

Modèle de circulation océanique dans la région de l'archipel des Açores

Rapport de Axel EUGENE

Résumé

Au cours de ce projet nous avons appris à utiliser CROCO, un modèle océanique régional en trois dimensions. Mon objectif a été de créer un modèle sur la région de l'archipel des Açores afin d'étudier les effets d'îles. Les effets d'îles sont des phénomènes se produisant lorsqu'un courant rencontre un obstacle comme une île. En aval plusieurs cas peuvent avoir lieu en fonction de la vitesse du courant et de la taille de l'obstacle. Pour cela deux modèles ont été faits, un premier à grande échelle et à faible résolution et un deuxième à petite échelle et à haute résolution. Les résultats sont intéressants mais malheureusement, par un manque d'études à très fine échelle de cette région, il est difficile de confirmer si oui ou non le modèle est correct.

Abstract

During this project we learned how to use CROCO, a threedimensional regional ocean model. My goal was to create a model of the Azores archipelago region to study the effects of islands. Island effects are phenomena that occur when a current meets an obstacle such as an island. Downstream several cases can occur depending on the speed of the current and the size of the obstacle. For this purpose two models have been made, a first one at large scale and low resolution and a second one at small scale and high resolution. The results are interesting but unfortunately, due to a lack of very fine scale studies of this region, it is difficult to confirm whether or not the model is correct.

Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier Monsieur A. Doglioli pour nous avoir enseigné, aidé et accompagné tout au long de ce projet malgré les difficultés rencontrées durant ce printemps de l'année 2020.

Je tiens également à remercier l'équipe informatique du laboratoire du MIO pour nous avoir aidé à accomplir notre projet à distance.

Table des matières

I) <u>Introduction</u>	<u>p. 1</u>
II) <u>Méthodes</u>	<u>p. 3</u>
1) <u>Fonctionnement de CROCO</u>	<u>p. 3</u>
2) <u>Modèles mis en place</u>	<u>p. 4</u>
III) <u>Résultats</u>	<u>p. 6</u>
IV) <u>Discussion</u>	<u>p. 8</u>
V) <u>Conclusion</u>	<u>p. 9</u>

Bibliographie

I) Introduction

Au cours de cette unité d'enseignement, nous avons appris à manipuler le logiciel CROCO et à mettre en place un modèle sur une région de notre choix. CROCO (Coastal and Regional Ocean COnmunity model) est un modèle numérique océanique à trois dimensions, destiné à simuler des courants, des écosystèmes, des cycles biogéochimiques et les mouvements sédimentaires dans diverses régions côtières. Il a été développé par l'UCLA, Rutgers University et l'IRD. L'objectif de CROCO est d'unir les modélisateurs derrière un code moderne qui peut combler le fossé entre les processus non hydrostatiques à petite échelle et les processus en eaux profondes. CROCO est un nouveau système de modélisation océanique basé sur ROMS_AGRIF, le noyau non hydrostatique de Symphonie-NH, et les interfaces MARS3D.

La région que j'ai choisie d'étudier est l'archipel des Açores. Les Açores sont un groupe de neuf îles portugaises qui se trouvent dans l'Atlantique Nord, à environ 1 450 km à l'ouest de Lisbonne, et à 2 446 km au sud-est des côtes orientales de l'île de Terre-Neuve (**Fig. 1**). Cet archipel connaît un climat océanique très humide avec des variations annuelles assez réduites. Ces îles sont parcourues par les vents Alizé.



Fig. 1 : Carte de l'archipel des Açores et emplacement sur le globe.

Mon choix s'est porté sur cette zone, car mon objectif était d'utiliser le logiciel CROCO afin de représenter les sillages turbulents dus aux îles, ou effets d'îles. Effectivement, dans un cas homogène et incompressible, le sillage derrière un obstacle, comme une île par exemple, est uniquement contrôlé par le nombre de Reynolds Re . Ce paramètre sans dimension caractérise le rapport entre le terme d'advection représentant les effets non linéaires de l'écoulement et la dissipation visqueuse (**Eq. 1**).

$$Re = \frac{V_0 D}{\nu}$$

Eq. 1 : Re le nombre de Reynolds, V_0 la vitesse de l'écoulement, D la taille de l'obstacle et ν la viscosité cinématique.

Pour $Re \ll 1$, la diffusion visqueuse domine et l'écoulement reste complètement symétrique amont/aval : aucune structure ne se forme dans le sillage. Pour $5-6 \leq Re \leq 47-50$, l'écoulement reste stationnaire, mais deux tourbillons contrarotatifs se forment derrière l'obstacle et la longueur de cette cellule de recirculation augmente avec le nombre de Reynolds. Lorsque le nombre de Reynolds devient supérieur à sa valeur critique $Re_c \approx 48$, l'écoulement devient instationnaire et une allée tourbillonnaire de von Karman se forme dans le sillage de l'obstacle (**Fig.2**).



Fig. 2 : Sillage derrière un cylindre, respectivement de gauche à droite : $Re = 1.54$, $Re = 26$, $Re = 140$ et $Re = 2000$, tiré de Van Dyke (1982).

II) Méthodes

1) Fonctionnement de CROCO

CROCO résout les équations primitives suivantes :

- les équations du mouvement de Navier-Stokes sur les composantes horizontales.
- l'équation de continuité.
- l'équation de conservation de la chaleur.
- l'équation de conservation de la quantité de sel.
- l'équation d'état de l'eau de mer (TEOS 10).

Pour résoudre ces équations, plusieurs hypothèses sont posées :

- la composante verticale de la vitesse est ramenée à l'équation hydrostatique.
- l'approximation de Boussinesq (décompose la masse volumique comme une somme de la masse volumique moyenne et d'une variation de masse volumique).
- la fermeture Newtonienne (introduit des coefficients de viscosité turbulente et des termes de vitesses moyenne).
- la négligence des contributions baroclines.
- les termes turbulents sont transformés en tensions dites de Reynolds.

Une fois ces hypothèses posées, on obtient le système d'équation suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} u - fv = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \nabla^2_h u + A_v + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \text{Eq. 2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} v + fu = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \nabla^2_h v + A_v + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad \text{Eq. 3} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Eq. 4} \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T = K_h \nabla^2_h T + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \text{Eq. 5} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} S = K_h \nabla^2_h S + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad \text{Eq. 6} \\ \rho = \rho(T, S, P) \quad \text{Eq. 7} \end{array} \right.$$

Eq. 2 et **Eq. 3** sont les équations du mouvement, **Eq. 4** est l'équation de continuité, **Eq. 5** l'équation de conservation de la chaleur, **Eq. 6** l'équation de conservation de la quantité de sel et **Eq. 7** l'équation d'état de l'eau de mer (TEOS 10).

Pour résoudre ces équations simplifiées, CROCO a besoin de conditions initiales et de conditions limites. Pour les conditions initiales, le modèle utilise des « *global data set* », qui comprennent des données atmosphériques, des données océaniques et des données topographiques. Pour les conditions limites il faut d'abord préciser les conditions aux bords (bord ouvert ou fermé). Pour la surface et le fond, le modèle utilise la tension de surface provoquée par le vent et les cisaillements de fonds ainsi que les flux de chaleur, d'eau douce et de salinité. Il faut également préciser la résolution et le pas de temps. Le modèle utilise une grille Arakawa 'C' pour l'horizontale et une grille σ généralisée pour la verticale. Il est également possible de choisir des hypothèses de départ différentes pour la fermeture de la turbulence.

Il est important en mettant en place un modèle de vérifier si le critère CFL (Courant-Friedrichs-Levy) (**Eq. 8**) est respecté. Ce critère fait le lien entre la résolution temporelle et la résolution spatiale, s'il n'est pas respecté, le modèle sera instable et les résultats inexploitables.

$$c\Delta t \leq \Delta x$$

Eq. 8 : Équation du critère CFL avec c la vitesse, Δt le pas de temps et Δx le pas spatial.

2) Modèles mis en place

Afin d'observer ces phénomènes de turbulences, j'ai mis au point deux modèles. Le premier est un modèle à grande échelle et à faible résolution (**Tab. 1**).

Xsize	Ysize	Rotation	Longitude	Latitude	Mesh size	Lm	Mm	NTIMES	dt[sec]	NDTFAST
1381	1111	0	-28	39	0.25	62	51	720	3600	60

Tab. 1 : Données pour modèle à grande échelle/faible résolution.

Le deuxième modèle est un modèle à petite échelle et à haute résolution (**Tab. 2**).

Xsize	Ysize	Rotation	Longitude	Latitude	Mesh size	Lm	Mm	NTIMES	dt[sec]	NDTFAST
956	555	0	-27.5	38.5	0.125	86	51	1440	1800	60

Tab. 2 : Données pour modèle à petite échelle/haute résolution.

Les deux modèles ont une grille verticale de 32 niveaux. Après avoir posé ces conditions, il faut lancer le script `make_forcing.m` qui lit les forçages atmosphériques de la région choisie. Puis il faut lancer le script `make_clim.m` qui met en place les conditions aux frontières de la région choisie.

Ensuite on peut lancer les modèles. Les calculs ont été faits sur un cluster au sein du laboratoire du MIO. Un cluster, ou grappe de serveurs est une technique consistant à regrouper plusieurs ordinateurs indépendants appelés nœuds afin de permettre une gestion globale et de dépasser les limitations d'un ordinateur unique, ce procédé est très pratique quand il s'agit de faire des calculs à hautes performances comme ici.

Une fois que les modèles ont fini de tourner, il faut les diagnostiquer à l'aide du script `croco_diags.m` puis du script `plot_diags.m` (**Fig. 3**). Ceci permet premièrement de vérifier que le modèle est bien adapté à la zone étudiée et deuxièmement cela permet de déterminer à partir de quel moment les modèles sont stables et donc quand il est possible d'utiliser les données.

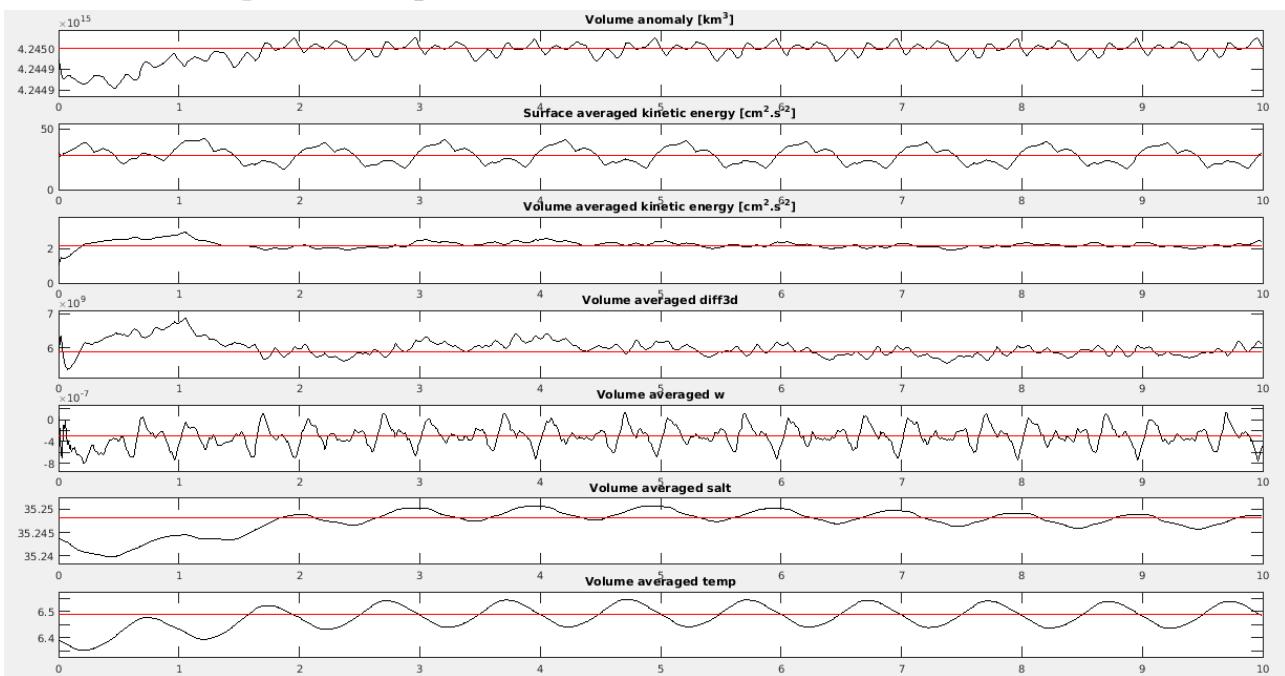


Fig. 3 : plot_diags du modèle à faible résolution.

On peut voir que les modèles mettent un certain temps avant d'être périodiques. C'est donc sur les données de l'année numéro 7 que je vais me baser pour les deux modèles. Afin de voir les résultats, il faut faire tourner le script `croco_gui.m`.

III) Résultats

Premièrement j'ai comparé mes résultats à la littérature. Comme exemple j'ai choisi la température sur la verticale (**Fig. 4**). Il est intéressant de voir que les données de mon modèle collent aux données de la littérature.

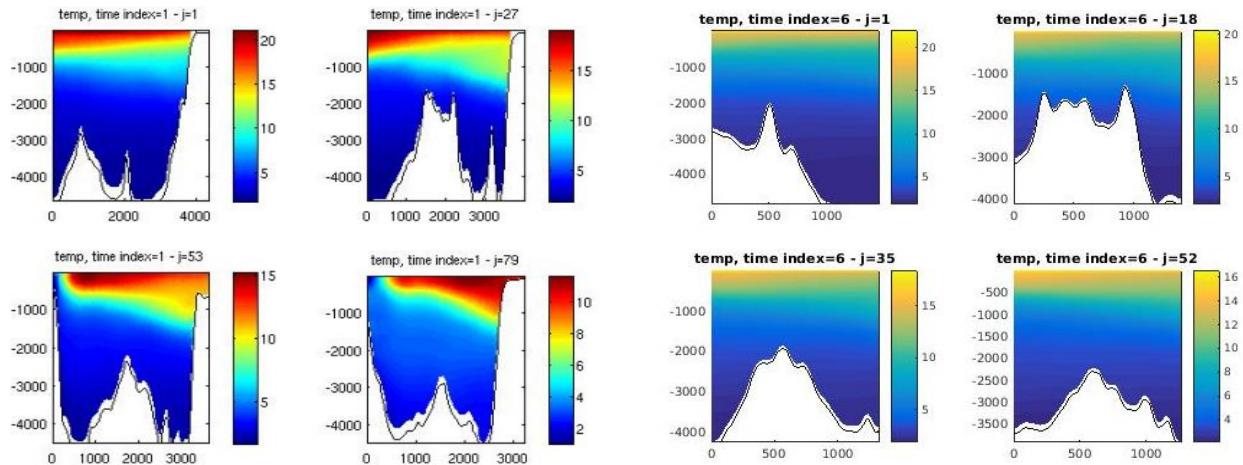


Fig. 4 : Section verticale W-E de la température. À gauche les données de la littérature tiré de Shree Ram Prakya et al. (2012) (section faites sur une plus grande distance), à droite les données du modèle haute résolution.

Ensuite j'ai donc voulu voir si ces effets d'îles étaient visibles à 10 mètres de profondeur avec le modèle à faible résolution (**Fig. 5**).

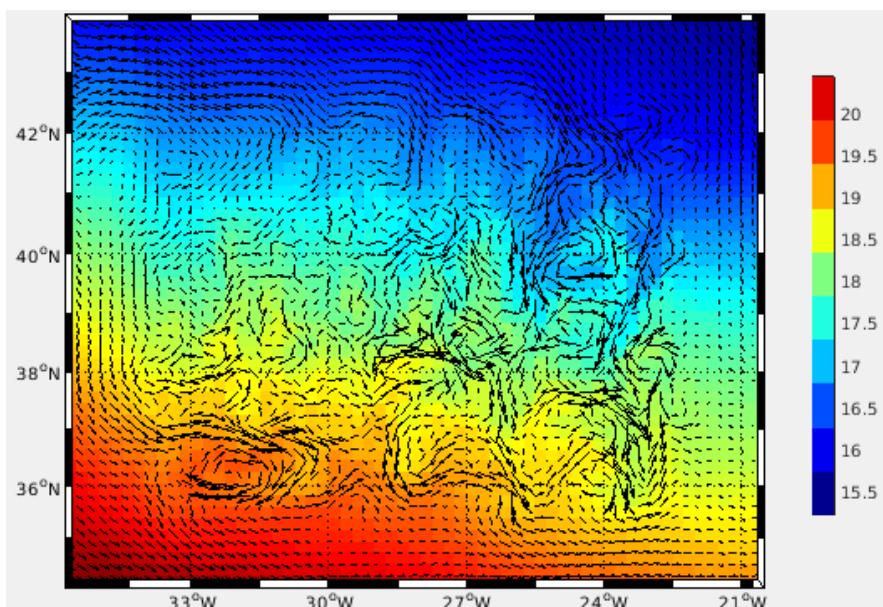


Fig. 5 : Modèle faible résolution. Représentation de la température à 10 mètres de profondeur. Les vecteurs représentent la vitesse moyenne à 10 mètres de profondeur (échelle : 0,1 m.s⁻¹). (Juillet Année 7).

De la turbulence et des tourbillons sont observables partout dans la région où se trouvent les îles (le plus gros amas d'îles se trouve en 38°N , 28°W), mais à cette résolution il est difficile de voir quel type de sillage est présent. Afin d'avoir une meilleure représentation de ces tourbillons, je suis donc rapidement passé à la haute résolution (**Fig. 6**).

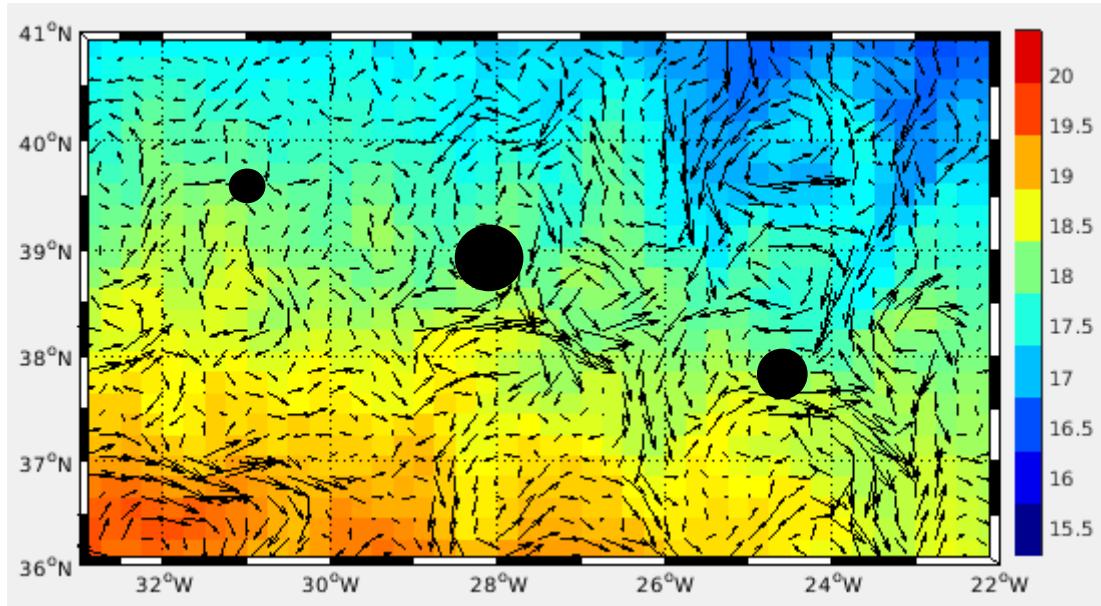


Fig. 6 : Modèle haute résolution. Représentation de la température à 10 mètres de profondeur. Les vecteurs représentent la vitesse moyenne à 10 mètres de profondeur (échelle : 0,1 m.s⁻¹). Les cercles noirs représentent les îles et amas d'îles.
(Juillet Année 7).

On peut aisément constater que c'est une zone de forte turbulence avec beaucoup de tourbillons. J'ai ensuite voulu voir si la situation était la même au mois de janvier lors de la même année (**Fig. 7**).

La situation en janvier n'est pas exactement la même, nous ne retrouvons pas les mêmes tourbillons même si la tendance générale peut rappeler celle de juillet par endroits ($38^{\circ}\text{N}, 25^{\circ}\text{W}$ et $37.5^{\circ}\text{N}, 24^{\circ}\text{W}$).

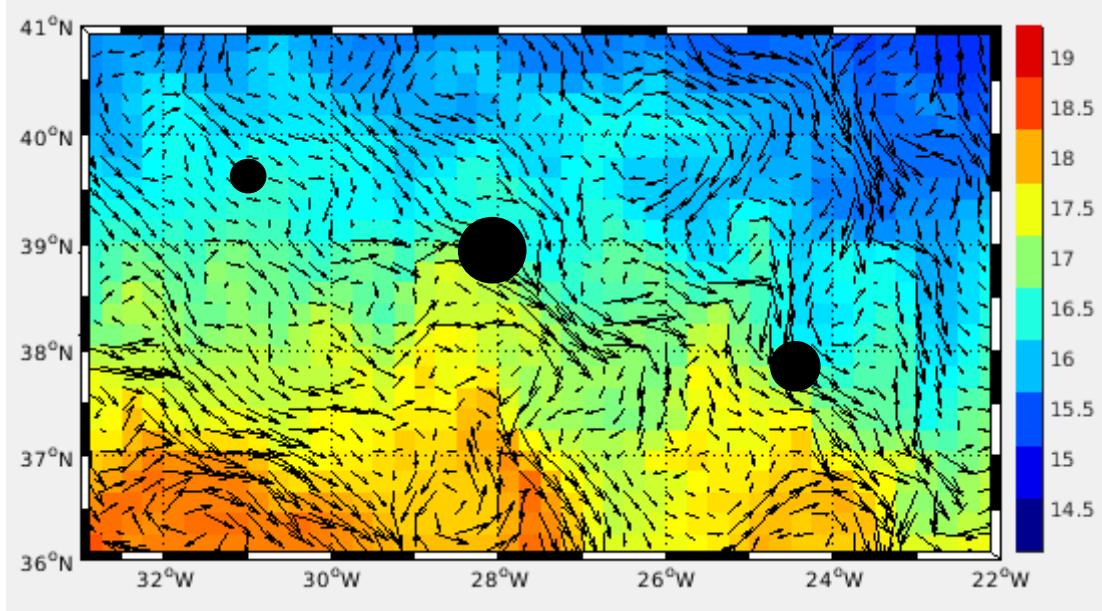


Fig. 7 : Modèle haute résolution. Représentation de la température à 10 mètres de profondeur. Les vecteurs représentent la vitesse moyenne à 10 mètres de profondeur (échelle : 0,1 m.s⁻¹). Les cercles noirs représentent les îles et amas d'îles. (Janvier Année 7).

IV) Discussion

Il est possible d'observer sur les résultats du modèle haute résolution en juillet quelques tourbillons contrarotatifs (**Fig. 8**), malheureusement il n'est pas possible d'affirmer qu'ils sont dus à un effet d'île.

Plusieurs hypothèses sont possibles quant à la présence de ces tourbillons contrarotatifs. La première étant qu'ils sont bien dus aux îles, mais pour vérifier cela il faudrait un modèle avec une résolution encore plus grande ainsi qu'une résolution des côtes améliorée. La deuxième hypothèse est que ces tourbillons ne sont pas dus aux îles, cependant lorsque l'on regarde la **Fig. 5**, il est facilement constatable que loin des îles les courants semblent laminaires. Ils seraient donc potentiellement dus à la topographie des fonds. La dernière hypothèse est que le modèle n'est pas adapté à la région et que donc les résultats sont faux et donnent ces tourbillons.

Malheureusement, peu d'étude avec une résolution très fine ont été faites dans cette région ce qui rend impossible la validation d'une de ces hypothèses.

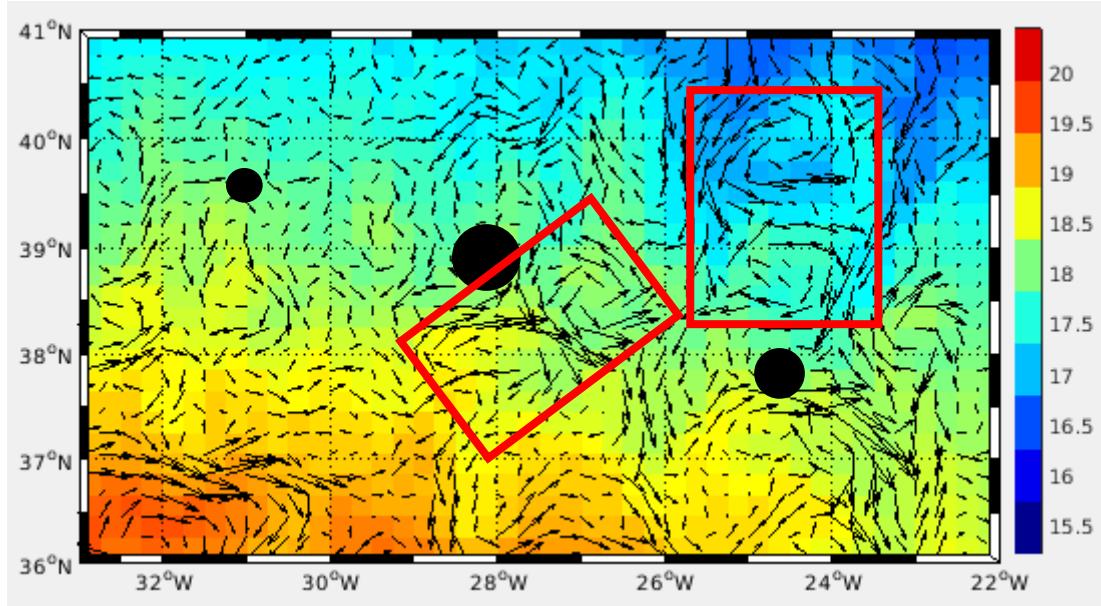


Fig. 8 : Modèle haute résolution. Représentation de la température à 10 mètres de profondeur. Les vecteurs représentent la vitesse moyenne à 10 mètres de profondeur (échelle : 0,1 m.s⁻¹). Les cercles noirs représentent les îles et amas d'îles et les rectangles rouges des possibles tourbillons contrarotatifs. (Juillet Année 7).

Cependant, si l'on observe les tourbillons contrarotatifs en aval de l'obstacle se trouvant au milieu de la carte, on remarque qu'ils font significativement la même taille que l'obstacle ce qui peut être une preuve qu'il découle d'un effet d'île. De plus si on fait une étude du nombre de Reynolds en prenant pour l'amas d'île centrale de l'archipel $D = 50 \text{ km}$, pour le courant $V_0 = 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ et $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, on obtient un $Re = 5.10^9$ ce qui voudrait dire que l'on serait dans le cas où l'écoulement en aval n'est plus laminaire et qu'il y a donc présence d'effet d'île.

V) Conclusion

CROCO est un modèle tridimensionnel qui permet la modélisation de différentes régions océanographique grâce à un système d'équations primitives basées sur des simplifications des équations du mouvement de Navier-Stokes et d'autres équations de conservation. Par la suite, la création de deux modèles pour la région de l'archipel des Açores a permis d'observer les phénomènes d'effets d'îles. Un modèle à grande échelle et faible résolution et un modèle à fine échelle et haute résolution. Malheureusement, le manque de résolution et d'études à très fine échelle de cette région n'ont pas permis de conclure sur la présence ou non de tourbillons dus à des effets d'îles. Il serait donc intéressant de reproduire un modèle à bien plus grande résolution. Cependant l'étude du nombre de Reynolds tend à dire qu'il y a bien des effets d'îles dans la région.

Bibliographie :

PERRET, G. et al. *Cyclone-anticyclone asymmetry of large-scale wakes in the laboratory*. Physics of Fluids, 2006, vol.18, issue.3.

VAN DYKE, M. *An album of Fluid Motion*, 1982.

PRAKYA, S. et al. *A Three Dimensional Ocean Model for the Azores Region using the Regional Ocean Modeling System (ROMS) to Study the Circulation and the Variability of the Azores Current*, 2012.