernières années de simulation. De ce fait j'ai choisi de m'intéresser à la septième année de ma simulation pour qu'aucune anomalie ne vienne impacter mon interprétation.

### 3.2. Front thermohalin

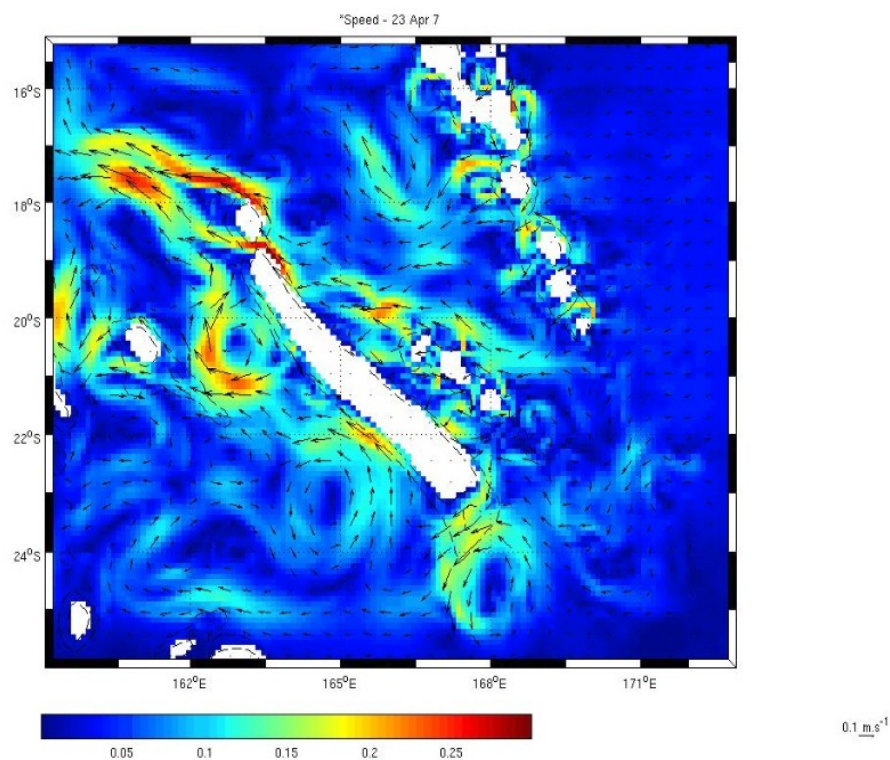
L'une des premières choses que j'ai pu remarquer lors des sorties graphiques (*roms\_gui.m*) de ma simulation est la présence persistante d'un puissant front thermohalin à la latitude de 22° sud environ. Ce front thermohalin se caractérise par des températures plus chaudes associées à des salinité plus faibles au nord du front qui sont opposées à des températures plus froides et des salinité plus élevées au sud.



**Fig.3:** 2/06 Distributions de surface de la température a) et de la salinités b)

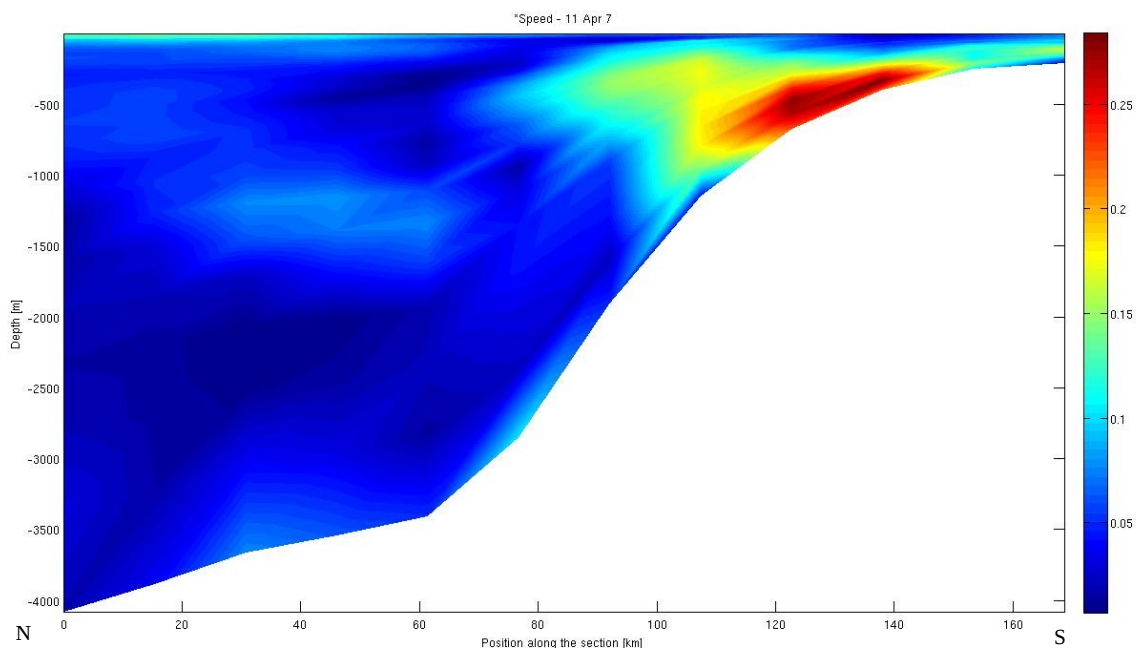
### 3.3. Jet Nord Calédonien

Au cours de son transit en mer de Corail, la branche sud du Courant Équatorial Sud se combine avec la présence de nombreux récifs, îlots et archipel corallien, comme ceux de la Nouvelle-Calédonie ou de l'archipel du Vanuatu, qui vont alors former des jets océaniques, fins et intenses, aux extrémités de ces obstacles topographiques. J'ai cherché à voir si mon modèle reproduisait le Jet Nord Calédonien. Je me suis placée à une profondeur de 400m et j'ai produit des sortie graphique de la variable dérivée: vitesse. J'ai aussi fait une section verticale des vitesses au Nord de la Grande Terre.



**Fig.4** : 23/04 Distribution des vitesses à 400m de profondeur

On peut très bien observer le trajet du Jet Nord Calédonien qui rentre dans le lagon par l'est à mi hauteur de la Grande Terre en contournant les îles Loyautés, puis longe la côte en remontant vers le Nord. Il se renforce à la pointe Nord de la Grande Terre en formant deux branches séparées par l'île Art. Grâce à la coupe verticale nous pouvons parfaitement observer le jet fin et intense avec des maximums de vitesses à 500 de profondeur sur la bordure de la pointe nord de la Grande Terre.

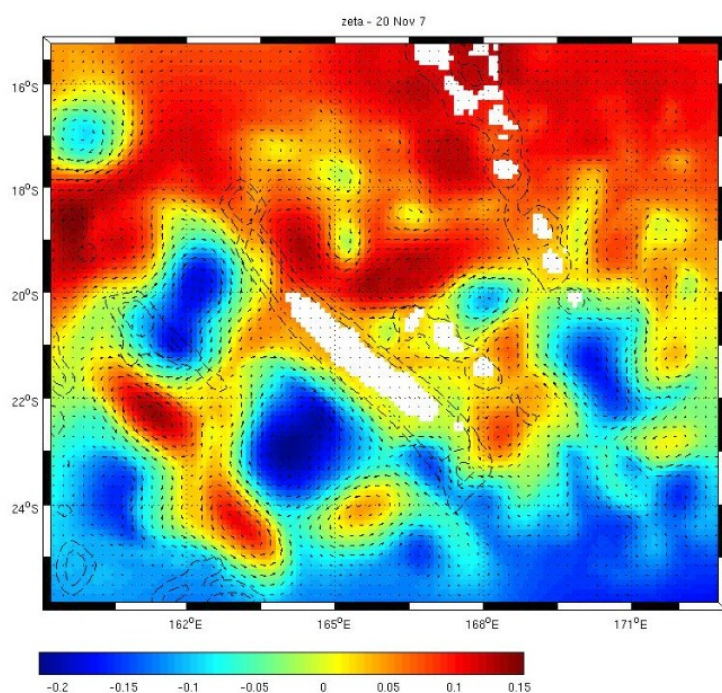


**Fig.5** : 23/04 Coupe verticale des vitesses à la pointe Nord de la Grande Terre



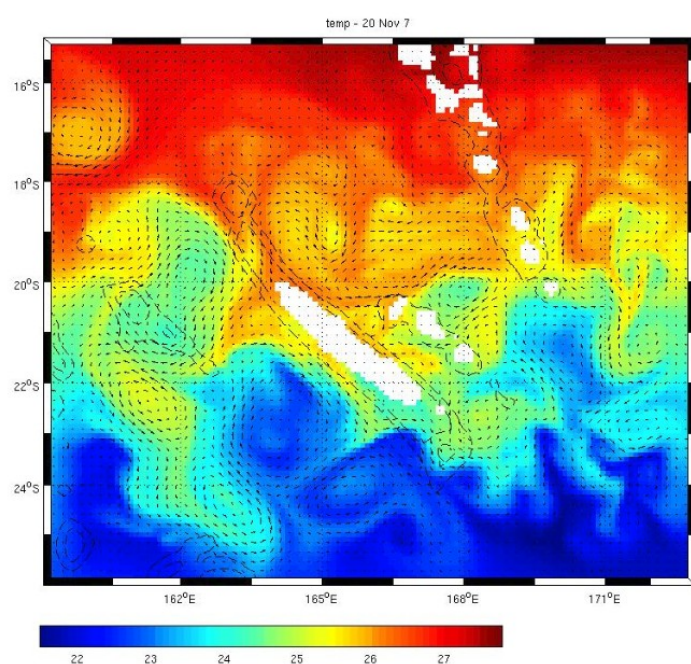
### 3.4. Upwelling de bordure Ouest

Le régime des vents des Alizés est censé dans cette région, et plus particulièrement entre octobre et mars, entraîner une remontée d'eau profonde au niveau de la bordure ouest de la Grande Terre. Ce phénomène appelé upwelling résulte de l'influence des vents Alizés qui créaient en surface un courant cyclonique (Hémisphère Sud) qui entraîne à son tour une divergence des eaux en surface responsable alors du pompage d'Ekman et donc de la remontée d'eau profonde. Je me suis donc intéressée aux distributions de zéta, l'élévation de surface libre qui en présence d'un upwelling devrait être négative du fait de la divergence des eaux. La distribution des températures de surface doit elle aussi être caractéristique de ces remontées d'eau froides.



**Fig.6 :** 20/11 Distribution de surface de zéta

Présence sur la bordure ouest sur la partie sud de la Grande Terre, d'une zone avec des élévations zéta négatives associées à des vecteurs cycloniques traduisant la divergence des eaux dans cette zone



**Fig.7:** 20/11 Distribution de surface des températures

Présence d'eau plus froides que les eaux entourant cette même zone, signe d'une remontée d'eau profonde.

## 4. Discussion

Cette zone géographique faisant l'objet de nombreuses études je me suis appuyée sur un article écrit par Patrick Marchesiello *et al.* paru en 2010 dans le Marine Pollution Bulletin 61 : Coastal upwelling, circulation and heat balance around New Caledonia's barrier reef. Ils ont réalisés la première étude d'analyse dynamique de l'upwelling et de son environnement régional en se basant sur des simulations numériques ROMS. Cette étude m'a permis de comparer mes résultats à des simulations à haute résolution comparées à des données satellitaires précises. J'ai ainsi pu observer une grande similitude de mes résultats et de leurs propres simulations qui étaient validées par les données satellitaires. La relation régime de vent -upwelling a pourtant était remise en question. L'importance du forçage du vent dans la circulation océanique a été largement étudiée. En commençant par les études d'Ekman en 1902, le stress de vent est reconnu comme le plus important producteur de l'upwelling côtier depuis Smith en 1968. Cependant la compartimentation de l'upwelling sur la partie sud de la côte ouest de la Grande Terre et sa variabilité ne pouvant seulement être expliquées par la variation des régimes de vents, les chercheurs de cette étude ont ainsi démontré la présence d'un système de courant géostrophiques interagissant entre l'upwelling côtier la Grande Terre et la divergence d'Ekman « coastal geostrophic convergence ». Des simulations sur de plus grandes zones d'étude s'étendant jusqu'à la côte Est Australienne ont montré la présence de courant transportant de l'ouest des eaux plus chaudes, sous la surface, Subtropical Counter Current, vers l'est. Ces eaux seraient les eaux d'origines de l'upwelling côtier calédonien. L'upwelling côtier de bordure ouest de la Nouvelle Calédonie et sa variabilité spatio-temporelle dépendrait donc de bien plus que des simples variations des Alizés et la compréhension de la dynamique de la ZEE calédonienne ne peut donc se limiter à une étude locale. La validation de la présence du Jet Nord Calédonien est elle aussi très intéressante puisque le modèle ROMS étant un modèle de circulation régionale il permet toute fois de modéliser un courant issu d'une circulation, mer de Corail, qui joue elle un rôle clé dans la connexion entre le vaste gyre anticyclonique subtropicale de l'Océan Pacifique Sud et les régions équatoriales.

## 5. Conclusion

Pour conclure sur l'utilisation de ROMS dans cette zone d'étude, le modèle semble être fidèle aux phénomènes observables et étudiés dans cette région. Cependant afin d'envisager une étude plus poussée sur le fonctionnement et l'origine de cet upwelling il serait nécessaire d'augmenter la résolution pour des simulations de plus grande zone géographique pour éviter de perdre en précision. L'utilisation de données climatologique plus actuelles pour le forçage du modèle permettrait de vérifier si ce modèle concorde réellement avec des données mesurées aux temps correspondants. Cela permettrait alors de dépasser le simple stade d'analyse d'un phénomène mais de tenter d'en donner une prédiction.

## **Bibliographie**

Coastal upwelling, circulation and heat balance around New Caledonia's barrier reef, Patrick Marchesiello *et al.*, Marine Pollution Bulletin 61 (2010) 432-448

Notes de Cours et Travaux Dirigés de Modélisation de la Circulation Océanique, Andrea Doglioli