

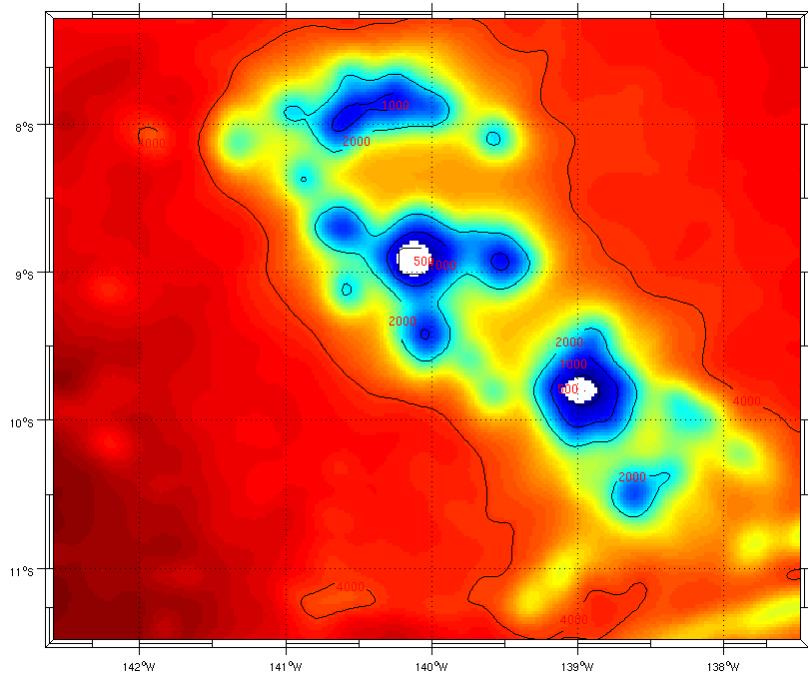
Rapport de stage

Effet d'îles aux Marquises :

Étude des processus physiques
à l'origine de l'enrichissement
autour des îles

Auteur : Timothée Bourgeois

6 août 2012



Tuteur : Elodie Martinez

Co-tuteur : Andrea M. Doglioli

Remerciements

Je remercie tout d'abord mes encadrants, Elodie Martinez et Andrea M. Doglioli pour ces deux mois de stage passés en leur compagnie, ainsi que pour m'avoir conseillé et soutenu durant les différentes étapes du stage. Je remercie aussi l'équipe pédagogique du MIO (Institut Méditerranéen d'Océanologie) pour les connaissances qu'elle m'a transmises. Je remercie Marion Kersalé, Francesco Nencioli et Jérôme Bouffard pour leur complicité, leurs conseils et leur participation à la réalisation de ce travail. Je remercie enfin les responsables du service Informatique de l'Institut Pythéas et du Campus Luminy, Gérard Milhaud, Christophe Yohia et Maurice Libes, pour leur disponibilité lors de mes problèmes informatiques.

Résumé

L'objectif initial de ce stage était évaluer l'impact de différents processus physiques sur la production biologique dans l'archipel marquésien. Pour ce faire, il a été convenu de réaliser l'implémentation d'une simulation à partir du modèle physique ROMS couplé avec un modèle biogéochimique idéalisé de type NPZD, avec une composante de raffinement de maillage (AGRIF). Des tests de sensibilité portant sur la bathymétrie et la dynamique atmosphérique devaient être opérés *via* l'utilisation de différents produits de vents et différentes résolutions spatiales. Malgré le fait qu'elles ne présentent pas les configurations rigoureusement prévues, deux simulations physiques intégrant une composante de raffinement de maillage ont été lancées. Le manque de temps associé à des problèmes informatiques de réseau n'ont pas permis d'exploiter les sorties de ces simulations.

Abstract

The aim of this work was the assessment of the different impacts of physical processes on biological production in the marquesas archipelagos. To do so, it was decided to perform an implementation of a run from the ROMS physical model, coupled with an idealized biogeochemical model (NPZD), including an embedded domain. Sensitivity tests on bathymetry and atmospheric dynamics should be operated. Despite the fact that the implemented runs did not have the exact expected configurations, two runs were launched. The lack of time associated with network problems do not permit to study the model results.

Table des matières

1	Introduction	4
2	Matériel & Méthodes	7
2.1	Zone d'étude	7
2.2	Modèle ROMS	8
2.3	Procédure de raffinement de maillage AGRIF	9
2.4	Implémentations réalisées	11
2.4.1	Implémentation large	11
2.4.2	Implémentation restreinte	12
2.5	Caractérisation des allées de tourbillons	12
3	Résultats	14
4	Discussion	18
4.1	Représentation de la topographie	18
4.2	Interpolations des conditions initiales	18
4.3	Relancement de simulation	19
4.4	Erreur MATLAB	20
4.5	Création des figures de sortie de modèle	20
5	Conclusion	21

1 Introduction

En milieu océanique, les îles sont connues pour perturber la circulation océanique. L'interaction entre les contraintes topographiques, la dynamique océanique locale, ainsi que les forçages atmosphériques engendrent des perturbations de sub-mésoéchelle, au niveau du sillage des îles, sous forme de tourbillons et de pompage d'Ekman. L'advection vertical qui en résulte permet une remontée des nutriments d'origine profonde qui enrichit les eaux superficielles. Ainsi, des blooms phytoplanctoniques importants se développent au niveau du sillage des îles et dans les tourbillons formés. Ce phénomène, nommé effet d'îles ("island mass effect", Doty and Oguri, 1956), stimule ainsi l'ensemble de la chaîne trophique.

Par l'utilisation du modèle numérique POM, Hasegawa et al. (2009) ont déterminé trois processus majeurs associés à l'effet d'îles. Le premier consiste en une augmentation de la biomasse phytoplanctonique en surface au niveau du sillage due à la remontée passive du maximum profond de chlorophylle. Le second se produit dans les tourbillons détachés du sillage de l'île, qui forment une allée de tourbillons de Karman (Figure 1). La remontée des nutriments observée dans les tourbillons cycloniques stimule la production primaire locale dans la couche euphotique de surface. Enfin, le troisième processus se traduit par l'entretien d'un upwelling côtier par les vents, ce qui engendre une injection de nutriments du fond vers la surface, localisé à proximité de l'île et dans son sillage. Associé au temps de résidence plus long des eaux à cet endroit, la remontée de nutriment entraîne l'apparition d'un bloom phytoplanctonique de moindre mesure.

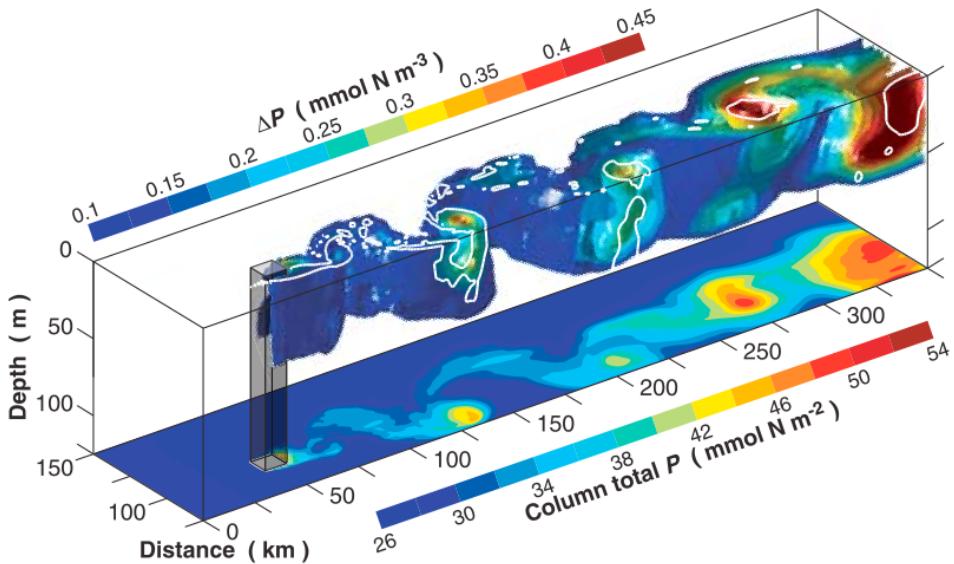


FIGURE 1 – Aperçu 3D de l'augmentation de la concentration phytoplanctonique localisé dans la couche euphotique et la concentration en phytoplancton intégré sur la colonne d'eau - Image tirée de Hasegawa et al. (2009).

Jimenez et al. (2008) ont étudié l'importance relative des contraintes topographiques et des forçages atmosphériques sur le détachement des tourbillons océaniques créés par les îles à fort relief et en eaux profondes. L'étude de la propagation des tourbillons est réalisé en étudiant leurs signatures *via* le paramètre de vorticité relative (Figure 2). L'étude numérique a montré que les forçages topographiques sont déterminant dans la formation d'une allée de tourbillons alors que les vents sont considérés comme des sources secondaires de vorticité.

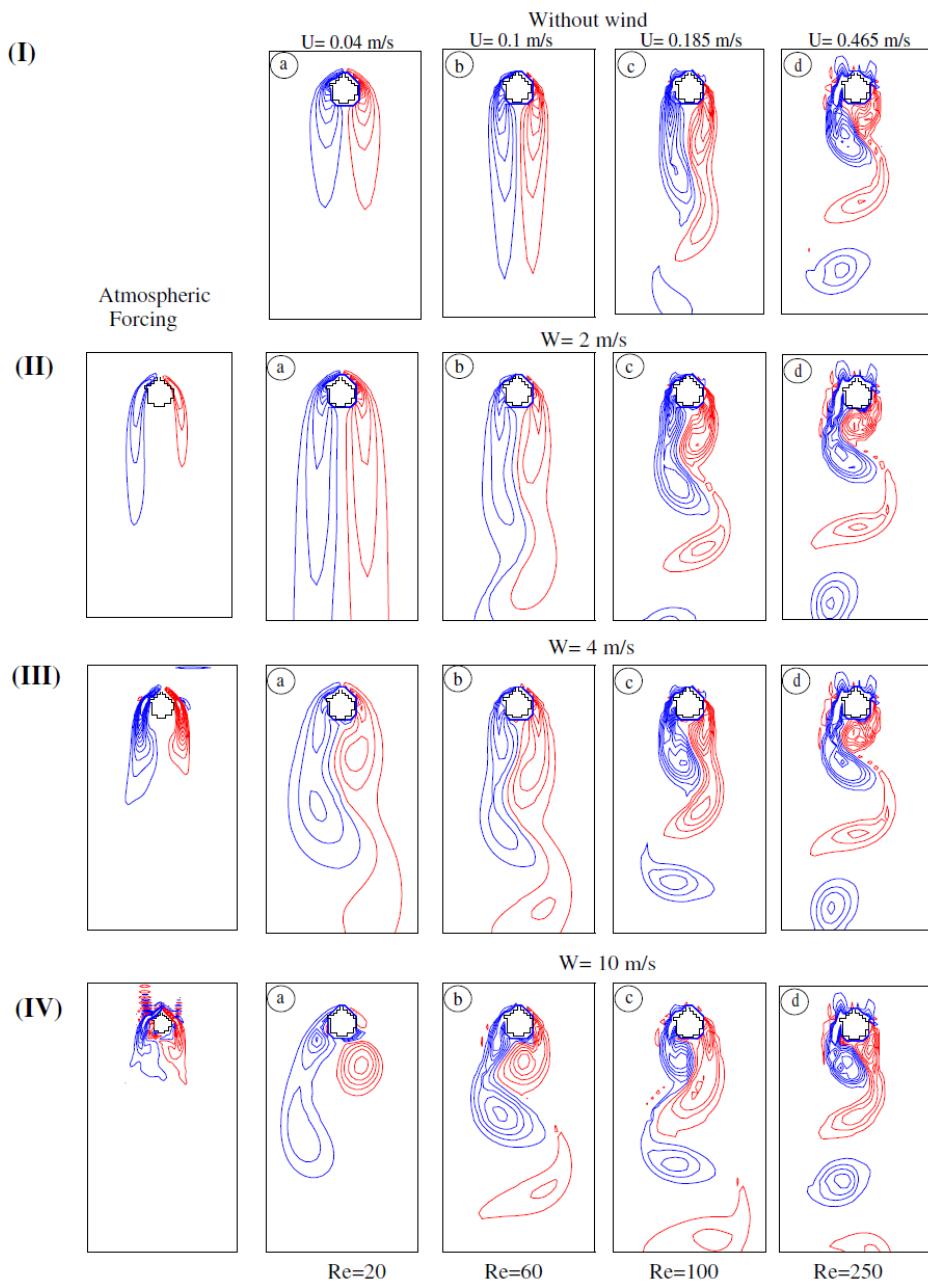


FIGURE 2 – Comparaison entre les cas de forçages topographiques seuls (I), et de forçages topographiques + atmosphériques pour différentes vitesses de vent W (II, III, IV) et différents courants (Re : Nombre de Reynolds). Les lignes rouges et bleues indiquent respectivement les vorticité négatives et positives - Image tirée de Jimenez et al. (2008).

En combinaison avec les contraintes topographiques, les forçages atmosphériques participent effectivement à la formation de tourbillons. Le transport d'Ekman associé aux vents crée des tourbillons et des perturbations au niveau de la pycnocline qui se traduisent par la génération de tourbillons horaires et anti-horaires de chaque côté du sillage, à proximité directe des îles (Figure 3).

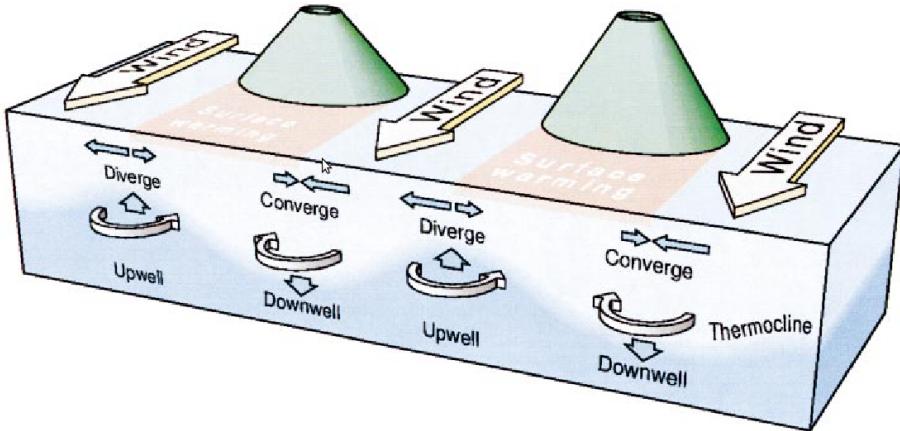


FIGURE 3 – Mécanisme de génération de tourbillons par l’interaction du vent et des îles - Image tirée de Barton (2001).

Situé dans la partie centrale du gyre subtropical du Pacifique Sud, les îles Marquises font partie de l’un des cinq archipels de la Polynésie française. L’effet d’île dans cette région océanique crée un contraste important avec les eaux environnantes oligotrophes. D’après Martinez and Maamaatuaiahutapu (2004), on peut définir trois types de blooms dans l’archipel marquéien : les blooms saisonniers, les blooms épisodiques, et les blooms liés aux phénomènes La Niña. La même étude a déterminé que la fertilisation des eaux en micronutriments par le drainage des îles et les sources hydrothermales n’est pas considéré comme un facteur déterminant dans l’apparition des blooms de cette région. Les origines exactes de l’effet d’île de cette région océanique reste donc méconnues. La cause suspectée de cette perturbation est la combinaison du fort Courant Équatorial Sud avec les alizées, qui traversent l’archipel du Nord-Est au Sud-Ouest. Ce travail a pour but de vérifier cette hypothèse et d’apporter des précisions sur l’importance et le rôle des facteurs physiques impliqués dans l’effet d’île de cette région océanique.

Ainsi, l’objectif initial de ce travail était évaluer l’impact de différents processus physiques sur la production biologique dans l’archipel marquéien. Pour ce faire, il a été convenu de réaliser l’implémentation d’une simulation à partir du modèle physique ROMS couplé avec un modèle biogéochimique idéalisé de type NPZD, avec une composante de raffinement de maillage (AGRIF). Des tests de sensibilité portant sur la bathymétrie et la dynamique atmosphérique devaient être opérés *via* l’utilisation de différents produits de vents et différentes résolutions spatiales. Le manque de temps associé à des problèmes informatiques de réseau n’ont pas permis de réaliser l’ensemble des travaux convenus.

2 Matériel & Méthodes

Pour réaliser cette étude, le modèle ROMS a été appliqué à la région océanique de l'archipel marquésien. Grâce à l'utilisation d'une composante de raffinement de maillage, il est possible d'améliorer localement la résolution du modèle afin de caractériser les phénomènes de sub-mésoéchelle engendrés par l'effet d'île de cette région océanique.

2.1 Zone d'étude

Les îles Marquises se situent dans la partie centrale du gyre subtropical du Pacifique Sud ($218^{\circ}\text{E}-222^{\circ}\text{E} / 8^{\circ}\text{S}-11^{\circ}\text{S}$). Ces îles font partie de l'un des cinq archipels de la Polynésie française. D'une superficie totale de 997 km^2 , elles s'organisent en deux groupes d'îles principaux entourés d'ilôts (Figure 4) : (i) le groupe septentrional, centré autour de la grande île de Nuku Hiva, avec les îles de Ua Pou au sud, Ua Huka à l'est, et au nord les îles de Eiao, Hatutaa et Motu One ; (ii) le groupe méridional, centré autour de l'île principale de Hiva Oa, avec les îles de Tahuata et Moho Tani, et au sud l'île de Fatu Hiva. Cette région présente de fortes variations topographiques au niveau terrestre, avec des monts qui dépassent fréquemment les 1100 mètres d'altitudes. Parmi eux, on peut citer le mont Tekao (1 224 m) sur l'île de Nuku Hiva, le mont Temetiu (1 213 m) sur Hiva Oa, ainsi que le point culminant des Marquises, le mont Oave (1 230 m) sur Ua Pou. Les falaises plongeantes des îles montrent aussi des reliefs abrupts qui se prolongent dans les fonds marins.

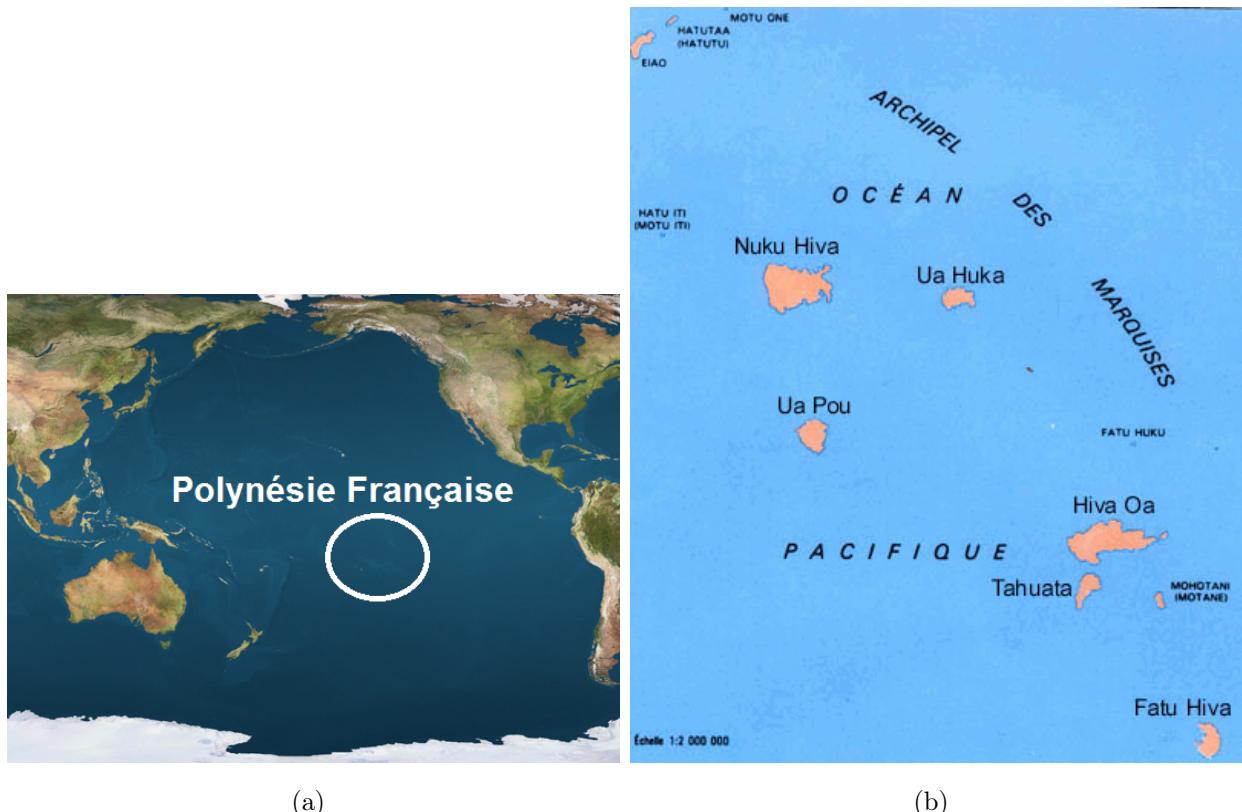


FIGURE 4 – (a) Carte de l'Océan Pacifique (Source : wikipedia) - (b) Carte des îles Marquises (Source : http://www.bwsailing.com/images/map_marquesas.gif).

2.2 Modèle ROMS

Le modèle ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) est un modèle hydrodynamique permettant la simulation de courants, mais aussi d'écosystèmes, de cycles biogéochimiques et de transports de sédiment. La version du code ROMS utilisé dans ce travail est la version 2.1 du code ROMS-AGRIF de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement). Compatible avec les architectures informatiques parallélisées, ROMS-AGRIF est accompagné d'une librairie Roms_tools (http://www.brest.ird.fr/Roms_tools/). Ces outils, codées sous format MATLAB (<http://www.mathworks.com/>), permettent de générer simplement la grille, les forçages de surface, les conditions initiales, les conditions de frontière latérale pour les expériences climatologiques et inter-annuelles. De plus, ils permettent la mise en place d'un système de prévision et l'exploitation des sorties du modèle. Pour davantage d'information sur le modèle, le lecteur est invité à se référer aux travaux de Shchepetkin and McWilliams (2003, 2005), ainsi qu'au manuel d'utilisation ROMS-AGRIF/Roms_tools (Penven et al., 2010).

ROMS est un modèle numérique 3D de surface libre qui résout les équations primitives de Navier-Stokes dans un environnement en rotation, en se basant sur l'approximation de Boussinesq, l'hypothèse d'incompressibilité et l'équilibre hydrostatique. En utilisant l'approche de Reynolds qui consiste à séparer la moyenne statistique des fluctuations, on obtient le système de six équations à six inconnues suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \bar{u} - f \bar{v} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + A_h \nabla_h^2 \bar{u} + A_z \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \bar{v} + f \bar{u} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + A_h \nabla_h^2 \bar{v} + A_z \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \\ 0 = \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \rho g \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \bar{T} = K_h^T \nabla_h^2 \bar{T} + K_z^T \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} \\ \frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \bar{S} = K_h^S \nabla_h^2 \bar{S} + K_z^S \frac{\partial^2 \bar{S}}{\partial z^2} \\ \rho = \rho(T, S, z) \end{array} \right.$$

Ce modèle emploie un schéma aux différences finies et permet l'application de conditions de frontières ouvertes. La discréttisation temporelle est effectuée avec un pas de temps court pour l'élévation de surface et les équations barotropes, alors qu'un pas de temps plus long est utilisé pour la température, la salinité et les équations baroclines. Concernant la discréttisation spatiale, des coordonnées verticales de type sigma et des coordonnées horizontales curvilignes sont utilisées.

Afin d'améliorer la visualisation des interactions entre dynamique côtière et hauturière, cette version du modèle ROMS intègre la capacité d'emboîtement d'un nombre arbitraire de grilles avec la librairie AGRIF (Adaptive Grid Refinement in Fortran ; Blayo and Debreu, 1999). Des outils permettant l'intégration d'une composante de raffinement de maillage sont fournis par la suite Roms_tools.

2.3 Procédure de raffinement de maillage AGRIF

La création de grilles emboîtées est possible avec les 'Nesting_tools' de la librairie Roms_tools. Une interface graphique d'utilisateur, appelé NestGUI (*Nesting Graphical User Interface*) permet la génération des fichiers nécessaires au sous-domaine, appelé grille fille, qui est emboité dans un domaine plus large, appelé grille mère. La préparation des données de la grille fille se réalise par une série d'interpolations à partir des fichiers mères, générés par l'étape dite de *Preprocessing*. Les fichiers créés relatifs à la grille fille sont reconnaissables par leur extension '.#' avec # représentant le niveau de grilles emboîtées. Dans notre exemple constitué d'un domaine et d'un sous-domaine, les fichiers de la fille auront leur extension terminée par '.1'.

L'utilisation des différents outils se réalise depuis le répertoire courant '\Run\' avec MATLAB et nécessite de lui renseigner leurs chemins d'accès avec l'exécution préalable du script 'start.m'. L'interface graphique NestGUI (Figure 5) se lance en exécutant le script 'nestgui.m'.

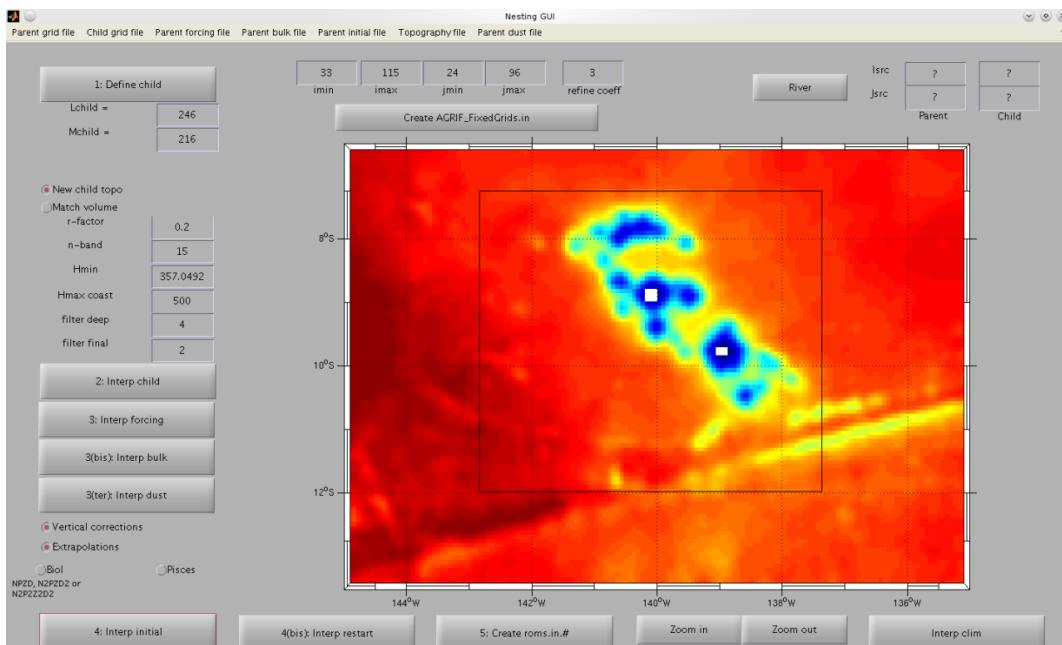


FIGURE 5 – Capture d'écran de l'interface graphique NestGUI

Au lancement de NestGUI, il est demandé de charger la grille mère, à savoir '\ROMS_FILES\roms_grd.nc'.

Ensuite, sélectionner '1 : Define child'. Cela permet de définir de manière grossière la position et la taille de la grille fille en la dessinant sur la grille mère avec la souris. La position et la taille de la grille fille peuvent être affinées en modifiant les coordonnées en pixels imin, imax, jmin et jmax. Une attention particulière doit être apportée à la position des frontières de la grille fille qui doivent être suffisamment éloigné des frontières et des coins de la grille mère pour ne pas mordre sur la couche de sponging mère. Comme pour la grille mère, les frontières de la grille fille doivent suivre une topographie suffisamment douce pour ne pas provoquer d'erreurs au lancement du modèle.

Le coefficient de raffinement (par défaut fixé à 3) peut être aussi ajusté, malgré le fait qu'un rapport de 3 soit considéré comme un bon compromis entre les résolutions mère et fille.

Au lieu d'interpoler la topographie de la grille fille à partir de la grille mère, il est possible de créer la grille fille à partir d'une nouvelle topographie, identique ou différente de celle de la grille mère, en choisissant l'option 'New child topo'. Il faut alors charger le fichier relatif à la topographie choisie, théoriquement situé dans '\Roms_tools\Topo'. Cette option active automatiquement les options de corrections verticales et d'extrapolations qui interviendront plus tard. Bien qu'elles soient désactivables, ces options sont fortement conseillées en cas d'utilisation d'une nouvelle topographie.

La génération de la grille fille se lance en sélectionnant '2 : Interp child'. Une fenêtre apparaît alors précisant le nom de la grille fille créée : '\ROMS_FILES\roms_grd.nc.1'. Le script de création de la grille fille a été modifié (annexe 1) afin de permettre l'édition du masque de la grille fille. Si un message de type 'Warning' apparaît, il peut être nécessaire de repositionner les frontières de la grille fille.

Une fois la grille fille créée, l'interpolation des forçages pour générer ceux de la grille fille à partir de ceux de la grille mère s'opère en sélectionnant '3 : Interp forcing'. Il est alors demandé de charger les forçages mères localisés dans '\ROMS_FILES\roms_frc.nc'. Une fenêtre indique le nom du fichier qui sera généré, '\ROMS_FILES\roms_frc.nc.1'.

L'interpolation des conditions initiales se réalise de manière similaire aux forçages. La sélection de '4 : Interp initial' permet de charger les conditions initiales mère situées dans '\ROMS_FILES\roms_ini.nc' et créera le fichier '\ROMS_FILES\roms_ini.nc.1' relatif aux conditions initiales filles.

L'interpolation des conditions climatologiques, similaire aux interpolations précédentes, est utile seulement si l'on souhaite lancer une simulation à partir de la grille fille seule.

Il est ensuite nécessaire de créer le fichier d'entrée fille du modèle, 'roms.in.1', en sélectionnant 'Create roms.in.#', à partir du fichier 'roms.in' qui est demandé.

Enfin, il faut générer un fichier renseignant la position de la grille fille en sélectionnant simplement 'Create AGRIF_FixedGrids.in'.

Pour relancer une simulation à partir d'un fichier *restart*, il faut générer un fichier *restart* fille 'roms_rst_Y#M#.nc.1', à partir de celui mère, 'roms_rst_Y#M#.nc' en sélectionnant '4(bis) : Interp restart'.

Pour lancer des simulations longues, il est nécessaire de générer aussi un fichier d'entrée fille du modèle qui soit adéquate, à savoir 'roms_inter.in.1'. L'interface NestGUI ne permet pas la création de ce fichier à partir du fichier mère 'roms_inter.in'. La copie de ce dernier permet d'obtenir l'architecture de base du fichier. Il ne reste alors plus qu'à y reporter les valeurs contenues dans le fichier 'roms.in.1'.

Avant la compilation du modèle, il est nécessaire de définir la clé AGRIF (undef > define), à la ligne 50 du fichier 'cppdefs.h'.

Avant le lancement de la simulation, il faut définir le nombre de niveau de grille (ici 2) à la ligne 38 du fichier 'run_roms.csh'.

2.4 Implémentations réalisées

Deux implémentations ont été réalisées et lancées de manière séquentiel sur le cluster de calcul intensif de l’Institut Pythéas. Elles intègrent une composante de raffinement de maillage avec un coefficient de raffinement de 3. La première implémentation consiste en une grille mère étendue sur la région des Marquises, avec une grille fille zoomée sur l’archipel. La deuxième présente une grille mère similaire à la grille fille précédente, mais avec une grille fille zoomée sur Nuku Hiva et Hiva Oa. Les différents paramètres fixés sont présentés en annexe 2.

2.4.1 Implémentation large

Cette implémentation a été réalisé afin d’obtenir une visualisation globale des phénomènes physiques engendrés par l’effet d’iles.

Suite à des problèmes d’interpolations avec NestGUI (cf. partie 4), la génération de la grille fille a été réalisé en interpolant à partir de la topographie de la grille mère. La bathymétrie n’étant pas améliorée, le masque de la grille fille a quand même été édité afin d’obtenir des îles ellipsoïdales.

La grille mère permet d’obtenir les conditions hydrodynamiques globales de la région des îles Marquises, tout en s’affranchissant des conditions aux frontières (Figure 6 - a). La grille fille permet d’affiner la zone où les allées de tourbillons se propagent (Figure 6 - b). La résolution du champs topographique utilisé, ETOP02, ne permet pas de rendre compte de la totalité des îles. Ce problème s’aggrave avec le lissage bathymétrique effectué lors de la création des grilles, qui fait apparaître certaines îles sous forme de monts sous-marins aux reliefs adoucis.

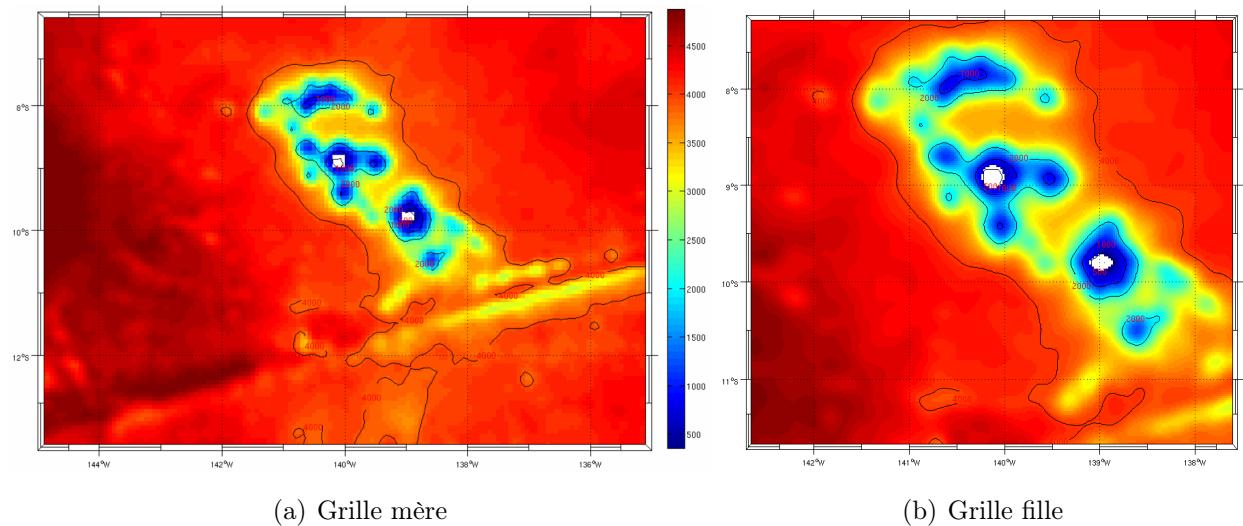


FIGURE 6 – Bathymétries de l’implémentation large.

2.4.2 Implémentation restreinte

L'implémentation restreinte a été réalisé après l'implémentation précédente, de manière à réduire le temps de calcul. Cette implémentation est identique à la première, mis à part les positions et les tailles des grilles mères et filles (Figure 7).

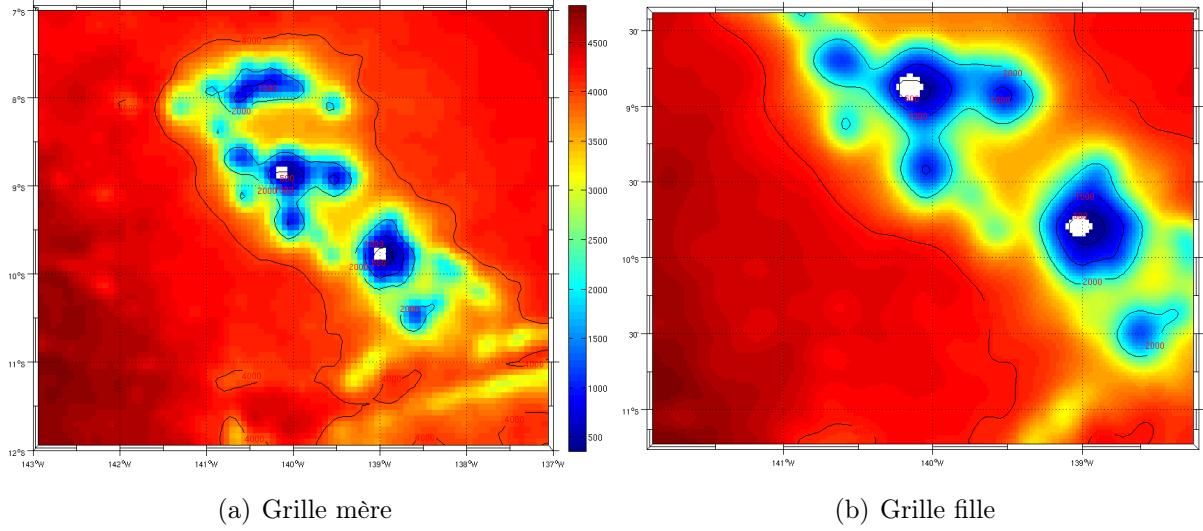


FIGURE 7 – Bathymétries de l'implémentation restreinte.

2.5 Caractérisation des allées de tourbillons

Selon Barton (2001), il est possible de caractériser le sillage formé par les îles par le biais de différents critères.

Dans un repère non tournant, la forme du sillage provoquée par un courant de vitesse U rencontrant un cylindre de diamètre d dépend du nombre de Reynolds (Batchelor, 1967) : $R_e = \frac{Ud}{\nu}$, avec ν la viscosité moléculaire du fluide. Même si la formule est difficile à appliquer en milieu réel, elle permet une première approche sur la nature du sillage créé (Tableau 1). Sachant que le SEC traverse l'archipel du Nord-Est au Sud-Ouest, les dimensions des îles (annexe 3) ont été prises suivant la perpendiculaire à la trajectoire du courant. De manière à prendre en compte le caractère turbulent des écoulements, l'usage est d'utiliser le nombre de Reynolds turbulent en remplaçant la viscosité moléculaire par la viscosité turbulente, comprise entre 10^2 et $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Apel, 1987). La viscosité choisie pour le calcul est de $10^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, en accord avec les travaux de Heywood et al. (1996). Sachant que la vitesses du SEC varie avec les saisons, le nombre de Reynolds est calculé avec $U = 20 \text{ cm s}^{-1}$ et $U = 30 \text{ cm s}^{-1}$ (Martinez et al., 2009).

Pour $R_e > 40$, le sillage devient instable et on observe la formation d'une allée de tourbillons (Figure 8). La fréquence n de détachement des tourbillons est aussi un paramètre à prendre en compte. Celle-ci augmente avec le nombre Reynolds, et intervient dans le nombre de Strouhal : $S_t = \frac{nd}{U}$. Pour de très grand nombre de Reynolds, le nombre de Strouhal tend vers une valeur asymptotique égale à 0.21. Cependant, le nombre de Reynolds est connu pour surestimer les valeurs de transition entre les différentes formes de sillage. Une manière

plus approprié de caractériser celui-ci est l'utilisation du 'paramètre de sillage d'île' ('*island wake parameter*') : $P = \frac{Uh^2}{K_z d}$, avec h la profondeur et K_z la diffusivité verticale du tourbillon. Toutefois, ce paramètre n'est intéressant que si les forces de frictions au niveau des frontières et du fond sont prises en compte.

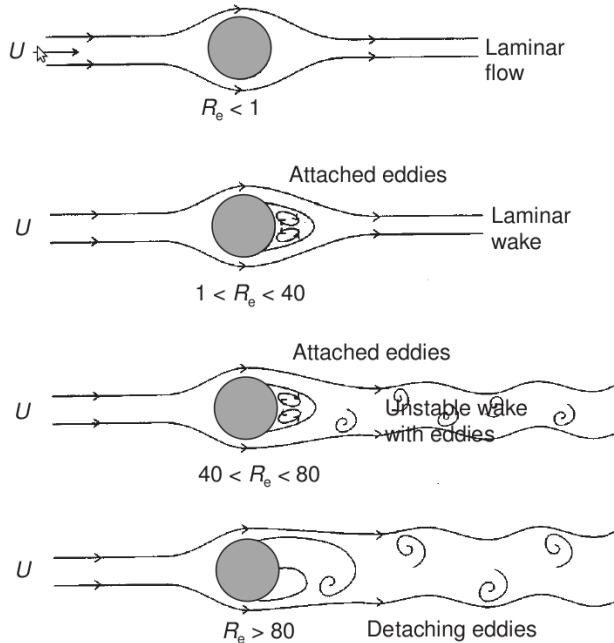


FIGURE 8 – Régime de courant pour différents nombres de Reynolds - Image tirée de Barton (2001).

Dans un repère tournant, deux autres paramètres sont calculables. Le nombre de Rossby ($R_o = \frac{U}{\Omega d}$ avec Ω vitesse angulaire de rotation terrestre) représente le rapport entre les forces d'inerties et les forces dues à la rotation terrestre. Le nombre d'Ekman ($E_k = \frac{2\nu}{\Omega d^2}$) traduit la largeur du sillage. De la même manière que le nombre de Reynolds turbulent, le nombre d'Ekman turbulent est utilisé pour mieux caractériser l'écoulement. Le rapport $\frac{R_o}{E_k}$ est proportionnel au nombre de Reynolds, ce qui généralise ce concept pour un écoulement en rotation. Il est aussi intéressant de noter que la rotation terrestre stimule le détachement des tourbillons en rotation dans le même sens, à savoir les tourbillons cycloniques.

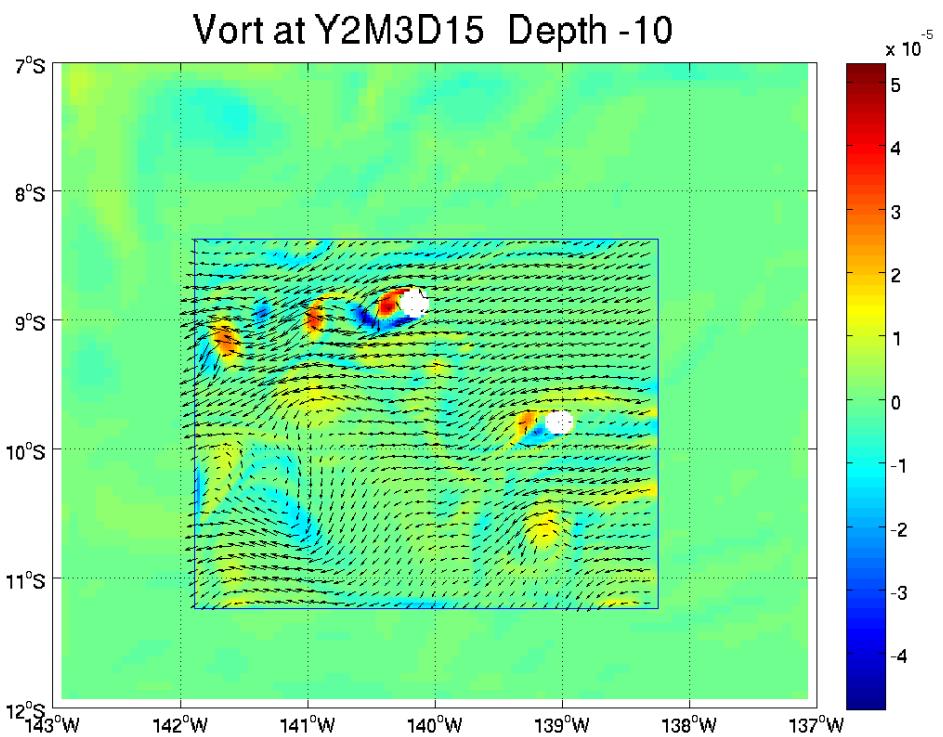
TABLE 1 – Estimations des nombres de Reynolds R_e et Ekman E_k pour le sillage des îles de Nuku Hiva, Hiva Oa, Ua Huka et Ua Pou

Nom de l'île	Dimension (km)	R_e		E_k
		$U = 20 \text{ cm s}^{-1}$	$U = 30 \text{ cm s}^{-1}$	
Nuku Hiva	28	56	84	$3.54 \cdot 10^7$
Hiva Oa	28	56	84	$3.54 \cdot 10^7$
Ua Huka	13	26	39	$1.64 \cdot 10^{-6}$
Ua Pou	13	26	39	$1.64 \cdot 10^{-6}$

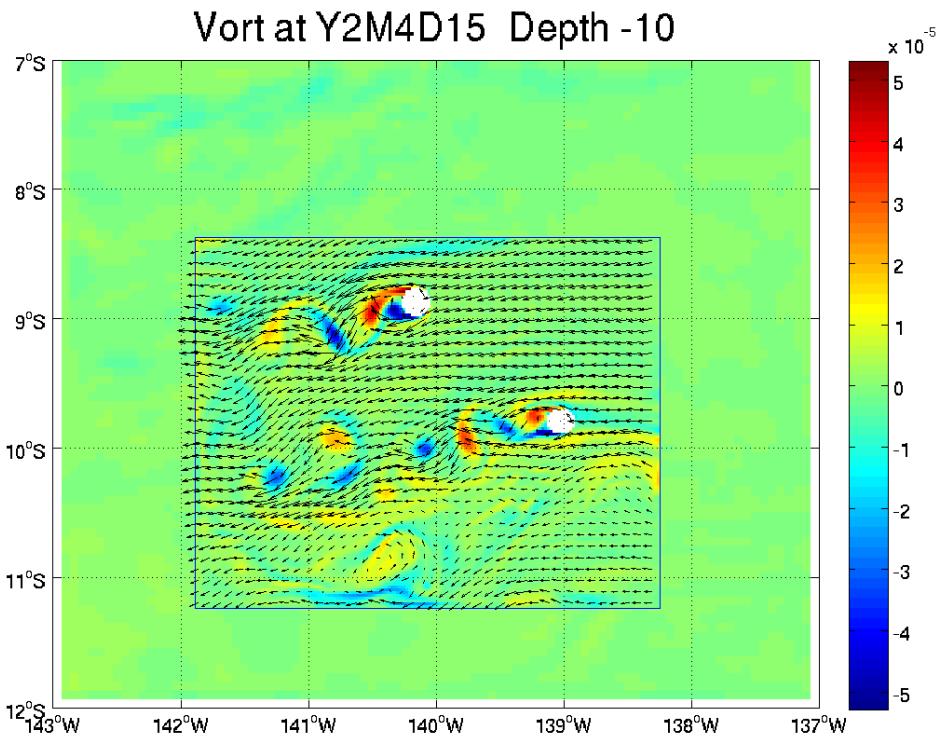
3 Résultats

Beaucoup de problèmes ont été rencontrés pendant ce stage, ce qui a considérablement retardé le lancement des simulations. Les sorties de modèle n'ont pas été exploité, à cause de la phase d'équilibrage (*spin-up*) du modèle, nécessaire au début des simulations longues. Cette partie ne comporte donc pas d'analyse des figures mais seulement une présentation des figures pouvant être obtenues avec un modèle intégrant des grilles emboîtées.

Les résultats exposés ici concernent l'implémentation restreinte qui a nécessité 15 jours de calcul pour 2 ans de simulation. Le diagnostic des 2 ans de simulation est disponible dans l'annexe 4.

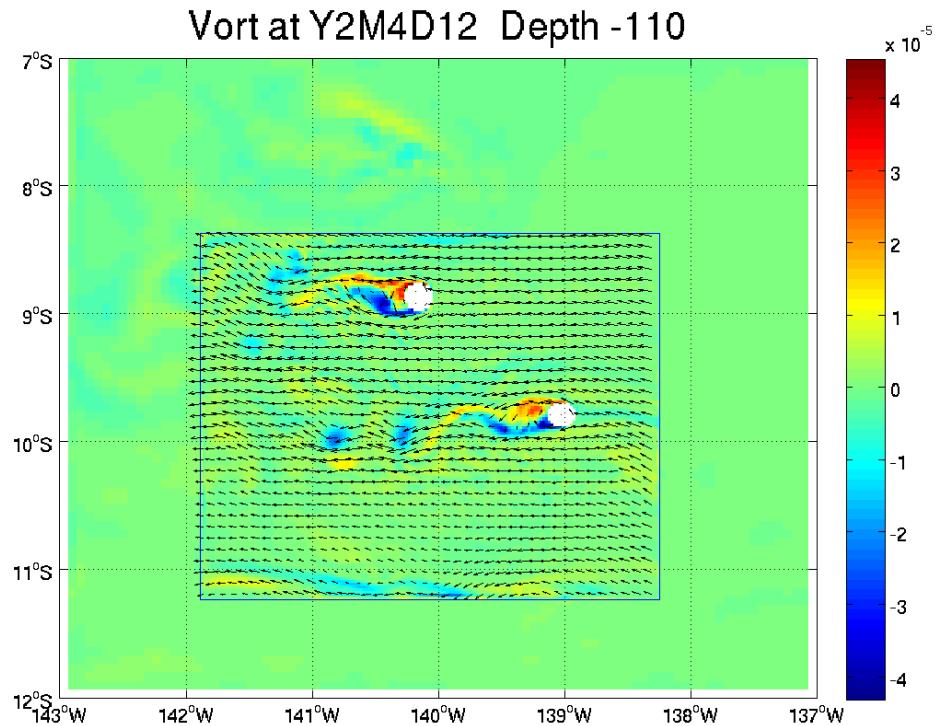


(a) Mois : 3 - Jour 15

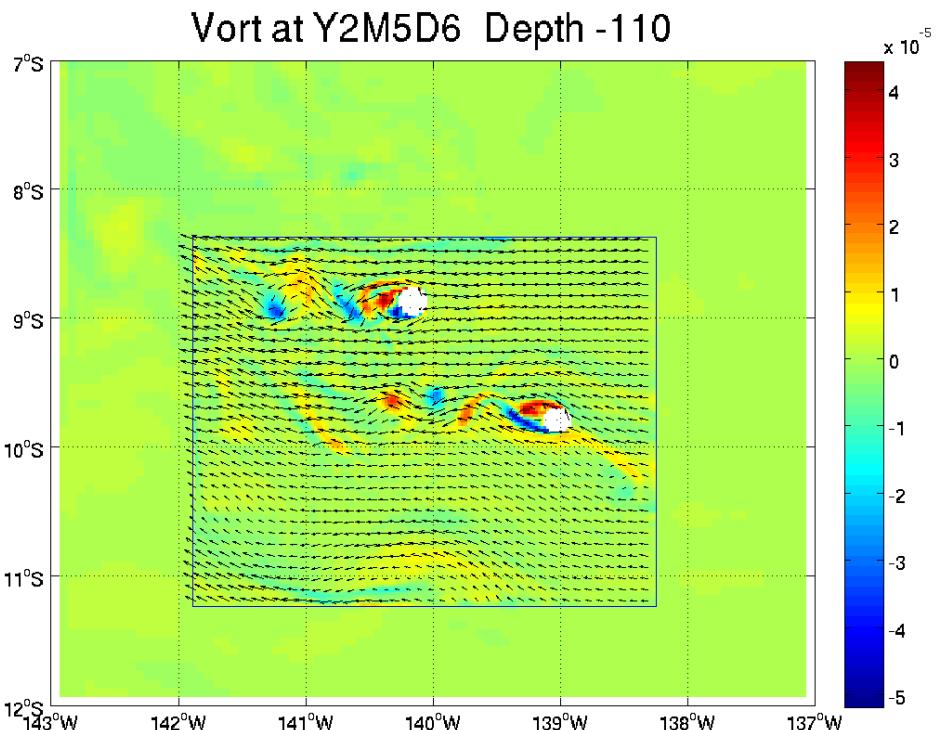


(b) Mois : 4 - Jour 15

FIGURE 9 – Champs instantané de vorticité relative de l'année 2 de l'implémentation restreinte à la profondeur -10 m.



(a) Mois : 4 - Jour 12



(b) Mois : 5 - Jour 6

FIGURE 10 – Champs instantané de vorticité relative de l'année 2 de l'implémentation restreinte à la profondeur -110 m.

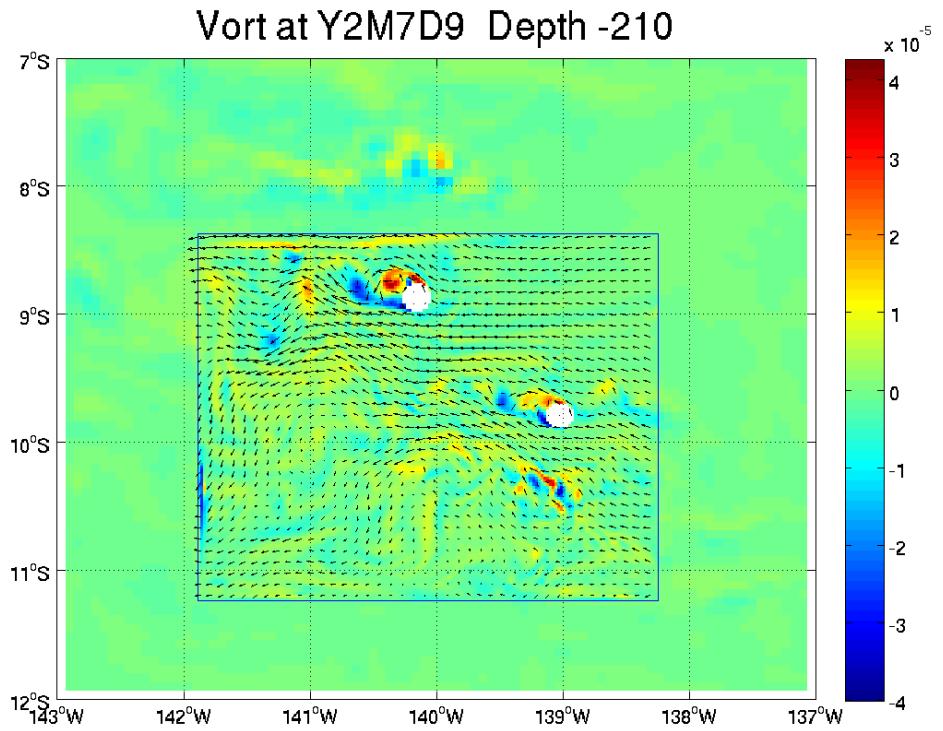


FIGURE 11 – Champs instantané de vorticité relative au jour 9 - Mois 7 - Année 2 de l’implémentation restreinte à la profondeur -210 m.

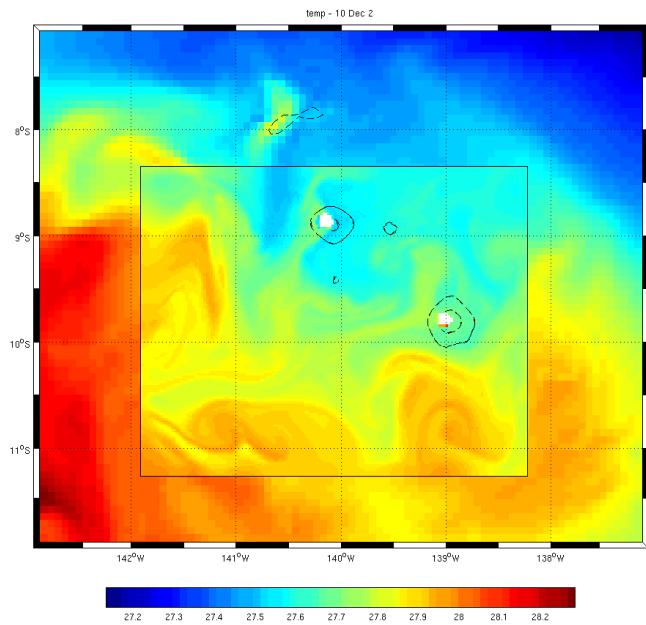


FIGURE 12 – Champs instantané de la température de surface au jour 10 - Mois 12 - Année 2 de l’implémentation restreinte.

4 Discussion

Cette partie expose les différents problèmes rencontrés durant le stage, faute de résultats à exploiter. Ces problèmes concernent différentes étapes de l'implémentation, allant de l'étape de *Preprocessing* à la création des figures de sorties de modèle.

4.1 Représentation de la topographie

Un premier soucis a été rencontré au niveau de la représentation de la topographie du modèle. La résolution spatiale de la topographie ETOPO2 associé au lissage bathymétrique transforme les îles en monts sous-marins. Avec la résolution spatiale de la grille mère d' $1/15^\circ$, seulement deux îles apparaissent. La disparition des îles simplifie fortement la dynamique océanique observée et perd en réalisme en ne faisant apparaître que deux sillages en surface. La création d'îles supplémentaires à partir de l'éditeur de masque est délicate et peut engendrer des erreurs au niveau de la simulation. Il est donc nécessaire d'opérer avec une très grande résolution spatiale, ce qui demande de grandes capacités de calcul. À titre d'exemple, l'implémentation large ($r_{\text{mère}} = \frac{1}{15}^\circ$, $r_{\text{fille}} = \frac{1}{45}^\circ$) nécessite 26 jours de calcul pour une simulation d'un an. C'est pourquoi l'implémentation restreinte a été créée et lancée pour tenter de pallier à ce problème. Bien que cette implémentation soit moins gourmande en terme de calcul, elle est aussi moins intéressante car la grille fille ne couvre pas la totalité des allées de tourbillons attendues. La solution idéale serait de compiler le modèle de manière à pouvoir le lancer en calcul parallélisé sur le cluster de calcul, au lieu de le lancer en calcul séquentiel. Le modèle ROMS permet ce genre de configuration.

Pour cela, il est nécessaire de modifier trois fichiers. Une première modification concerne la définition de la clé MPI à la ligne 48 du fichier 'cppdefs.h'. MPI correspond au compilateur installé sur le cluster pour la parallélisation. Ensuite, il faut définir à la ligne 24 du fichier 'jobcomp' le nom du compilateur à utiliser à savoir 'set LINUX_FC=mpiifort'. Enfin, il faut définir le nombre de noeud à utiliser sur le cluster à la ligne 127 du fichier 'param.h' (par défaut, 4). La compilation est alors prête à être lancée. Une tentative de compilation pour le calcul parallélisé de la simulation a été effectué en vain (annexe 5). Le problème a été soumis au forum ROMS-AGRIF.

4.2 Interpolations des conditions initiales

Un autre problème a été rencontré, cette fois-ci concernant la procédure de raffinement de maillage. Un des objectifs fixés dans ce travail était d'améliorer la représentation de la topographie du modèle en augmentant la résolution spatiale de la zone d'étude par ajout d'une composante de raffinement de maillage. L'amélioration de la topographie est réalisée par l'activation de l'option "New child topo" de NestGUI. Cette option permet de créer la grille fille en interpolant à partir d'une topographie originale, et non à partir de la grille mère. L'activation de cette option active automatiquement deux autres options qui sont 'Vertical corrections' et 'Extrapolations'. Or, l'interpolation des conditions initiales avec

ces options affiche un message d'erreur MATLAB sur certaines configurations (annexe 3). Malgré le fait que ce problème n'ai pas été résolu, plusieurs configurations ont été testé pour observer le comportement de l'erreur. Il en a été déduit les informations suivantes. L'erreur se produit seulement avec l'option 'Extrapolations' qui intervient à la ligne 121 du script nested_initial.m situé dans \Nesting_tools\. L'erreur affichée est relative à 'qhull' qui est un logiciel utilisé par MATLAB lors des calcul de triangulation de Delaunay, avec 'delaunayn.m'. Ce script est utilisé par 'griddata.m', qui est enfin utilisé par ijcoast.m situé dans \Roms_tools\mask\. La taille et la position de la grille fille n'influe pas sur l'erreur. Les paramètres infuant sur celle-ci sont la taille et la résolution spatiale de la grille mère. Pour une résolution donnée, une taille de grille mère minimale existe pour un bon déroulement des interpolations. Enfin, l'erreur se produit à des étapes différentes (zeta, ubar, vbar) selon la taille et la résolution de la grille mère. Ce problème a été soumis au forum ROMS-AGRIF (https://gforge.inria.fr/forum/?group_id=735). Il a été proposé de générer la grille fille à partir d'une autre topographie que celle à l'origine de la grille mère (ETOPO1 à la place de ETOPO2 par exemple) ou de passer à la version 2.2 de ROMS-AGRIF. Pour tenter de rattraper le retard accumulé, l'amélioration de la bathymétrie a été abandonné donc la procédure de raffinement de maillage a été effectué sans l'option 'New child topo'.

4.3 Relancement de simulation

Pour gagner du temps, une tentative de redémarrage d'une implémentation a été effectué, en ajoutant en même temps une composante de raffinement de maillage. L'implémentation d'origine, sans composante de raffinement de maillage, a été réalisé lors des travaux dirigés de l'unité d'enseignement 'OPB205 : Modélisation de la Circulation Océanique' animé par Andrea M. Doglioli. Le démarrage de la simulation a été réussi mais le modèle explose ('blow up') au bout de quelques pas de temps, sur un pas de temps de la grille fille. Le 'blow up' n'arrête pas le modèle. Ce dernier exécute tous les mois de la même manière avec la même erreur. Suite à divers tests, il a été jugé que l'origine du problème pourrait provenir du fait que l'introduction d'une composante de raffinement de maillage tout en redémarrant une simulation n'est techniquement pas possible. Une question se pose alors : Pourquoi peut-on créer, avec NestGUI, un fichier de redémarrage fille en interpolant à partir d'un fichier de redémarrage mère ? En effet, le redémarrage d'une simulation avec une composante de raffinement de maillage ne nécessite pas de créer un fichier de redémarrage fille car la simulation elle-même le crée. Ce problème a été exposé sur le forum ROMS-AGRIF et est en attente d'une réponse.

4.4 Erreur MATLAB

Un problème a été rencontré lors de l’interpolation des forçages *via* NestGUI. En effet, lors de cette interpolation, le message d’erreur MATLAB suivant s’affiche : ‘Class of operand is not supported’. Ce problème se produit sur le poste informatique PC-NENCIOLI-2, présentant la version MATLAB 7.10.0.499 (R2010a). Pour pallier à ce problème, un poste de la salle informatique de l’Institut Pythagoras, présentant la version de MATLAB 7.4.0.336 (R2007a) a été utilisé.

4.5 Création des figures de sortie de modèle

Un script a été réalisé pour permettre la création rapide de figures issues des sorties de simulation, en s’affranchissant de l’interface graphique roms_gui (annexe 7).

Les vecteurs vitesses ont pu être intégré dans les figures mais il n’a pas été trouvé comment utiliser la fonction add_arrow.m pour ajouter la légende des vecteurs. L’affichage de ceux-ci a aussi posé d’autres problèmes. En effet, il n’a pas été possible d’afficher les champs de vecteurs vitesses de la grille mère, et de la grille fille, sans qu’ils ne se superposent sur le domaine de la grille fille.

En comparant les valeurs intérieurs et extérieurs à la grille fille des conditions hydrodynamiques et hydrologiques à proximité des frontières de la grille fille, on observe parfois de fortes différences. Ces différences ne devraient pas avoir lieu d’être car les conditions aux bords de la grille fille sont définis à partir des valeurs de la grille mère. Aucune explication n’a été apportée.

5 Conclusion

L'axe de recherche initial de ce travail était l'évaluation de l'impact de différents processus physiques sur la production biologique dans l'archipel des Marquises. La procédure de raffinement de maillage, bien qu'elle soit maîtrisée, a posé des problèmes qui n'ont pas été résolu. Certains objectifs fixés, comme l'amélioration de la topographie, n'ont pas abouti. Cependant, des simulations opérationnelles incluant une composante de raffinement de maillage ont été préparées et lancées sur le cluster de calcul intensif. La durée limitée du stage et le retard accumulé n'ont pas permis l'exploitation des résultats.

Il serait intéressant de poursuivre ce travail en implémentant une simulation lancée de manière parallélisé, en augmentant la résolution d'un facteur 2 (résolution mère $1/30^\circ$), tout en améliorant la topographie ('New child topo'). Pour cela, il sera nécessaire de trouver une taille de domaine mère s'affranchissant du problème d'interpolation des conditions initiales, si celui-ci n'est pas résolu. Si les capacités du cluster le permettent, et de manière à exploiter au maximum ROMS-AGRIF, l'implémentation de simulations à 3 niveaux de grilles serait à envisager avec par exemple : un domaine mère semblable au domaine mère de l'implémentation large, un domaine fille centré sur l'ensemble de l'archipel en incluant les sillages et un domaine 'petite-fille' zoomée sur une ou plusieurs îles, en incluant aussi leurs sillages. Après le succès de ces tâches, le couplage du modèle physique avec un modèle biogéochimique plus ou moins complexe, et la réalisation des différents tests de sensibilité convenus (résolution bathymétrique, dynamique atmosphérique) pourront être opérés.

Références

- Apel, J. R. (1987). *Principles of ocean physics*. Academic Press, Orlando, FL, USA.
- Barton, E. D. (2001). Island wakes. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 5 :1397–1402.
- Batchelor, G. (1967). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, London and New York.
- Blayo, E. and Debreu, L. (1999). Adaptive mesh refinement for finite-difference ocean models : First experiments. *J. Phys. Oceanogr.*, 27 :1197–1215.
- Doty, M. S. and Oguri, M. (1956). The island mass effect. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, 22 :33–37.
- Hasegawa, D., Lewis, M. R., and Gangopadhyay, A. (2009). How islands cause phytoplankton to bloom in their wakes. *Geophys. Res. Lett.*, 36(L20605).
- Heywood, K. J., Stevens, D. P., and Bigg, G. R. (1996). Eddy formation behind the tropical island of aldabra. *Deep-Sea Res. I*, 43(4) :555–578.
- Jimenez, B., Sangra, P., and Mason, E. (2008). A numerical study of the relative importance of wind and topographic forcing on oceanic eddy shedding by tall, deep water islands. *Ocean Model.*, 22 :146–147.
- Martinez, E., Ganachaud, A., Lefevre, J., and Maamaatuaiahutapu, K. (2009). Central south pacific thermocline water circulation from a high-resolution ocean model validated against satellite data : Seasonal variability and el nino 1997 – 1998 influence. *J. Geophys. Res.*, 114(C05012).
- Martinez, E. and Maamaatuaiahutapu, K. (2004). Island mass effect in the marquesas islands : Time variation. *Geophys. Res. Lett.*, 31(L18307).
- Penven, P., Cambon, G., Tan, T., Marchesiello, P., and Debreu, L. (2010). Roms_agrif / romstools user's guide - roms_agrif v2.1 - romstools v2.1. Disponible sur internet à l'adresse suivante : <http://www.romsagrif.org/index.php/documentation>.
- Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. (2003). A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with nonaligned vertical coordinate. *J. Geophys. Res.*, 108(C3).
- Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS) : a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Model.*, 9 :347–404.

Annexes

ANNEXE 1 : Modifications de scripts pour l'édition du masque de la fille

Insertion du script suivant après la ligne 128 du script 'nested_grid.m'

```
% Write it down to enable editmask to read the mask
%
disp(' ')
disp(' Write it down...')
nc=netcdf(child_grd,'write');
nc{'h'}(:)=hnew;
nc{'mask_u'}(:)=maskuchild;
nc{'mask_v'}(:)=maskvchild;
nc{'mask_psi'}(:)=maskpchild;
nc{'mask_rho'}(:)=maskrchild;
close(nc);
disp(' ')
disp([' Size of the grid: LLm = ',...
       num2str(Lchild-1), ' - MMm = ',num2str(Mchild-1)])
%
% Edit mask
%
editmask(child_grd)
r=input(' Finished with edit mask ? [press enter when finished]', 's');
%
```

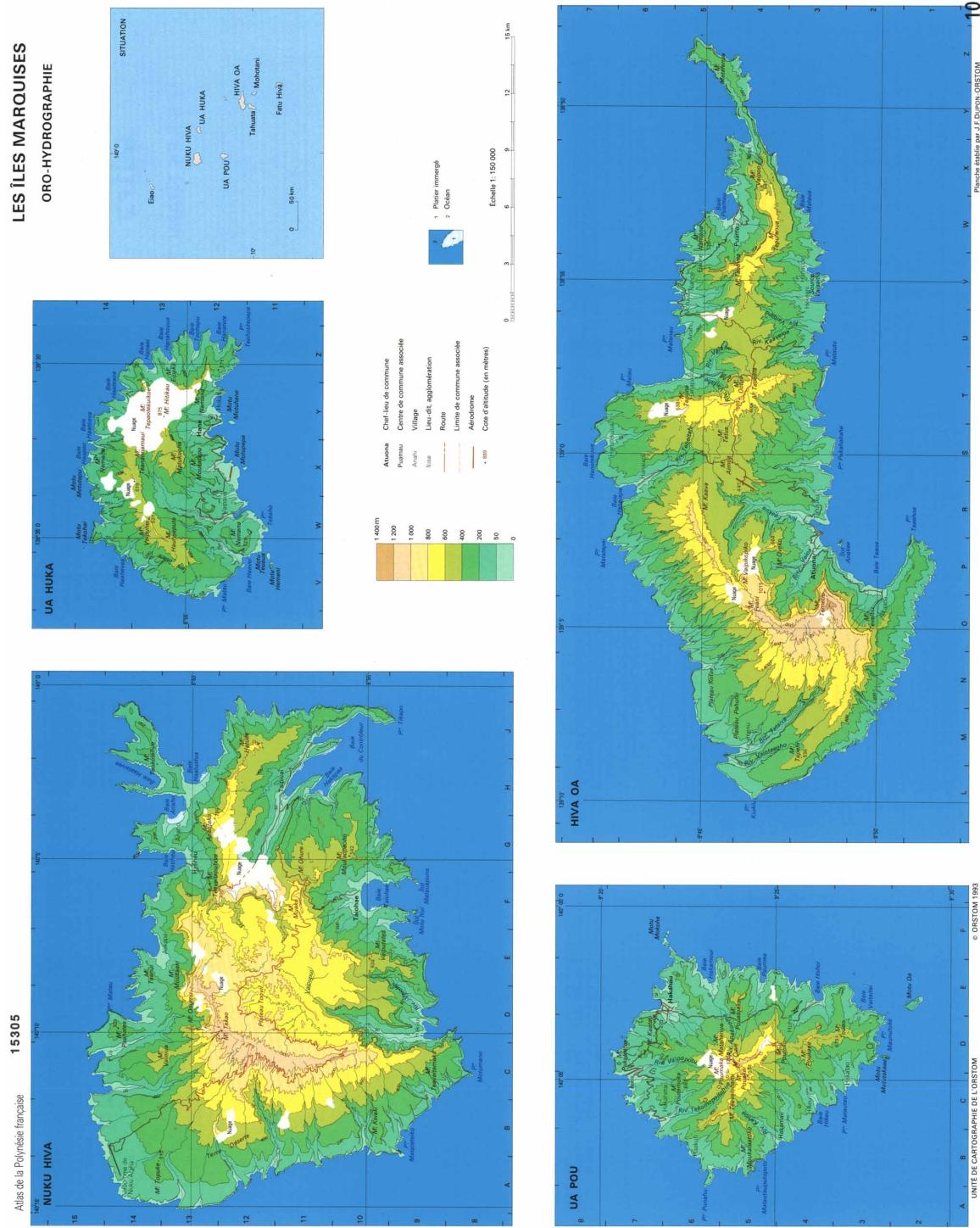
Pour une compatibilité entre les scripts, il est nécessaire de remplacer certains noms de variable dans le scripts 'editmask.m' ainsi que dans les scripts qui lui sont liés, à savoir 'read_mask.m', 'write_mask.m' et 'uvp_masks.m'. Les modifications à effectuer sont les suivantes :

umask → maskuchild
vmask → maskvchild
rmask → maskrchild
pmask → maskpchild

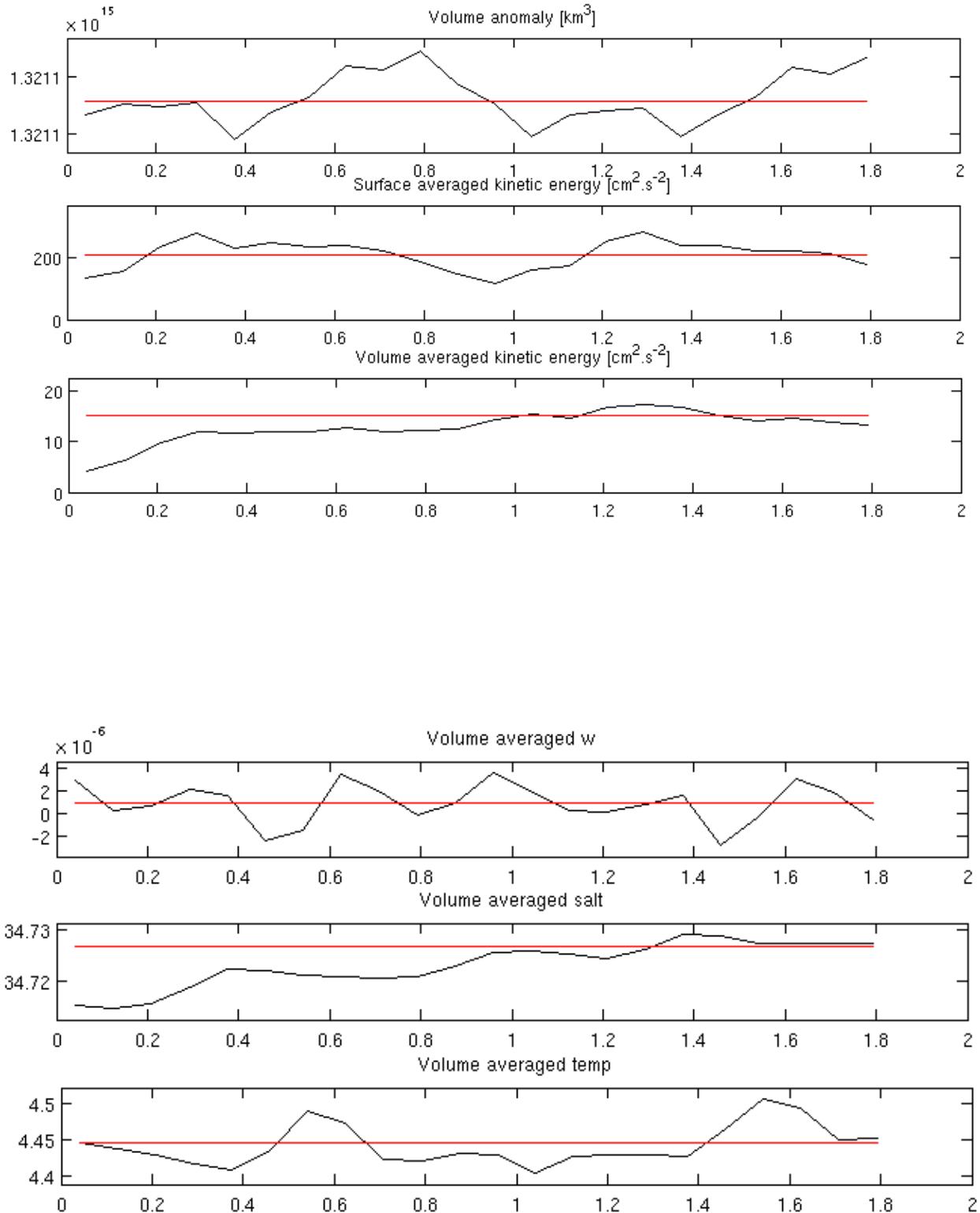
ANNEXE 2 : Paramètres des implémentations

Implémentation	Restreinte	Large
Coordonnées géographiques de la grille mère :		
Longitude ($^{\circ}$ E)	217 ; 223	215 ; 225
Latitude ($^{\circ}$ N)	-12 ; -7	-13.5 ; -6.5
Coordonnées en pixels de la grille fille :		
imin, imax	17, 72	35, 112
jmin, jmax	12, 56	28, 96
Résolution mère ($^{\circ}$)	1/15	
Résolution fille ($^{\circ}$)	1/45	
Nombre de couche verticale		32
Paramètres de la grille verticale :		
theta_s		8
theta_b		0
hc (m)		10
Epaisseur de la couche de sponging (km) :		
Grille mère		30
Grille fille		10
Viscosité aux frontières ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)		1000
Nombre de pas de temps pour les équations 3D :		
Grille mère		7200
Grille fille		21600
Pas de temps pour les équations 3D (s) :		
Grille mère		360
Grille fille		120
Nombre de pas de temps 2D dans les équations 3D		60
Fréquence d'écriture des données historiques		10/mois
Fréquence d'écriture des données moyennées		1/mois
Péiode de simulation (années)		5
Forçages atmosphériques	Climatologie COADS (2005)	
Conditions initiales et aux frontières ouvertes	WOA(2005)	

ANNEXE 3 : Oro-hydrographie des îles de Nuku Hiva, Hiva Oa, Ua Huka et Ua Pou issue de la planche numéro 10 de l'Atlas de la Polynésie française (1993), établie par J.-F. Dupon. (Paris, ORSTOM, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération) - Echelle 1 : 150000.



ANNEXE 4 : Diagnostic de l'implémentation restreinte



ANNEXE 5 : Erreur de compilation pour la parallélisation de la simulation :

```
mpiifort -c -O3 -w90 -w95 -cm -72 -fno-alias -i4 -r8 -fp-model precise  
-I AGRIFZOOM -I../../../../apps/intel/impi/3.2.0.011/include64/  
main_.f -o main.o  
main_.f(8): error #7002: Error in opening the compiled module file.  
Check INCLUDE paths. [AGRIF_UTIL]  
    Use Agrif_Util  
-----^
```

ANNEXE 6 : Message d'erreur MATLAB lors de l'interpolation des conditions initiales associé à l'option d'extrapolation

```
Do the interpolations...  
zeta...  
qhull precision error: initial facet 1 is coplanar with the interior point  
ERRONEOUS FACET:
```

```
While executing: | qhull d Qt Qbb Qc  
  
Options selected for Qhull 2003.1 2003/12/30:  
  delaunay  Qtriangulate  Qbbound-last  Qcoplanar-keep  _pre-merge  
  _zero-centrum  Pgood  Qinterior-keep  _max-width 90  Error-roundoff  
1.3e-13  _one-merge 8.8e-13  Visible-distance 2.5e-13  U-coplanar-distance  
2.5e-13  Width-outside 5e-13  _wide-facet 1.5e-12
```

precision problems (corrected unless 'Q0' or an error)

```
2  
flipped facets
```

The input to qhull appears to be less than 3 dimensional, or a computation has overflowed.

Qhull could not construct a clearly convex simplex from points:

The center point is coplanar with a facet, or a vertex is coplanar with a neighboring facet. The maximum round off error for computing distances is 1.3e-13. The center point, facets and distances to the center point are as follows:

facet	facet
p77	7089
p7012	p77
p0	p0
distance= 0	distance= 0

facet	facet
p7089	p7089
p7012	p77
p0	p7012
distance= -7.1e-15	distance= -7.1e-15

These points either have a maximum or minimum x-coordinate, or they maximize the determinant for k coordinates. Trial points are first selected from points that maximize a coordinate.

The min and max coordinates for each dimension are:

0: 1	91	difference= 90
1: 1	78	difference= 77
2: 0	90	difference= 90

If the input should be full dimensional, you have several options that may determine an initial simplex:

- use 'QJ' to joggle the input and make it full dimensional
- use 'QbB' to scale the points to the unit cube
- use 'QR0' to randomly rotate the input for different maximum points
- use 'Qs' to search all points for the initial simplex
- use 'En' to specify a maximum roundoff error less than 1.3e-13.
- trace execution with 'T3' to see the determinant for each point.

If the input is lower dimensional:

- use 'QJ' to joggle the input and make it full dimensional
- use 'Qbk:0Bk:0' to delete coordinate k from the input. You should pick the coordinate with the least range. The hull will have the

correct topology.

- determine the flat containing the points, rotate the points into a coordinate plane, and delete the other coordinates.
- add one or more points to make the input full dimensional.

This is a Delaunay triangulation and the input is co-circular or co-spherical:

- use 'Qz' to add a point "at infinity" (i.e., above the paraboloid)
 - or use 'QJ' to joggle the input and avoid co-circular data
-

ANNEXE 7 : Script réalisé permettant la création efficace de figures issues des fichiers de sortie netcdf du modèle ROMS.

```
% Script de production de figures issues des sorties de modèle ROMS situé
% dans le dossier /SCRATCH/.

% Création de figures aux profondeurs -10, -110 et -210 m.

clear all
close all

%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%
%PARTIE A EDITER
%%%%%%%%%%%%%

chld = 1; % Présence d'une grille fille chld = 1
data = 'his'; % type de fichier à utiliser ('his' pour history,
% 'avg' pour average)
% situé dans le dossier /SCRATCH/
year = 2; % année choisie
beginmnths = 9; % premier mois à étudier
endmnths = 10; % dernier mois à étudier
parent_vec = 0; % Affichage des vecteurs mères (1 = activé )
child_vec = 1; % Affichage des vecteurs filles (1 = activé )
parent_skp = 6; % résolution des vecteurs vitesses mères
child_skp = 4; % résolution des vecteurs vitesses filles
scale = 0.25; % échelle des vecteurs vitesses
rempts = [1 1 1 1]; % nombre de vecteurs vitesse à ignorer aux frontières
% [S E N W]
totindex = 10; % fréquence d'écriture par mois
variable = 'Vort'; % variable à observer (zeta, u, v, ubar, vbar, omega, w
% temp, salt, Ke, Pot_vort, Rho, Vort, Psi,
% Speed, Transport, Okubo, Rho_pot, Bvf, Chla, z_SST-1C,
% z_rho-1.25, z_max_bvf, z_max_dTdZ, z_20C, z_15C,
% z_sig27, z_sig26, Lorbacher_MLD , rfactor).
deriv = 1; % deriv = 1 si la variable est une variable dérivé des
% variables ROMS

%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%
```

```

if deriv == 1
    vname = ['*',num2str(variable)];
else
    vname = variable;
end

parentgrd='ROMS_FILES/roms_grd.nc';

if chld == 1
    childgrd='ROMS_FILES/roms_grd.nc.1';
end

for months=beginmnths:endmnths
    parentdat=['SCRATCH/roms_',num2str(data),'_Y',num2str(year),...
'M',num2str(months),'.nc'];

    if chld == 1
        childdat=['SCRATCH/roms_',num2str(data),'_Y',num2str(year),...
'M',num2str(months),'.nc.1'];
    end

    for vlevel=-10:-100:-210
        mkdir(['Results/',num2str(variable),'/',M',num2str(months),'./Depth',...
num2str(vlevel)])
    end

    for tindex=1:totindex
        h=figure('visible','off');
        coef=1;
        m_proj('MERCATOR','long',[217 223 ],'lat',[-12 -7]);
        [lat,lon,mask,var]=get_var(parentdat,parentgrd,vname,tindex,vlevel, ...
        coef,rempts);
        m_pcolor(lon,lat,var)
        if chld == 1
            hold on
            [lat,lon,mask,var]=get_var(childdat,childgrd,vname,tindex,vlevel, ...
            coef,rempts);
            m_pcolor(lon,lat,var)
            h=bounddomain(lon,lat);
        end
        shading flat
        m_grid;
    end
end

```

```

colorbar
if (parent_vec == 1)
    hold on
    h=add_speed_vec(parentdat,parentgrd,tindex,vlevel,parent_skp, ...
rempts,scale);
end
if chld == 1
    if (child_vec == 1)
        hold on
        h=add_speed_vec(childdat,childgrd,tindex,vlevel,child_skp, ...
rempts,scale);
    end
end
tps=tindex*(30/totindex);
title([num2str(variable), ' at Y',num2str(year), 'M',num2str(months),...
'D',num2str(tps), ' Depth ',num2str(vlevel)],'fontsize',20)
saveas(h,['Results/',num2str(variable),'/M',num2str(months),...
'/Depth',num2str(vlevel), '/',num2str(variable),'_M_',num2str(months),...
'_Depth_',num2str(vlevel), '_Day_',num2str(tps), '.png']);
close
disp([' Month : ',num2str(months), ' - Depth : ',num2str(vlevel),...
' - Day :',num2str(tps)])
end
end
end

clear all
close all

```