

Master Océanographie -Spécialité Physique Biogéochimique

OPB : 205 Modélisation de la circulation océanique

Modélisation de la circulation océanique autour de l'archipel des Marquises



Université d'Aix-Marseille – OSU Institut Pythéas

CASSIANIDES Angelina
19 avril 2018

RÉSUMÉ

Regional Oceanic Modeling System, ou ROMS, est un modèle numérique 2D et 3D visant à modéliser la circulation océanique de différentes régions du monde. La zone géographique étudiée dans ce rapport est l'archipel des îles Marquises situé au nord-est de la Polynésie Française dans le Pacifique Sud. Ces îles attirent la curiosité à cause de leur faune et de leur flore spécifiques à cette région et très florissantes comparées au reste du territoire. Cette particularité est due aux fortes concentrations de chlorophylle *a* et aux forts taux de production primaire présents dans leurs sillages. Ce phénomène appelé « effet d'île », est engendré par le passage du Courant Equatorial Sud, qui passe autour des îles et génère dans leur sillage des tourbillons cycloniques. Les simulations effectuées grâce au modèle de ROMS ont permis d'observer ce processus de vorticité. Cependant lors des premières simulations il y a eu un problème de résolution (inférieure à 1/5) qui a empêché le modèle de représenter la vorticité. Une résolution fine de 1/15 a donc été choisie afin de pouvoir exploiter les données et étudier l'effet d'île. Grâce aux précédentes recherches sur ce sujet, les résultats obtenus ont pu être comparés afin de déterminer si le modèle de ROMS s'est bien implanté à la zone d'étude, à ses paramètres et à ses contraintes.

ROMS, Regional Oceanic Modeling System, is a 2D and 3D numerical model which can model ocean circulation in different regions of the world. The geographical area studied in this report is the archipelago of the Marquesas Islands located northeast of French Polynesia in the South Pacific ocean. These islands attract curiosity because of their fauna and flora specific to this region and very flourishing compared to the rest of the territory. This is due to the high concentrations of chlorophyll *a* and the high primary production rates present in their wakes. This phenomenon is called the island mass effect caused by the passage of the South Equatorial Current, which passes around the islands and generates cyclonic eddies in their wake. Simulations performed with ROMS allowed to observe this vorticity process. However during the first simulations there was a problem with resolution (less than 1/5) that prevented the model from representing the vorticity. A fine resolution of 1/15 was therefore chosen in order to be able to exploit the data and study the island mass effect. Previous investigations on this topic had allowed the simulation results to be compared to determine if the ROMS model was well established in the study area, its parameters and its constraints.

Table des matières

RÉSUMÉ.....	1
1. INTRODUCTION.....	3
1.1 Présentation de la zone d'étude.....	3
1.2 Présentation de la modélisation numérique.....	4
2. MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	4
2.1 Explication de ROMS.....	4
2.1.1 Les équations primitives.....	4
2.1.2 Les hypothèses.....	5
2.1.3 Système d'équations.....	5
2.1.4 Équations de conditions limites.....	6
2.1.5 Discrétisation spatiale et temporelle.....	6
2.2 Implémentation de la zone.....	7
3. RÉSULTATS.....	9
4. CONCLUSION.....	12
BIBLIOGRAPHIE.....	13
ANNEXES.....	14

1. INTRODUCTION

1.1 Présentation de la zone d'étude

Les îles Marquises sont situées au nord-est de la Polynésie Française et s'étendent sur une surface de 100 000km². Elles sont constituées de plusieurs îles volcaniques. Par ailleurs, les îles principales sont au nombre de cinq et divisées en deux groupes distincts : un groupe septentrional comportant Nuku Hiva (île centrale), Ua Pou, Ua Huka, et un groupe méridional avec Hiva Oa et Fatu Hiva (Fig. 1).

Les îles Marquises sont localisées dans le gyre oligotrophe Subtropical du Pacifique Sud. Les eaux qui les entourent sont qualifiées de HNLC (*High Nutrient Low Chlorophylle*) dues à leurs fortes teneurs en éléments nutritifs ainsi que de faibles taux de chlorophylle a (comparés au reste de la Polynésie qui est caractérisée d'oligotrophe et LNLC *Low Nutrient Low Chlorophylle*). Ce phénomène s'explique par la localisation des îles qui représente un obstacle dans la propagation naturelle des courants, dont notamment celui du Courant Équatorial Sud (SEC pour *South Equatorial Current*). En effet, ce dernier s'écoule vers l'ouest sud-ouest et rencontre sur son trajet les îles Marquises qui forment un obstacle bathymétrique. De ce fait, le SEC passe autour des îles, ce qui engendre l'apparition de tourbillons cycloniques dans leurs sillages et par conséquent la remontée d'eaux profondes riches en éléments nutritifs (E. Martinez et al., 2016). De plus, les ruissellements des îles et les flux hydrothermaux provenant des formations volcaniques pourraient être des sources conséquentes en nutriments (E. Martinez et al, 2004).

L'objectif de ce projet est de modéliser le circulation océanique autour des îles Marquises mais aussi d'observer le phénomène d'effet d'île à travers la représentation de la vorticité.

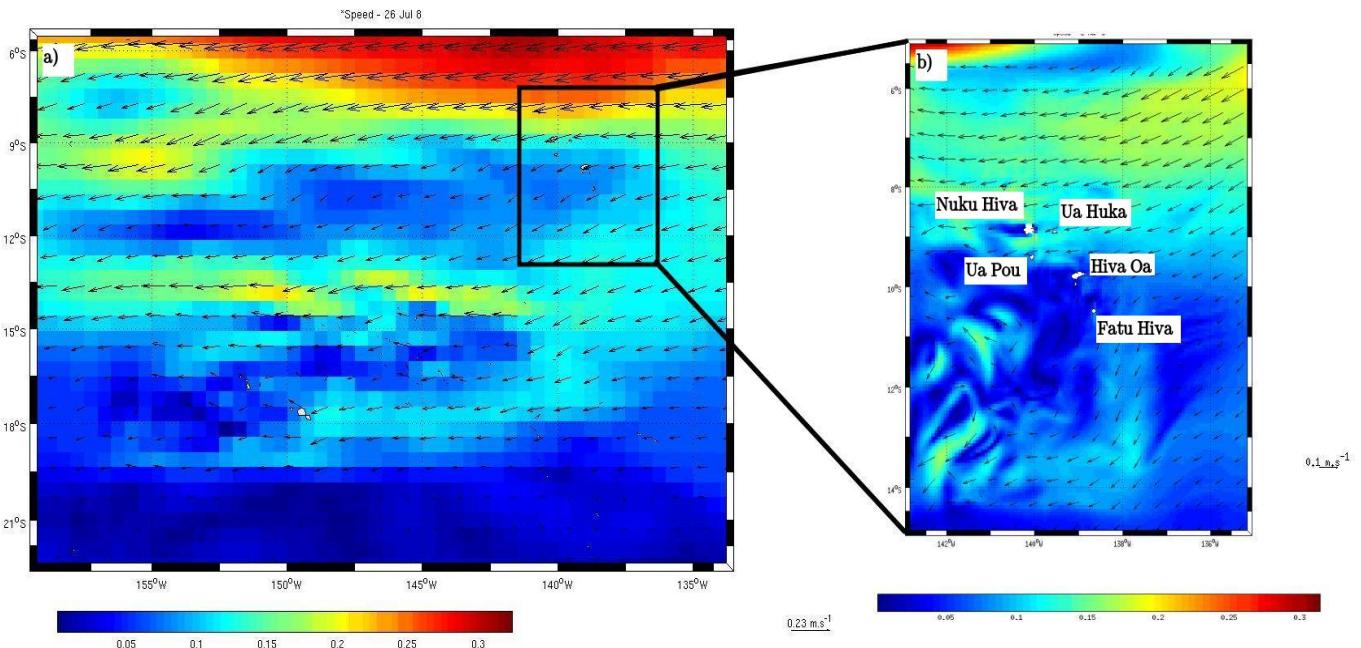


Figure 1 : Représentation de la vitesse du courant de surface (m.s⁻¹) a) de la Polynésie Française et b) de l'archipel des Marquises. Les vecteurs représentent la vitesse et le sens du courant de surface, avec une échelle de 0,1 m.s-1.

1.2 Présentation de la modélisation numérique

Depuis la moitié du XXe siècle, les modèles numériques ne cessent de s'améliorer et les techniques numériques qu'ils utilisent deviennent de plus en plus performantes. Ces modèles permettent de prévoir des événements météorologiques ou océanographiques à différentes échelles spatiales et temporelles, ainsi leur utilisation dans le domaine scientifique est devenue indispensable.

Les premiers outils pour modéliser la météorologie ou les phénomènes océanographiques ont été des calculs, des hypothèses et le cerveau de l'Homme pour les assembler. L'exemple le plus équivoque pour illustrer cette idée est la technique de calcul organisée par Richardson en 1922: il a proposé de simplifier le problème mathématique par des approximations physiques et il a affirmé que des données conséquentes sont indispensables sur les couches atmosphériques ainsi que le domaine terrestre, pour résoudre ces équations. Il a divisé le travail mathématique en plusieurs équations et il a estimé que 64 000 personnes seraient nécessaires afin de pouvoir prévoir des phénomènes en avance à l'aide de ces équations. Avec un nombre de personnes moins important, il a organisé un essai de prévision de la pression atmosphérique mais le résultat n'a pas été concluant puisqu'il a obtenu une valeur de 145 hPa en 6 heures beaucoup trop importante. Les premiers calculateurs ont fait leur apparition en 1946 avec l'Eniac (*Electronic Numerical Integrator Analyser and Computer*) à l'université de Pennsylvanie à Philadelphie. De fil en aiguille, les simplifications et hypothèses effectuées sur les équations mathématiques se font nombreuses et en 1950 la première prévision numérique du temps est réussie par Charney. Par la suite, la mise en place de modèles baroclines (1963) et de modèles barotropes (1969) mis en place par Bryan, permet de faire de la modélisation sur la circulation océanique. Aujourd'hui le modèle de Bryan reste le plus utilisé sans avoir subi de grands changements. En France, le modèle CROCO (*Coastal and Regional Community model*) est en cours de développement et vise à inclure dans son système des modèles déjà existants comme ROMS, MARS3D et HYCOM.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

La modélisation se fait en deux étapes : en premier lieu il faut mettre en place un système d'équations et la seconde étape consiste à remplacer ces équations contenant des variables continues en des équations composées de variables discrètes. Leurs solutions seront obtenues grâce à un algorithme. Dans l'UE OPB205, nous avons étudié trois modèles numériques tridimensionnels SYMPHONIE, ROMS et POM, et nous avons utilisé ROMS comme sujet de travail afin de modéliser une région océanique. ROMS (*Regional Oceanic Modeling System*) est un modèle numérique 2D et 3D visant à modéliser la circulation océanique de différentes régions du monde. Il est développé en France par l'IRD, l'Institut de Recherche pour le Développement. Il est composé d'algorithmes qui relient la physique au numérique, ainsi que plusieurs modèles qui sont couplés avec la biogéochimie, le domaine sédimentaire, la bio-optique et la mer glaciaire.

2.1 Explication de ROMS

2.1.1 Les équations primitives

SYMPHONIE, ROMS et POM résolvent des équations primitives qui sont décrites dans un système de coordonnées cartésiennes (O,x,y,z) avec O situé à la surface de l'eau, Ox dirigé vers le sud, Oy vers l'est et Oz vers le Zénith. Les équations à résoudre sont les équations du mouvement de Navier Stokes, l'équation de continuité ainsi que les équations de conservations de la température et de la salinité.

2.1.2 Les hypothèses

Plusieurs hypothèses et simplifications sont utilisées afin de résoudre les équations primitives :

- l'équation de la composante verticale de la vitesse est réduite à l'équation hydrostatique.
- l'approximation de Boussinesq : décompose la masse volumique comme une somme de la masse volumique de référence avec une variation de masse volumique plus faible. Elle se fait pour des écoulements incompressibles à surface libre.
- la fermeture Newtonienne : introduit des coefficients de viscosité turbulente et des termes de vitesses moyennes.
- la négligence de la contribution barocline et de la pression atmosphérique : les composantes horizontales de la vitesse sont indépendantes de z .

Les hypothèses de fermeture de la turbulence cherchent à résoudre les termes turbulents qui restent indéterminés après les 3 premières hypothèses citées précédemment. Elles permettent d'introduire des vitesses moyennées sur le temps qui génèrent les équations nommées RANS equations (*Reynolds-averaged Navier Stokes equations*). En parallèle, les termes turbulents sont transformés en tensions dites de Reynolds qui seront par la suite reliées aux vitesses moyennes grâce aux coefficients d'échange turbulents. Dans ROMS, les coefficients turbulents peuvent être déterminés selon deux méthodes : *i*) Pacanowski et Philander (1981) utilise le nombre de Richardson qui permet de comparer la stabilité statique (fréquence de Brunt-Väisälä) à la stabilité dynamique (gradient vertical de la vitesse) ; *ii*) la méthode de Large et al (1994) appelée *KPP,K-profile parametrization*, divise la colonne d'eau en une couche de surface et une couche interne où chaque couche aura un profil spécifique et donc un coefficient turbulent unique.

2.1.3 Système d'équations

Lorsque ces approximations et hypothèses sont effectuées, on obtient un système de six équations avec les équations du mouvement (équ. 1 et éq. 2), l'équation de continuité (éq. 3), l'équation de conservation de la chaleur (éq. 4), l'équation de conservation de la salinité (éq. 5) et enfin l'équation d'état de l'eau de mer (éq. 6) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \nabla^2_h u + A_v + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \nabla v - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \nabla^2_h v + A_v + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2) \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3) \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u \nabla T = K_h \nabla^2_h T + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4) \\ \frac{\partial S}{\partial t} + u \nabla S = K_h \nabla^2_h S + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (5) \\ \rho = \rho(T, S) \quad (6) \end{array} \right.$$

2.1.4 Équations de conditions limites

Pour résoudre les équations simplifiées, le modèle a besoin des conditions limites de la zone à étudier. Il faut donc préciser les conditions aux limites latérales (fermées à la côtes et ouvertes à l'océan), de la surface et du fond. Pour la surface, le modèle travaille sur les équations de la tension de surface provoquée par le vent (éq. 7), des flux de chaleur (éq. 8), d'eau douce et de salinité (éq. 9 et éq. 10). Pour les conditions du fond, le modèle utilise les équations de cisaillement du fond (éq. 11), les flux de chaleur du fond (éq. 12) et considèrent les paramètres de température et de salinité comme nulles (éq. 13).

Tableau 1: Récapitulatif des équations liées aux conditions de surface et de fond

<i>A la surface libre (z = η)</i>		<i>Au fond (z = - H)</i>	
$A_z \left(\frac{\partial u}{\partial z}; \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$	(7)	$A_z \left(\frac{\partial u}{\partial z}; \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by})$	(11)
$Q = \frac{\ \vec{\tau}_s\ }{\rho_0 \sqrt{C_\varepsilon \cdot C_q}}$	(8)	$Q = \frac{\ \vec{\tau}_b\ }{\rho_0 \sqrt{C_\varepsilon \cdot C_q}}$	(12)
$A_z^s \frac{\partial S}{\partial z} = (E - P) S$	(9)	$\left(\frac{\partial T}{\partial z}, \frac{\partial S}{\partial z} \right) = 0$	(13)
$A_z^T \frac{\partial T}{\partial z} = H_s + H_e + H_l + (1 - Tr) H_c$	(10)		

2.1.5 Discréétisation spatiale et temporelle

Afin qu'un schéma numérique soit performant, il est nécessaire qu'il soit consistant (c'est-à-dire si l'erreur de troncature tend vers 0 lorsque le pas d'intégration tend vers 0), convergent (si la solution numérique tend vers la solution continue quand le pas de discréétisation tend vers 0) et stable (si les erreurs introduites ne s'amplifient pas). Lorsque l'on modélise, il est très courant d'avoir des erreurs que l'on peut classer en quatre groupes : les erreurs de modélisation (différence entre le système physique et la solution exacte), les erreurs de discréétisation (différence entre la solution exacte du modèle et la solution numérique exacte, cette différence est vérifiée grâce au fichier *plot_diags.m*), les erreurs de convergence (différence entre la solution exacte issue des équations discrètes et celle issue de la méthode itérative) et les erreurs d'arrondi (le calculateur effectue des arrondis néfastes).

Dans ROMS, la discréétisation spatiale se fait sur la verticale et l'horizontal avec des schémas de différences finies. Sur la verticale, les équations primitives sont résolues sur une grille verticale décalée qui utilisent les coordonnées sigma, afin de respecter la topographie du fond, améliorer la résolution verticale près de la surface et du fond et garder un nombre constant de mailles sur toute la verticale de la zone d'étude. Sur l'horizontal, les équations sont discréétisées sur une grille d'Arakawa-C décalée qui permet de calculer les vitesses sur les faces de la maille et les autres variables au centre de la maille.

Les équations sont discréétisées dans le temps selon le schéma de Leapfrog, prédicteur du 3^e ordre, ainsi que le schéma d'Adam-Moulton, un correcteur, qui ont l'avantage d'être robustes et stables. Les ondes de gravité constituent une solution des équations primitives et permettent d'utiliser l'équation du CFL en prenant en compte la bathymétrie de la zone géographique (éq. 14). Le critère CFL (*Courant-Friedrichs-Levy*) relie la résolution temporelle et spatiale, et s'écrit :

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (14)$$

avec Δt le pas de temps et Δx le pas de grille

La séparation du pas de temps se fait selon le mode *splitting* : afin d'éviter le phénomène d'aliasing, il est important d'avoir une bonne résolution temporelle et spatiale, de plus le pas de temps doit être adapté au pas spatial de façon à reproduire les événements les plus petits.

2.2 Implémentation de la zone

Une première simulation à grande échelle a été faite pour simuler le passage du Courant Équatorial Sud au nord de la Polynésie Française, et spécifiquement aux alentours des Marquises (Fig. 1). Pour débuter, il est important de rentrer les coordonnées géographiques de la zone dans le fichier *romstools_param*. Les coordonnées de la Polynésie sont 156°W-132°W et 25°S-7°S, tandis que pour l'archipel des Marquises il est entré 143°W-138°W et 11°S-7°S. Il est nécessaire de spécifier au programme les frontières latérales ouvertes et fermées qui se fait dans le même fichier. Pour les deux cas, les frontières sont ouvertes. Pour la suite du projet, deux résolutions pour l'archipel des Marquises ont été faites l'une à 1/3 (~ 36 km) et la seconde à 1/15 (~ 7 km), qu'il faut renseigner dans *romstools_param*. Grâce à ces informations, *make_grid.m* génère une grille de calcul avec les paramètres : LLm et Mmm les nombres de maille respectivement sur l'horizontal et la vertical, dx et dy les longueurs du pas spatial sur l'horizontal et la vertical, et N le nombre de niveau. Les données de chaque résolution sont fournies (tableau 2). Ces informations sont ensuite utilisées par *make_grid.m* pour générer la grille ainsi que la bathymétrie.

Tableau 2: Données de la grille de calcul pour chaque résolution.

Résolution	1/3	1/15
LLm	23	119
MMm	30	152
[dxmax;dxmin] (km)	[35,782;36,9122]	[7,1564;7,381]
[dymax;dymin] (km)	[35,8087;36,88:8835]	[7,1575;7,3799]

Par la suite, le script *make_forcing.m* est lancé afin de lire les forçages atmosphériques (tel que le flux de chaleur ou de salinité) fourni par COADS (*Comprehensive Ocean-Atmosphere Data set*). De même, *make_clim.m* est utilisé afin de préciser les conditions aux frontières telles que la vitesse et la direction du courant fournies par *World Ocean Atlas*. Grâce aux paramètres de maille du tableau 2, le fichier *ad_cfl.m* permet de calculer le pas de temps interne et externe à la simulation permettant ainsi d'avoir une résolution temporelle adaptée à la résolution spatiale. Ce fichier se base donc sur le critère CFL pour faire les calculs. Il fournit le pas de temps interne DTI ou dt, le pas de temps externe DTE, la durée de la simulation NTIMES, la fréquence de sauvegarde des sorties instantanées et moyennées NWRT et NAVG. Le rapport dt / DTE est appelé NDTFAST et est fixé à 60. Pour chaque résolution, les valeurs sont fournies dans le tableau 3.

Tableau 3 :Paramètres de la résolution temporelle

Résolution	Dt (s)	DTE (s)	NTIMES (s)	NWRT (s)	NAVG (s)	NDTFAST
1/3	3600	60	720	720	72	60
1/15	720	12	3600	3600	360	60

Afin de vérifier que le modèle s'est bien adapté à la zone étudiée, à ses paramètres et à ses contraintes, il est important d'exécuter un diagnostic. Il permet ainsi de déterminer à partir de quel moment le modèle s'est stabilisé et à partir de quand l'exploitation des données peut se faire. Pour la simulation à 1/3, c'est la salinité moyennée sur le volume qui met le plus temps à se stabiliser contrairement à la résolution à 1/15 où l'énergie cinétique moyennée sur le volume se stabilise lentement (Fig. 2). Les simulations seront ainsi exploitables à partir du mois 9 de la première année pour la simulation à 1/3 et à partir du mois 7 de la deuxième année pour la simulation à 1/15.



Figure 2 : Diagnostic de la simulation A) à 1/3 B) à 1/15. De haut en bas, le volume total (km^3), l'énergie cinétique moyennée sur le surface (m^2s^{-2}), l'énergie cinétique moyennée sur le volume (m^2s^{-2}), la vitesse verticale moyennée sur le volume, la salinité moyennée sur le volume, la température moyennée sur le volume.

3. RÉSULTATS

Afin de comparer le bon fonctionnement du modèle, il est nécessaire de comparer les résultats à la littérature, ici l'article scientifique de Raapoto *et al.* (2018) sur la modélisation de l'archipel des Marquises sera notre référence. Une première comparaison est faite avec la température de surface (SST) entre les deux simulations et le modèle de la littérature (Fig. 3). Les deux simulations représentent le même comportement de SST avec de fortes valeurs au sud et à l'ouest des îles tandis que le nord-ouest est caractérisé par des eaux froides signature du courant SEC. Au sud-est des îles, les sillons de température prouvent la perturbation engendré par le SEC lorsqu'il contourne les îles. Cependant, on observe clairement que la simulation à 1/3 ne permet pas d'avoir une résolution assez fine pour représenter les sillons de la température de surface. Pour cette raison, seule la résolution à 1/15 sera conservée pour l'étude des phénomènes de vorticités.

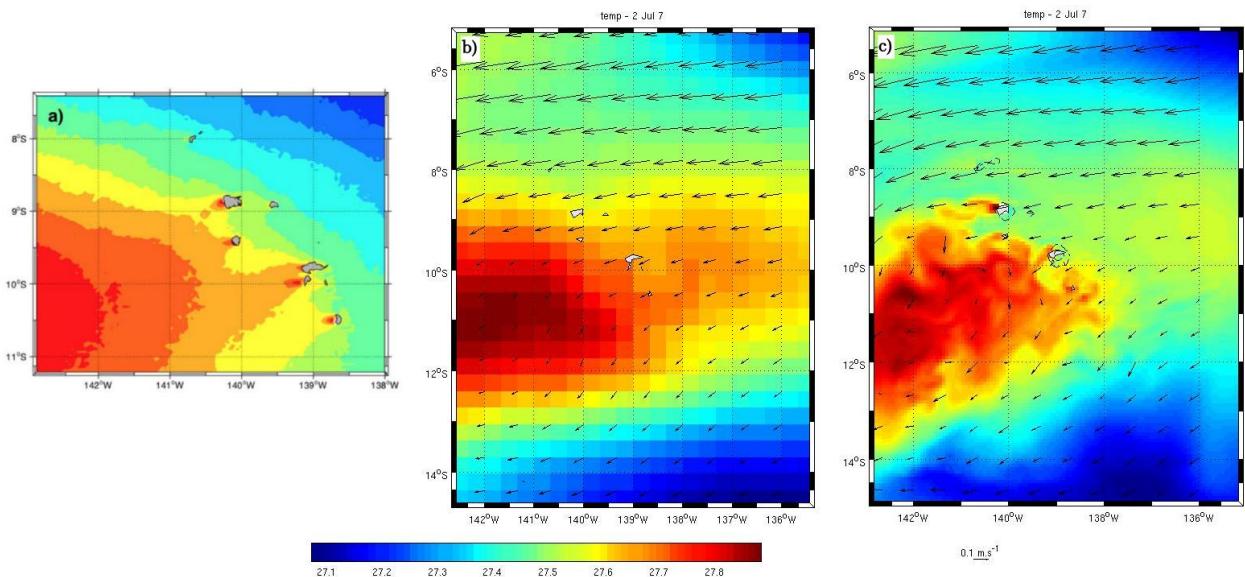


Figure 3 : Représentation de la SST, a) moyennée sur la période de juillet 2002 à juin 2015 avec une résolution de 1/45 (Raapoto *et al.*, 2018), b) selon la représentation à 1/3 à l'an 7 le 2 juillet et c) selon la représentation à 1/15 à l'an 7 le 2 juillet. Le champ de vecteur représente la vitesse moyenne à la surface, l'échelle est de $0,1 \text{ m.s}^{-1}$.

Les valeurs de températures et de salinités de surface fournis par *make_forcing.m* varient dans un intervalle respectivement de [26;28] ($^{\circ}\text{C}$) et [35.2;36.2] (Fig. A et Fig. B en ANNEXES), et coïncident avec les valeurs généralement rencontrées en Océan Pacifique sud. De plus la comparaison de la SST fournie par *make_forcing* et celle simulée par (Chelton *et al.*, 2001), ont de grandes similitudes notamment sur l'intervalle de valeurs et la distribution de la température de surface (Fig. A et Fig. C, ANNEXES). Une comparaison entre la saison estivale et la saison des moussons pour la salinité de surface et de la SST démontre la variabilité importante de ces deux paramètres (Fig 3 et Fig.4). En été (ce qui correspond à l'hiver dans l'hémisphère nord), l'air est plus sec et les taux de précipitations augmentent ce qui pourraient expliquer les forts taux de salinité observés en dessous de l'archipel. Tandis que durant la période des moussons l'apport d'eau douce diminue la salinité (Fig. 4). Les fortes valeurs de salinités en aval des îles peuvent être dues aux perturbations générées par le SEC ou bien par le rejet des îles en éléments chimiques.

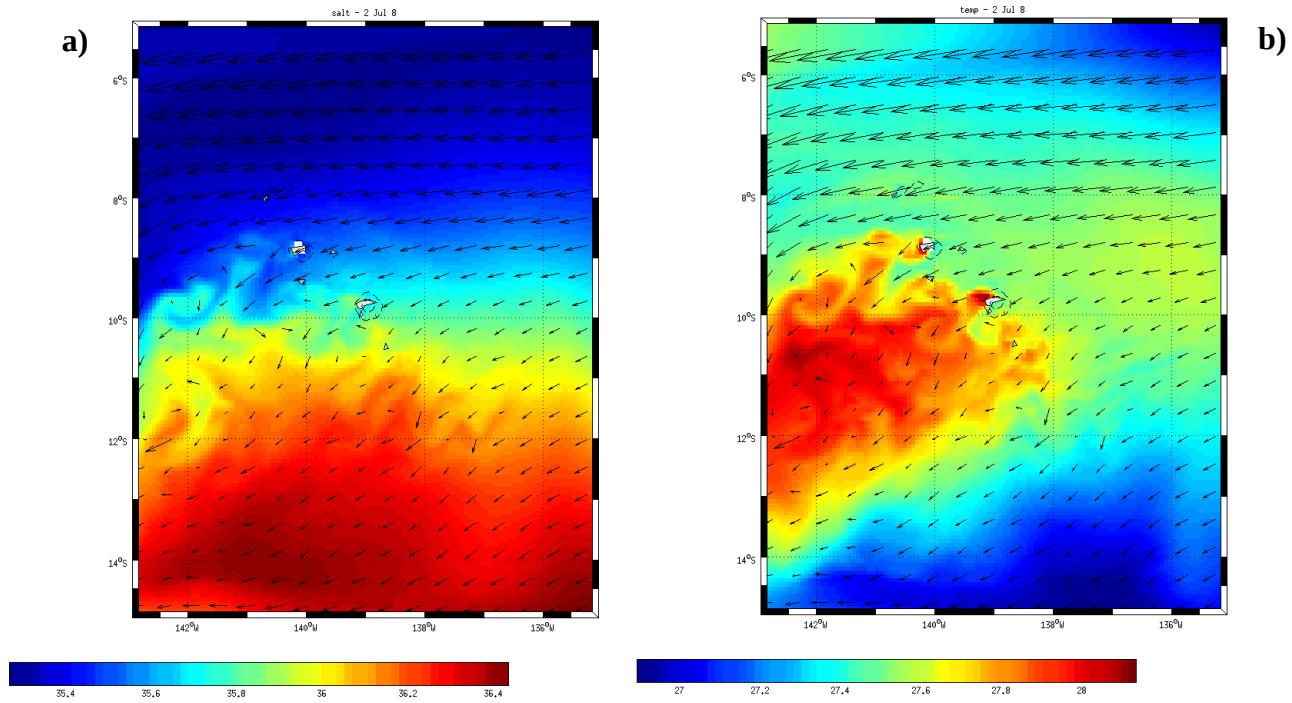


Figure 4: Simulation de résolution 1/15 avec une comparaison saisonnière de la salinité de surface entre a) la période estivale et b) la période des moussons de l'archipel des Marquises. Les vecteurs représentent la vitesse et le sens du courant de surface, avec une échelle de 0,1 m.s⁻¹.

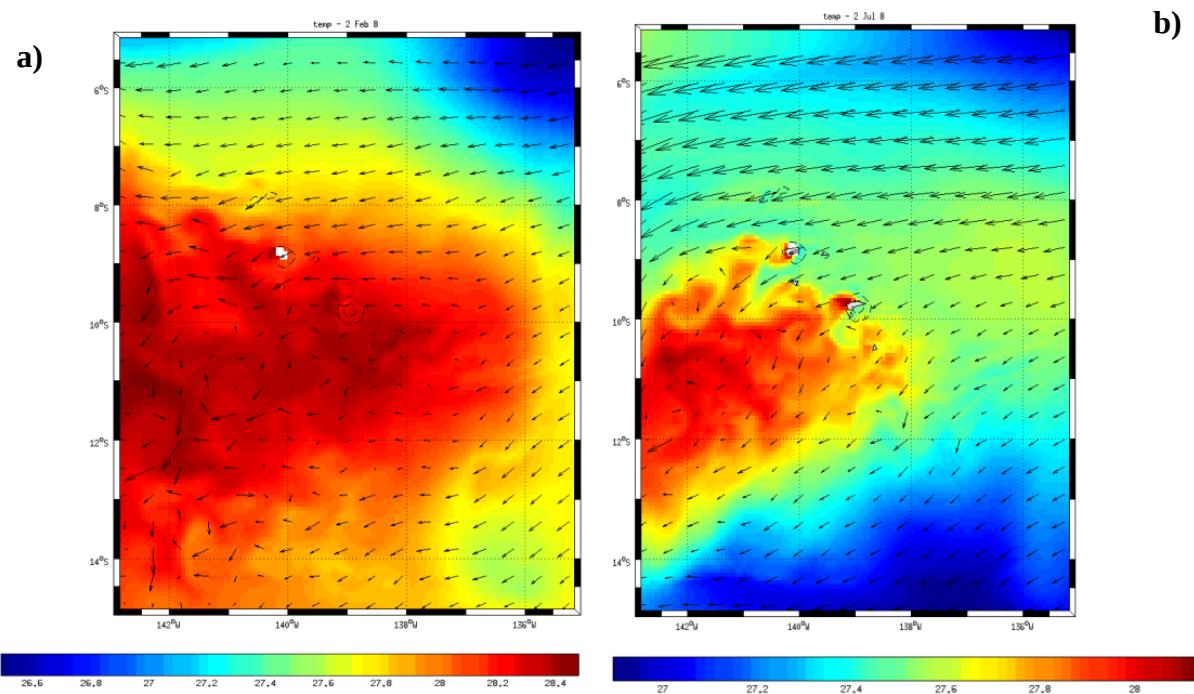
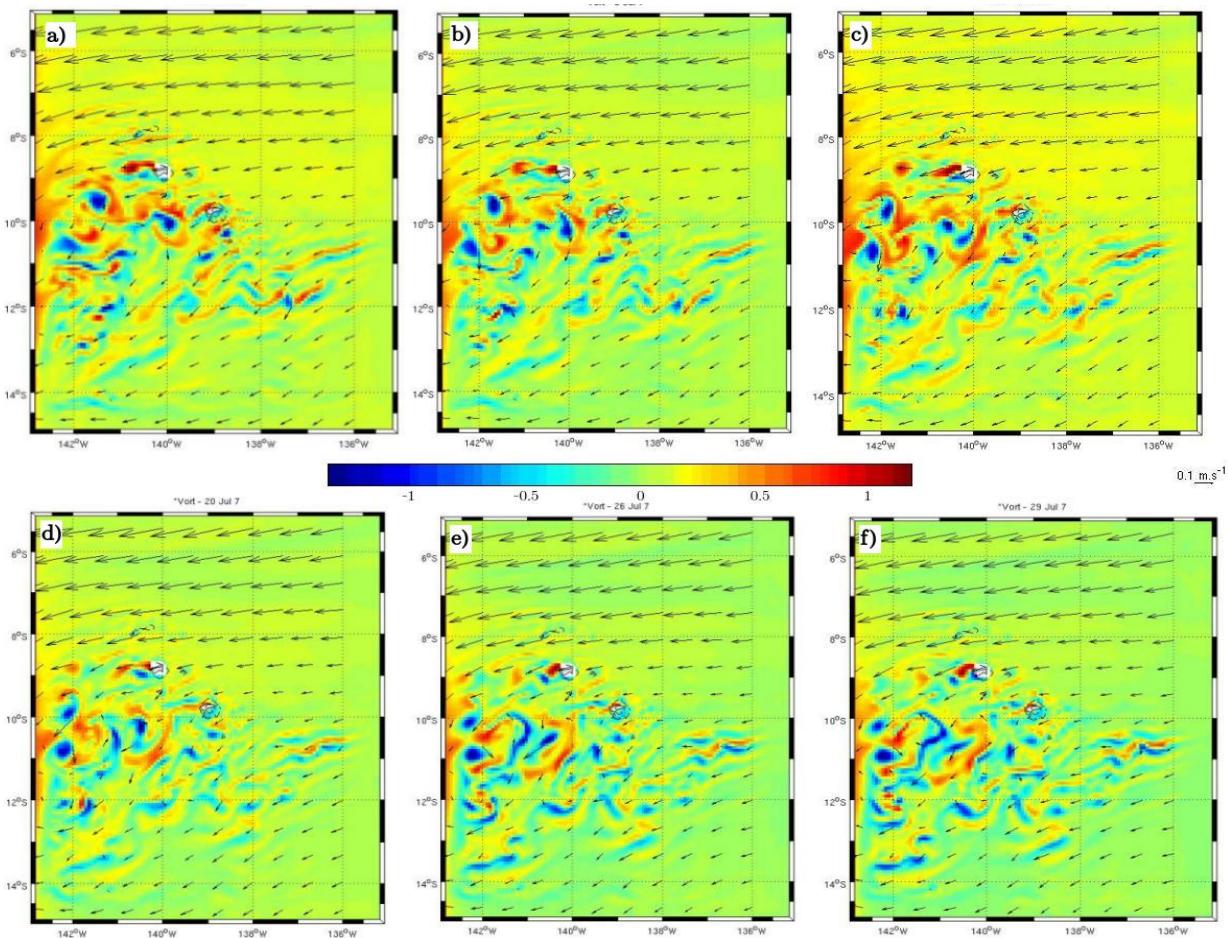


Figure 5: Simulation de résolution 1/15 avec une comparaison saisonnière de la température de surface entre a) la période estivale et b) la des moussons de l'archipel des Marquises. Les vecteurs représentent la vitesse et le sens du courant de surface, avec une échelle de 0,1 m.s⁻¹.

Pour la suite du projet, les simulations sont focalisées sur la septième année, afin d'être certain que le modèle s'est bien implantée dans la zone, et notamment durant la période estivale où le phénomène de vorticité est le plus accru (Raapoto *et al.*, 2018). Les résultats sont répartis durant le mois de juillet avec une simulation tous les 6 jours (Fig. 4) afin d'observer l'évolution du phénomène. Le 2 juillet, des formes tourbillonnaires rouges-orange en aval des îles (sud-ouest) sont observables avec à leur centre une forme bleu et de sens cyclonique. Ce comportement des eaux est le cœur du phénomène d'effet d'île. En effet, lorsque le courant SEC est perturbé par la bathymétrie des îles, il contourne ces obstacles au lieu de les traverser et engendre dans leurs sillages des mouvements tourbillonnaires cycloniques. Dans l'hémisphère sud, ces derniers déclenchent la remontée des eaux profondes vers la surface, qui se sont enrichies en éléments nutritifs durant leur trajets dans la circulation océanique globale. Cette remontée de nutriments permet d'apporter des ressources nutritives aux phytoplanctons et ainsi d'activer la production primaire dans ces eaux oligotrophes. Les tourbillons tendent à se déplacer vers le sud-ouest au fil du temps, emportés par le courant SEC, et à se dissiper progressivement le long de leur trajet. Des tourbillons beaucoup plus gros et intenses sont observées en aval des deux îles les plus importantes en taille, Nuku-Hiva et Hiva Oa, et qui correspond aux simulations de Raapoto *et al* (2018).

Une autre observation intéressante est l'apparition de tourbillons au nord-est des îles pour le cas de Raapoto *et al.*, 2018. Lors de la comparaison du paramètres de vorticité de l'année 7 avec l'année 9 (Fig D, Annexe), il semble que la non-apparition des tourbillons soit dû à une faible résolution du modèle et non pas aux conditions climatiques propres à l'année 7 qui auraient empêché leur observation.

Figure4 : Répartition spatiale des tourbillons de vorticité à 10 m de la surface (s^{-1}) pour la simulation de 1/15. Le phénomène est observable le a) 2 juillet an 7, b) 8 juillet an 7, c) 14 juillet an 7, d) 20 juillet an 7, e) 26 juillet an 7, f) 29 juillet an 7.



4. CONCLUSION

Le modèle de ROMS est un modèle tridimensionnel qui permet la modélisation de la circulation océanique de différentes zones géographiques. L'implantation du modèle dans l'archipel de Marquises s'est effectué grâce à la simplification des équations de Navier-Stokes, de l'équation de continuité et des équations de conservation de la chaleur et de la salinité. La grille de calcul Arakawa-C ainsi que les différents schémas numériques employés pour la discréétisation, ont permis de générer un pas de temps adapté à la résolution spatiale. En effet, l'archipel des Marquises est constitué d'îles très petites, et afin de pouvoir observer les phénomènes qui apparaissent autour de leurs côtes, il est important d'affiner la résolution spatiale et donc d'adapter son pas de temps afin d'observer les événements les plus petits. Cependant, malgré une bonne observation des paramètres de température, de salinité et des phénomènes de vorticités, il est nécessaire de faire tourner le modèle avec une résolution encore plus petite. Au vu du temps de simulation qu'a demandé la résolution à 1/15, soit 5 jours, il était compliqué de refaire une simulation plus fine, notamment une résolution de 1/45 si l'on voulait la comparer aux simulations océaniques de Raapoto *et al.* (2018)

BIBLIOGRAPHIE

Chelton D. B., Esbensen S. K., Schlax M. G., Thum N., Freilich M. H., (2011), *Observations of coupling between surface wind stress and sea surface temperature in the eastern tropical pacific*, J.Clim., vol. 14, pp. 1479-1498.

Martinez, E., & Maamaatuiaihutapu, K. (2004). *Island mass effect in the Marquesas Islands: Time variation*. *Geophysical Research Letters*, 31, L18307. <https://doi.org/10.1029/2004GL020682>

Martinez, E., Rodier, M., & Maamaatuiaihutapu, K. (2016). *Environnement oceanique des Marquises*. In R. Galzin, S. D. Duron, & J. Y. Meyer (Eds.), *Biodiversite terrestre et marine des îles Marquises* (pp. 123–136). Paris, France: Societe Française d'Ichtyologie.

Raapoto, H., Martinez, E., Petrenko, A., Doglioli, A. M., & Maes, C. (2018). *Modeling the wake of the Marquesas archipelago*. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123. <https://doi.org/10.1002/2017JC013285>

ANNEXES

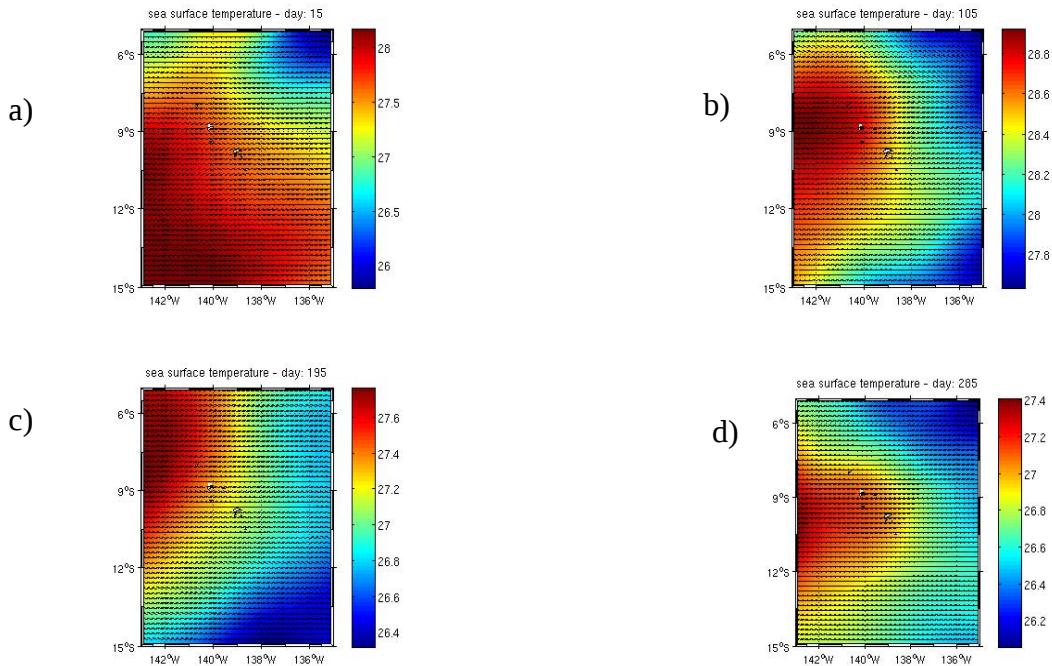


Figure A: Simulation de la SST de l'archipel des Marquises, a) moyennée sur 15 jours, b) moyennée sur 105 jours, c) moyennée sur 195 jours, d) moyennée sur 205 jours. Les vecteurs représentent la vitesse et le sens du courant de surface, avec une échelle de 0,1 m.s-1.

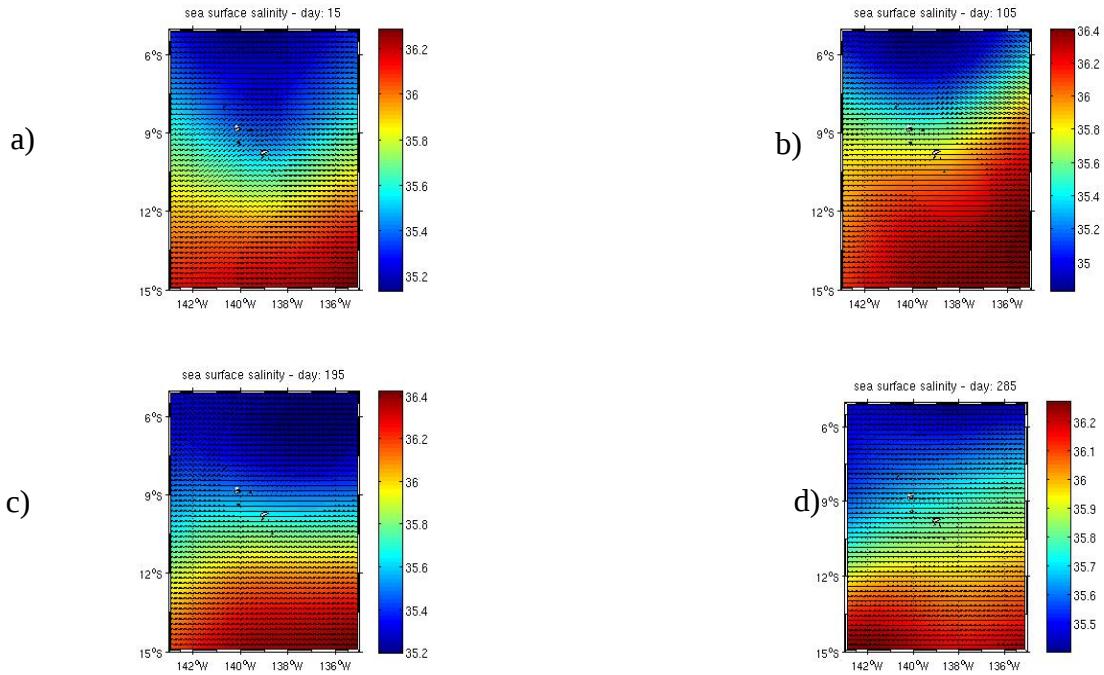


Figure B: Simulation de la salinité de l'archipel des Marquises, a) moyennée sur 15 jours, b) moyennée sur 105 jours, c) moyennée sur 195 jours, d) moyennée sur 205 jours. Les vecteurs représentent la vitesse et le sens du courant de surface, avec une échelle de 0,1 m.s-1.

a) TMI Average Sea Surface Temperature

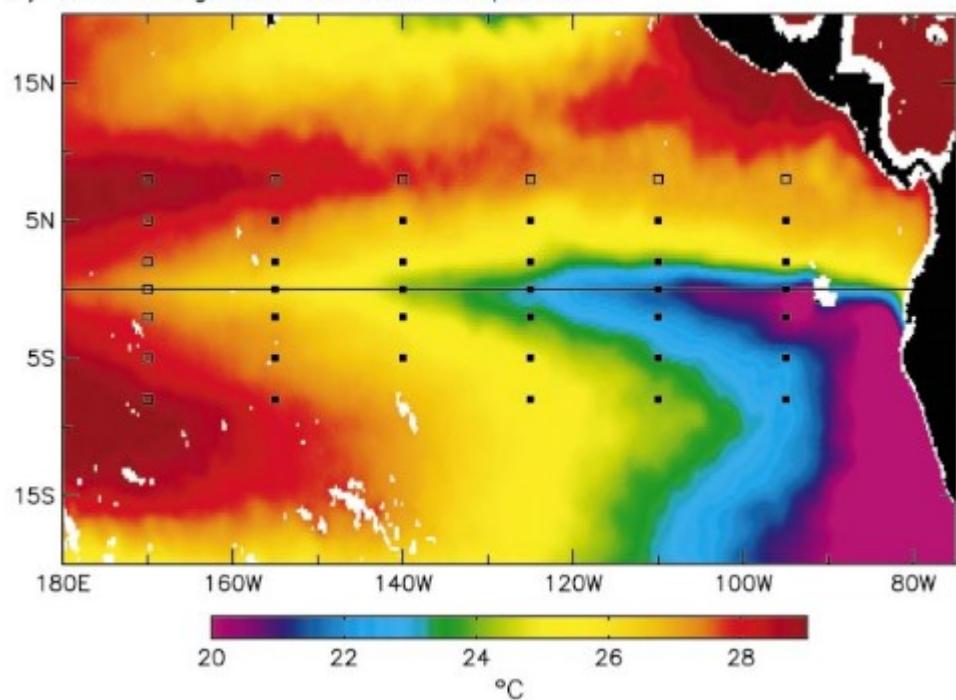


Figure C: Mesure de la SST moyennée sur 3 mois (21 juillet – 20 octobre 1999) au niveau du Pacifique équatorial. Les tâches blanches sont des zones avec des données manquantes. (Chelton *et al.*, 2001)

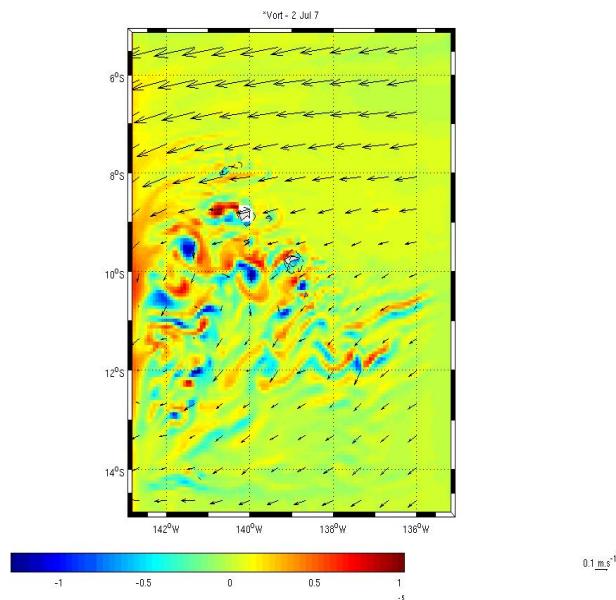


Figure D : Répartition spatiale des tourbillons de vorticité à 10 m de la surface (s^{-1}) pour la simulation de 1/15. Le phénomène est observable le 2 juillet an 9. Les vecteurs représentent la vitesse et le sens du courant de surface, avec une échelle de $0,1 \text{ m.s}^{-1}$.