

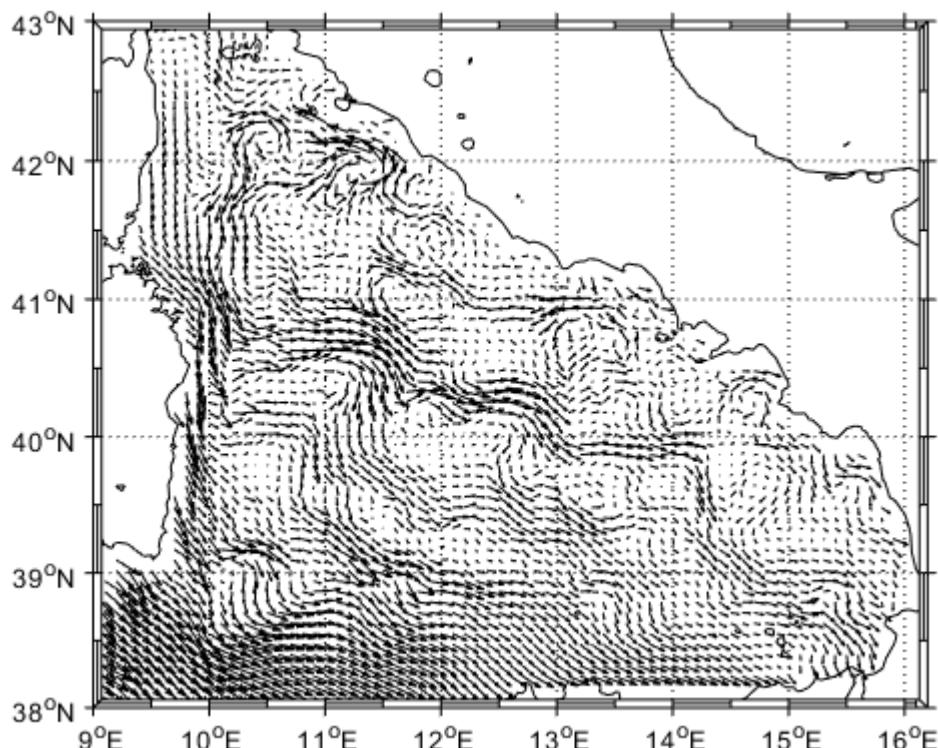


Master 1 Sciences de la Mer, Université d'Aix-Marseille

Année 2018-2019

UE OPB 205 : Modélisation 3D océanique

Etude de la variabilité saisonnière de la circulation en mer Tyrrhénienne à l'aide du modèle ROMS



Résumé

Le sous-bassin Tyrrhénien, situé à l'est de la Méditerranée occidentale, est particulièrement connu pour les particularités que présente sa circulation. En effet, la Tyrrhénienne présente une circulation complexe guidée par les effets bathymétriques et les forçages environnementaux rencontrés dans le bassin. Parmi ces particularités, le couple de structures cyclonique/anticyclonique rencontré au large des Bouches de Bonifacio est un incontournable. De nombreux auteurs se sont accordés sur le fait que la circulation en Tyrrhénienne présentait également une variabilité saisonnière marquée. Dans cette étude, la circulation en Tyrrhénienne a été modélisée à l'aide du modèle ROMS. Les composantes du courant moyennées sur la saison hivernale et la saison estivale ont permis d'effectuer une évaluation du modèle en les comparant à la littérature. Ainsi, même si le modèle semble représenter les structures typiques, il demande encore des améliorations afin d'obtenir des résultats plus réalistes.

Mots clés : Méditerranée, Tyrrhénienne, ROMS, modélisation, circulation.

Abstract

The Tyrrhenian Sea, located in the Western Mediterranean Sea, is particularly known thanks to its circulation particularities. Indeed, the Tyrrhenian Sea show a complex circulation driven by the bathymetric features and the environmental stressors found within the area. Among these particularities, the couple of cyclonic/anticyclonic structures found off the strait of Bonifacio in an essential structure. Many authors have agreed on the fact that the Tyrrhenian Sea's circulation also shows an obvious seasonal variability. Throughout this study, the circulation in the Tyrrhenian Sea was modelled thanks to ROMS. Averaged current's components of winter and summer allowed to carry out the model's evaluation by comparing them to scientific papers about this same topic. Thus, even if the model seems to depict the typical structures, it calls for some enhancements to obtain more realistic results.

Key words: Mediterranean Sea, Tyrrhenian Sea, ROMS, modelling, circulation.

Table des matières

I. Introduction	1
I.1. Objectifs de l'étude	1
II. Matériel et Méthodes	1
II.1. Le modèle ROMS	1
II.2. Implémentation du modèle à la zone d'étude	3
II.2.1. Caractérisation de la grille.....	4
II.2.2. Caractérisation des frontières	4
II.2.3. Caractérisation des pas de temps et d'espace	5
III. Résultats	5
III.1. Diagnostiques et forçages	5
III.2. Température et salinité de surface	6
III.3. Circulation de surface	7
IV. Discussion	9
IV.1. Température et salinité de surface	9
IV.2. Circulation de surface.....	9
V. Conclusion	10
Références	11

Table des figures

Figure 1 : Diagnostiques du modèle. La droite bleue représente la fin du temps de spin up.	6
Figure 2 : Température (au-dessus) et salinité (en dessous) de surface moyennées sur l'année. Les figures a) et b) correspondent aux sorties du modèle. Les figures c) et d) correspondent aux données du CMEMS.	7
Figure 3 : Champs de courant à 10 mètres de profondeur, moyennés pour l'hiver (a) et l'été (b) de l'année 6. Les structures tourbillonnaires remarquables sont entourées en rouge. L'encadré noir repère une circulation particulière.....	8

Table des Annexes

Annexe I : Hypothèses utilisées et conditions aux limites.	i
Annexe II : Forçages appliqués au modèle : température et salinité de surface.	iii
Annexe III : Circulation en mer Tyrrhénienne.	iv

I. Introduction

La mer Méditerranée, du latin *mediterraneus* (« qui est au milieu des terres »), est une mer intercontinentale. D'une superficie de 2.510.000 km², elle est séparée en deux bassins principaux : le bassin occidental (ou *western basin* en anglais) et le bassin oriental (ou *eastern basin* en anglais), par le canal de Sicile. De la même façon, ces deux bassins sont divisés en divers sous-bassins (Millot et Taupier-Letage, 2005). Parmi ces divisions, le sous-bassin tyrrhénien présente une circulation particulière du fait des différents phénomènes de mésos-échelle pouvant y être rencontrés.

Le sous-bassin tyrrhénien (ou plus fréquemment « mer Tyrrhénienne ») est situé à l'est de la Méditerranée occidentale. Délimitée par les côtes Est de la Corse et de la Sardaigne, la côte ouest de l'Italie et la côte nord de la Sicile, la Tyrrhénienne pourra être apparentée à un triangle dont la surface approche 222.000 km² (Astraldi et Gasparini, 1994). Elle est reliée aux autres sous-bassins méditerranéens par l'intermédiaire de deux ouvertures : Le canal de Corse et la limite sud du sous-bassin, par lesquelles circuleront des masses d'eau de surface telle que l'*Atlantic Water* (AW), ou intermédiaires telle que la *Levantine Intermediate Water* (LIW).

Zone d'intérêt, la Tyrrhénienne est, au même titre que la Méditerranée, largement étudiée (Astraldi et Gasparini, 1994). Ainsi, l'étude des mesures *in situ* effectuées dans le sous-bassin tyrrhénien pourra être complétée, par la mise en œuvre de modèles permettant, après évaluation, d'étudier cette zone sur le long terme.

I.1. Objectifs de l'étude

Cette étude a pour but d'appliquer le modèle ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) à une région océanique choisie : La mer Tyrrhénienne. Ainsi, l'application de ce modèle nous permettra d'étudier entre autres la circulation en mer Tyrrhénienne et sa variabilité saisonnière. Les sorties de modèle obtenues seront ensuite comparées à la littérature afin de mettre en évidence les éventuelles limites du modèle utilisé. Pour se faire, nous utiliserons un article de référence : «*The seasonal characteristics of the circulation in the Tyrrhenian Sea* » publié en 1994 par Astraldi et Gasparini, et un jeu de données concernant l'année 2018 obtenu sur le site du CMEMS (*Copernicus – Marine Environment Monitoring Service*).

II. Matériel et Méthodes

L'étude de la circulation en mer Tyrrhénienne fut réalisée à l'aide du modèle ROMS. Une toolbox MATLAB a également été utilisée afin de visualiser les résultats du modèle avant de les comparer aux résultats fournis par la littérature.

II.1. Le modèle ROMS

Le modèle ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) est un modèle spécialement dédié à la modélisation des procédés physiques océaniques. Trois versions du modèle sont aujourd'hui répertoriées : la version développée par l'université Rutgers, la version développée par l'université de Californie (UCLA) et la version développée par l'IRD. La dernière version spécifiée est appelée ROMS AGRIF. C'est la version utilisée dans le cadre de cette étude.

En plus de la version ROMS AGRIF développée par l'IRD, le package ROMSTOOLS, package adapté à MATLAB et comprenant entre autres l'interface roms_gui permettant d'afficher les sorties du modèle, a été utilisé.

A noter qu'une évolution de la version ROMS AGRIF appelée CROCO (*Coastal and Regional Ocean Community model*) est actuellement disponible sur le site : <http://www.croc-ocean.org/>. Cette version permet en plus de l'approche régionale déjà proposée par ROMS AGRIF, une approche à plus fine échelle représentant efficacement les environnements côtiers.

Le modèle ROMS est un modèle à équations primitives. De façon plus précise, les équations résolues par le modèle seront :

- L'équation de conservation de la quantité de mouvement (eq.1) ;
- L'équation de conservation du sel (eq.2) ;
- L'équation de conservation de la chaleur (eq.3) ;
- L'équation de continuité (eq.4) ;
- L'équation d'état de l'eau de mer (TEOS-10) (eq.5).

Ces équations sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + fv - \frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - fu - \frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} S = -\frac{\partial (\bar{S}'u')}{\partial x} - \frac{\partial (\bar{S}'v')}{\partial y} - \frac{\partial (\bar{S}'w')}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = -\frac{\partial (\bar{T}'u')}{\partial x} - \frac{\partial (\bar{T}'v')}{\partial y} - \frac{\partial (\bar{T}'w')}{\partial z} + \frac{H_c}{\rho_0 C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (5)$$

A noter que les équations précédentes sont obtenues en considérant les hypothèses suivantes :

- Dans le système d'équation 1, sur la verticale, seule l'équilibre hydrostatique est pris en compte.
- Les équations 1,2 et 3 sont obtenues après application de l'approximation de Boussinesq et de la décomposition des vitesses de Reynolds.
- L'équation 4 est obtenue dans le cas d'un fluide incompressible.

Les hypothèses précédentes sont détaillées en annexe I. Les paramètres et variables des équations sont consignés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Paramètres et variables des équations résolues par le modèle.

u, v, w	Composantes moyennes de la vitesse en $m.s^{-1}$
ρ_0	Masse volumique (en approximation de Boussinesq) en $kg.m^{-3}$
P	Pression en Pa
f	Paramètre de Coriolis (en approximation plan β) en s^{-1}
u', v', w'	Composantes turbulentes de la vitesse (ou fluctuations) en $m.s^{-1}$
S	Salinité
T	Température
H_c	Flux solaire incident
C_p	Coefficient de chaleur massique
I(z)	Flux incident parvenant à la profondeur z ($I(z)=exp(-\lambda z)$ avec λ , coefficient d'atténuation)

En appliquant la fermeture de la turbulence de Boussinesq, les équations 1, 2 et 3 pourront se réécrire respectivement de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + fv + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - fu + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} S = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h^S \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h^S \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_v^S \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h^T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h^T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_v^T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{H_c}{\rho_0 C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (8)$$

Les coefficients A , A^T et A^S apparaissant dans les équations 6, 7 et 8 sont appelés respectivement diffusivité turbulente pour la quantité de mouvement, diffusivité turbulente pour la température et diffusivité turbulente pour la salinité (sur l'horizontale (h) et la verticale (v)).

Pour les équations 7 et 8 des conditions aux limites devront être spécifiées. Ces conditions sont rappelées en annexe I.

II.2. Implémentation du modèle à la zone d'étude

Ces équations seront donc résolues par le modèle sur une région choisie : la mer Tyrrhénienne.

II.2.1. Caractérisation de la grille

Les caractéristiques de la région étudiée ont été entrées dans un premier script ; le script romstools_param.m. Dans ce script on définira notamment :

- Les limites du domaine étudié en termes de latitude et longitude ;
- La résolution ;
- Le nombre de niveaux sur la verticale.

Ces paramètres permettront de créer une grille sur laquelle les calculs pourront être effectués. La grille ainsi créée sera caractérisée par un nombre de maille sur l'horizontal (LLm et MMm) et comme spécifié précédemment, un nombre de niveau sur la verticale (N).

ROMS utilisera des grilles du type Arakawa-C (grille particulièrement stable satisfaisant la conservation de la masse) sur l'horizontal et des coordonnées sigma généralisées sur la verticale.

Les paramètres concernant la grille sont consignés dans le Tableau 2. A noter que, dans notre cas, le nombre de maille total est de 147680, ce qui équivaut à environ 25 heures de calcul.

Tableau 2 : Paramètres de la grille.

Longitude max ($^{\circ}$ E)	16.2	Longitude min ($^{\circ}$ E)	9.0
Latitude max ($^{\circ}$ N)	43.0	Latitude min ($^{\circ}$ N)	38.0
LLm	71	MMm	65
Résolution ($^{\circ}$)	1/10	N	32

II.2.2. Caractérisation des frontières

Comme explicité dans la première partie, le modèle ROMS résout des équations et dans certains cas, une condition aux limites sera nécessaire. Cette condition dépendra de la nature de la frontière (ouverte ou fermée). La nature de la frontière choisie est à renseigner dans deux scripts : Le script make_grid.m et le script cppdefs.h. Dans le script make_grid.m les frontières ont toutes été considérées ouvertes (soit [S E N W] = [1 1 1 1]). Des conditions aux frontières ont donc été créées par le script de façon à tenir compte de l'ouverture de chacune des frontières.

Dans le deuxième script : cppdefs.h, le type de frontières est également défini. Prenons par exemple la frontière Est de la région étudiée. Cette frontière a été définie ouverte dans le premier script, des conditions aux limites ont donc été créées. Cependant, dans le deuxième script cette frontière a été désactivée (c'est-à-dire considérée fermée) car représentant une côte. Les conditions créées par le premier script n'y seront donc pas appliquées.

Finalement, les frontières ont été définies comme suit dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Paramétrisation des frontières.

Frontière SUD	Ouverte	Frontière NORD	Ouverte
Frontière EST	Fermée (côte)	Frontière OUEST	Ouverte

II.2.3. Caractérisation des pas de temps et d'espace

Le modèle a permis d'effectuer une simulation sur 10 années de 12 mois de 30 jours chacun. Les données seront sauvegardées tout les 3 jours. Les pas de temps et d'espace ont été choisis afin de respecter le critère CFL (Courant Friedrich Levy), critère indispensable à la stabilité du modèle, qui sera donné par l'équation 9.

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Le script ad_cfl.m permettra d'obtenir les pas de temps et d'espace compatibles afin de respecter le critère CFL et ces valeurs pourront être vérifiées par le calcul. A noter que ROMS utilise le time splitting ou séparation du pas de temps afin de séparer la résolution des équations primitives (pas de temps interne, Δt_i) et la résolution des ondes de gravité (pas de temps externe, Δt_e) d'où la nécessité de choisir deux pas de temps. Le nombre de pas de temps externe est renseigné par NTDFAST. Les pas de temps et d'espace choisis dans le cadre de cette étude sont renseigné dans le Tableau 4. NTIMES est la durée de la simulation et NAVG la fréquence de sauvegarde des sorties moyennées.

Tableau 4 : Pas de temps et d'espace utilisés.

Δt_e (s)	12	NTIMES (j)	3600	NTDFAST	60	Δx (km)	8,7574
Δt_i (s)	720	NDAYS (j)	30	NAVG (j)	360	Δy (km)	8,7527

III. Résultats

Après avoir renseigné la totalité des paramètres explicités dans la section précédente, le modèle a pu être lancé. Les premières sorties du modèle à analyser sont les diagnostiques, créés par le script roms_diags.m. Il faudra également prendre en compte les forçages créés au préalable par le script make_forcing.m.

III.1. Diagnostiques et forçages

Les figures représentant les forçages dans le cas de la température et de la salinité sont présentées en annexe II. Ces forçages seront également disponibles pour le vent à la surface, le flux de chaleur, le flux d'eau douce, le flux net de chaleur sensible et la radiation solaire. Néanmoins, dans le cadre de notre étude, seules la température et la salinité nous seront utiles.

Les diagnostiques sont présentés par la Figure 1. Ils permettent d'évaluer les résultats donnés par le modèle en se basant par exemple sur la conservation du volume (le modèle ne perd ni ne gagne d'eau, il reste équilibré) durant la simulation.

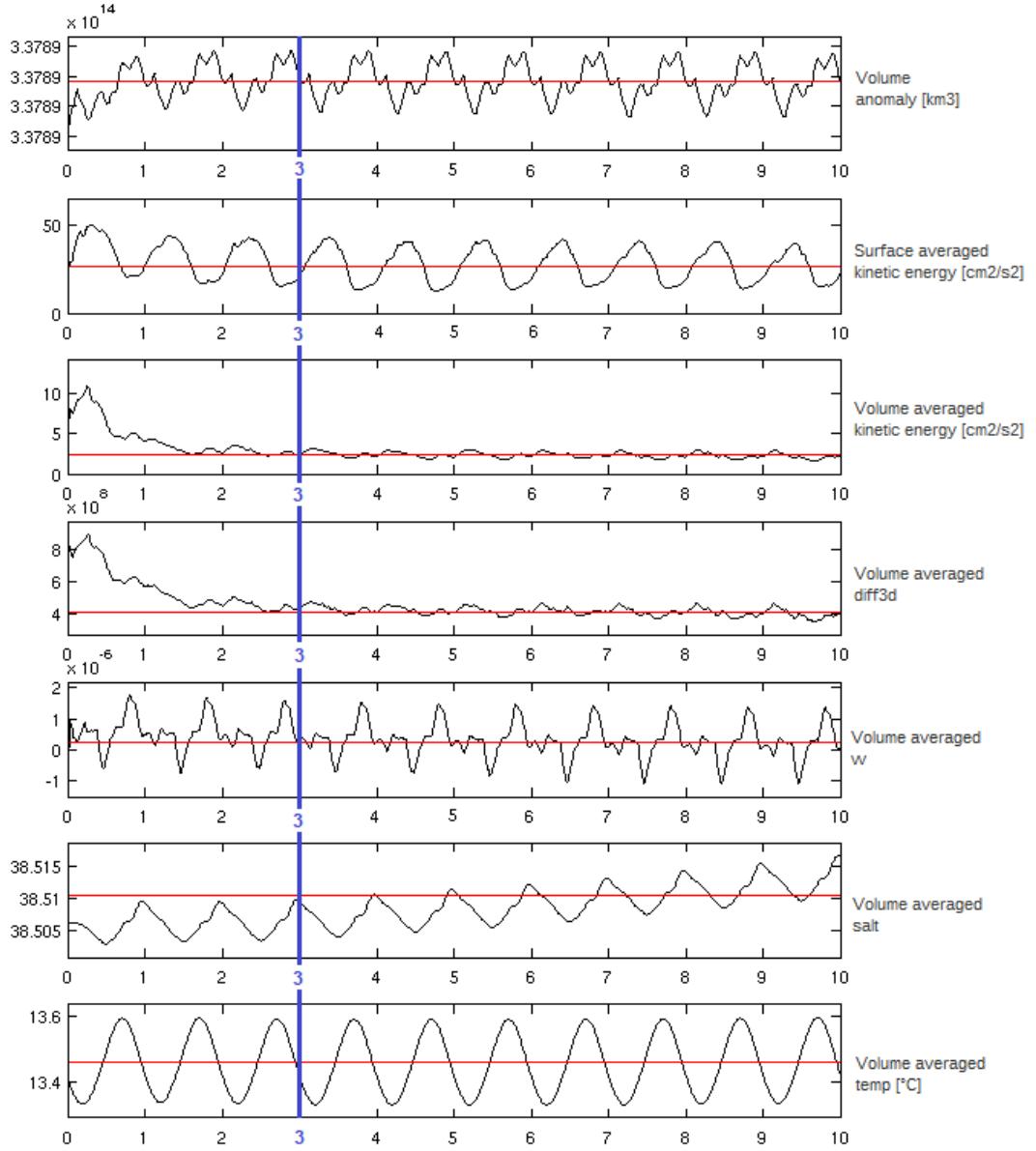


Figure 1 : Diagnostics du modèle. La droite bleue représente la fin du temps de spin up.

Les diagnostics permettent de repérer l'année à partir de laquelle le modèle n'est plus influencé par les conditions initiales. Dans notre cas, le modèle n'est plus influencé par les conditions initiales à partir de la troisième année de simulation. Dans tout ce qui suit, nous étudierons la sixième année de simulation (année pour laquelle le modèle est largement stabilisé). Ainsi sur la sixième année de simulation, une première étude de la température et de la salinité de surface a été menée (étude sur l'année), la variabilité saisonnière (hiver/été) de la circulation de surface a ensuite été analysée (étude sur la saison).

III.2. Température et salinité de surface

La température et la salinité de surface ont été moyennées sur la totalité de la sixième année de simulation et comparées aux données obtenues sur le site du CMEMS qui ont également été moyennées sur une année : l'année 2018 (Figure 2). Ces moyennes ont été effectuées à l'aide d'un script réalisé sur MATLAB. Les données du CMEMS sont également des sorties de

modèle (*Operational Mercator global ocean analysis and forecast system*) avec une résolution de 1/12 de degré.

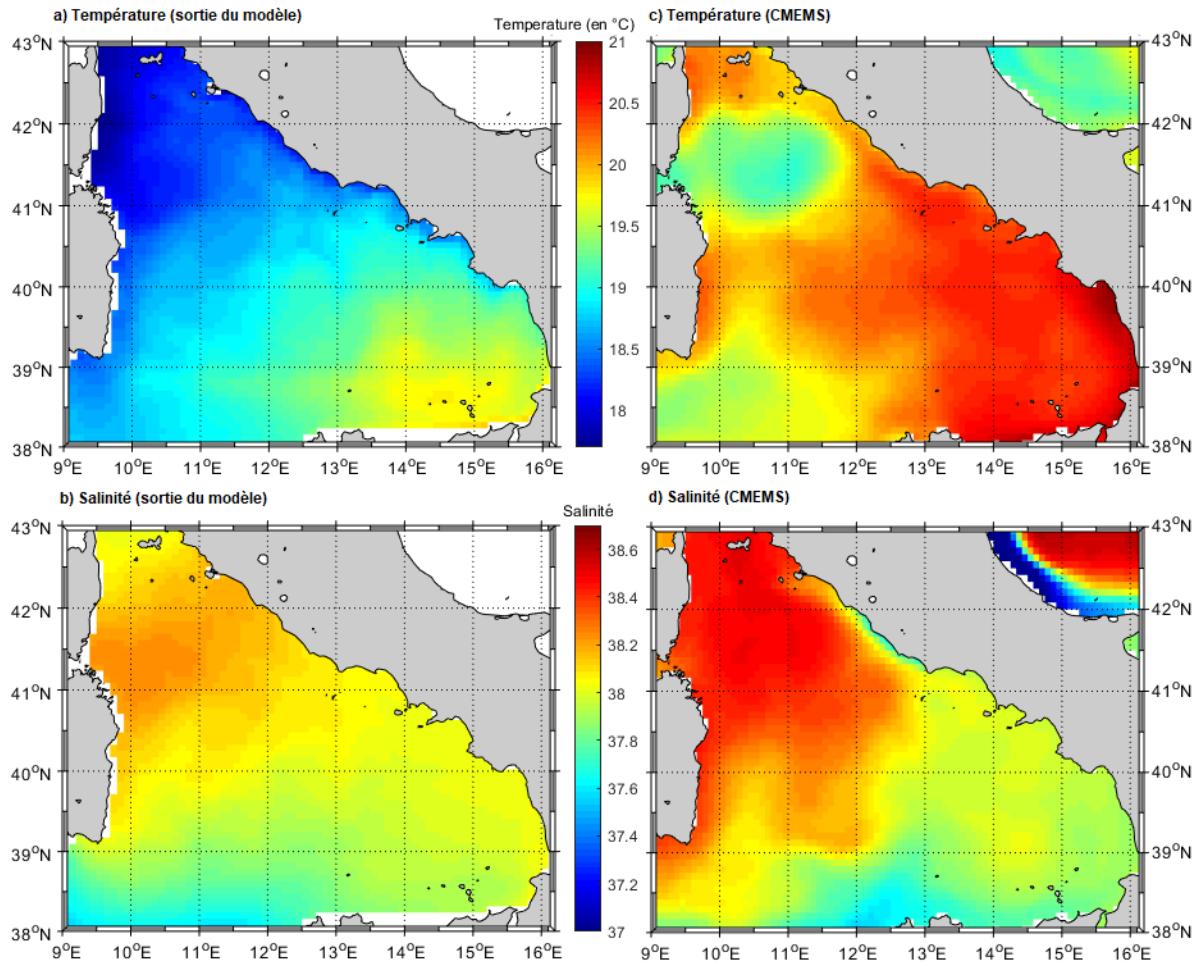


Figure 2 : Température (au-dessus) et salinité (en dessous) de surface moyennées sur l'année. Les figures a) et b) correspondent aux sorties du modèle. Les figures c) et d) correspondent aux données du CMEMS.

La Figure 2 permet donc de comparer les sorties de notre modèle aux sorties de modèle obtenues par le CMEMS. Ainsi, dans le cas d'une comparaison avec l'année 2018, notre modèle semble largement sous-estimé la température de surface plus froide que celle représentée par les données du CMEMS. Néanmoins, une tendance est conservée : la température est plus basse au nord du bassin et augmente en se déplaçant vers le sud (gradient nord-sud). Dans le cas de la salinité, notre modèle donne une bonne représentation au sud du bassin mais sous-estime largement les valeurs de salinité au nord. Une tendance, comme dans le cas de la température, est tout de même conservée : la salinité est plus forte au nord du bassin et diminue en se déplaçant vers le sud (gradient sud-nord).

III.3. Circulation de surface

Les composantes du courant ont été moyennées pour l'été et l'hiver à l'aide d'un script réalisé sur MATLAB. Les saisons ont été définies selon les forçages de température et salinité appliqués, soit pour l'hiver, du jour 15 au jour 105 et pour l'été, du jour 195 au jour 285 de la simulation. Les champs de courant moyennés sont représentés sur la Figure 3.

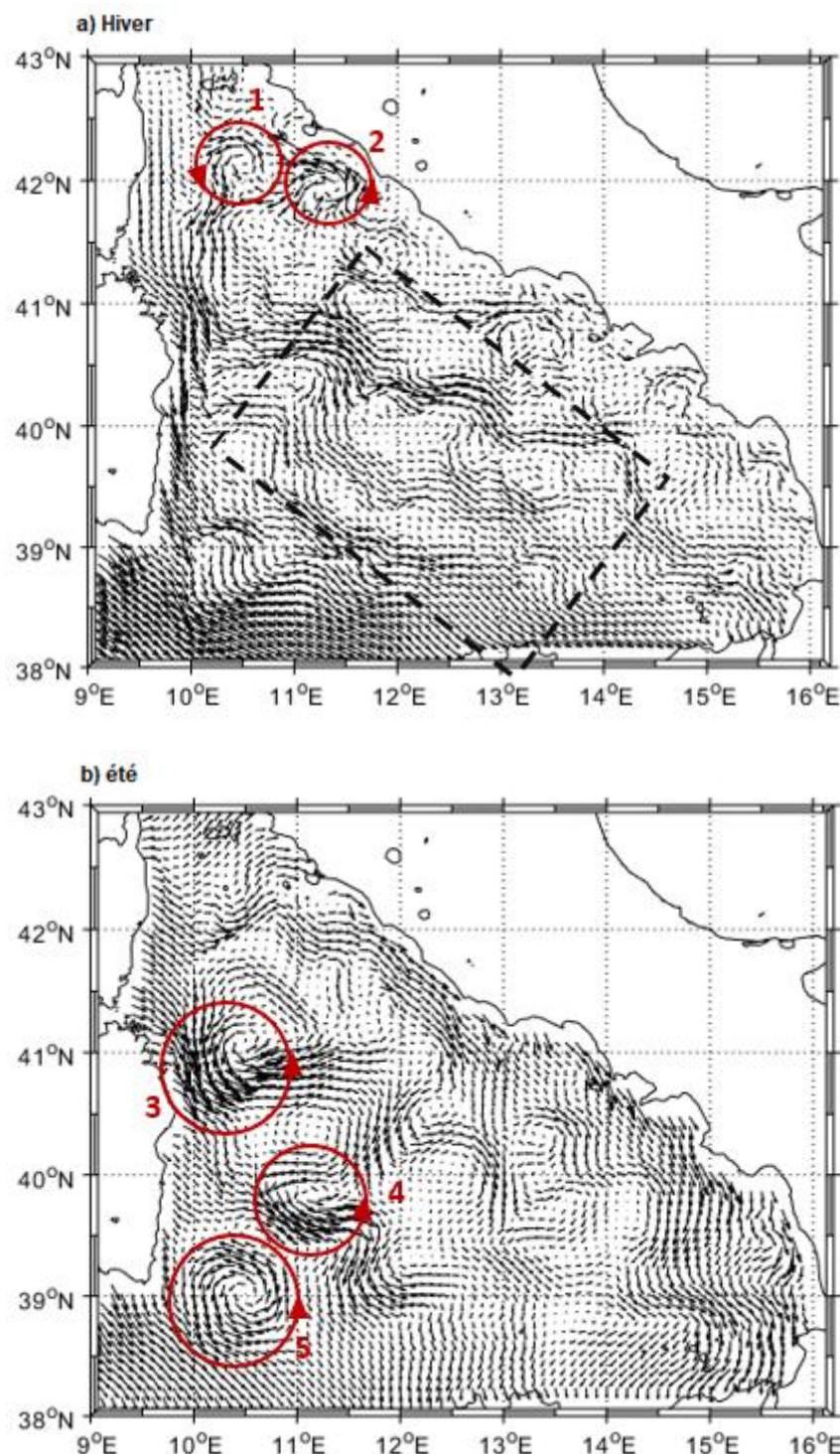


Figure 3 : Champs de courant à 10 mètres de profondeur, moyennés pour l'hiver (a) et l'été (b) de l'année 6. Les structures tourbillonnaires remarquables sont entourées en rouge. L'encadré noir repère une circulation particulière.

5 structures tourbillonnaires et une circulation particulière ont été repérées. Les structures sont plus visibles en été. En hiver, la circulation semble plus intense et désordonnée. Des branches se dirigeant vers le sud est, dans le sud du bassin (encadré noir) sont bien visibles et devront être vérifiées.

IV. Discussion

Le modèle nous a donc permis d'obtenir des résultats sur la zone implémentée. Ces résultats doivent tout de même être vérifiés avant utilisation afin de confirmer ou d'infirmer le bon fonctionnement du modèle.

IV.1. Température et salinité de surface

Dans le cas de la température et de la salinité, comme explicité précédemment, le modèle semble sous-estimer les valeurs. Les tendances principales sont malgré tout conservées : Un gradient nord-sud pour la température et un gradient sud-nord pour la salinité. De plus, notre modèle semble assez bien représenter la salinité au sud du bassin.

Néanmoins, il est important de noter que les données de salinité et de température ont pu être influencées par la définition des frontières. Prenons par exemple le cas de la température, au nord du bassin. Les résultats donnés par notre modèle montrent une température très homogène, la variation est ensuite très progressive : les données sont donc très lisses. Dans le cas des données du CMEMS, au nord du bassin, l'influence des Bouches de Bonifacio est clairement visible. En effet, une zone froide peut être observée à la sortie des Bouches. Rappelons que les Bouches de Bonifacio n'ont, dans notre cas, pas été considérées car elles ont été fermées lors de la définition de la zone d'étude. De manière plus générale, la considération ou la non-consideration de certaines zones va donc impacter les résultats obtenus.

Enfin, dans le cas de la salinité, même si le modèle semble la sous-estimé au nord, il est important de rappeler que la quantité de sel est mal gérée par le modèle comme le montre la Figure 1. Ainsi, le choix de l'année aura une influence sur la quantité de sel enregistrée et donc la correspondance avec les résultats obtenus sur le site du CMEMS.

IV.2. Circulation de surface

Le modèle permet d'obtenir une première évaluation de la circulation de surface en mer Tyrrhénienne. Néanmoins, cette circulation doit être comparée à la littérature afin d'obtenir une évaluation du modèle. La circulation saisonnière en Tyrrhénienne est rappelée en annexe 3.

Les auteurs semblent s'accorder sur la présence de structures tourbillonnaires typiques en mer Tyrrhénienne (Astraldi et Gasparini, 1994 ; Vetrano et al, 2009 ; Iacono et al, 2013). Parmi ces structures, le couple de structure cyclonique/anticyclonique crée par l'effet entonnoir que subit le vent des Bouches de Bonifacio (Artale et al, 1994), ou encore le cyclone présent au sud de la Sardaigne. Ces structures sont permanentes (Iacono et al, 2013) et devraient donc ne pas être impactées par la variabilité saisonnière de la circulation qui se manifestera principalement en modifiant l'intensité des différentes branches et structures tourbillonnaires (Astraldi et Gasparini, 1994).

En hiver, deux structures tourbillonnaires (1 et 2, Figure 3) sont visibles à l'est du bassin. De telles structures hivernales sont présentes dans les simulations de Iacono et al (2013), néanmoins, elles sont assez peu similaires à celles présentées dans cette étude. Astraldi et Gasparini (1994) considèrent une large structure cyclonique au sud de la Tyrrhénienne. Cette structure est esquissée par le modèle mais n'est pas bien lisible (encadré noir).

En été la circulation est largement modifiée. En effet, les principales structures observées se trouvent à l'ouest (structures 3,4 et 5, Figure 3). Ainsi les structures 3 et 5 peuvent être interprétées comme deux des structures typiques évoquées précédemment (respectivement, cyclone relié aux Bouches de Bonifacio et cyclone relié au sud de la Sardaigne).

La variabilité saisonnière de la circulation se manifestera principalement par une intensification de la circulation à l'ouest du bassin en été, et une intensification de la circulation au sud du bassin complétée par la mise en place d'une structure cyclonique dans la partie sud-est du bassin en hiver. Ces résultats, retracés par les représentations d'Astraldi et Gasparini (1994), semblent être également représentés par le modèle. Néanmoins, le modèle ne parvient pas à faire perdurer les structures permanentes citées par Iacono et al (2013) (structures cyclonique/anticyclonique de Bonifacio et cyclone du sud de la Sardaigne).

Enfin, dans les deux représentations, le modèle ne parvient pas à représenter les caractéristiques basiques de la circulation en Tyrrhénienne. En effet, tous les auteurs (Astraldi et Gasparini, 1994 ; Millot et Taupier-Letage, 2005 ; Vetrano et al, 2009 ; Iacono et al, 2013) s'accordent sur le fait que la circulation en Tyrrhénienne est généralement représentée par une boucle cyclonique, les eaux entrent à l'ouest de la Sicile, remontent le long de la côte italienne et rejoignent le sous-bassin Liguro-Provençal. Le modèle présente dans chacune des représentations une branche se dirigeant vers le sud en longeant la côte italienne. Cette circulation est moins marquée en hiver mais reste bien présente en été. C'est l'une des principales anomalies du modèle.

Il sera important de noter que, dans ce cas, la circulation est représentée à une profondeur de 10 mètres. Cette profondeur est encore largement influencée par le vent. Elle sera donc fortement dictée par les forçages climatiques utilisés pour effectuer la simulation.

De plus, ROMS calcule des courants géostrophiques sur la base de la méthode dynamique (méthode permettant de déduire les courants à partir de la température, de la salinité et de la pression). La méthode dynamique est largement dépendante de la définition d'une profondeur dite de no motion à partir de laquelle les courants sont forcés à 0 car supposés ralentis par les frottements du fond. Cette profondeur est fixée à 1000 mètres, elle pourra donc avoir une incidence sur les champs de courant finalement observés.

Dernièrement, il faut rappeler que la définition des frontières n'a pas été homogénéisée dans les scripts correspondants. Ce manque d'homogénéisation pourrait éventuellement être une source d'erreur pour le modèle.

V. Conclusion

Finalement, la circulation en mer Tyrrhénienne présente une variabilité à l'échelle saisonnière évidente. En hiver, une intensification de la circulation au sud du bassin ainsi que la mise en place d'une cellule de circulation cyclonique dans la partie sud-est du bassin est observée. En été, la circulation semble s'intensifier à l'est. Des structures typiques telles que le cyclone associé aux Bouches de Bonifacio ou encore le cyclone associé au sud de la Sardaigne sont bien visibles en été mais ne perdurent pas en hiver alors qu'elles le devraient. De plus le modèle ne parvient pas à représenter correctement la boucle cyclonique générale présente en Tyrrhénienne et décrite par de nombreux auteurs. De la même façon, les valeurs de température et salinité de surface sont sous-estimées par le modèle. Ainsi, des améliorations et des corrections (notamment au niveau des frontières) devront être apportées au modèle afin d'obtenir des résultats plus réalistes.

Références

- Artale, V., Astraldi, M., Buffoni, G and Gasparini, G. P. *Seasonal variability of gyre-scale circulation in the Northern Tyrrhenian Sea.* J. Geophys. Res., 1994, 99 (C7), 14127–14137.
- Astraldi, M and Gasparini, G. P. *The seasonal characteristics of the circulation in the Tyrrhenian Sea.* Coastal and Estuarine Studies, 1994, 1, 115-115.
- GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024, CMEMS. Consulté le 7 mai 2019.
Disponible sur Internet : http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024
- Iacono, R., Napolitano, E., Marullo, S and Artale, V. *Seasonal Variability of the Tyrrhenian Sea Surface Geostrophic Circulation as Assessed by Altimeter Data.* Journal of physical oceanography, 2013, 43, 1710-1732.
- Millot, C and Taupier-Letage, I. *Circulation in the Mediterranean Sea.* Hdb Env Chem, 2005, 5, 29–66.
- Vetrano, A., Napolitano, E., Iacono, R., Schroeder, K and Gasparini, G. P. *Tyrrhenian Sea circulation and water mass fluxes in spring 2004: Observations and model results.* Journal of geophysical research, 2010, 115.

Annexe I : Hypothèses utilisées et conditions aux limites.

Equilibre hydrostatique

Sur la composante verticale du système d'équation de la conservation de la quantité de mouvement, seul l'équilibre hydrostatique est considéré. Cet équilibre est le suivant :

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$$

Approximation de Boussinesq

Boussinesq considère que la masse volumique ρ peut être écrite sous la forme :

$$\rho = \rho_0 + \rho'(x, y, z, t) \quad \rho_0 \gg \rho'$$

Avec ρ_0 , une masse volumique de référence et ρ' , une fluctuation. Cette approche permet de considérer, sur la composante verticale, la contribution de la poussée d'Archimède.

La pression (P) pourra également être écrite sous cette forme.

Décomposition de Reynolds

Pour étudier une vitesse moyennée sur la période de temps du phénomène considéré et non une vitesse instantanée comme le permettent les équations de Navier Stokes, Reynolds propose de décomposer la vitesse de la façon suivante en une composante moyenne ($\bar{}$) et une fluctuation ($'$). Les trois composantes du vecteur vitesse pourront donc se réécrire :

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' & \bar{u} &\gg u' \\ v &= \bar{v} + v' & \bar{v} &\gg v' \\ w &= \bar{w} + w' & \bar{w} &\gg w' \end{aligned}$$

Conditions aux limites

Des conditions aux limites (surface et fond) doivent être implémentées pour les équations de conservation de la chaleur et du sel.

Dans le cas de la conservation de la chaleur, ces conditions concernent le terme $A_v^T \frac{\partial T}{\partial z}$ et sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \left(A_v^T \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{Surf} &= H_s + H_e + H_l + (1 - T_r)H_c \\ \left(A_v^T \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{Fond} &= 0 \end{aligned}$$

Avec H_s = Flux de chaleur sensible, H_e = Flux de chaleur latente, H_l = Flux radiatif d'ondes longues, H_c = Flux radiatif d'ondes courtes et T_r = Coefficient de transmission.

Dans le cas de la conservation du sel, ces conditions concernent le terme $A_v^S \frac{\partial S}{\partial z}$ et sont les suivantes :

$$\left(A_v^S \frac{\partial S}{\partial z} \right)_{Surf} = (E - P)S$$

$$\left(A_v^S \frac{\partial S}{\partial z} \right)_{Fond} = 0$$

Avec E = évaporation et P = précipitations.

Annexe II : Forçages appliqués au modèle : température et salinité de surface.

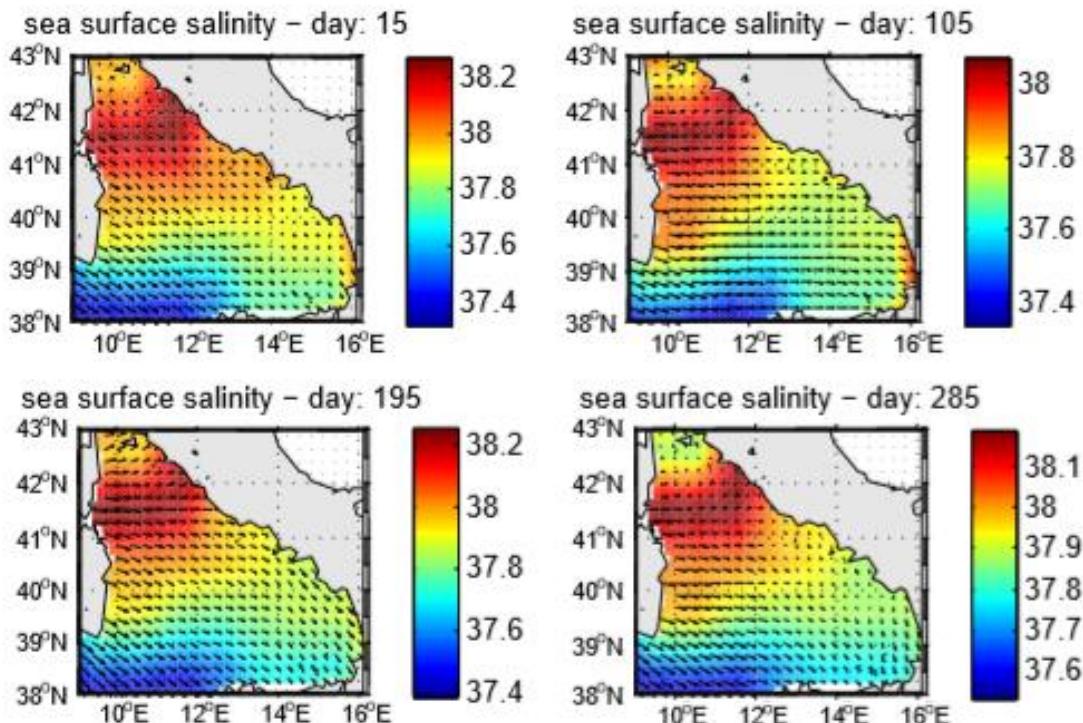


Figure I : Forçages appliqués au modèle : Salinité de surface et vent (flèches).

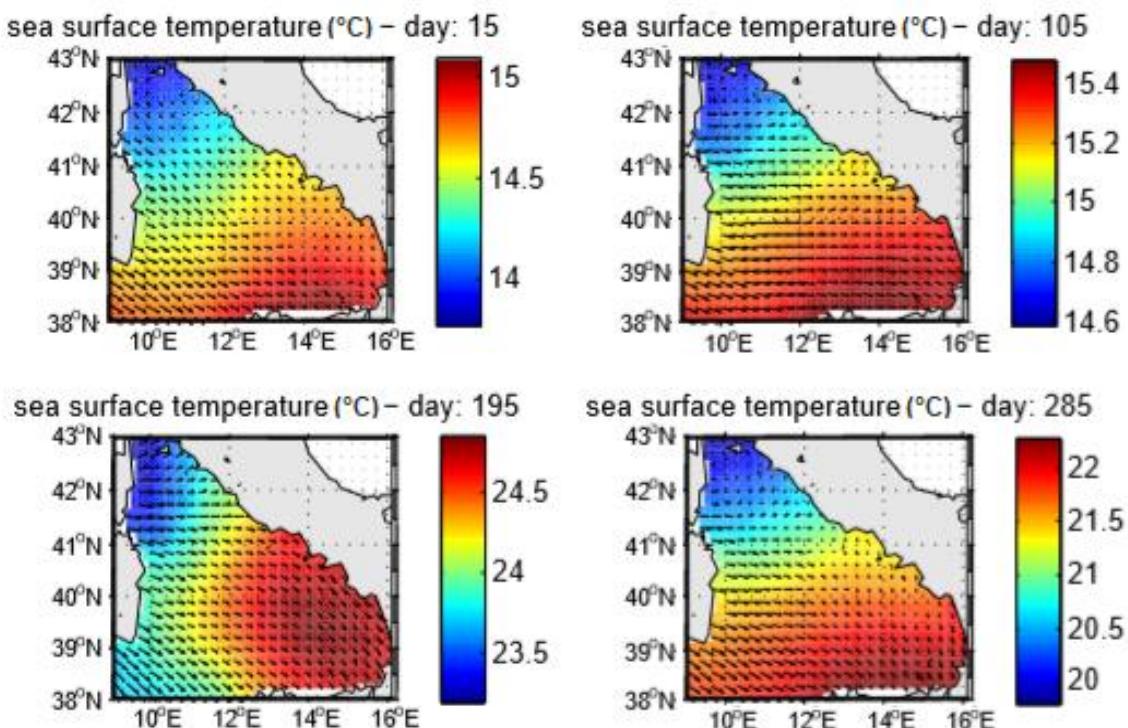


Figure II : Forçages appliqués au modèle : Température et vent (flèches).

Annexe III : Circulation en mer Tyrrhénienne.

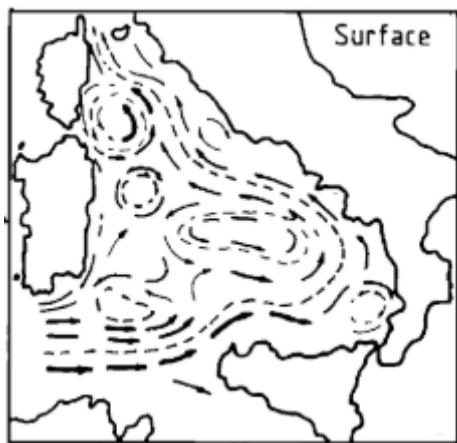


Figure III : Circulation hivernale de surface en mer Tyrrhénienne (tirée d'Astraldi et Gasparini, 1994).

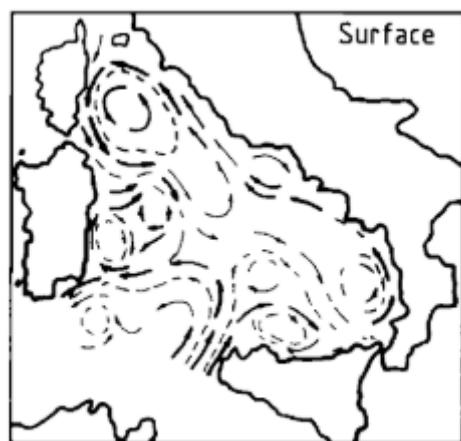


Figure IV : Circulation estivale de surface en mer Tyrrhénienne (tirée d'Astraldi et Gasparini, 1994).