

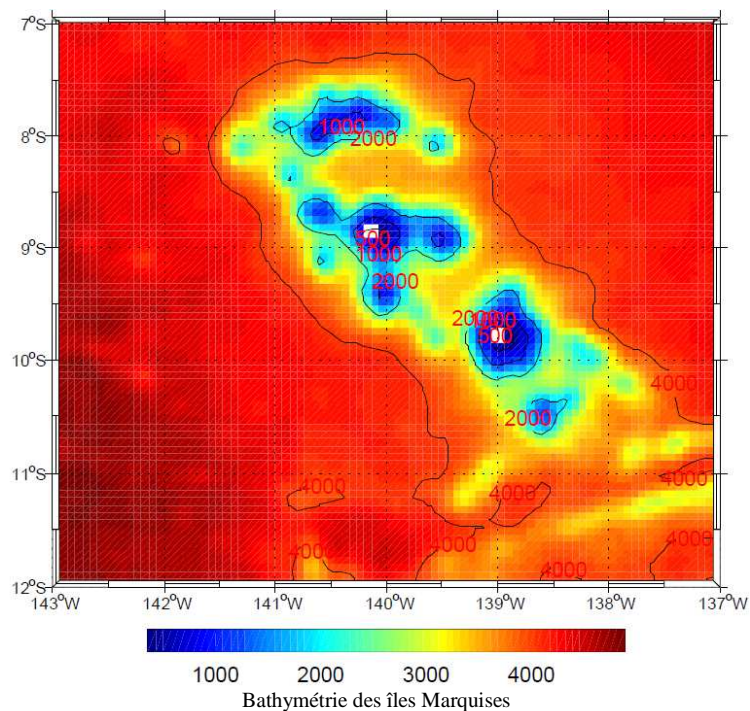
Master d'Océanographie Physique et Biogéochimique

Unité d'enseignement OPB205 : Modélisation de la circulation océanique

Enseignant : Andrea M. Doglioli

Année 2012

APPLICATION DU MODELE ROMS AUX ILES MARQUISES



Auteur : Timothée Bourgeois

30 Avril 2012

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Sommaire | 2 |
| Résumé / Abstract | 3 |
| 1. Introduction | 4 |
| 2. Méthodes | 4 |
| 2.1 Zone d'étude | 4 |
| 2.2. Modèle ROMS..... | 5 |
| 2.2.1. <i>Modélisation numérique en océanographie physique</i> | 5 |
| 2.2.2. <i>Regional Ocean Modeling System (ROMS)</i> | 6 |
| 2.3. Implémentation du modèle ROMS aux îles Marquises..... | 7 |
| 3. Résultats numériques et Discussion..... | 8 |
| 3.1. Simulation Polynésie Française..... | 8 |
| 3.1.1. <i>Diagnostic</i> | 8 |
| 3.1.2. <i>Circulation saisonnière</i> | 8 |
| 3.2. Simulation Marquises | 11 |
| 3.2.2. <i>Diagnostic</i> | 11 |
| 3.2.2. <i>Comparaison avec l'implémentation Polynésie Française</i> | 12 |
| 3.2.3. <i>Effet d'îles aux îles Marquises</i> | 14 |
| 4. Conclusion..... | 15 |
| Références..... | 16 |
| Annexes | 17 |

Résumé / Abstract

Le modèle ROMS a été implémenté sur deux zones d'étude où les îles Marquises apparaissent. La première simulation inclut l'ensemble de l'archipel de la Polynésie Française alors que la seconde ne prend en compte que les îles Marquises. Intégrées sur une période 10 ans, les deux simulations présentent des variations saisonnières qui ne reflètent pas exactement la réalité et les résultats issus de l'étude de Martinez *et al.* (2009). Même si les tendances générales sont globalement représentées, des améliorations sont nécessaires pour permettre une bonne représentation des perturbations de la circulation régionale.

The ROMS model was implemented on two domains where the Marquesas Islands appear. The first one includes the whole chain of French Polynesia whereas the second one is focused on the Marquesas Island. Integrated on 10 years, the two simulations show seasonal variations which do not reflect exactly the reality, and the results from Martinez *et al.* (2009). Even if the general trends are roughly represented, enhancements are required to permit well-represented perturbations of the regional circulation.

1. Introduction

En milieu océanique, les îles sont connues pour perturber la circulation océanique. Les variations bathymétriques rencontrées par les courants océaniques engendrent des perturbations à méso-échelle sous forme de tourbillons et de pompage d'Ekman (Martinez et Maamaatuaiahutapu, 2004). Il en résulte un enrichissement en nutriment des eaux superficielles qui, associé au lessivage des îles par les pluies, provoque des blooms phytoplanctoniques importants. Ces blooms sont effectivement observés au niveau de nombreux archipels comme celui des Fidji, de la Nouvelle-Calédonie, du Vanuatu ou même celui d'Hawaï. Tout comme ces dernières, les îles Marquises génèrent aussi des blooms d'effet d'îles.

Situé dans la partie centrale du gyre tropical du Pacifique Sud, les îles Marquises font parties des cinq archipels de la Polynésie française. L'effet d'île dans cette région océanique crée un contraste important avec les eaux environnantes oligotrophes. Un des moteurs de la perturbation engendrée est le fort Courant Equatorial Sud qui traverse l'archipel.

Cette étude s'axera sur l'application du modèle de circulation océanique régionale ROMS, avec sa suite ROMS_tools, à la région océanique des îles Marquises. Après une description de la zone d'étude, du modèle ROMS et de son implémentation aux Marquises, les résultats numériques obtenus seront expliqués afin de permettre ensuite une comparaison avec les données disponibles de la littérature.

2. Méthodes

Pour modéliser la circulation océanique autour des îles Marquises, un modèle de circulation océanique régionale a été implémenté pour permettre une représentation fidèle des phénomènes de méso-échelle mis en jeu dans cette zone d'étude.

2.1 Zone d'étude

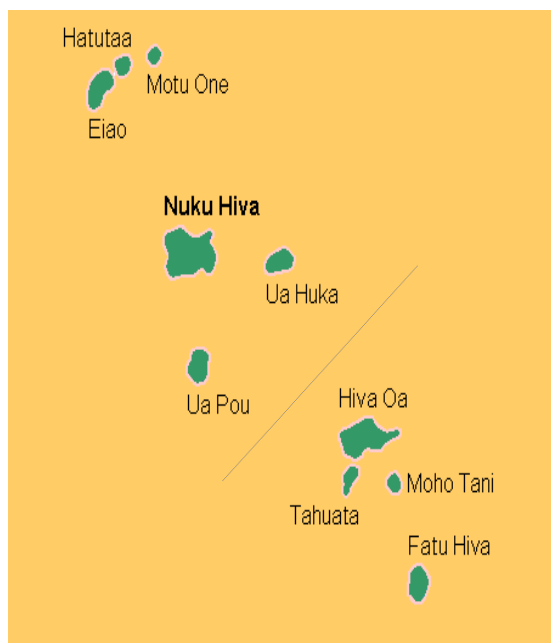


Figure 1 : Carte des îles Marquises (wikipedia)

Les îles Marquises se situent dans la partie centrale du gyre tropical du Pacifique Sud (218°E - 222°E / 8°S - 11°S). Ces 14 îles font parties des cinq archipels de la Polynésie française (wikipedia). D'une superficie totale de 997 km^2 , elles s'organisent en deux groupes principaux visible sur la figure 1 : (i) le groupe septentrional, centré autour de la grande île de Nuku Hiva, avec les deux plus petites îles d'Ua Pou au sud, Ua Huka à l'est, et au nord les petites îles d'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 notamment le Mont Oave qui culmine à 1230 m sur Ua Pou. Les falaises plongeantes des îles montrent des reliefs abrupts qui se prolongent dans les fonds marins.

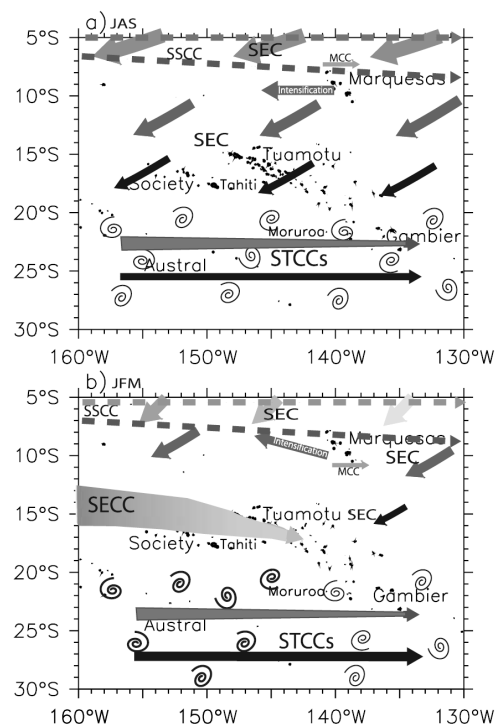


Figure 2 : Représentation schématique des principaux courants en Polynésie Française pendant l'hiver (JAS) et l'été austral (JFM) (Martinez *et al.* (2009))

Le climat marquisien est tropical humide et marqué par des températures modérées (29 °C en moyenne) dues aux alizés (sea.edu). La pluviométrie est très variable au niveau spatial et interannuel (sécheresse en période La Niña). Les côtes exposées aux vents dominants connaissent des pluies plus importantes que celles sous le vent.

La région est traversée par de nombreux courants comme le montre la figure 2. Le Courant Equatorial Sud (SEC) orienté vers le Sud-Ouest présente des vitesses de l'ordre de 35 m/s. Ce courant est caractérisé par une forte variabilité saisonnière (intensification avec les alizés en hiver austral) et interannuelle (ralentissement en période El Niño) (Lefevre *et al.*, 2004). Le Contre-Courant Sud de Subsurface (SSCC) s'écoule vers l'est. Pendant l'été austral et El Niño, le Contre-Courant Equatorial Sud (SECC) orienté vers l'Est s'amplifie avec des vitesses de 10 cm/s allant jusqu'à 20 cm/s. Orienté aussi vers l'Est, le Contre-Courant des Marquises (MCC) apparaît durant l'hiver (J. Rancher et F. Rougerie, 1995). Vers 25°S, le Contre-Courant Subtropical (STCC) se dirige vers l'est.

2.2. Modèle ROMS

Le modèle ROMS/Agrif utilisé ici est un modèle « nouvelle génération » d'hydrodynamisme côtier. Ce type de modèle a été développé grâce à l'essor de la modélisation numérique qui a profondément mûri au fil des années.

2.2.1. Modélisation numérique en océanographie physique

Le développement de la modélisation numérique a commencé dans la deuxième moitié du XXème siècle avec l'apparition de puissants outils de calculs. La modélisation en océanographie est apparue suite à l'essor de la prévision numérique en météorologie et la compréhension de la circulation océanique. L'apport de la modélisation a permis de préciser de nombreux mécanismes d'écoulements, en représentant de manière réaliste et fidèle les processus spatio-temporels liés au fluide. Depuis les modèles se sont multipliés. Parmi les plus connus, on peut citer les modèles SYMPHONIE, POM (Princeton Ocean Model), et ROMS (Regional Ocean Modeling System) qui est utilisé ici.

Ces modèles résolvent les équations primitives de Navier-Stokes, couplées à l'équation de continuité, à des équations de conservation de la température et de la salinité, ainsi qu'à l'équation internationale d'état de l'eau de mer. Les formulations de ces équations dépendent de diverses hypothèses, simplifications et méthodes de calculs, qui sont différentes selon les modèles. Le cas de ROMS est décrit dans la partie suivante.

2.2.2. Regional Ocean Modeling System (ROMS)

Le modèle ROMS est un modèle numérique tridimensionnelle appliqué au domaine marin qui permet de calculer des paramètres hydrodynamiques, hydrologiques, écologiques, biogéochimiques et sédimentologiques, tout en prenant en compte les variations de la surface libre. Trois versions de ROMS sont disponibles actuellement, deux américaines et une française issue de l'IRD. C'est cette dernière version qui est utilisée dans ce travail. Associé au logiciel Matlab, la suite Roms_tools qui est fournie avec le modèle permet une implémentation optimisée, et une exploitation variée des résultats du modèle.

Les équations utilisées dans le modèle ROMS admettent quatre hypothèses principales qui sont :

- l'hypothèse hydrostatique qui réduit l'équation de la composante verticale du mouvement à l'équilibre entre force de pression et force de pesanteur.
- l'approximation de Boussinesq qui estime les variations de masse volumique ρ négligeables. Ainsi, il est conservé une masse volumique constante de référence ρ_0 qui remplace le paramètre ρ dans les équations de mouvement, à l'exception du terme de gravitation.
- l'approche de Reynolds qui permet la fermeture de la turbulence par l'introduction des concepts d'écoulement moyen et de coefficients de viscosité turbulente A_x, A_y, A_z .
- l'hypothèse de turbulence horizontale isotrope qui affirme que les coefficients de viscosité turbulente horizontaux sont égaux ($A_x=A_y=A_h$).

Le système d'équation revient à :

| | |
|--|--|
| <p>⇒ Equation du mouvement :</p> $\frac{\partial u}{\partial t} + U \cdot \nabla u - f \cdot v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \nabla_h^2 u + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ $\frac{\partial v}{\partial t} + U \cdot \nabla v + f \cdot u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \nabla_h^2 v + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$ <p>⇒ Equation de conservation de la salinité et de la température :</p> $\frac{\partial T}{\partial t} + U \cdot \nabla T = A_h^T \nabla_h^2 T + A_z^T \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ $\frac{\partial S}{\partial t} + U \cdot \nabla S = A_h^S \nabla_h^2 S + A_z^S \frac{\partial^2 S}{\partial z^2}$ | <p>⇒ Equation d'état de l'eau de mer :</p> $\rho = \rho(T, S, z)$ <p>⇒ Equation de continuité :</p> $\nabla \cdot \vec{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ <p>⇒ Equation de la pression hydrostatique :</p> $P(z) = P_a + g \int_z^\eta \rho \cdot dz$ |
|--|--|

La fermeture de la turbulence de Reynolds nécessite une paramétrisation des coefficients de viscosité turbulente. Parmi les différentes méthodes qui peuvent être appliquées, celle de Large *et al.* (1994), nommé *KPP (K-Profile Parametrization)*, qui est établie par défaut dans le modèle, sera utilisée pour le calcul des coefficients verticaux. Cette méthode propose une paramétrisation des coefficients, selon plusieurs couches suivant un profil vertical appelé profil K. Des conditions aux limites pour la surface libre et pour le fond sont appliquées pour paramétriser les coefficients verticaux de ces couches et représenter

fidèlement les processus physiques qui y sont liés (cisaillement au fond, forçage atmosphériques de surface). Les conditions aux frontières latérales sont paramétrables (fermées aux côtes ou ouvertes sur l'océan) pour s'adapter à la zone d'étude et reproduire des entrées et sorties de champ réalistes. La formule de Smagorinski (1963) est choisie pour le calcul des coefficients horizontaux.

La discrétisation spatiale du modèle ROMS est la suivante : à l'horizontal, des coordonnées curvilignes sont utilisés avec une grille décalée type Arakawa C. A la verticale, ce sont les coordonnées σ qui sont utilisés. Concernant la discrétisation temporelle, la méthode de séparation des pas de temps (*mode splitting*) est choisie. Les conditions de stabilité entre la discrétisation spatiale et temporelle sont établies par un critère de stabilité de type CFL (Courant-Friedrichs-Levy).

Les conditions initiales du modèle peuvent être alimentées par différentes données comme ICOADS, QuickSCAT et WOA par le biais des scripts *make_forcing.m* et *make_clim.m*.

Une interface graphique, générée par *roms_gui.m*, permet l'affichage des résultats sous différentes formes (carte, profil vertical, section vertical, série temporelle).

2.3. Implémentation du modèle ROMS aux îles Marquises

Deux implémentations différentes ont été réalisées dans ce travail. La première, nommée Marquises présente une zone d'étude (figure 3) focalisée sur les îles Marquises alors que la zone d'étude de l'implémentation Polynésie Française (figure 4) inclus, en plus des îles Marquises, la partie sud de l'archipel de la Polynésie française.

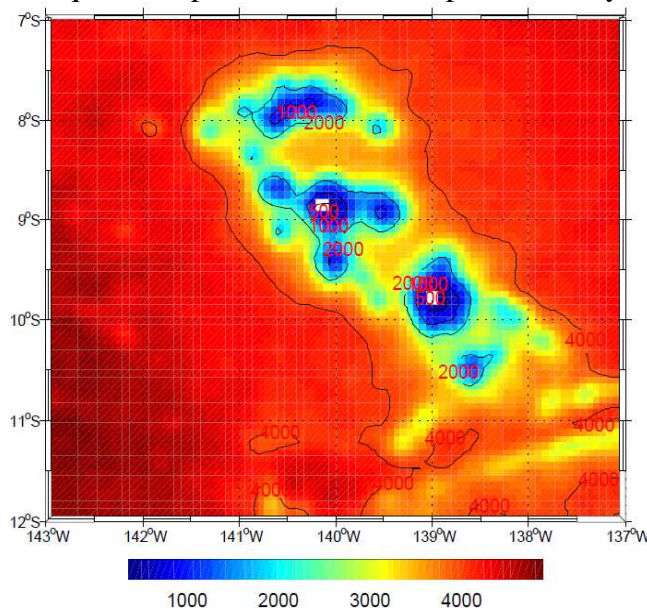


Figure 3 : Bathymétrie de l'implémentation Marquises

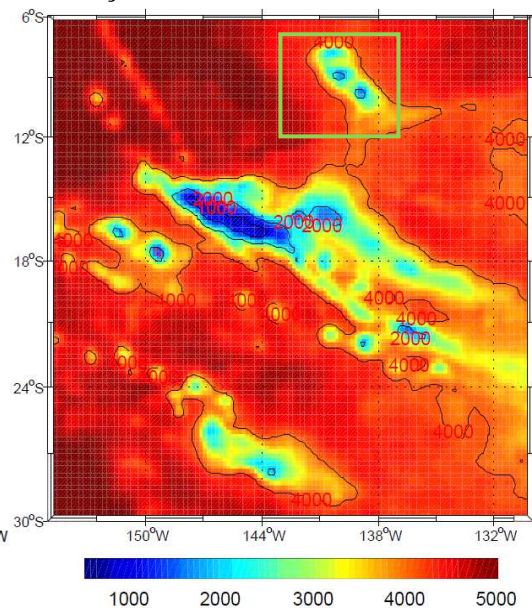


Figure 4 : Bathymétrie de l'implémentation Polynésie Française (cadre vert clair : implémentation Marquises)

Les tailles de grilles ont été limitées à 10^5 mailles pour éviter les simulations trop longues. Comme le montre les figure 3 et 4, la résolution ne permet pas de rendre compte des archipels. Elles apparaissent dans la grille d'étude sous la forme de monts sous-marins aux reliefs adoucis. Les simulations ont été implémentées suivant le tableau 1.

Tableau 1 : Valeurs utilisées pour l'implémentation des deux simulations

| Paramètre \ Implémentation | Marquises | Polynésie Française |
|---|---|---------------------|
| Longitude (°E) | 217 ; 223 | 204 ; 230 |
| Latitude (°N) | -12 ; -7 | -30 ; - 6 |
| Résolution (°) | 1/15 | 1/5 |
| Nombre de couche verticale | 32 | |
| NTIMES : Nombre total de pas de temps pour les équations 3D | 7200 | 1800 |
| DT : Pas de temps pour les équations 3D (seconde) | 360 | 1440 |
| NDTFAST : Nombre de pas de temps 2D dans chaque pas de temps 3D | 60 | |
| Période de simulation (année) | 10 | |
| Frontières latérales ouvertes | Nord – Sud – Est – Ouest | |
| Conditions initiales | Forçages de surface : ICOADS(2005) Température & Salinité : WOA (2005) | |

3. Résultats numériques et Discussion

A l'issue des simulations sur 10 ans, les résultats ont été récupérés et traités. Concernant la simulation Polynésie Française, ses résultats seront surtout exploités pour étudier la circulation saisonnière globale de la zone alors que la simulation Marquises permettra une visualisation précise des phénomènes de petite échelle lié l'effet d'île.

3.1. Simulation Polynésie Française

3.1.1. Diagnostic

Selon l'annexe 1, on observe que la simulation présente un temps de *spin-up* d'environ 3 ans. Les variations saisonnières présentent cependant une forte hétérogénéité interannuelle. L'année sélectionnée pour l'étude des résultats est l'année 7 pour s'éloigner au maximum du temps de *spin-up* tout en sélectionnant une année avec une variation saisonnière raisonnable pour la température et la salinité.

3.1.2. Circulation saisonnière

La circulation saisonnière dans la région de la Polynésie Française est animée ici de nombreux tourbillons sur toute l'année 7, qui sont facilement visible sur la variation de la surface libre (figure 5). D'ailleurs ce sont les tourbillons anticycloniques qui présentent ici les vitesses de rotation les plus importantes. Ces perturbations sont surtout localisées sur la moitié Sud de la zone d'étude. A cette échelle, les îles Marquises ne semble pas être les principaux acteurs de formations de ces tourbillons qui sont plutôt créés par les îles du Sud de l'archipel.

La circulation saisonnière issus de ces résultats est difficilement corrélable aux résultats (figure 6) issus du papier Martinez *et al.* (2009). Même si le SEC subit bien une intensification en hiver austral (figure 5, aout) sur ces résultats, son amplitude persiste à l'approche de l'été austral (figure 5, novembre). Le SECC, normalement localisé vers 15°S et orienté vers l'est, n'est pas visible sur la totalité de l'année. En effet, la tendance des masses d'eaux de surface à cette latitude est plutôt un déplacement vers l'Ouest. Cependant, ce faible

courant vers l'Ouest s'annule en été austral, moment où Martinez *et al.* (2009) enregistre une intensification du SECC. Le STCC est un des courants les mieux représentés ici. Il est présent toute l'année au niveau de la frontière Ouest, à la latitude 25°S. Dirigé vers l'est, il est fort et étroit, avec des vitesses atteignant 0,5 m.s⁻¹ environ.

Les différences avec les résultats du modèle de Martinez *et al.* (2009) peut venir des différences d'implémentation utilisées. La zone d'étude n'est pas rigoureusement la même. Des problèmes survenus au chargement des forçages ont nécessité une modification de la zone d'étude. Les données de salinité et de température qui ont alimenté leur modèle sont issues d'un modèle de circulation générale. L'origine des forçages atmosphériques est aussi différente avec en particulier les tensions de vent qui sont fournis par la base données CERSAT, interpolée pour la grille de données QuickSCAT.

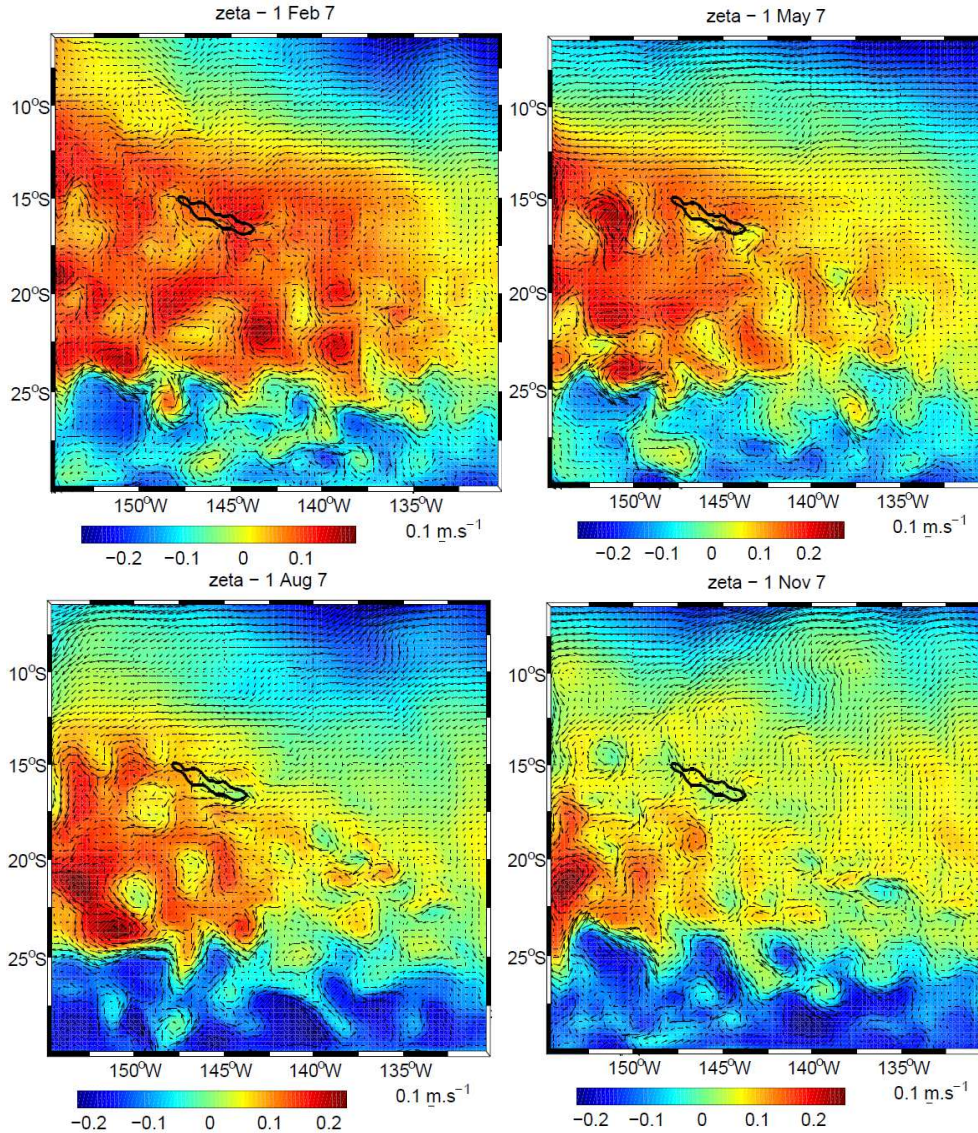


Figure 5 : Champs instantanés d'élévation de la surface libre (m) avec les courants de surface pour les mois de février, mai, aout, et novembre de l'année 7 pour la simulation Polynésie Française

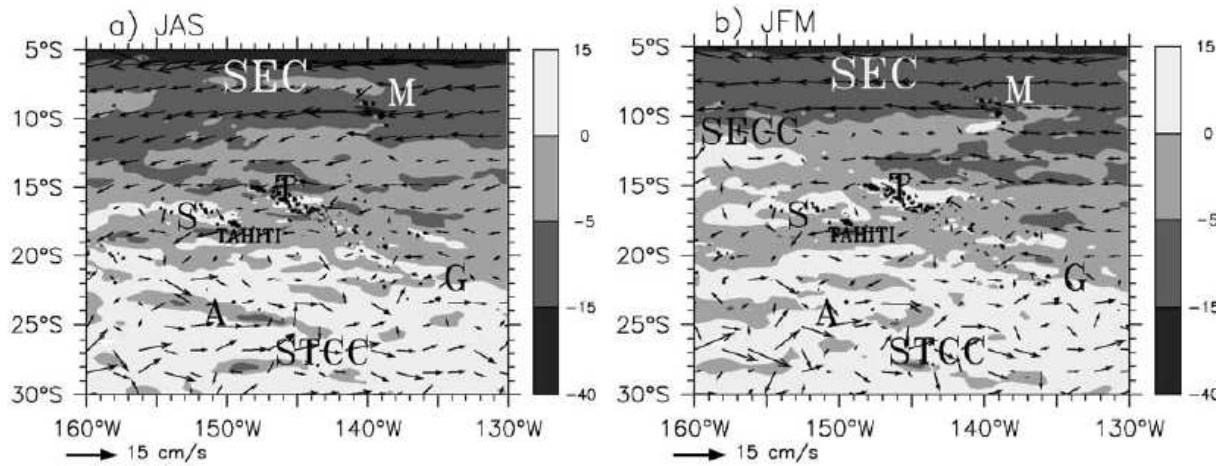


Figure 6 : Vitesses zonales et courants de surface moyennés sur 100 mètres pour l'hiver (JAS=juillet-aout-septembre) et l'été austral (JFM=janvier-février-mars) (Martinez *et al.*, 2009)

Les variations saisonnières de la température de surface sont visibles avec des températures au sud qui dépassent les 28°C en été (figure 7r) alors qu'elle ne dépasse pas 27°C en hiver sur la même zone. Plus au nord, entre 20 et 30°S, une zone de front thermique apparaît où des tourbillons provenant du STCC participent à l'homogénéisation des masses d'eaux. Ce front thermique est centré sur la latitude 25°S en février alors qu'elle se situe plutôt vers 22°S en aout.

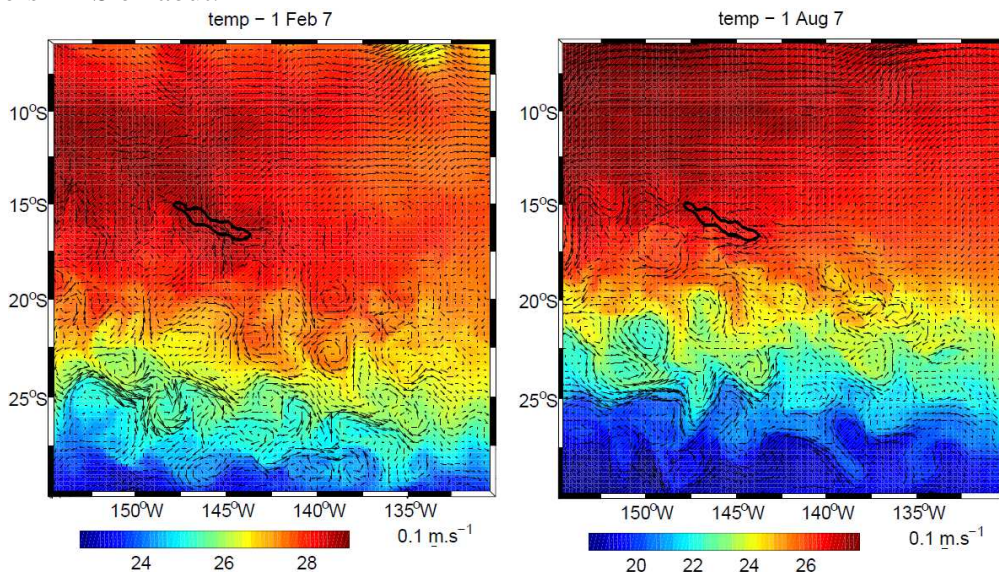


Figure 7 : Champs instantanés de température de surface et courants de surface pour les mois de février et aout de l'année 7 pour la simulation Polynésie Française

Selon la figure 8, le courant STCC est présent en début de section sur les 450 premiers mètres, voire plus profond. Cette observation est en accord avec les résultats (figure 9) de Martinez *et al.* (2009), même si le courant est beaucoup plus étroit sur les résultats exposés ici. Les vitesses qu'ils ont obtenues pour ce courant sont inférieures à 10 m.s⁻¹ alors que la figure 8 indique des valeurs autour de 16 m.s⁻¹ en surface, à même latitude. En fin de section, le SEC est plus étendu en profondeur (200 m vs. 150 m). A même latitude, on aperçoit deux taches jaunes en surface qui pourrait correspondre à la formation du MCC orienté dans le sens contraire du SEC. Toujours en fin de section, le SSCC est visible à partir de 200 m, comme l'indique les résultats de Martinez *et al.* (2009).

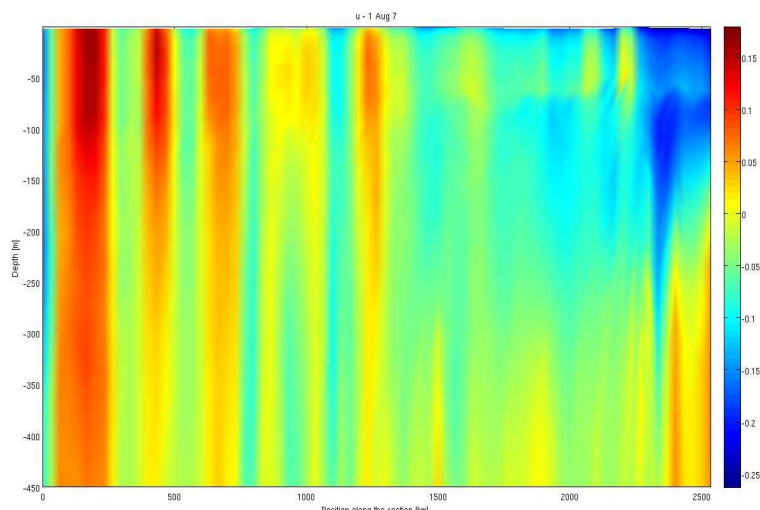


Figure 8 : Section méridionale (140°W) de la vitesse zonale (m.s^{-1}) en aout de l'année 7 à travers la totalité de la zone d'étude de la simulation Polynésie Française

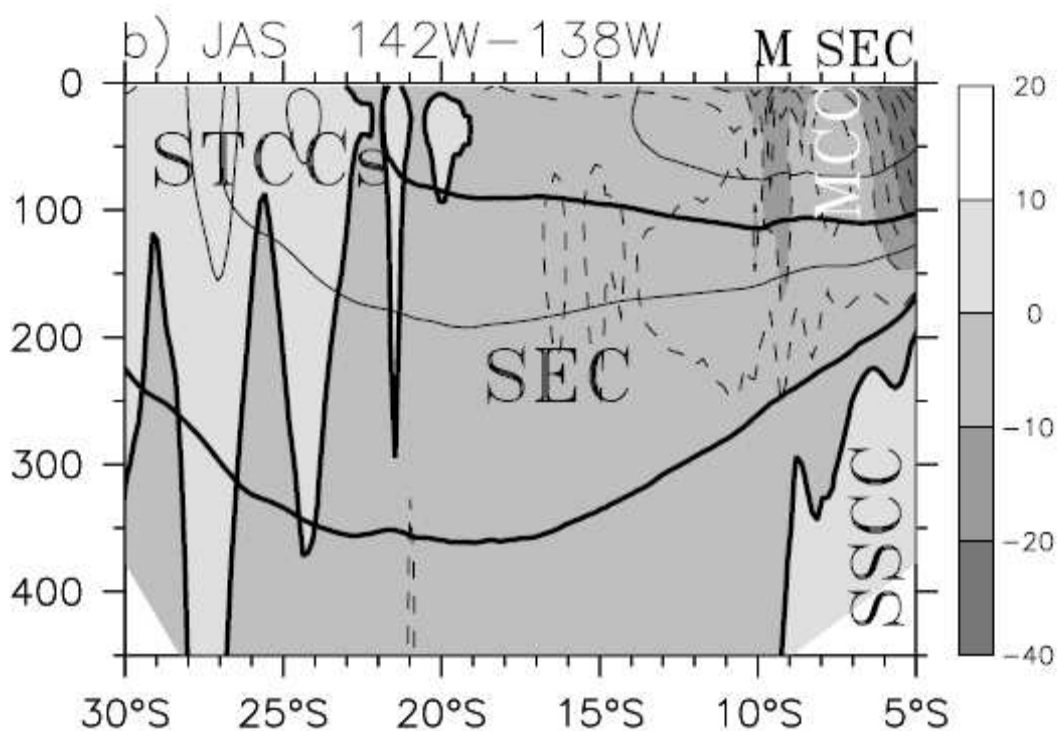


Figure 9 : Section méridionale de la vitesse zonale (cm.s^{-1}) moyennée entre 142°W et 138°W (Martinez *et al.*, 2009)

3.2. Simulation Marquises

3.2.2. Diagnostic

Concernant le diagnostic de la simulation Marquises, le temps de *spin-up* est beaucoup plus court et ne nécessite qu'une année pour atteindre l'état d'équilibre (Annexe 2). Même la salinité, qui est un paramètre connu pour atteindre difficilement l'équilibre dans les modèles, se stabilise au bout de 4 ans. Contrairement à la simulation précédente, les variations

saisonniers et interannuelles de température et de salinité sont régulières. L'année 9 est choisie pour l'analyse des résultats afin de bien s'écarter du temps de *spin-up*.

3.2.2. Comparaison avec l'implémentation Polynésie Française

On observe sur la première moitié de l'année un tourbillon de méso-échelle dans la partie Nord-Ouest de la zone d'étude qui « s'écrase » sur la frontière Nord en Mai (figure 10). Etant trop proche des frontières de l'étude, il est délicat de tirer des informations de cette observation sachant que les mouvements des masses d'eaux subissent souvent un lissage parallèle aux frontières. Comme l'indique Martinez *et al.* (2009), le mois de février est caractérisé par une atténuation du SEC, bien qu'elle soit exagérée sur le mois de février de la figure 10. De plus, ce courant s'intensifie bien en été austral. Il faut noter que le MCC n'est pas visible sur cette figure. Les îles modifient peu la circulation au début de l'année puis on observe en aout des perturbations avec la formation de tourbillons au Sud-Ouest des îles. Ceux-ci s'atténuent ensuite en novembre.

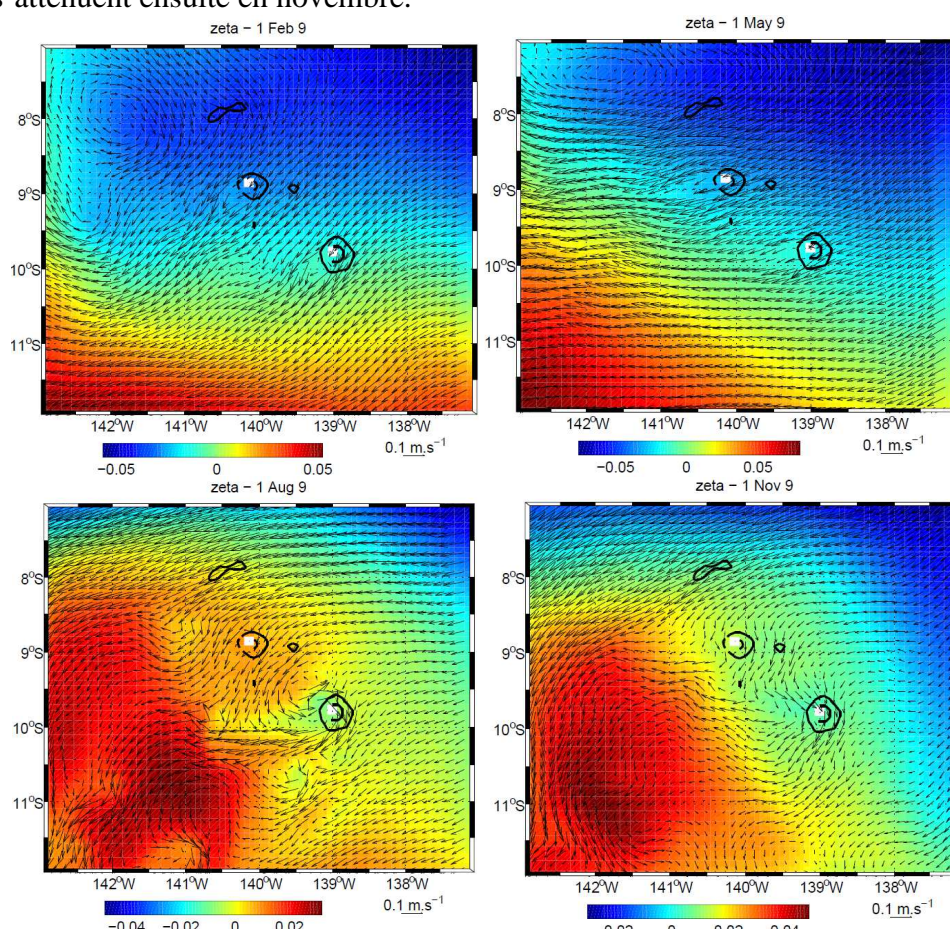


Figure 10 : Champs instantanés d'élévation de la surface libre (m) avec les courants de surface pour les mois de février, mai, aout, et novembre de l'année 9 pour la simulation Marquises

Concernant les températures de surface, on observe, sur la figure 11, la forte influence du SEC sur cette zone d'étude. Des trainées de masses d'eaux plus chaudes apparaissent dans le sens du courant. Ces eaux chaudes sont protégées par les îles de l'eau plus fraîche du courant. Globalement, les températures de surface oscillent autour de 28°C en été et descendent à 27,4°C environ en hiver. Ces températures sont en accord avec la simulation précédente. En aout, les températures sont plus homogènes que sur les 3 autres mois exposés ici, qui présente quant à eux un gradient Nord-Est Sud-Ouest net.

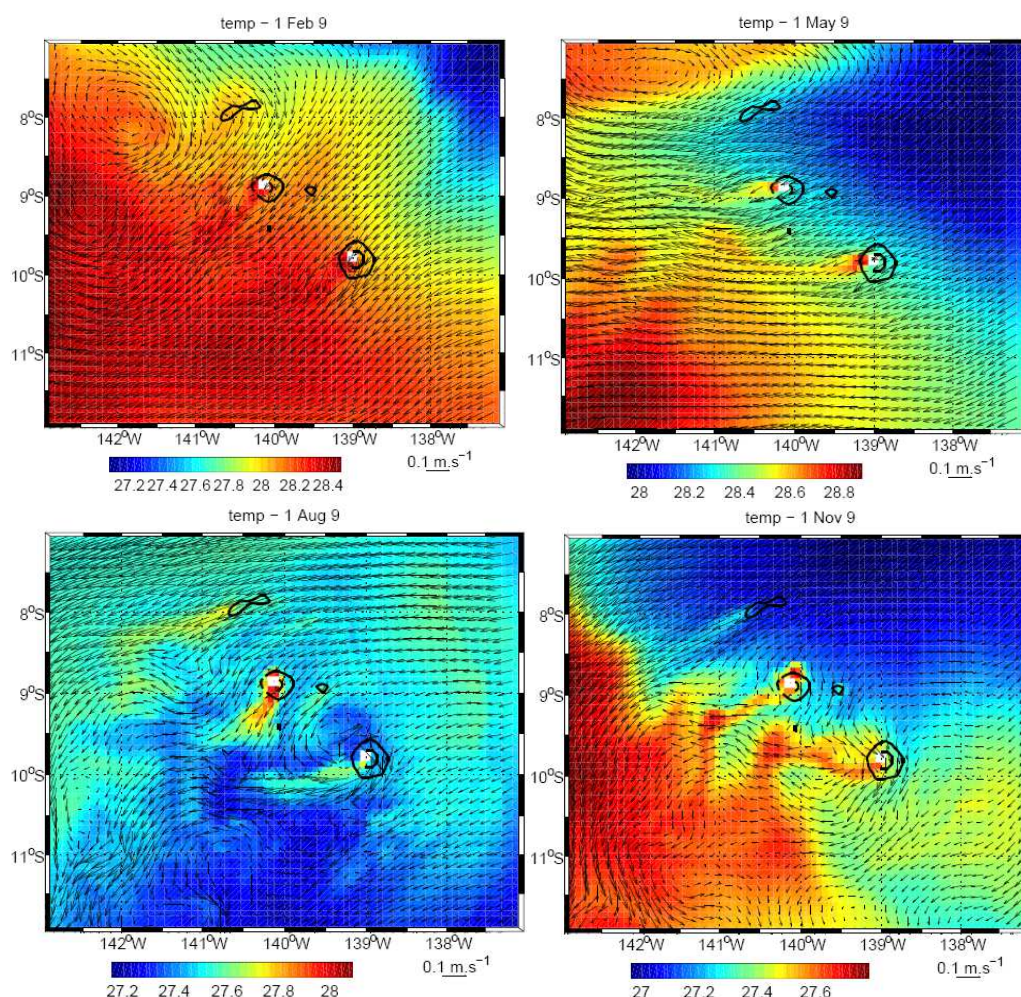


Figure 11 : Température de surface (°C) des mois de février, mai, aout, et novembre de l'année 9 de la simulation Marquises

3.2.3. Effet d'îles aux îles Marquises

L'effet d'îles aux îles Marquises, expliqué en partie par l'interaction des courants géostrophiques avec l'archipel qui engendre des remontées d'eaux de fond (Martinez et Maamaatuaiahutapu, 2004), est visible sur la figure 12. Sur cette simulation, les vitesses verticales sont maximales à 200 mètres de profondeur. A cette profondeur, les upwellings sont présents à proximité des îles sur toute l'année 9 avec une intensification en hiver austral où la vitesse verticale dépasse 1 m.s^{-1} . En février, et toujours à même profondeur, un tourbillon situé à l'Ouest Hiva Oa se forme et prend de l'ampleur vers le large en août. Un effet entonnoir est observé sur les deux mois entre les îles d'Eiao et de Nuku Hiva qui concentre le SEC et provoque son amplification.

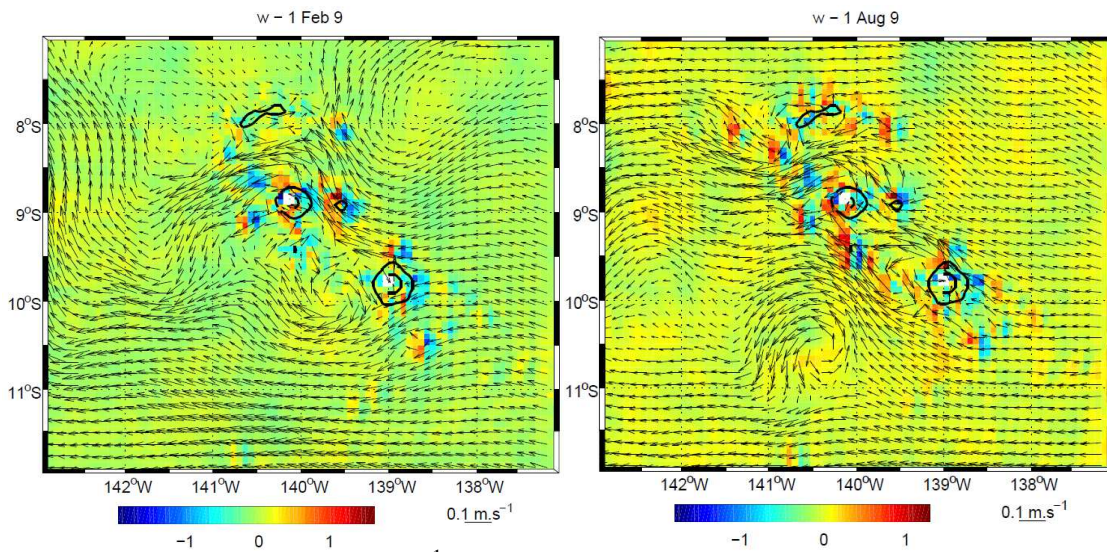


Figure 12 : Vitesse verticale (m.s^{-1}) et courants à 200 m de profondeur pour les mois de février et août pour l'année 9 de la simulation Marquises

4. Conclusion

Les deux implémentations du modèle montrent des résultats qui se rapprochent de la réalité et de la littérature, malgré des différences parfois importantes. La véracité de la dynamique saisonnière observée est discutable. Concernant la zone d'étude de la Polynésie Française, les îles Marquises n'ont pas créées d'impacts importants sur la circulation. La circulation tourbillonnaire est centrée au Sud et visiblement créée par l'archipel de la Polynésie Française. Cependant, la simulation centrée sur les îles Marquises montre une perturbation sensible de type effet d'île. La taille de la zone d'étude semblerait impacter sur la détection des phénomènes de petite échelle du modèle ROMS. Il serait intéressant de tester le modèle sur une zone encore plus restreinte telle que l'île Nuku Hiva pour observer le comportement du modèle à cette échelle et définir avec précision l'impact de cette bathymétrie particulière. En plus d'augmenter la détection des perturbations d'écoulement, cette méthode permettrait d'augmenter la résolution de la bathymétrie. En effet, un handicap notable des deux implémentations présentées ici est l'absence des îles Marquises qui voient leurs reliefs lissés sous forme de monts sous-marins. En parallèle, il pourrait être intéressant d'alimenter le modèle avec des données différentes pour déterminer si les forçages utilisés ici sont adaptés à la zone d'étude.

Références

Conese J., et Feldman T., Nuku Hiva Atlas Project, Sea Education Association, disponible sur Internet http://www.sea.edu/spice233/nuku_hiva_atlas/geographic_features_in_nuku_hiva_and_impacts_on_the_natural_environment.

Lefevre J., *et al.*, Soutien technique dans le cadre de la thèse d'Elodie Martinez. 2004.

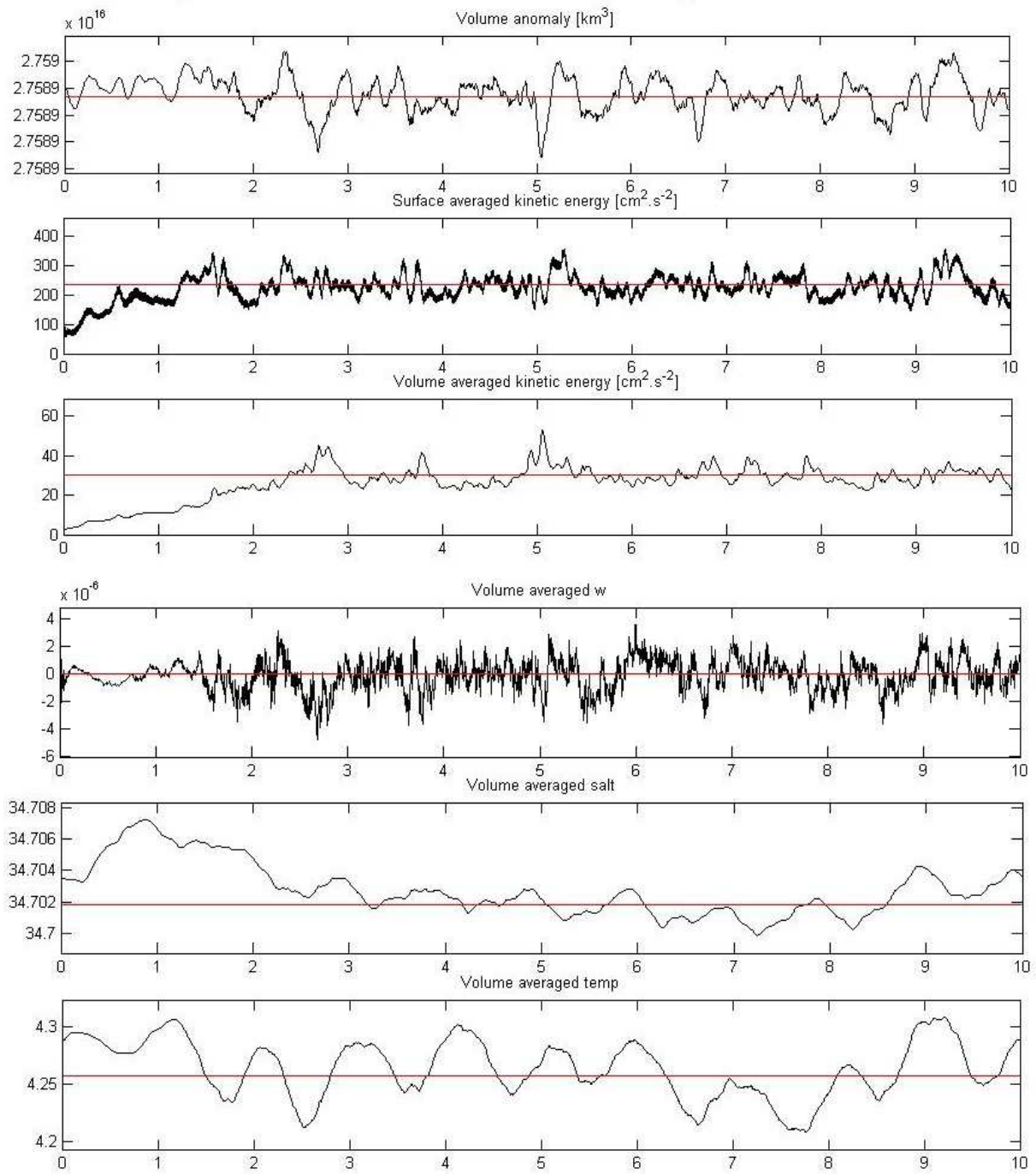
Martinez, E., et Maamaatuaiahutapu K. Island mass effect in the Marquesas Islands: Time variation, *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31, L18307, doi:10.1029/2004GL020682.

Martinez, E., *et al.*, Central South Pacific thermocline water circulation from a high-resolution ocean model validated against satellite data: Seasonal variability and El Niño 1997–1998 influence, *J. Geophys. Res.*, 2009, 114, C05012, doi:10.1029/2008JC004824.

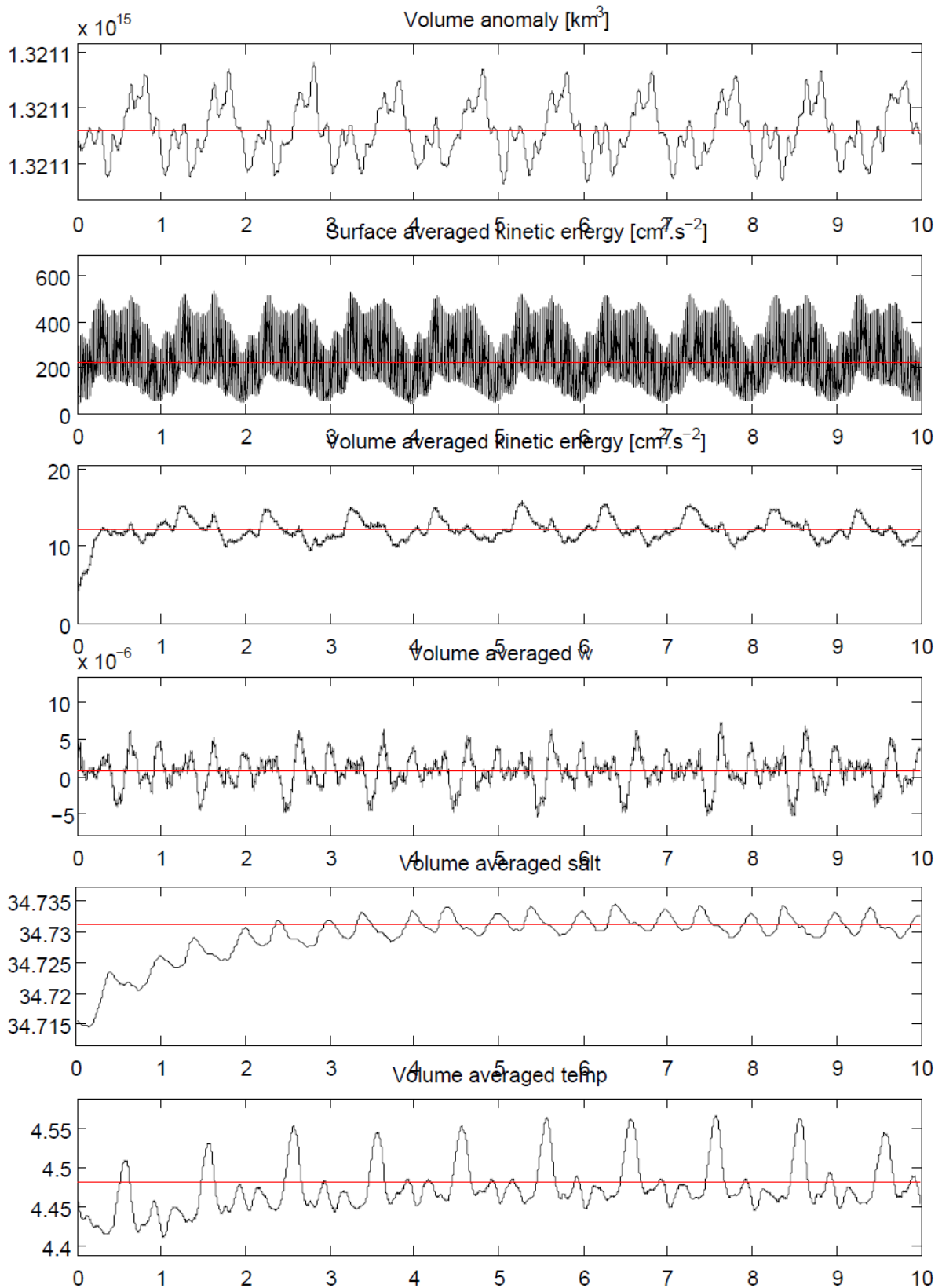
Rancher J. et Rougerie F. "L'environnement océanique de l'archipel des Tuamotu (Polynésie française)." *Oceanologica Acta*, 1995, 18(43-59).

Wikipedia, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Marquises>

Annexes



Annexe 1 : Diagnostic de la simulation Polynésie Française



Annexe 2 : Diagnostic de la simulation Marquises