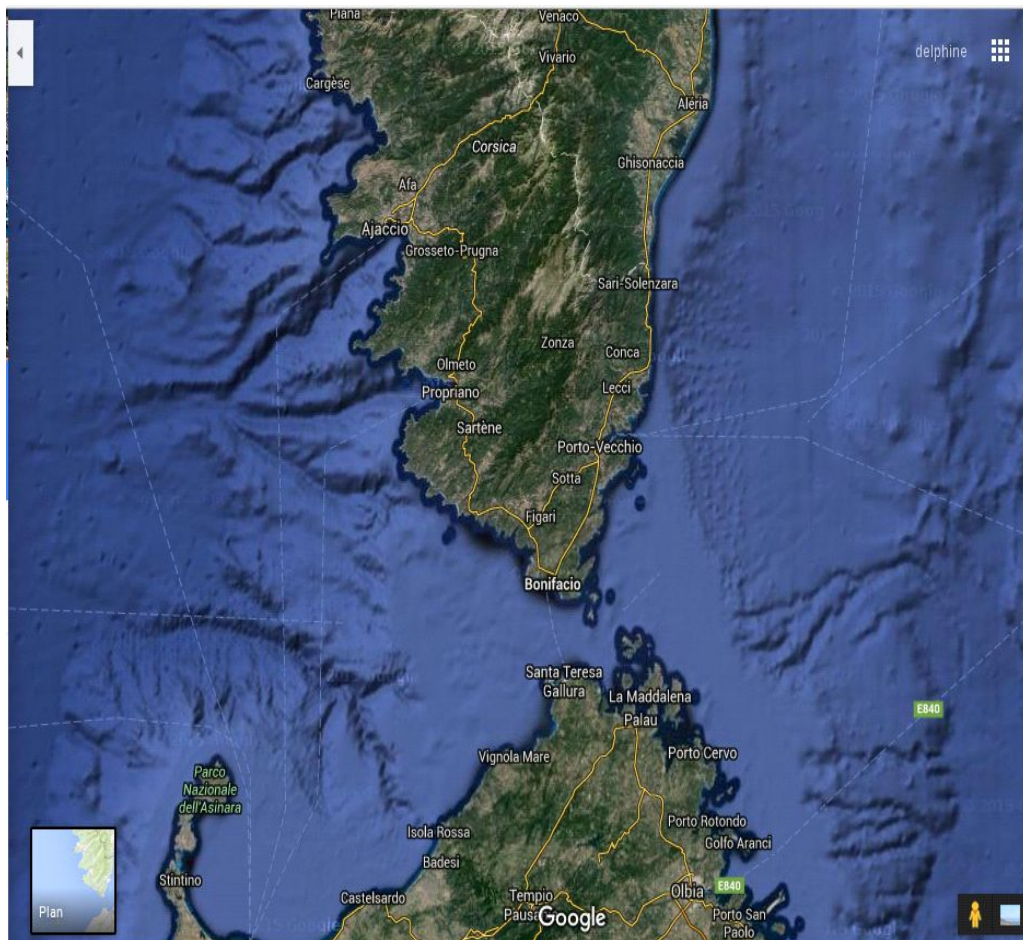


OPB 205

Modélisation de la circulation océanique



Modélisation des Bouches de Bonifacio

Delphine BERNIER
M1 OPB

Résumé

Ce rapport présente la comparaison entre des données de températures de subsurface (11 mètres) issues du modèle ROMS et celles de l'article de Gerigny et *al*, qui réalise aussi une comparaison entre des données de températures in situ et celles issues du modèle SYMPHONIE. La zone d'étude qui a été choisie est une petite zone côtière de quelques kilomètres de large située dans les Bouches de Bonifacio (Corse du Sud). Le but est de tester la fiabilité des deux modèles afin de définir lequel des deux est le plus réaliste. Les données de températures in situ proviennent d'enregistrement collectés par l'équipe de la Réserves Naturelles des Bouches de Bonifacio.

Les résultats obtenus montre une différence entre les mesures de température in situ et celles prédites par les deux modèles, le modèle ROMS reste tout de même plus proche de la réalité que le modèle SYMPHONIE.

Abstract:

This report presents a comparison between subsurface temperature data (11 meters) from the ROMS model and those of Article of Gerigny et *al*, which also makes a comparison between in situ temperature data and those from the SYMPHONY model. The study area was chosen is a small coastal area a few kilometers wide located in the Strait of Bonifacio (Southern Corsica). The aim is to test the reliability of the two models in order to define which one is the most realistic. In situ temperature data comes from records collected by the team of the marine park of Strait of Bonifacio.

The results show a difference between the in situ temperature data and those predicted by the two models, the ROMS model still remains closer to reality than the SYMPHONY model.

Table des matières

Introduction	3
Matériels et méthodes	3
1. Description et équations du modèle ROMS.....	3
2. Implémentation du modèle ROMS pour les Bouches de Bonifacio.....	5
2.1. Zone d'implantation du modèle	5
2.2. Paramétrisation du modèle.....	6
Résultats	7
Discussion des résultats et comparaison avec la littérature.....	10
Conclusion.....	13
Bibliographie:	13

Introduction

Il existe de nombreux modèles numériques permettant de modéliser la circulation océanique de différentes régions du monde. Grâce à une grande puissance de calculs, ils offrent la possibilité de représenter les paramètres hydrologiques et thermodynamiques de la région choisie. Ils possèdent de nombreux avantages permettant de faciliter la représentation, l'interprétation et la compréhension des paramètres qui entrent en jeu. Parmi les modèles numériques régionaux les plus connus et utilisés, nous retrouvons le modèle SYMPHONIE et le modèle ROMS (Regional Ocean Modeling System), qui seront les modèles 3D que nous comparerons dans la suite de ce rapport appliqués à notre zone géographique.

Ces modèles sont capables de résoudre les équations de la dynamique des fluides, en réalisant une dérivation des équations des modèles numériques de circulation océanique. Ces outils, à partir de simulations, permettent d'obtenir une représentation tridimensionnelle des courants et des variables thermodynamiques.

L'objectif de ce projet était d'implémenter le modèle ROMS à la région océanique de notre choix telles que les Bouches de Bonifacio situées en Corse du Sud. Cette simulation à l'échelle régionale a permis la modélisation en trois dimensions de la région étudiée sur une période de dix ans.

Les Bouches de Bonifacio se situent à l'extrême sud de la Corse et font partie d'une magnifique réserve naturelle qui porte leur nom, accueillant des écosystèmes marins riches et complexes.

Dans cette zone, le courant Liguro-Provençal et le bassin Tyrrhénien se rencontrent, donnant lieu à un violent hydrodynamisme.

Par la suite, nous avons réalisé une série temporelle avec l'aide de notre modèle, dans une zone bien précise de notre région, afin de comparer les résultats avec des mesures in situ et des estimations faites par le modèle SYMPHONIE issues de la littérature : GERIGNY, Olivia, DI MARTINO, Bernard, ROMANO, Jean-Claude, *et al.* A one-year (2005) comparison of seawater temperature series between in situ and modelling data: Application to the Strait of Bonifacio (South Corsica). *Comptes Rendus Geoscience*, 2011, vol. 343, no 4, p. 278-283.

Matériels et méthodes

1. Description et équations du modèle ROMS

Le modèle numérique de circulation océanique ROMS repose sur l'utilisation de plusieurs équations primitives décrites dans un système de coordonnées cartésiennes (O, x, y, z).

Nous retrouvons les équations du mouvement permettant de représenter la vitesse moyenne horizontale (au sens de la turbulence) de particules de fluides géophysique. Ceci est décrit par les équations de Navier-Stokes qui sont les suivantes:

$$\begin{array}{c}
 \text{Variation locale de la} \\ \text{vitesse en fonction du} \\ \text{temps}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{Advections horizontales}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{Gradient de} \\ \text{pression}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{Terme de} \\ \text{Coriolis}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{Termes de la turbulence}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + f v - \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - f u - \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z}
 \end{array}$$

avec: u, v et w les composantes horizontales et verticales non turbulentes de la vitesse du mouvement, u', v' et w' sont les composantes turbulentes de la vitesse du mouvement, f le paramètre de Coriolis, P la pression et ρ_0 la densité de référence de l'eau de mer au sens de l'hypothèse de Boussinesq.

Les équations en eaux peu profondes sont utilisées, ce qui permet d'effectuer une simplification des équations de Navier-Stokes en supposant que les composantes horizontales de la vitesse sont indépendante de z :

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f v + A_h \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + F_x + B_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - f u + A_h \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + F_y + B_y\end{aligned}$$

Il faut donc utiliser l'équation de continuité pour un fluide incompressible ce qui permet d'ajouter une troisième équations à ce système car il y a trois inconnues (les deux composantes de la vitesse et la surélévation) :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad \text{avec } H = h + \eta$$

Ce sont les trois dernières équations qui constituent les équations en eaux peu profondes (shallow water equations).

L'équation de continuité peut également s'écrire sous la forme suivante en formulant d'autres hypothèses :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Les équations de conservation de la chaleur et du sel sont également utilisées, elles concernent le transport de la température et de la salinité :

Flux turbulent de chaleur modélisé à l'aide du concept de
diffusivité turbulente

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T &= - \overbrace{\frac{\partial(\overline{T'u'})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{T'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{T'w'})}{\partial z}} + \frac{H_c}{\rho_o C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} S &= - \underbrace{\frac{\partial(\overline{S'u'})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{S'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{S'w'})}{\partial z}}\end{aligned}$$

Flux turbulent de sel modélisé à l'aide du concept de diffusivité
turbulente

avec: H_c le flux solaire incident, C_p le coefficient de chaleur massique ($C_p = 3950 \frac{J}{kg} . K$), $I(z)$ la fraction de ce flux qui parvient au niveau z sachant que $I(z) = e^{-\lambda z}$ avec $\lambda = 0,05 m^{-1}$ le coefficient d'atténuation choisi à partir des tables de Jerlov en eau claire (1976).

Il y également l'équation d'état de l'eau de mer :

$$\rho = \rho(S, T, z)$$

Il peut être intéressant de préciser que les modèles océaniques tels que ROMS ou SYMPHONIE se distinguent par différentes techniques de fermeture de la turbulence notamment par l'utilisation de formules empiriques et par le calcul des différents coefficients de viscosité.

Conditions aux limites

Après avoir effectué la fermeture de la turbulence il est nécessaire d'ajouter des conditions aux limites qui existent sous deux formes dans le modèle ROMS:

- Condition de frontière à la surface libre ($z = \eta$) :

$$\begin{array}{l} \text{Tension de surface dû} \\ \text{au vent} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} A_v \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_{sx} \\ A_v \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_{sy} \end{array} \right. \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} = w \quad \begin{array}{l} K_v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q}{\rho_0 C_p} \\ K_v \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{S(E-P)}{\rho_0} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{Flux de chaleur} \\ \text{Evaporation-} \\ \text{Précipitation = Bilan} \\ \text{du sel} \end{array} \right.$$

Dans ce cas la vitesse du courant est proportionnelle à la tension de frottement de surface dû au vent et pour le température et la salinité, elles s'obtiennent avec le bilan de chaleur et de sel.

- Condition de frontière au fond ($z=-H$):

$$\begin{array}{l} \text{Tension de} \\ \text{cisaillement sur} \\ \text{le fond} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} A_v \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_{bx} \\ A_v \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_{by} \end{array} \right. \quad w = -u \cdot \nabla H \quad \begin{array}{l} K_v \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \\ K_v \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \end{array}$$

Dans ce cas, la vitesse du courant est fonction de la tension de cisaillement sur le fond et les variations de température et de salinité sont nulles.

Détermination du pas de temps :

$$\frac{dx}{dt} > \sqrt{gh} \rightarrow dt < \frac{dx}{\sqrt{gh}}$$

La méthode de discrétisation :

Sur l'horizontale et la verticale, le modèle utilise des schémas aux différences finies décalées notamment une grille Arakawa-C.

2. Implémentation du modèle ROMS pour les Bouches de Bonifacio

2.1. Zone d'implantation du modèle

Les Bouches de Bonifacio sont situées dans la partie Nord-Ouest de la mer Méditerranée entre deux îles qui se font face, que sont la Corse et la Sardaigne et c'est à cet endroit que le courant Liguro-Provençal et le bassin Tyrrhénien se rencontrent. Sa superficie est de 80 000 hectares parsemés de nombreuses petites îles et îlots. Les régimes des vents dans cette région sont principalement le vent d'ouest (50 % du temps, toute l'année et vitesses jusqu'à 8 m.s^{-1}) mais nous retrouvons également le vent d'est en hivers seulement (vitesse allant de 5 à 8 m.s^{-1}). Du fait que l'écosystème qu'elles abritent soit menacé, les Bouches de Bonifacio sont considérées comme une zone sensible et ont été classée site protégé, nous y retrouvons à présent la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio.

2.2. Paramétrisation du modèle

Nous avons téléchargé à partir des sites internet <http://www.romsagrif.org> et <http://www.myroms.org/> différents fichiers nous permettant ainsi d'obtenir le modèle ROMS_AGRIF. Il a fallu fixer les coordonnées du domaine de calcul nous permettant ainsi de réaliser les calculs uniquement pour la zone que nous avons choisi, ceci a été fait avec le fichier *ad_findgeocoord.m*. Les coordonnées que nous avons décidé de sélectionner sont: longitude minimale 7° E, longitude maximale 11° E, latitude minimale 41° N et latitude maximale 42° N.

Par la suite afin de préparer nos simulations, nous devons mettre en place la grille qui allait nous servir pour représenter nos résultats, ceci a été réalisé à l'aide des scripts Matlab *roomstools_param.m* et *make_grid.m* en choisissant l'option *edit_mask*. De plus, nous avons modifié dans le script *roomstools_param.m* les coordonnées en les remplaçant par celles que nous avons choisi, et nous avons également décidé de réaliser l'ensemble de nos simulations avec une résolution de 1/20.

Pour éviter des simulations trop longues, la taille de la grille était limitée à 10^5 mailles, soit:

$$(\Delta \text{ longitude} \times \Delta \text{ latitude} \times \left(\frac{1}{\text{Résolution}}\right))^2 < 10^5$$

Application numérique: $(4 \times 1 \times \left(\frac{1}{20}\right))^2 = 6400 \text{ mailles de grille}$

Il fallut également faire particulièrement attention à l'emplacement des frontières ouvertes ou fermées, dans notre cas elles étaient toutes ouvertes, de ce fait dans le script *roomstools_param.m* nous avons écrit que *obc=[1 1 1 1]*. Nous obtenions ainsi une figure de la bathymétrie de notre zone d'étude.

Les valeurs de la grille que nous avons obtenu étaient *LLm=79* (taille de la grille en direction des x) et *MMm=26* (taille de la grille en direction des y), celles-ci étaient nécessaire aux calculs du critère CFL.

Après tout ceci, nous avons enfin pu calculer les forçages des conditions initiales et aux frontières avec les scripts *make_forcing.m* et *make_clim.m* (une des figures obtenues correspondent à la figure 1 située dans la rubrique résultats).

Les pas de temps interne et externe de la simulation sur la base du critère CFL ont été calculé à l'aide du script *ad_cfl.m* entraînant des modifications dans les fichiers *param.h* et *cppdefs.h* en définissant une nouvelle clé pour la nouvelle configuration et en activant les clés correspondantes aux frontières ouvertes. Le fichier *roms.in* a aussi été modifié en vérifiant les valeurs de la grille verticale, le pas de temps interne et externe sur la base du critère CFL, nous obtenions ainsi *dt= 720* secondes (pas de temps interne), *NDTFAST=60* (pas de temps externe) et *NTIMES=3600* (durée de la simulation). La fréquence de sauvegarde des sorties instantanées et moyennes a été fixée à 3600 (NAVIG et NWRT), il en est de même pour les sorties nécessaires pour relancer le modèle.

La dernière modification fut réalisée pour les fichiers *roms_inter.in* et *rum_roms.csh* avant de pouvoir lancer notre simulations pluriannuelles (10 années).

Dans cette étude, nous voulions comparer les températures obtenues avec le modèle ROMS à celles obtenues par le modèle SYMPHONIE et de manière in situ. Afin de pouvoir modéliser et représenter ces températures pour l'ensemble de l'année et pour les 10 années de simulations à 11 mètres de profondeur et à un endroit spécifique, nous avons rédigé un script matlab qui est le suivant:

```

%% VARIATION DU FICHIER POUR AVOIR UN APERCU TEMPORELLE
%% AFFICHE LES FIGURES DE CHAQUE MOIS SUR UNE ANNEE

itotal=0;

for i=1:12
    hisfile= ['SCRATCH/roms_avg_Y10M',num2str(i),'.nc'];
    gridfile='SCRATCH/roms_grd.nc';
    vname='temp';
    for tindex= 1:10 ;
        vlevel= -11 ; %(Profondeur souhaitée)
        coef= 1;
        remlts = [1 1 1 1];
        [lat,lon,mask,var]=get_var(hisfile,gridfile,vname,tindex,vlevel,coef,remlts);

        itotal=itotal+1;
        temperature(itotal)=var(11,40);

    end %for tindex

end %for i

time=(1:120); % Données toutes les 3 jours soit en tout 120 jours de données
au          % total sur une année

figure()
plot(datenum(time*3),temperature,'-*'); % datenum permet d'afficher les mois
de % l'année
datetick('x','mmm');

ylabel('Température (°C)');
title('Evolution de la température au cours de la dixième année de simulation
à 11 mètres de profondeur');
ylim([10.00 26.00])

```

Modifié selon l'année considérée (2 à 10)

Résultats

Nous avons dans un premier temps, effectué des simulations des différents forçages (vent, flux de chaleur net à la surface, flux d'eau douce de surface, température de surface, flux de chaleur sensible et radiation solaire) et des données climatiques (en section verticale). L'unique figure qui est présentée ci-dessous représente la température de surface pour l'ensemble des Bouches de Bonifacio pour chaque saison sur une seule année (figure 1).

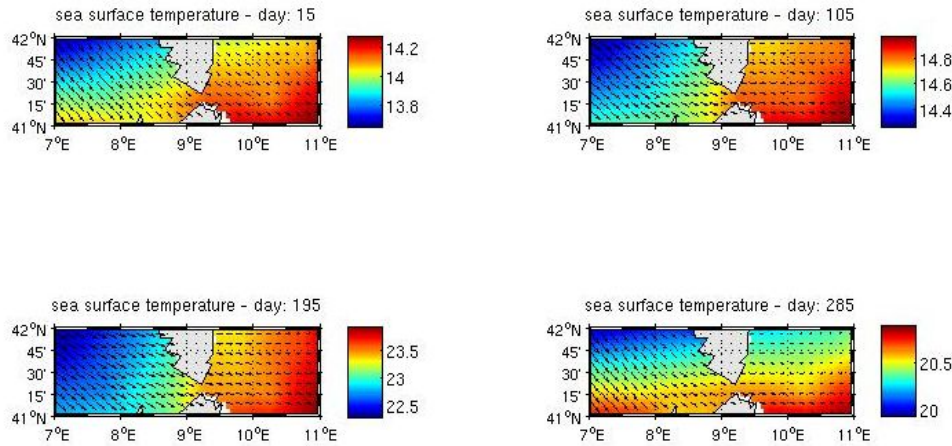


Figure 1: Représentation des températures de surface pour chaque saison de l'année (hiver en haut à gauche, printemps en haut à droite, été en bas à gauche et automne en bas à droite).

Dans un second temps, à l'aide du scripts MATLAB `roms_diags.m`, nous avons effectué plusieurs tests afin de diagnostiquer la stabilité du modèle sur la zone choisie. Puis avec le script `plot_diags.m`, nous avons obtenu un graphique contenant les variables de diagnostique moyennées permettant ainsi de déterminer à quel moment le modèle devient stable sur la simulation de dix années (figure 2).



Figure 2: Diagnostiques de stabilité du modèle appliqué aux Bouches de Bonifacio.

Le graphique des variables de diagnostiques moyennées représente la variabilité de sept paramètres différents que sont l'anomalie de volume (en km^3), l'énergie cinétique de surface moyennée (en $cm^2.s^{-2}$), l'énergie cinétique de volume moyennée (en $cm^2.s^{-2}$), la diffusion de volume moyennée, la vitesse w de volume moyennée, la salinité de volume moyennée et la température de volume moyennée. L'évolution de ce graphique permet de déterminer la stabilité de ce modèle pour la zone océanique étudiée, et nous pouvons donc remarquer que cette stabilité varie selon le paramètre concerné. En général, il faut attendre entre deux à trois années de simulations pour que le modèle devienne stable, or dans notre cas la région océanique choisie est relativement petite, de ce fait nous pouvons observer que le modèle devient stable dès la première année en raison de la périodicité de manière constante des valeurs étudiées. Mais afin d'être certain de la fiabilité de nos résultats, nous avons fait le choix de considérer uniquement les résultats obtenus à partir de la deuxième année.

Dans ce projet nous devons également comparer nos simulations à des résultats issus de la littérature. Nous avons donc choisi d'utiliser l'article de Gerigny et *al*, qui compare des mesures de température de surface in

situ à celles obtenues à partir de simulations réalisées avec le modèle SYMPHONIE, pour une zone spécifique des Bouches de Bonifacio. Nous avons donc créé un script Matlab nous permettant de tracer la température à 11 mètres de profondeur pour chaque année de simulation. Les figures qui suivent (figure 3 à 7) représentent donc cette évolution pour les années de simulations réalisées avec le modèle ROMS.

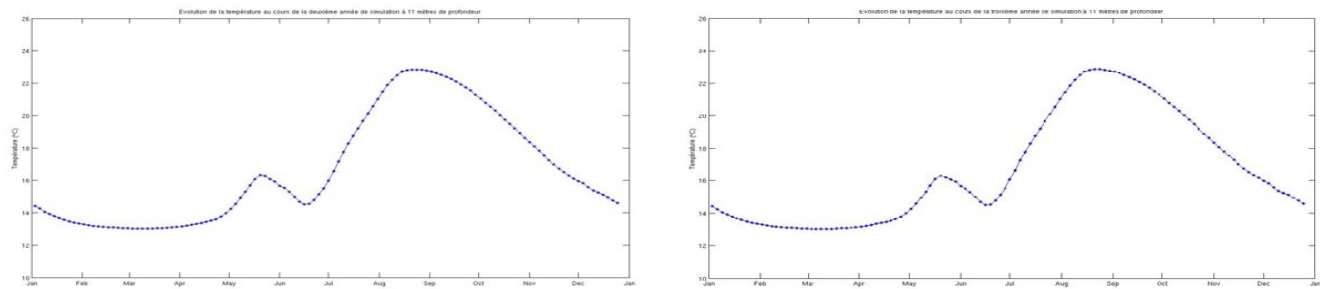


Figure 3: Evolution de la température à 11 m de profondeur pour la zone d'étude choisie dans les Bouches de Bonifacio pour la deuxième (à gauche) et troisième année (à droite) de simulation.

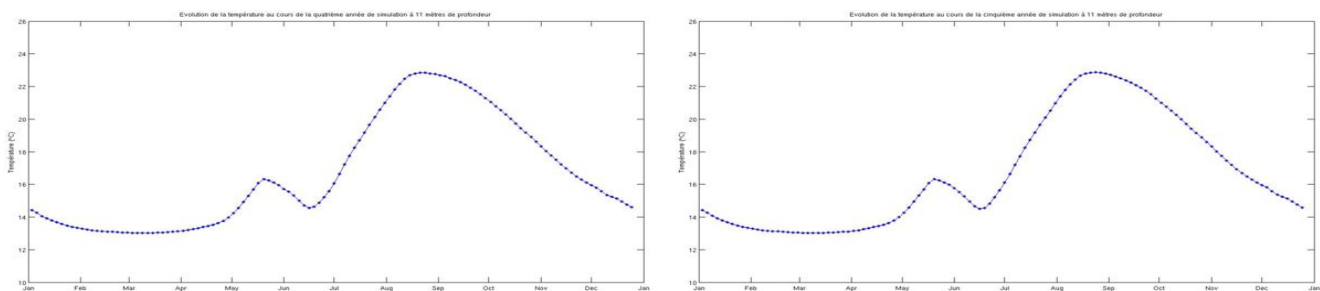


Figure 4: Evolution de la température à 11 m de profondeur pour la zone d'étude choisie dans les Bouches de Bonifacio pour la quatrième (à gauche) et cinquième année (à droite) de simulation.

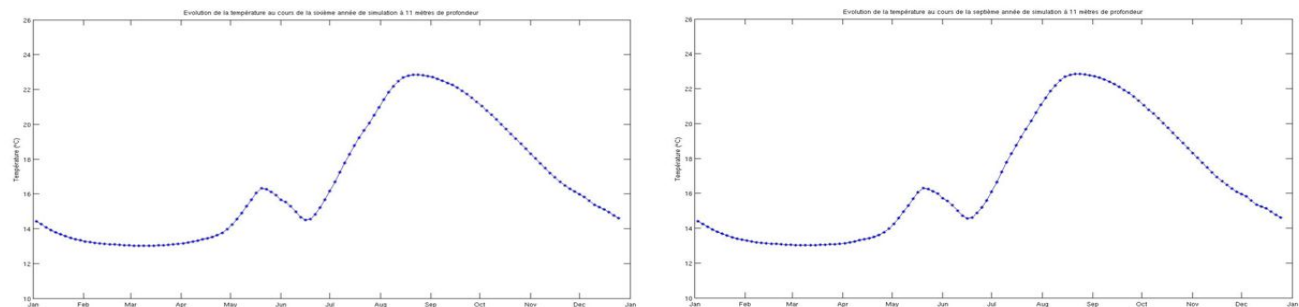


Figure 5: Evolution de la température à 11 m de profondeur pour la zone d'étude choisie dans les Bouches de Bonifacio pour la sixième (à gauche) et septième année (à droite) de simulation.

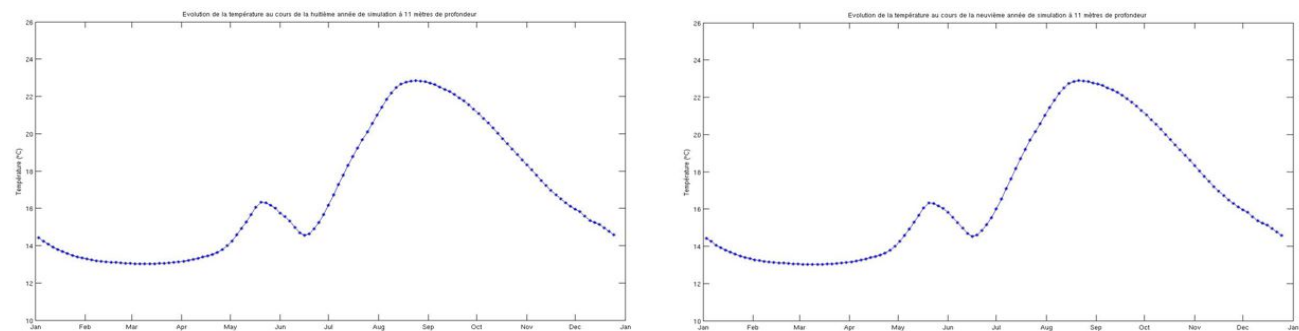


Figure 6: Evolution de la température à 11 m de profondeur pour la zone d'étude choisie dans les Bouches de Bonifacio pour la huitième (à gauche) et neuvième année (à droite) de simulation.

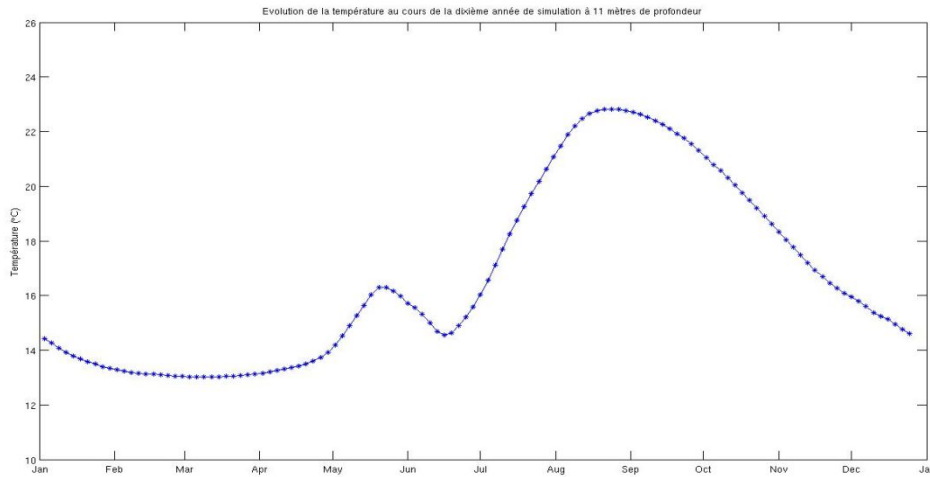


Figure 7: Evolution de la température à 11 m de profondeur pour la zone d'étude choisie dans les Bouches de Bonifacio pour la dixième année de simulation.

Discussion des résultats et comparaison avec la littérature

Dans ce projet, nous devons comparer les résultats de nos simulations que nous avons obtenu avec le modèle ROMS avec des résultats de la littérature. L'article que nous avons choisi est celui GERIGNY, Olivia, DI MARTINO, Bernard, ROMANO, Jean-Claude, *et al.* A one-year (2005) comparison of seawater temperature series between in situ and modelling data: Application to the Strait of Bonifacio (South Corsica). *Comptes Rendus Geoscience*, 2011, vol. 343, no 4, p. 278-283. Il effectue une comparaison entre les températures de surface obtenues à partir de mesure in situ et les résultats obtenus à partir de simulations réalisées avec le modèle SYMPHONIE.

Les données de température in situ utilisées dans l'article de GERIGNY *et al.*, ont été fournies par la Réserve naturelle des Bouches de Bonifacio qui a installé quatre thermomètres ThermoTidbit (capteurs ST Pro) à différentes profondeurs (à 11, 25, 35 et 42 m de profondeur) au niveau de l'île Madonneta (41° 23' 07" N et 9° 08' 07" E). La fréquence d'échantillonnage des mesures enregistrées était de l'ordre de 30 minutes et ceci fut réalisé pour l'ensemble de l'année 2005.

De ce fait, les simulations que nous avons effectuées avec le modèle ROMS ont été faites pour une localisation géographique similaire soit 41,5° N et 9,0° E. Nous n'avons pas pu choisir exactement les mêmes coordonnées étant donné que cette île est assez proche des côtes et que par conséquent le modèle situait cette position sur la Terre (la Corse) et non dans la mer.

Tout comme le modèle ROMS, le modèle SYMPHONIE est un modèle tridimensionnel, il est également très utilisé pour modéliser des bassins océaniques à une échelle régionale.

Dans l'étude de Gerigny *et al.*, il est indiqué que le forçage atmosphérique utilisé par le modèle SYMPHONIE a été fourni par le modèle de prévision météo Aladin (Leredde *et al.*, 2007). La composante du courant, de l'élévation de surface, de la température et de la salinité ont été calculées avec une grille C en utilisant des méthodes de différences finies classiques (Leredde *et al.*, 2007). Afin d'étudier les données de températures obtenues par les simulations pour les quatre profondeurs, ils ont essayé de choisir un point le plus proche possible de l'emplacement où les mesures in situ avaient été réalisées. De plus afin d'adapter le modèle SYMPHONIE à une zone aussi petite, la résolution qu'ils ont choisi était de 500 m.

Les résultats de température qu'ils ont obtenu avec le modèle SYMPHONIE ont été tracés pour une profondeur de 11 mètres et ont été comparés, sur ce même graphique, avec les mesures de température in situ (figure 8).

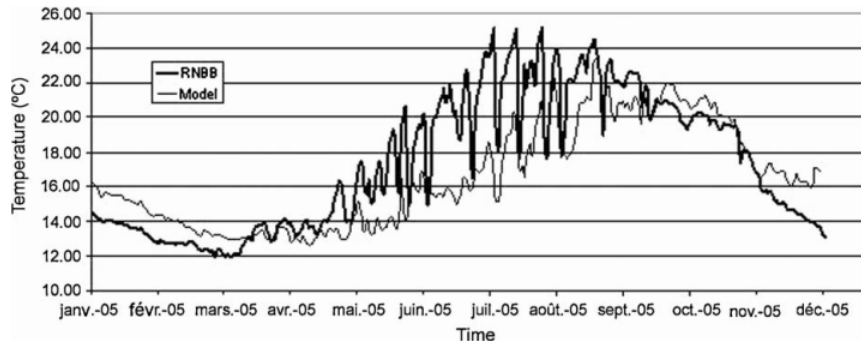


Fig. 2. Daily temperature averages recorded by the Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio and model during 2005 to a depth of -11 m.

Figure 8: Moyenne journalière des températures enregistrées par la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio et le modèle au cours de l'année 2005 à -11 m de profondeur (figure tirée de l'article de Gerigny et *al.*

Les températures de surface présentent une plus forte variabilité au cours de l'été au contraire de l'hivers. Les résultats obtenus avec le modèle SYMPHONIE montrent des différences significatives par rapport aux mesures in situ notamment de Mai à Septembre. En effet, les valeurs sont plus faibles jusqu'à quasiment -6°C et présentes une variabilité moins importante.

En revanche pendant l'hivers, les valeurs du modèle ont été plus élevées que les valeurs in situ, atteignant jusqu'à 2 °C de différences.

Nous pouvons remarquer que pendant la saison estivale, les températures simulées en faible profondeur (11 mètres) avec le modèle SYMPHONIE présentes une sous-estimation assez importante par rapport aux données de températures fournies par la Réserves naturelles des Bouches de Bonifacio malgré leurs très fortes variabilités. Et en hivers, c'est une surestimation qui est observée mais de façon moins significative.

Toujours d'après l'article de Gerigny et *al.*, de telles différences seraient expliquées par la fait qu'en été les températures in situ varient très rapidement et ceci aurai été surement lissées par la modèle.

Nous avons en premier lieux, réalisé des simulations de température de surface pour l'ensemble des Bouches-de-Bonifacio afin d'avoir un aperçu des données thermiques de la région. Nous pouvons observer d'après la figure X, que la température de surface au niveau du point que nous avons choisi dans la zone est environ à 14,1°C pour la saison hivernale, 14,7°C pour la saison printanière, 23,3°C pour la saison estivale et 20,6 °C pour la saison automnale. Nous pouvons déjà remarquer des différences de valeurs avec celles mesurées in situ mais ce n'est pas être pas dû à une erreur du modèle, cela pourrait être lié au fait qu'elles ne situent pas à la même profondeur (à 0 m pour la figure 1 et à -11 m pour les températures in situ) entrainant un réchauffement ou refroidissement plus rapide pour les températures de surface.

Afin de pouvoir comparer les résultats réalisés avec le modèle ROMS pour la même localisation géographique et la même profondeur, nous avons créé un script Matlab nous permettant de tracer la température à cette profondeur pour chaque année de simulation.

Lorsque nous observons les figures présentant l'évolution de la température à 11 m de profondeur pour la zone d'étude choisie dans les Bouches de Bonifacio pour les 9 années de simulations gardées (figure de 3 à 7), nous pouvons noter très peu de différences significatives entre les différentes années de simulations. L'ensemble de ces figures semblent présenter des courbes et des échelles de valeurs similaires

Afin de faciliter la comparaison entre les valeurs obtenues par les deux modèles (ROMS et SYMPHONIE) et les valeurs in situ, nous avons décidé de les mettre sous forme de tableau (tableau 1) :

Tableau 1: Comparaison des différentes valeurs obtenues pour la température à 11 mètres de profondeur réalisées avec la modèle ROMS et SYMPHONIE

Mois	Données in situ (°C)	Valeurs prédites par le modèle SYMPHONIE (°C)	Différence par rapport à la température in situ (°C)	Valeurs prédites par le modèle ROMS (°C)	Différence par rapport à la température in situ (°C)
Janvier	13,8	15,3	+ 1,5	14,4	+ 0,6
Février	12,7	13,8	+ 1,1	13,2	+ 0,5
Mars	12,7	13,1	+ 0,4	12,9	+ 0,2
Avril	13,7	13,2	- 0,5	13,4	- 0,3
Mai	16,2	13,7	- 2,5	14,2	- 2,0
Juin	19,0	15,4	-3,6	15,7	- 3,3
Juillet	21,8	17,0	- 4,8	16,3	- 5,5
Août	21,8	18,9	- 2,9	21,2	- 0,6
Septembre	22,6	21,1	- 1,5	22,7	+ 0,1
Octobre	20,4	21,0	+ 0,6	21,3	+ 0,9
Novembre	18,6	19,2	+ 0,6	18,6	0
Décembre	14,5	16,6	+ 2,1	15,8	+ 1,3

Nous pouvons donc constater que les valeurs obtenues avec le modèle ROMS, sont supérieures par rapport aux températures in situ allant de 0,2 à 0,6 °C pour les mois de Janvier à Mars. Alors qu'avec le modèle SYMPHONIE, nous remarquons une différence de 0,4 à 1,5°C supplémentaire. Pour les mois d'Avril à Août (sauf mois de Juillet), nous observons des différences allant de -0,3 à -3,3°C avec le modèle ROMS et de -0,5 à -3,6°C avec le modèle SYMPHONIE. Et pour les mois de Septembre à Décembre, nous notons des différences comprises entre 0 à 1,3°C avec le modèle ROMS et entre -1,5 à +2,1°C avec le modèle SYMPHONIE.

Au final, nous pouvons donc affirmer que les différences entre les températures prévues par le modèle ROMS et les températures in situ sont moins importantes que celles obtenues avec le modèle SYMPHONIE sauf pour le mois de Juillet. De ce fait, le modèle ROMS semble plus adapté pour effectuer des simulations dans cette région malgré que ces deux modèles soient utilisés pour réaliser des simulations à des échelles régionales.

De tels écarts peuvent s'expliquer pour le modèle SYMPHONIE, d'après l'article de Gerigny et *al*, par une mauvaise valeur du rayonnement solaire qui pénètre en profondeur, ou des conditions aux limites ou de l'advection des courants. Cela pourrait être aussi dû à une imprécision dans les nombreux calculs qu'effectue le modèle entraînant ainsi des résultats éloignés des valeurs réelles. De plus certains phénomènes ne sont pas pris en compte comme la marée et les nombreux apports fluviaux.

Les données atmosphériques qui avaient été choisies peuvent également avoir un impact important sur les simulations réalisées. En effet celles-ci ont été calculé avec l'aide du modèle météo de prévision Aladin, pour le modèle ce sont celles de WOA 2009 qui ont été utilisées (qui correspond à une année "type"). Etant donnée la faible profondeur où nous avons utilisé lors de nos nombreuses simulations, le forçage atmosphérique (notamment le rayonnement solaire et le vent) joue un rôle prépondérant dans la régulation de la température des eaux de surface, de ce fait, comme les deux modèles n'ont pas utilisé les mêmes données atmosphériques, l'efficacité d'un modèle par rapport à l'autre peut en être perturbé entraînant ainsi des différences dans les valeurs de température obtenues.

De plus la résolution choisie est également différente, ce qui peut aussi influencer les résultats des simulations.

Entre le modèle SYMPHONIE et le modèle ROMS, il existe des différences notables au niveau des calculs des coefficients de viscosité (A_h, K_h, A_v, K_v). En effet par exemple, le modèle SYMPHONIE calcule le coefficient de viscosité vertical en se basant sur l'équation de l'énergie cinétique turbulente en considérant qu'il se conserve comme la température ou la salinité. Par conséquent, les écarts de températures peuvent avoir un impact sur d'autres calculs réalisés par le modèle.

Conclusion

Depuis un certain nombre d'années, la compréhension et l'analyse des processus hydrodynamiques se sont énormément améliorés grâce à l'utilisation de modèles océanique numériques. Si nous considérons de grandes échelles d'espace, les résultats fournis par ces modèles deviennent fiables et permettent leur utilisation dans de nombreuses études. Cependant, les résultats obtenus à partir de ces simulations ne reproduisent pas de bon résultats avec une grande précision pour des échelles d'espace plus restreintes.

En zone côtières, les modèles peuvent être perturbés par de nombreux facteurs comme la bathymétrie, les lignes côtières, le vent et la marée (Lamouroux, 2006; MILLOT, 1989, 1999). Pour palier à cela, il est possible d'utiliser des données in situ recueillies lors de campagnes océanographique par exemple, permettant ainsi de pouvoir comparer les résultats obtenus par modélisation et ainsi vérifier la justesse et l'exactitude des valeurs obtenues pour la zone concernée.

Les modèles numériques régionaux présentent les mêmes difficultés à reproduire les données in situ, mais ils restent assez proches de celles-ci. En effet lorsque nous avons comparé les valeurs que nous avons obtenu avec le modèle ROMS, elles étaient proches de la réalité. Le modèle SYMPHONIE présentait des écarts plus important, de ce fait nous pouvons conclure que malgré des différences de paramétrisation entre les deux modèles (ROMS et SYMPHONIE), le modèle ROMS semble plus apte à reproduire des valeurs de températures similaires à celles mesurées de manière in situ.

Il aurait été intéressant de réaliser de nouvelles simulations avec le modèle ROMS mais en choisissant les données météorologiques et atmosphériques qu'utilisait le modèle SYMPHONIE, afin de pouvoir déterminer l'impact de celles-ci sur les calculs effectués par le modèle. Il existe de nombreux problèmes à résoudre sur la structure des modèles dans le but de pouvoir un jour avoir une entière confiance envers les données fournies numériquement.

Bibliographie:

GERIGNY, Olivia, DI MARTINO, Bernard, ROMANO, Jean-Claude, *et al.* A one-year (2005) comparison of seawater temperature series between in situ and modelling data: Application to the Strait of Bonifacio (South Corsica). *Comptes Rendus Geoscience*, 2011, vol. 343, no 4, p. 278-283.

Doglioli, A. M. (2015), Notes de Cours et Travaux Dirigés de Modélisation de la Circulation Océanique, Université d'Aix-Marseille, Marseille, France.