

Master 1 Sciences de la Mer
Spécialité Océanographie Physique et Biogéochimique
Institut Pythéas — Aix-Marseille Université

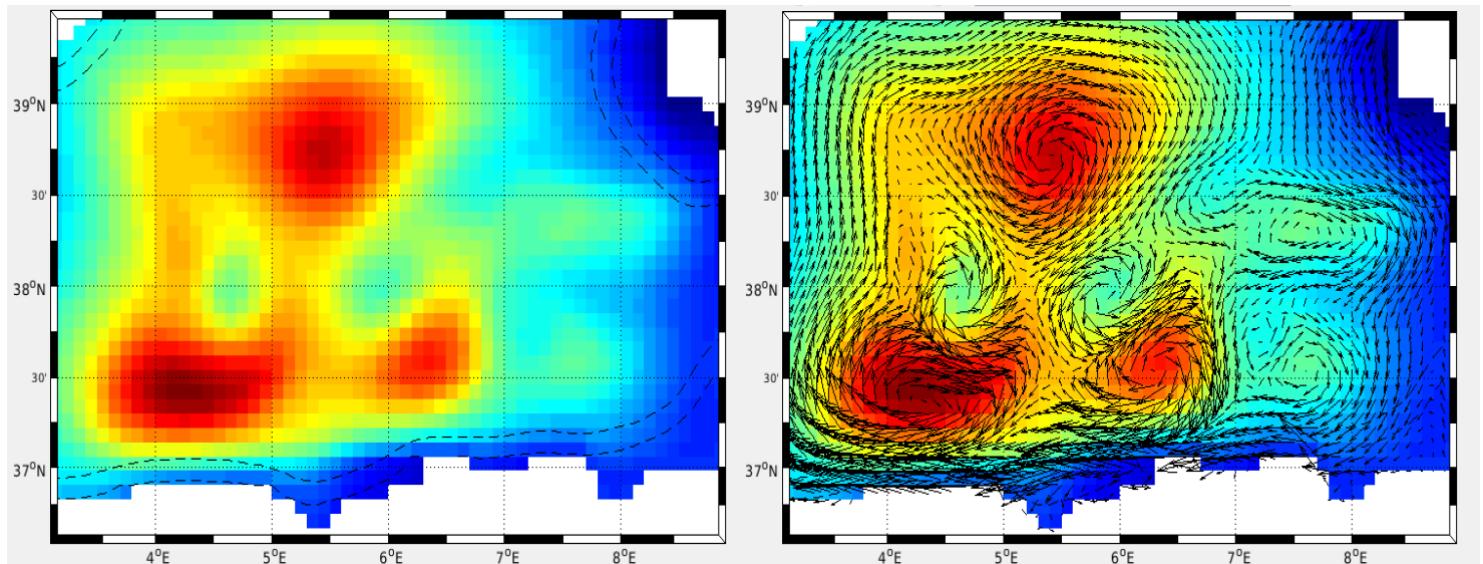
2019 – 2020

OPB 205 : Modélisation 3D océanique

Pauline MARTINOT

Avril 2020

**Variabilité intra-annuelle de l'hydrodynamisme de surface et
observation des structures tourbillonnaires de méso-échelle sur
la côte Algérienne en Méditerranée Sud-Occidentale à l'aide du
modèle CROCO**



Résumé

Le modèle de simulation de la circulation océanique côtière et régionale CROCO est implémenté pour la région Sud-Occidentale de Méditerranée. L'objectif de cette étude est d'observer les processus de formation de structures tourbillonnaires de méso-échelles communément appelés *eddies*. Le modèle se montre performant pour une fine résolution de la dynamique côtière. Les gradients de température spécifiques de cette région et du transport des masses d'eau par les eddies sont correctement représentés par le modèle en comparaison des études précédentes (Benzohra & Millot, 1995).

Cette étude nous montre que l'utilisation du modèle CROCO convient à une modélisation côtière et hauturière de Méditerranée. En effet, la région ne présente pas de zone sensible aux défaillances du modèle lors d'apports d'eau douce et de présence de glace. Cependant, la comparaison avec l'étude de Aulicino et al. (2018) nous montre l'importance des paramètres d'initialisation et des paramètres de référence pour le calcul et la représentation des résultats. Une prochaine étude pourrait coupler ces performances de modélisation hydrodynamique de surface avec des données biogéochimiques pour évaluer l'impact du processus sur la biologie marine.

Absract

The coastal and regional ocean circulation simulation model CROCO was implemented for the South-Western Mediterranean region. The objective of this study is to observe the process of formation of mesoscale structures commonly known as *eddies*. The model proved its efficiency for a fine resolution of coastal dynamics. The temperature gradients, specific to this region, and the transport of water bodies by eddies are correctly represented by the model in comparison with previous studies (Benzohra & Millot, 1995).

This study shows that the use of CROCO model is suitable for coastal and offshore modelling in the Mediterranean. Indeed, the region doesn't present an area sensitive to model failures like freshwater inflows and presence of ice. However, a comparison with the study made by Aulicino et al. (2018) demonstrates the importance of initialization and reference parameters for the calculation and representation of results. A future study could couple this surface hydrodynamic modelling performance with biogeochemical data to assess the impact of the process on marine biology.

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
1.1 GENERALITES	1
1.2 DESCRIPTION GEOGRAPHIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	1
2. MATERIEL ET METHODE	2
2.1 MODELE UTILISE	2
2.2 PARAMETRISATION DU MODELE POUR LA ZONE D'ETUDE	5
2.2.1 <i>Choix de la zone et grille utilisée</i>	5
2.2.2 <i>Conditions aux frontières</i>	5
2.2.3 <i>Caractérisation des pas de temps et d'espace</i>	6
3. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	7
3.1 DIAGNOSTIQUES DU MODELE.....	7
3.2 VARIATION INTRA-ANNUELLE DE TEMPERATURE ET FORMATIONS DES <i>EDDIES</i>	8
4. CONCLUSIONS	10
BIBLIOGRAPHIE	10
ANNEXE I : SCHEMA GLOBAL DE CIRCULATION EN MEDITERRANEE	I
ANNEXE II : RESUME ET EXPLICATION DES VARIABLES DEFINIES DANS LES ROUTINES MATLAB	II
ANNEXE III : SCRIPT MATLAB UTILISE POUR LA REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS DE LA SIMULATION	III

1. Introduction

1.1 Généralités

Le plateau continental Algérien est une région caractérisée par un hydrodynamisme complexe, constitué notamment d'un courant longeant la côte d'ouest en est et de tourbillons transportant les masses d'eau de cette partie du bassin Méditerranéen.

Les problématiques liées à cette région ont été abordée de nombreuses fois, et les analyses de ce courant et des formations en dérivant ont évolué avec la modélisation et les campagnes de mesures au fil des années. Dans le cadre de cette unité d'enseignement, la variation interannuelle de ces formations sera représentée à l'aide du modèle CROCO dans une simulation climatologique de 10 années.

Pour réaliser cette étude, nous avons employé le modèle CROCO (Coastal and Regional Ocean Community model) à partir de la suite CROCOTOOLS. Ce modèle de circulation océanique nouvelle génération est basé sur plusieurs autres systèmes : ROMS_AGRIF, MARS3D et HYCOM. Un des objectifs les plus ambitieux de CROCO est de résoudre les échelles très fines, en particulier dans les zones côtières, et leurs interactions avec les échelles plus grandes.

Il permet de réaliser des simulations régionales dans de nombreux secteurs de l'océan planétaire. Comme tout modèle numérique, le modèle CROCO présente des avantages à son utilisation ainsi que quelques obstacles à la représentation de certaines zones, notamment les régions prises par les glaces, ou encore les zones de faible salinité sous l'influence de grands fleuves. Tout au long de cette analyse, nous comparerons nos résultats à l'étude effectuée par Aulicino et. al en 2018 « *Monitoring the Algerian Basin through glider observations, satellite altimetry and numerical simulations along a SARAL/AltiKa track* ».

1.2 Description géographique et hydrodynamique de la zone d'étude

La circulation en Méditerranée peut être décrite comme constituée de deux grands gyres cycloniques longeant les bassins occidental et oriental. Dans chaque bassin, la partie sud de ces gyres, le courant Algérien et le courant Libyo-égyptien, sont nettement instables.

Ils génèrent à méso-échelle des tourbillons anticycloniques se propageant à une vitesse de quelques km par jour (soit quelques cm/s) mais peuvent également rester stationnaires pendant des semaines ou des mois.

Le courant entrant en Méditerranée à Gibraltar est dévié sur sa droite par la force de Coriolis, et longe la côte Algérienne dans le bassin Occidental. Des tourbillons de méso-échelle se forment, issus de l'instabilité de ce courant côtier.

Cette étude se porte sur la côte algérienne située entre la Sardaigne et les îles Baléares en Méditerranée Sud-Occidental. Le courant Algérien et les tourbillons générés dans cette région ont un rôle majeur dans la circulation des masses d'eau.

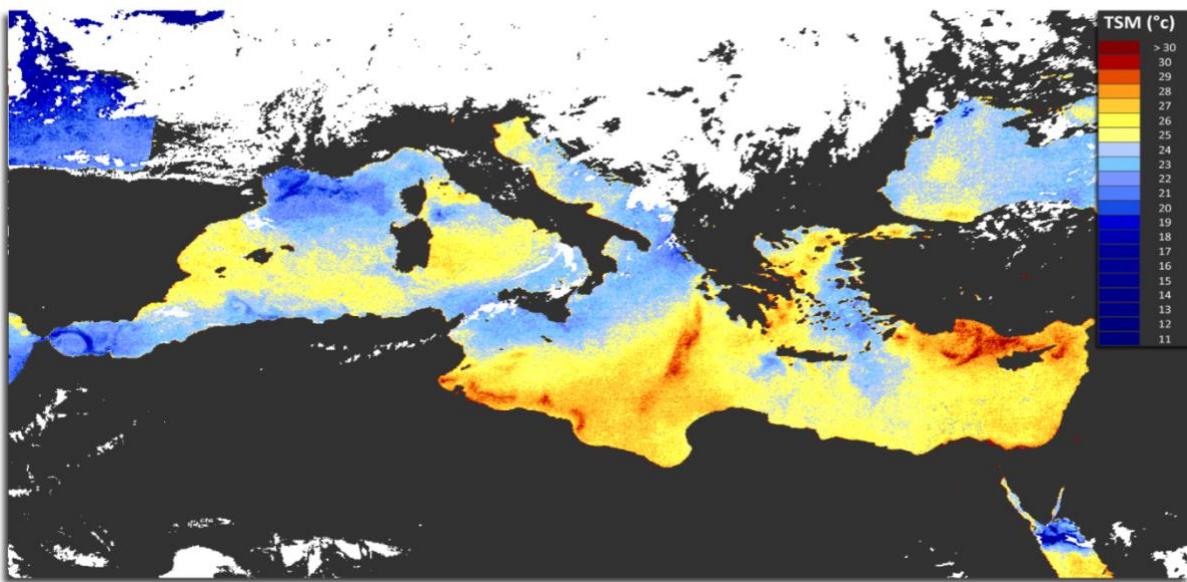


Figure 1. Carte du 19/07/2005 des températures de surface (°C) de Méditerranée obtenu par satellite. (<https://e-cours.univ-paris1.fr>) La zone d'étude est encadrée en rouge.

Ces tourbillons grands et profonds sont freinés dans leur propagation vers l'est par l'élargissement des plateaux tunisien et sarde. Ils sont donc contraints par la topographie du bassin à dériver vers le large et resteront piégés dans le sous-bassin Algérien.

La plupart d'entre eux pourront avoir des durées de vie jusqu'à environ 3 ans (Puillat et al. 2002). L'eau d'atlantique ainsi transportée et dispersée se propagera vers le courant Liguro-Provencal et le courant Catalan, formant le front Nord-Baléares au centre du bassin.

2. Matériel et méthode

2.1 Modèle utilisé

Le modèle CROCO qui a été utilisé pour cette étude résout les équations primitives de Navier-Stokes couplées aux équations de conservation. Pour ce faire, l'équation d'état de l'eau de mer fournit par TEOS 10 a été utilisée. Différentes hypothèses ont été formulées pour la construction du modèle :

- La compensation entre le gradient vertical de pression et l'accélération de la pesanteur (équilibre hydrostatique sur la composante verticale du mouvement)
- L'approximation de Boussinesq : la masse volumique peut être définie comme la somme d'une masse volumique fixe ρ_0 à laquelle s'ajoute une petite variation ρ' ($\rho' \ll \rho_0$)
- Les équations RANS sont utilisées (hypothèse de la fermeture Newtonienne de la turbulence)

En se basant sur ces 3 hypothèses, les équations (1) à (6) sont résolues par CROCO et la suite CROCOTOOLS.

L'équation de conservation de la quantité de mouvement :

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

L'équation de conservation du sel :

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

L'équation de conservation de la chaleur :

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

L'équation de continuité :

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

L'équation d'état de l'eau de mer (TEOS 10) :

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

Les paramètres de ces équations sont détaillés dans le Tableau 1.

	Paramètres	Unités
<u>u</u> , <u>v</u> , <u>w</u>	Composantes moyennes de la vitesse	<u>m.s-1</u>
<u>u'</u> , <u>v'</u> , <u>w'</u>	Composantes turbulentes de la vitesse	<u>m.s-1</u>
<u>ρ₀</u>	Masse volumique (partie fixe en approximation de Boussinesq)	<u>kg.m-3</u>
<u>f</u>	Paramètre de Coriolis (approximation de plan β)	<u>s-1</u>
<u>T</u>	Température	
<u>S</u>	Salinité	
<u>P</u>	Pression	<u>Pa</u>
<u>Cp</u>	Coefficient de chaleur massique	
<u>Hc</u>	Flux solaire incident	
<u>I(z)</u>	Flux incident parvenant à la profondeur z	

Tableau 1. Détails des paramètres des équations 1 à 5.

Les routines MATLAB contenues dans CROCO TOOLS iront chercher les données nécessaires à la résolution des équations dans des bases de données américaines composées sur une cinquantaine d'année de mesure (fichiers COAD, TOPO et WOA gérés par la NOAA).

Le fichiers COAD (Comprehensive Ocean & Atmospheric Dataset) contient les données de forçage atmosphérique (flux de chaleur et frottement du vent) à l'échelle mondiale. Le fichier TOPO contient lui la topographie des fonds marins avec un résolution de 2' soit 3,6km. Enfin, le fichier WOA (World Ocean Atlas) contient les données de température et de salinité sous forme de carte représentative de l'océan global avec une résolution d'un quart de degrés soit environ 25km. Ces données sont très précieuses pour notre modèle, car elles nous permettent d'établir les conditions aux frontières et l'initialisation des paramètres dans notre région. La résolution de ces 5 équations est réalisée par discréétisation sur le maillage. Cette dernière est liée au schéma numérique employé par le modèle et à la grille utilisée. Sur l'horizontale, CROCO utilise une grille d'Arakawa C (particulièrement stable, satisfaisant la conservation de la masse) comme expliqué sur la Figure 2, A., et sur la verticale un système de coordonnées sigma généralisées (Figure 2, B.), où le nombre de maille suit la topographie de la zone.

NB : Les sigmas normales sont utiles en zone côtière, mais les mailles s'élargissant vers le large peuvent empêcher la visualisation de la thermocline.

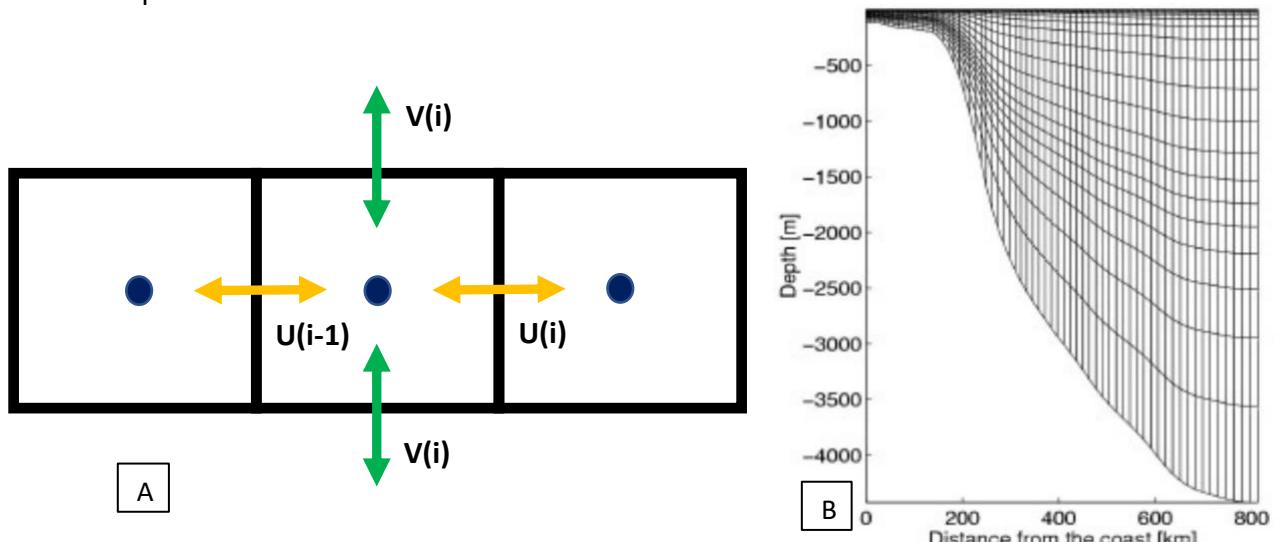


Figure 2. Schéma explicit d'une grille d'Arakawa C (A) et d'un système de coordonnées sigma (B) issue de la présentation de P.Penven à l'École d'été de l'Université de Toulon sur la modélisation en 2006.

Les processus qui apparaissent dans la modélisation peuvent être séparés en deux classes : les processus lents (3D) et les processus rapides (2D). Pour pallier ce problème, la technique du time-splitting sera utilisée pour isoler les processus et les suivre avec un pas de temps adapté. Il sera donc défini deux pas de temps : un pas de temps dit « externe » correspond au transport 2D, intégré dans un pas de temps dit « interne », plus long, qui correspond au transport 3D.

Un des principaux objectifs dans la construction du modèle est la non-amplification systématique des perturbations lors des calculs de résolutions. Cette stabilité est déterminée par le critère CFL pour le pas de temps externe. Avant de lancer une simulation, il est donc primordial de vérifier que les calculs respectent ce critère explicité par l'équation (6).

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

2.2 Paramétrisation du modèle pour la zone d'étude

2.2.1 Choix de la zone et grille utilisée

La première décision à prendre dans la paramétrisation du modèle et le choix d'une zone d'étude dont les dimensions sont adaptées à CROCO (Tableau 2).

Longitude (°E)		Latitude (°N)	
minimum	maximum	minimum	maximum
3.1	8.9	36.6	39.5

Tableau 2. Limites géographiques de notre zone d'étude.

Les caractéristiques de cette région ont été entrées dans le script MATLAB crocotools_param.m, où nous avons notamment défini :

- Les limites du domaine étudié (Tableau 2)
- La résolution (Tableau 3)
- Le nombre de niveau sur la verticale (Tableau 3)

LLM	59
MMm	38
Résolution (°)	1/10
N	30

Tableau 3. Paramètres de la grille.

L'ensemble des dénominations utilisées par les routines MATLAB ainsi que différents scripts et leur utilisation sont explicités dans l'Annexe II. Le domaine de calcul a ainsi été défini dans le script param.h, caractérisée par un nombre de maille sur l'horizontal (LLm et MMm) et un nombre de niveau vertical N. Les calculs seront résolus en utilisant une grille d'Arakawa C sur l'horizontale et des coordonnées sigma sur la verticale comme expliqué précédemment.

2.2.2 Conditions aux frontières

Pour que le modèle puisse résoudre les équations à chaque pas de temps et d'espace, nous devons lui fournir dans certains cas une condition limite. Cette condition dépendra de la nature de la frontière concernée, ouverte ou fermée, et sera spécifiée dans le fichier de paramétrisation cppdefsh.h (contenu dans Run_Med_HR). Dans un premier temps, les frontières sont définies toutes ouvertes, c'est ce qu'on appelle OBC pour OPEN Boundaries Conditions (soit [S E N W] = [1 1 1 1]) car c'est un modèle régional et non global. Ensuite, nous définissons dans cppdefsh.h la nature des frontières de notre zone d'étude plus spécifiquement, en explicitant sa nature fermée, si nous sommes sur une côte par exemple. Nous avons donc également dû définir ces « frontières numériques » pour notre modèle, en fixant notamment l'état des frontières de la manière suivante : fermée sur le bord Sud, ouvertes sur les bords Est, Nord et Ouest. Enfin, notre zone a été stratégiquement positionnée pour faire correspondre les angles Nord-Est et Nord-Ouest aux îles

Baléares et à la Sardaigne. Le fichier `croco_frc.nc` contient les forçages par flux de mouvement, de chaleur ou d'eau douce. Enfin, le fichier `croco_clm.nc` est utilisé pour calculer conditions initiales et au bord du domaine en allant chercher les données des DATABASE et en les interpolant.

2.2.3 Caractérisation des pas de temps et d'espace

Après avoir spécifié la zone d'étude, le type de grille utilisée et les conditions aux frontières, nous devons définir des pas de résolution en temps et en espace. Notre modèle effectuera une simulation de 10 années climatologiques, c'est-à-dire de 10 années de 12 mois et de 30 jours par mois.

Dans un premier temps, nous nous intéressons au maillage temporel. Pour fixer ce maillage, nous définissons le pas de temps interne, puis le rapport NDTFAST (rapport du pas de temps interne et externe). Le calcul du fameux critère CFL effectué grâce au script `ad_cfl.m` et vérifié à la main nous donne donc :

Δt_i	NDTFAST	Δt_e
1080 (s)	60	18 (s)

Ces valeurs de pas de temps ont été définies grâce au script MATLAB, en vérifiant qu'elles soient compatibles avec les pas d'espace.

Les valeurs de ces paramètres sont explicitées dans le Tableau 4.

NTIMES (j)	Δt_i	Δt_e
3600	1080 (s)	18 (s)
NDAYS (j)	Δx min (km)	Δx max (km)
30	8.5663	8.9335
NAVG (j)	Δy min (km)	Δy max (km)
360	8.5806	8.9288

Tableau 4. Pas de temps et d'espace utilisés dans le modèle.

Nous avons choisi une résolution très fine ($dl=1/10$) du maillage spatial impliquant un quadrillage de 59 mailles de latitude et 38 mailles de longitude.

Notre modèle va donc effectuer la résolution des équations primitives sur $7,17 \times 10^4$ cellules de calcul :

$LLm * MMm * N$ (nombre de niveaux verticaux) = $59 * 38 * 32 = 7,17 \times 10^4$ cellules de calcul.

Le temps de calcul pour notre simulation est de 22h.

Enfin, une dernière précaution a été prise avant le lancement du modèle. Le cluster de calcul du MIO a un système d'exploitation qui maximise le cœur de calcul. Au lieu de faire une modélisation conséquente de 12 mois, nous allons donc enchaîner les simulations courtes d'un mois pour pouvoir utiliser la machine la moins occupée du cluster et donc réduire notre temps de calcul. Il s'agit également d'une mesure de sécurité : si la simulation s'arrête, les fichiers jusqu'au dernier mois d'activité auront été sauvegardés et l'année entière ne sera pas perdue. A chaque lancement de simulation d'un mois, nous spécifions donc à la machine que le fichier d'initialisation est remplacé par le dernier fichier sauvegardé (correspondant au mois précédent).

3. Résultats et discussions

3.1 Diagnostiques du modèle

Les diagnostiques des paramètres du modèle sont calculés par le script `croco_diags.m` et représentés graphiquement par `plot_diags.m`. Les diagnostiques sont effectués pour toute la durée de la simulation, soit du premier instant de calcul jusqu'au 12^{ème} mois de l'année 10 de notre simulation (Figure 3). L'analyse de ces diagnostiques nous permet principalement de déterminer le temps de *spin-up* de notre modèle, c'est-à-dire la durée nécessaire pour qu'il se stabilise et atteigne un état d'équilibre dans ses calculs. La variable de salinité permet d'identifier clairement l'instant où l'équilibre est atteint (Figure 3).

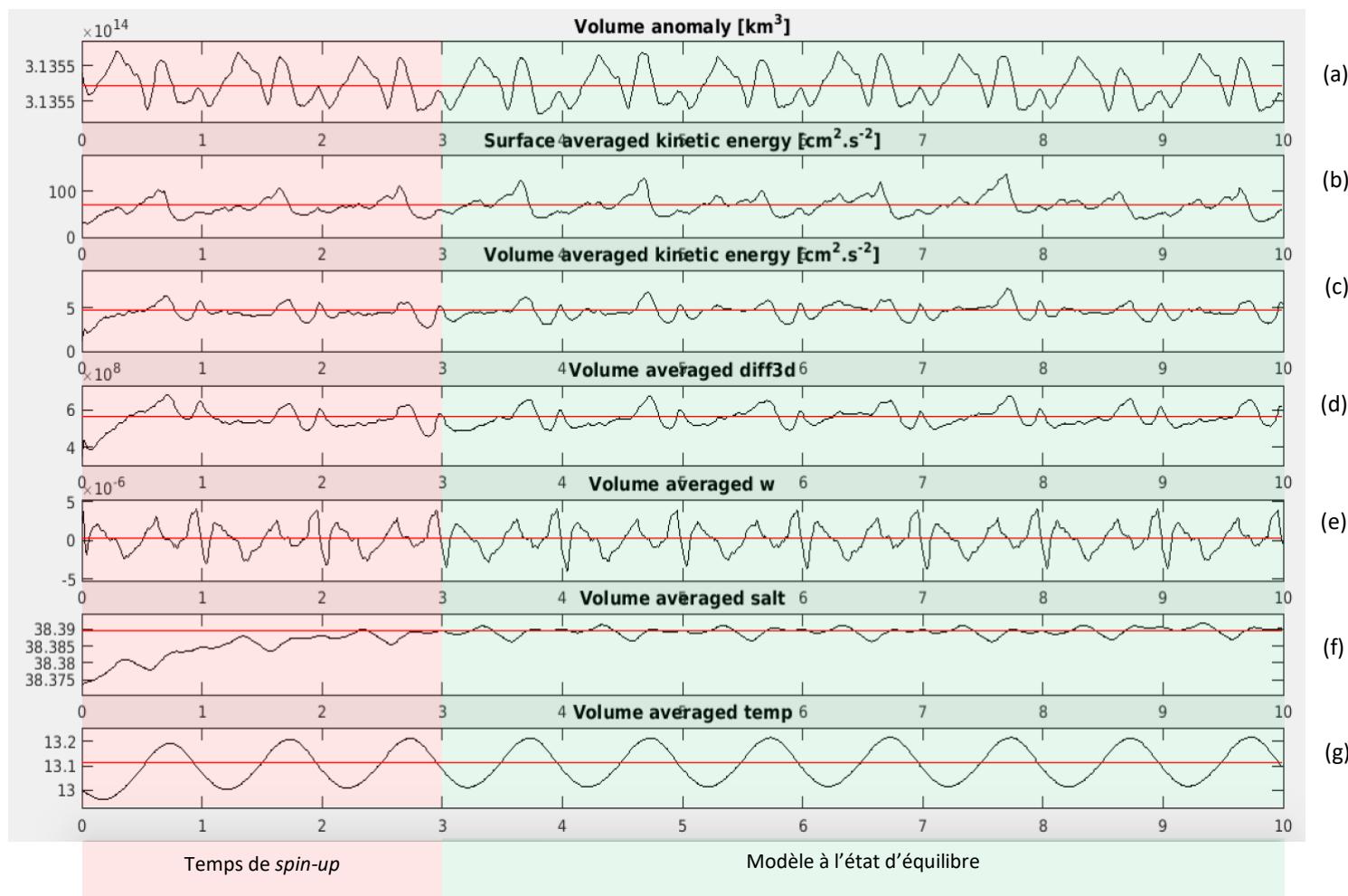


Figure 3. Diagnostiques du modèle illustrant (a) l'anomalie de volume, (b) l'énergie cinétique moyennée sur la surface, (c) l'énergie cinétique (d) la diffusivité 3D, (e) la vitesse verticale, (f) la salinité et (g) la température moyennée sur le volume.

3.2 Variation Intra-annuelle de température et formations des *Eddies*

De nombreuses variables ont été calculées lors de la simulation, et les fichiers « *avg* » en résultats seront priorisés pour l'interprétation des résultats. Dans cette étude, nous nous concentrerons dans un premier temps aux variations intra-annuelle de température, puis nous procéderons à une analyse courantologie pour observer la formation des tourbillons de méso-échelle caractéristiques de la zone (Aulicino et al., 2018).

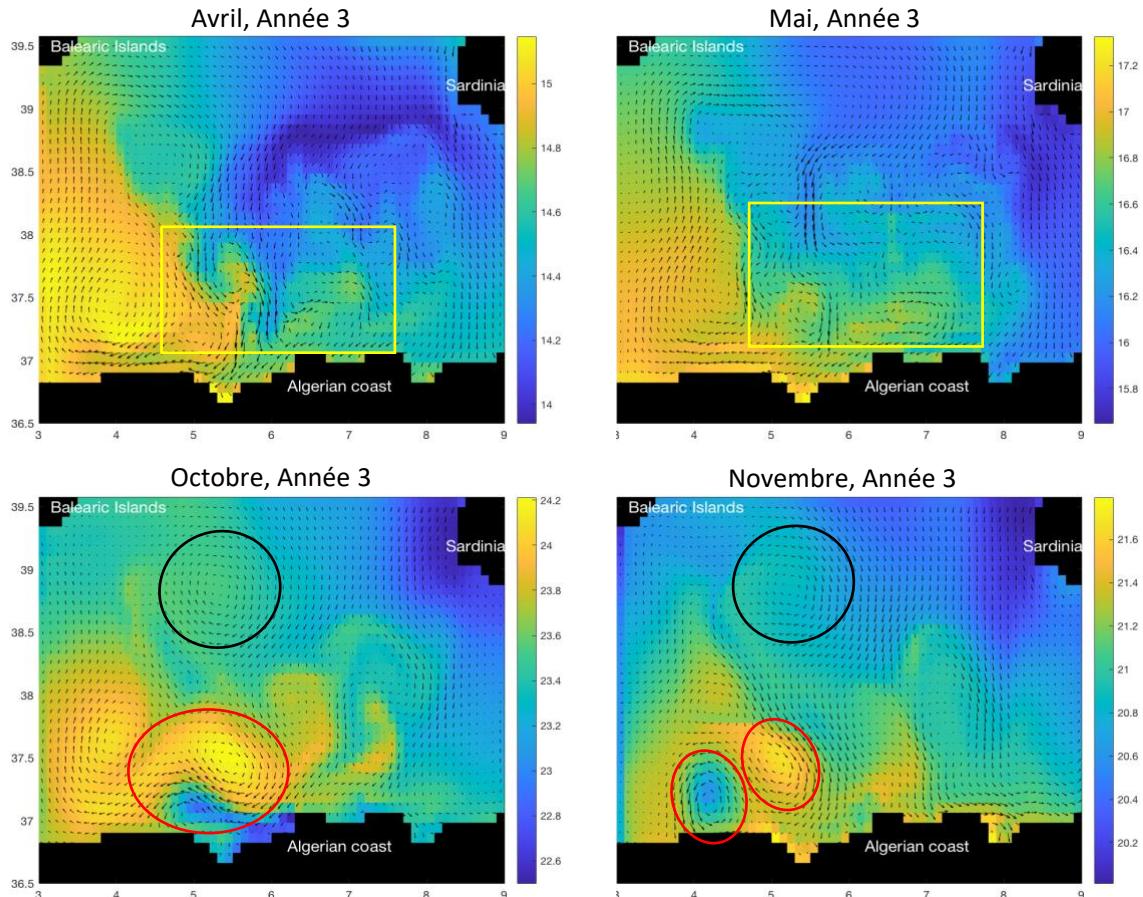


Figure 4. Représentation géographique de la température de surface et courantologie de notre zone d'étude simulé par notre modèle aux mois d'Avril, Mai, Octobre et Novembre de la troisième année de simulation. Figure MATLAB.

La température moyenne de surface obtenue pour notre région est graphiquement explicitée en sélectionnant quatre mois de la troisième année (Figure 4). Cette première représentation globale nous montre une succession saisonnière pertinente des températures : l'été est marqué par un réchauffement global de température tandis que l'hiver présente des températures plus froides. La première observation de ces graphiques, en se basant uniquement sur les variations de température de surface, laisse transparaître des formations tourbillonnaires particulièrement visibles aux mois possédant de forts gradients de température. Les encadrements géométriques ont été rajouté à la main pour souligner les similitudes et l'évolution des structures tourbillonnaires anticycloniques autour desquelles le courant circule. Les mois d'Octobre et Novembre montrent explicitement la formation de deux Eddies (cercles rouges, Figure 4), un plus « chaud » à 21.6°C et un plus « froid » à 20.6°C. Un fort gradient de température comme celui-ci sur une petite distance montre le pouvoir de piégeage des tourbillons, et l'isolement progressif des masses d'eau les unes des autres (Béranger et al. 2005). Enfin, entre les îles Baléares et la Sardaigne un troisième tourbillon est observable (cercle noir, Figure 4), plus large.

L'étude de Aulicino et al. (2018) a également identifié ces structures de méso-échelle et ce fort gradient de températures, caractéristiques d'un transport des masses d'eau forcé par la topographie de la région. Le modèle semble donc avoir correctement représenté les forts gradients de température sur des distances courtes. Les campagnes ELISA (Eddies and Leddies Interdisciplinary Study of Algeria) réalisées par le COM (1997-1998) ont confirmé l'importance de la topographie de cette zone dans le devenir de ces structures : l'absence de talus continental au large de l'Algérie et la barrière bathymétrique posée par le Canal de Sardaigne, qui sont des caractéristiques fondamentales de cette région, poussent ces *eddies* au large.

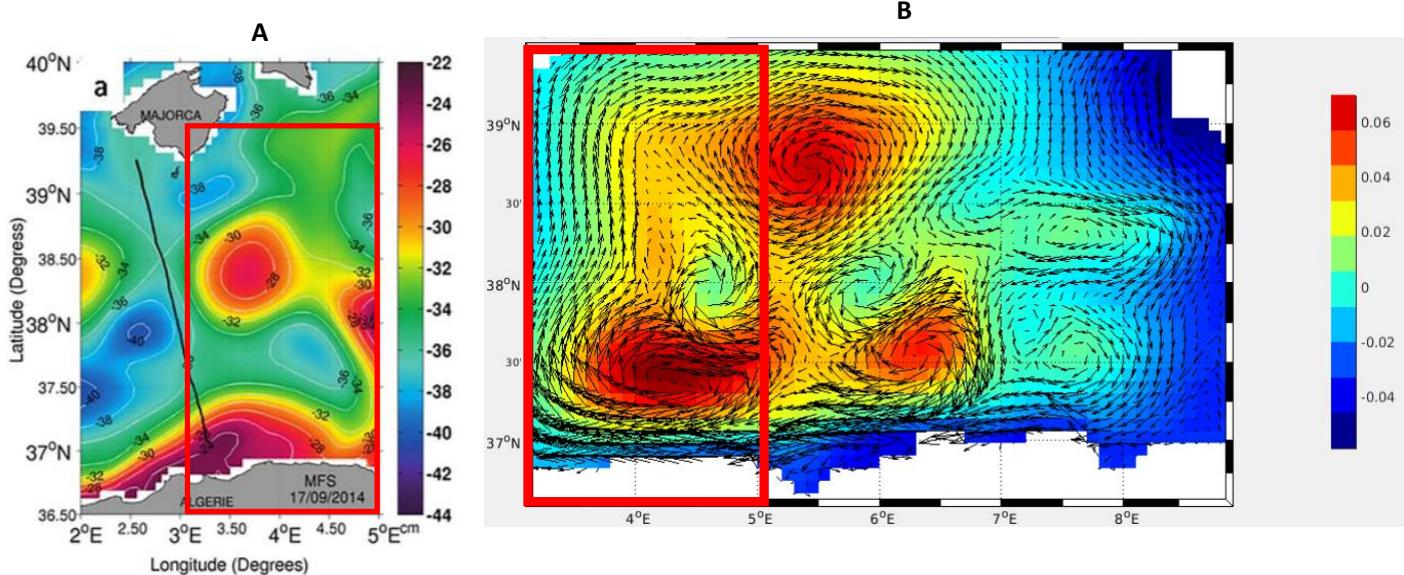


Figure 5. Comparaison entre le résultat d'un model MFS utilisé par Aulicino et al. en 2018 (A) (modifiée) et les résultats du modèle CROCO (quatrième année) (B) pour le mois de Septembre. Les couleurs sont associées à la surélévation du niveau marin (en cm pour A et en m pour B).

Ce transport bouleverse la composition physico-chimique de l'eau, et impact fortement la biologie de la zone et la répartition de la productivité primaire mesurable par satellite et par prélèvement (Taupier-Letage et al. 2003).

Aulicino et al. (2018) ont également identifié des structures de méso-échelle en représentant graphiquement la surélévation du niveau marin de la zone (Figure 5. Comparaison entre le résultat d'un model MFS utilisé par Aulicino et al. en 2018 (A) (modifiée) et les résultats du modèle CROCO (quatrième année) (B) pour le mois de Septembre. Les couleurs sont associées à la surélévation du niveau marin (en cm pour A et en m pour B). par un modèle MFS. Les encadrés rouges ont été rajouté pour délimiter la zone comparative. Le tourbillon représenté au large dans notre simulation (Figure 5, B) est signalé plus à l'ouest dans l'étude de Aulicino et al. (2018) (Fig. 5, A). La structure est similaire en termes de diamètre. Numériquement, les valeurs de surélévation sont fortement supérieures au sein des tourbillons pour le modèle CROCO. La Figure 5, B a été obtenues grâce à l'interface graphique de MATLAB à distance, il a donc été impossible de redimensionner la *colorbar* qui aurait permis de mieux interpréter la comparaison. Également, la surélévation côtière n'est pas la même.

L'explication la plus probable est que la valeur du niveau moyen de la zone n'est pas la même pour les deux simulations. L'anomalie de surélévation du niveau marin est donc quantitativement différente, mais peut être qualitativement comparée.

Pour confirmer cette hypothèse, il faudrait comparer les paramètres appliqués pour le calcul du *ssh* (sea surface height) des deux modèles.

4. Conclusions

Le modèle CROCO nous a permis de réaliser une étude à haute résolution de la circulation Méditerranéenne au sud du bassin Occidentale et d'observer la formation des structures tourbillonnaires de méso-échelle communément appelées *eddies*. Le modèle CROCO s'est avéré performant dans la résolution des équations primitives qui sont à la base des processus de simulation océanique.

Néanmoins, comme tout modèle, les résultats obtenus ne peuvent être interprétés sans une comparaison avec des données de campagne et/ou de mesures satellites. Notre zone d'étude est une bonne candidate pour l'utilisation de CROCO, qui a été notamment optimisé pour la résolution côtière. Il est important de noter que CROCO doit être utilisé avec précaution dans certaines régions, par exemple celles susceptibles d'être impactées par des apports d'eau continentale, ou dans les mers prises par les glaces aux pôles. La difficulté de différencier et de positionner les tourbillons anticycloniques identifiés dans cette étude porte cependant atteinte à la validation complète du modèle.

Enfin, les résultats d'un tel modèle ne peuvent et ne doivent être considérés et utilisés tels quels, mais en considérant l'intégralité de la paramétrisation de la simulation, les conditions aux frontières ainsi que les jeux de données d'initialisation pour permettre une interprétation pertinente. Toutefois, les résultats de notre étude rejoignent ceux de la littérature. Notre chance étant que la zone d'étude a été sujet à de nombreuses campagnes de prélèvement, observations satellites et modélisation numérique. La formation de ces *eddies* a suscité l'intérêt des océanographes physiciens et chimistes, mais aussi des biologistes dans l'étude de l'impact de ces conditions physico-chimiques particulières sur la vie marine. Ces études ont aujourd'hui fourni d'excellentes bases de données auxquelles se référer pour construire les modèles et y implémenter des conditions initiales pertinentes, ces modèles seront en retour utiles aux campagnes visant à échantillonner spécifiquement ces structures.

A l'avenir, il serait intéressant de réaliser un couplage de cette étude avec des données biogéochimiques afin d'appréhender la réponse biologique de ces processus de méso-échelle.

Bibliographie

Aulicino, G., Cotroneo, Y., Ruiz, S., Román, A. S., Pascual, A., Fusco, G., Tintoré, J., Budillon, G. (2018). *Monitoring the Algerian Basin through glider observations, satellite altimetry and numerical simulations along a SARAL/AltiKa track*. Journal of Marine Systems, **179**, 55-71.

Benzohra, M., Millot, C. (1995). *Characteristics and circulation of the surface and intermediate water masses off Algeria (ELISA campaign)*. Deep Sea Res., **42**(10), 1803-1830.

Béranger, K., Mortier, L., Crépon, M. (2005). *Seasonal variability of water transport through the Straits of Gibraltar, Sicily and Corsica, derived from a high-resolution model of the Mediterranean circulation*. Progress in Oceanography, **66**(2-4), 341-364.

Puillat, I., Taupier-Letage, I., Millot, C. (2002). *Algerian eddies lifetime can near 3 years*. Journal of Marine Systems, **31.4**, 245-259.

Taupier-Letage, I., Puillat, I., Millot, C., Raimbault, P. (2003). *Biological response to mesoscale eddies in the Algerian Basin*. Journal of Geophysical Research: Oceans, **108**(C8).

Annexe I : Schéma global de circulation en Méditerranée

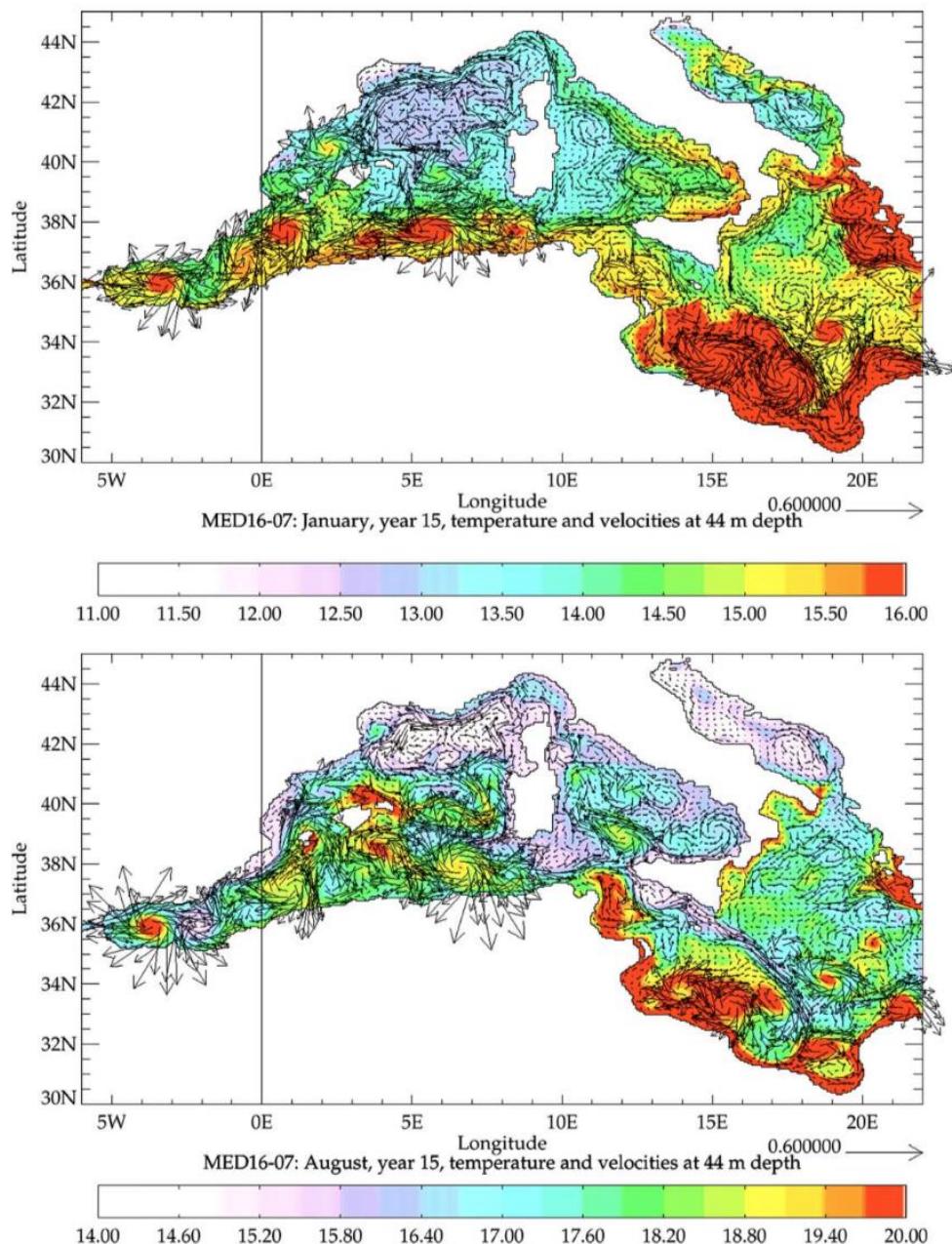


Figure I. Température potentielle moyenne mensuelle ($^{\circ}\text{C}$) et vitesses (m s $^{-1}$) à 44 m de profondeur en janvier et août (15e année de la simulation). Un vecteur sur quatre est tracé.

Tirée de Béranger et al., 2002.

Annexe II : Résumé et explication des variables définies dans les routines MATLAB

Dénomination	Interprétation	
Δt_i	Pas de temps interne (processus 2D, rapides)	Définis sur la base du critère CFL (eq. (6))
Δt_e	Pas de temps externe (processus 3D, lents)	
NDTFAST	Rapport ($\Delta t_i/\Delta t_e$)	
NTIMES	Durée de la simulation	
NWRT	Fréquence de sauvegarde de sortie instantanée	
NAVG	Fréquence de sauvegarde de sortie moyennée	
NRST	Fichier de redémarrage, créé à la fin de chaque mois	
LLm	Nombre de cellule pour la latitude	
MMm	Nombre de cellule pour la longitude	
N	Nombre de niveau sur la verticale	

Tableau I. Dénominations et interprétations utilisées par les routines MATLAB.

Dénomination	Interprétation
param.h	Fixe les coordonnées géographiques de la regions, le degré de résolution et les conditions aux frontières (OBC, [S E N W] = [1 1 1 1])
make_forcing.m	Fixe les forcages
make_clim.m	Fixe les conditions initiales
make_grid	Création de la grille par calcul des pas d'espace (LLm, MMm, dxmin,dymin,dwmaw,dymaw)

Tableau II. Dénominations et interprétations des fichiers de configuration CROCO

Dénomination	Interprétation
param.h	Permet d'intervenir sur la définition de notre domaine de calcul et fixations des paramètres de la grille (LLm, MMm, N)
cppdefs.h	Permet de définir les conditions d'ouverture/fermeture correspondant à notre zone
croco.in	Issu de la compilation de Jobcomp, on fixera NTIMES, NWRT et NAVG
croco_gui.in	Permet la visualisation des résultats sous MATLAB
croco_diags.m plot_diags.M	Permettent le diagnostiques du modèle

Tableau III. Dénominations et interprétations des fichiers du répertoire Run_Med_HR, édités dans fortran

Annexe III : Script MATLAB utilisé pour la représentation graphique des résultats de la simulation

```
clear all; close all;
hisfile = "DATANC/An_3/croco_avg_Y3M12.nc" %sélection du fichier à représenter

lat = ncread(hisfile,'lat_rho'); %latitude et longitude
lon = ncread(hisfile,'lon_rho');

temp = ncread(hisfile,'temp'); %data temperature

temp (temp==0)=NaN ;
tempsurf1=squeeze(temp(:,:,32,1));

salt = ncread(hisfile,'salt'); %data salinité
salt (salt==0)=NaN ;
saltsurf1=squeeze(salt(:,:,32,1));

lat_u=ncread(hisfile,'lat_u');
lon_u=ncread(hisfile,'lon_u');
lat_v=ncread(hisfile,'lat_v'); %data courant
lon_v=ncread(hisfile,'lon_v');
u=ncread(hisfile,'u');
u(u==0) = NaN;
usurf1=squeeze(u(:,:,32,1));
v=ncread(hisfile,'v');
vsurf1=squeeze(v(:,:,32,1));
v(v==0) = NaN;
sizeu=size(usurf1);
sizev=size(vsurf1);
nx=sizeu(1);
ny=sizev(2);

% figure temperature
figure(1)
pcolor(lon,lat,tempsurf1);
hold on
quiver(lon_u(:,:,1:ny),lat_u(:,:,1:ny),usurf1(:,:,1:ny),vsurf1(1:nx,:),'k')
colorbar
shading flat
set(gca,'color','k')
text( 6.2, 36.8,'Algerian coast', 'fontsize', 14, 'color', 'w')
text( 3.15, 39.5,'Balearic Islands', 'fontsize', 14, 'color', 'w')
text( 8.247, 39.19,'Sardinia', 'fontsize', 14, 'color', 'w')

% figure vecteurs courants et salinité
figure(2)
pcolor(lon, lat, saltsurf1)
hold on
quiver(lon_u(:,:,1:ny),lat_u(:,:,1:ny),usurf1(:,:,1:ny),vsurf1(1:nx,:),'k')
colorbar
shading flat
set(gca,'color','k')
text( 6.2, 36.8,'Algerian coast', 'fontsize', 14, 'color', 'w')
text( 3.15, 39.5,'Balearic Islands', 'fontsize', 14, 'color', 'w')
text( 8.247, 39.19,'Sardinia', 'fontsize', 14, 'color', 'w')
```