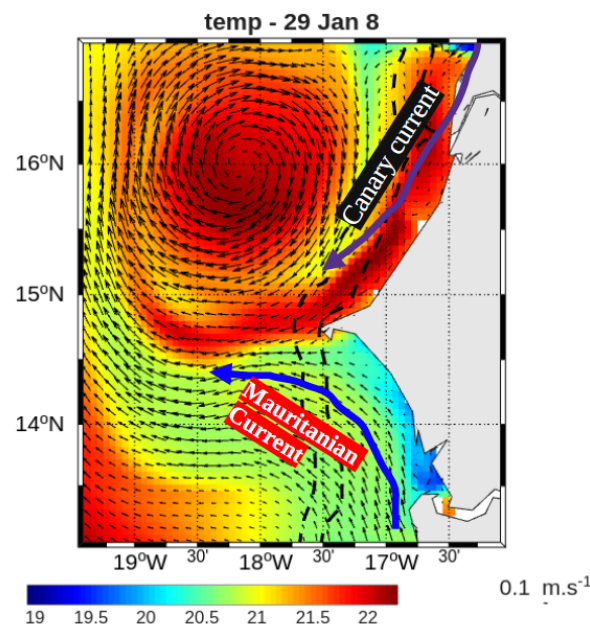


Aix Marseille Université

Master Sciences de la Mer

MODÉLISATION 3D OCÉANIQUE

Analyse du système d'upwelling des Canaries (Sénégal-Gambie-Maroc) grâce à une configuration régionale du modèle CROCO



Yannick NGANGMO

Supervisé par : M. Andrea DOGLIOLI

Année académique : 2025/2026

1^{er} Mai 2026

Table des matières

1	Introduction	1
2	Données, matériels et méthodes	2
2.1	Données	2
2.2	Matériels et méthodes	2
2.2.1	Le modèle CROCO et les équations primitives	2
2.2.2	Paramétrisation du modèle CROCO	4
3	Résultats et discussion	6
3.1	Diagnostic et stabilité du modèle	6
3.2	Validation du modèle par la dynamique océanique	7
3.3	Validation du système d’upwelling côtère	8
3.4	Validation du modèle par un cycle d’upwelling	9
4	Conclusion	10
5	Remarques	10

Abstract

Modeling of the Canary islands upwelling system using regional model was applied to the Senegal-Gambia-Morocco region, with the aim of simulating regional ocean circulation and the main physical processes, and then comparing some of the results obtained with a reference paper. The simulations demonstrate model stability, with diagnostic variables oscillating around their mean values without any constraints, a characteristic of reliable numerical models. The model reproduces the regional circulation fairly well, including the Canary Current, the Mauritanian Current, and the anticyclonic eddy structures, as required by the physics of the Northern Hemisphere. The upwelling system is also well localized along representative thermal gradients, although its intensity appears weaker and more diffuse than in the reference article, which may be due to our model's parametrization. Despite these limitations, the CROCO model satisfactorily represents the mechanisms of upwelling.

Keywords : CROCO model, upwelling, stability, Canary Current, Mauritanian Current

Résumé

La modélisation du système d'upwelling des Canaries en se servant du modèle régional CROCO a été appliquée à la région Sénégal-Gambie-Maroc, ayant pour objectif de simuler la circulation océanique régionale et les principaux processus physiques, puis de comparer quelques résultats obtenus à un article de référence. Les simulations montrent une stabilité du modèle, avec les variables diagnostiques oscillant autour des valeurs moyennes sans aucune contrainte, caractéristique des modèles numériques fiables. Le modèle reproduit assez bien la circulation régionale tout en incluant le Courant des Canaries, le Courant Mauritanien et les structures tourbillonnaires tournant dans le sens anticyclonique comme demandé par la physique de lorsqu'on se trouve à l'hémisphère nord. Le système d'upwelling est aussi bien localisé par des gradients thermiques représentatifs, malgré que son intensité apparaît faiblement et très diffus que l'article de référence, ce qui peut être dû à la paramétrisation de notre modèle. Malgré ces limites le modèle CROCO permet de représenter de manière satisfaisante les principaux mécanismes de l'upwelling et la dynamique océanique.

Mots clés : Modèle CROCO, upwelling, stabilité, Courant des Canaries et Courant Mauritanien

1 Introduction

La modélisation océanographique est une représentation mathématique et numérique des différents processus chimiques, physiques et biologiques de l'océan. Elle permet de mieux comprendre les mécanismes ou les processus qui se déroulent dans l'océan de surface et de fond (Ndoye et al., 2014). Ces différents processus incluent notamment les gyres, les phénomènes d'upwelling, la température, la salinité, la température de surface de la mer (SST), la concentration en chlorophylle-a (Chl-*a*), ainsi que les vents et les courants océaniques. En 1922, le mathématicien, météorologue Britannique Lewis Fry Richardson, estimait que 64000 personnes étaient nécessaires pour réaliser une prévision météorologique, mais aujourd'hui la puissance de calcul des ordinateurs les prévisions à moindre coût et à grande vitesses de calcul. Dans ce contexte de puissance de calcul accrue, l'analyse du système d'upwelling des Canaries constitue un bel exemple d'application. Cette zone (13°N - 17°N et 16°W - 19.50°W), qui s'étend du Sénégal-Gambie-Maroc, est le siège de processus physiques complexes où les interactions entre les vents d'alizés, la topographie côtière et les courants de bord exigent une modélisation à résolution grande pour être mieux reproduites (Ndoye et al., 2014). Le courant des Canaries s'étend le long des côtes de l'Afrique de l'Ouest, du Maroc à la Guinée, et se caractérise par une productivité biologique élevée due à la remontée d'eaux océaniques froides et profondes (upwelling) le long de cette côte. Cela favorise également une grande abondance de ressources halieutiques et une biodiversité globale élevée. Le système du courant des canaries se divise en deux (02) régions distinctes. Dans le nord, le courant des Canaries transporte l'*Eau Centrale Nord-Atlantique* (NACW) plus salée, le long de la branche principale de retour du gyre subtropical de l'Atlantique Nord. Par contre, dans le sud on a plutôt la présence dominante d'*Eau Centrale Nord-Atlantique* (SACW), plus fraîche et nettement moins salée, l'écoulement moyen y est fortement influencé par un rationnel de vent positif (Aristegui et al., 2009) La circulation à l'échelle régionale est cyclonique avec un courant de bord vers le pôle, Courant Mauritanien (MC) dont l'extension en profondeur forme le sous-courant de pente typique des systèmes d'upwelling (Barton, 1998). Le MC est relié au système complexe des courants équatoriaux, et cette connection implique une structure cyclonique quasi-stationnaire : le dôme de Guinée (Ndoye et al., 2014).

L'objectif de ce projet dans le cadre de l' UE OPB 205 est de mettre en œuvre une configuration régionale du modèle océanique CROCO (Coastal and regional Ocean Community) en fin de simuler les processus et/ou mécanismes d'intérêts dans cette région. Par la suite, les résultats simulés par le modèle CROCO seront valider ou confronter aux résultats obtenus ou

disponibles dans la littérature scientifique. Nos résultats seront comparés à ceux issues des travaux de Ndoye et al. 2014, ayant pour titre : **SST patterns and dynamics of the southern Senegal-Gambia upwelling center**. La structuration de ce projet est basé sur trois principaux axes. La section 1 pose le cadre général à travers une introduction détaillant le contexte du projet, une présentation de la zone géographique et l'analyse des processus physiques. La section 2 expose la méthodologie numérique et les configurations du modèle employées (configurations CROCO, données de Forçage et conditions initiales). En fin, la section 3 va s'atteler à présenter les différents résultats puis les différentes validations des résultats obtenus et ceux de la littérature.

2 Données, matériels et méthodes

2.1 Données

Les données sont disponibles et téléchargeables sur le site de CROCO (<https://www.croco-ocean.org>).

- Les **données COADS** (COADS05.tar.gz), constituent un champ climatique de vent, précipitation et température.
- Les **données WOA** (WOA2009.tar.gz), regroupent un champ climatique de salinité, température in situ et des sels nutritifs en fonction de la profondeur, de la saison et des variations mensuelles à l'échelle de l'océan globale.
- Les **données topographiques** (Topo.tar.gz), permettent de définir le masque de la grille et à intégrer la bathymétrie à partir des données topographiques.

Ces données seront utilisées pour les différentes simulations faites dans ce projet.

2.2 Matériels et méthodes

2.2.1 Le modèle CROCO et les équations primitives

Le modèle CROCO qui est utilisé dans ce projet vient du modèle ROMS. C'est un modèle assez modulable qui permet de s'adapter en fonction d'une zone d'étude choisit. Il est codé en langage Fortran et sa configuration se fait à travers les fichiers (param.h, cppdefs.h). Il sera important de noter que l'interface de visualisation des fichiers se fait sur Matlab via le fichier crocotools. Il est basé sur les équations du mouvement provenant des équations de Navier-Stokes et sur la conservation du sel et de la chaleur. Le modèle CROCO résout les équations primitives océaniques en tenant compte des propriétés de milieu marin et de principales hypothèses à savoir :

- L'approximation de Boussinesq : $\rho = \rho_0 + \rho'(x, y, z, t)$, avec $\rho'(x, y, z, t) \ll \rho_0$
- L'approximation hydrostatique : $\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g = 0$

– Plan- f : en considérant le facteur de Coriolis f comme une constante.

– L’hypothèse de la fermeture newtonienne : La turbulence permet de faire apparaître les termes de turbulence grâce à l’approche de Reynolds qui considère un écoulement moyen. En effet certains termes de turbulence sont indéterminés et rendent les équations du mouvement non résolubles. Les équations de fermeture, qui mettent en relation les flux turbulents et les gradients verticaux des paramètres non turbulents, permettent d’exprimer ces termes indéterminés grâce aux variables calculées par le modèle.

– Les termes de tension de Reynolds sont ensuite reliés aux composantes du gradient des vitesses moyennes par Boussinesq, faisant apparaître les coefficients d’échange turbulent (A_x, A_y, A_z). Les variations spatiales de ces coefficients sont négligées, ainsi que les termes de frottement moléculaire, petits devant les termes turbulents.

– L’hypothèse de turbulence horizontale isotrope suggère que les coefficients d’échange turbulent sur l’horizontale sont égaux : $A_x = A_y = A_h$.

Les équations primitives principales :

i) **Les équations de conservation du mouvement :**

Les Eqs. 1 et 2, présentent la conservation du mouvement suivant u et v respectivement.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + f v + A_h \vec{\nabla}^2 u + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - f u + A_h \vec{\nabla}^2 v + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

ii) **Les équations de conservation de chaleur et du sel :**

Les Eqs. 3 et 4, représentent respectivement la conservation de chaleur et de sel.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T = A_h \vec{\nabla}_h^2 T + A_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{H_C}{\rho_0 C_P} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} S = A_h \vec{\nabla}_h^2 S + A_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (4)$$

iii) **L’équation de continuité :**

En générale, l’équation de continuité est donnée par : $\frac{D\rho}{Dt} + \rho_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$. Pour un fluide incompressible $\frac{D\rho}{Dt} = 0$. Ce qui permet d’obtenir l’équation 5 :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

iv) **L’équation d’état de l’eau de mer :**

Elle est obtenue dans la nouvelle méthodologie TEOS 10, basée sur une salinité absolue et une température conservative. TEOS 10 permet de mieux comprendre la stratification

et la circulation océanographique.

$$\rho = \rho(S_a, T_c, p) \quad (6)$$

Dans les Eqs. 1 - 5, prendre $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ si nous sommes en coordonnée cartésienne, ρ_0 est la masse volumique du fluide, ici constante, P est la pression, T la température, S la salinité, et f correspond au facteur de Coriolis. Enfin les coefficients de viscosité sont notés A_h et A_z en fonction de leur composante (horizontale ou verticale).

Les paramètres ρ , u , v et T , constituent des variables **pronostiques**, car elles évoluent en fonction du temps. Par contre, certaines grandeurs, en particulier selon la direction verticale (par exemple la vitesse verticale w), sont déduites d'autres variables du systèmes; elles sont dites **diagnostiques**.

2.2.2 Paramétrisation du modèle CROCO

a) *La création de la grille :*

Une grille du type Akarawa-C (une grille décalée qui calcule les scalaires au centre des mailles et les vitesses sur les faces respectives de la grille) à été implémentée dans ce projet. La zone d'étude a pour coordonnées géographiques 13°N-17°N et 16°W-19.50°W avec une résolution spatiale de 1/20°, configuré dans le fichier `crocotools_param.m`. L'exécution du script `make_grid` dans Matlab, rend possible le calcul des dimensions spatiales (x(LLm) ; y(MMm)), et les pas de la grille (dx et dy) et génère une bathymétrie de la zone choisie qui servira pour la simulation. Le Tab.1 présente les paramètres de la grille. La Fig.1, présente l'ensemble et la géométrie nécessaire pour la résolution des équations de la dynamique océanographique.

TABLE 1 – Les paramètres de la grille

dl	N	LLm	MMm	dx (min ; max)	dy (min ; max)
1/20°	32	69	82	5.3136 5.4142	5.3156 5.4137

b) *Les conditions aux limites et aux frontières :*

Les conditions aux limites et aux frontières de notre modèle ont été définies à partir de la base de données WOA (WOA2009.tar.gz), comme définit à la section 2.1. Ces données permettent de mieux représenter de façon plus réalistes la dynamique océanique comme celle des courants des Canaries où se produit très souvent des systèmes d'upwelling

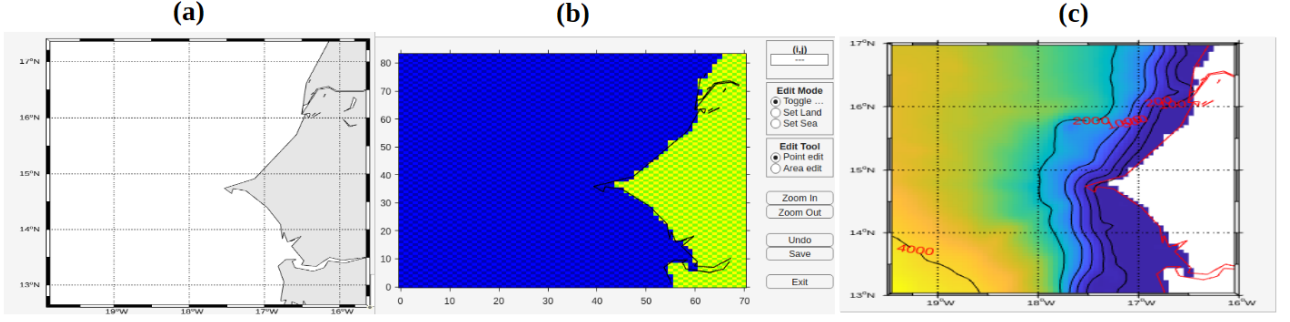


FIGURE 1 – (a) : Topographie théorique (masque de terre initiale); (b) : Discrétisations et masquage; (c) : Carte bathymétrique final

(Ndoye et al., 2014). Les conditions de surface ont quant à elles construites à partir de la base de l'International Comprehensive Ocean-Atmospheric Data Set, qui englobe des observations et les analyses les paramètres tel que les flux de surface et d'eau douce. Ces données ont rendues possible de configurer les fichiers (`make_clim`) et (`make_forcing`), qui seront tous deux utiles pour la simulation du modèle. Le script `cppdefs.h` permet de définir les frontières du domaine de calcul, avec des frontières ouvertes (nord, sud, ouest) et fermées (est) (voir Fig.1), comme l'indique la portion du code ci-dessous à propos des frontières ouvertes et fermées.

```
/*Open Boundary Condition*/
# undef OBC_EAST; # define OBC_WEST; # define OBC_NORTH;
# define OBC_SOUTH
```

c) *Estimation de pas de temps*

Les paramètres temporelles du modèle ont ensuite été déterminés à partir de l'Eq.7, qui représente le pas de temps externe. l'estimation du pas de temps interne est déterminer par l'expression $\Delta t_{int} = \Delta t_{ext} \times NDTFAST$, avec `NDTFAST` le nombre de boucle externe pour une boucle interne. Un fichier (`memo.mat`) est crée pour stocker les dimensions spatiales (`x(LLm)`; `y(MMm)`), et les pas de la grille (Δx et Δy), permettant ainsi de mettre en relation la résolution temporelle et la résolution spatiale par le calcul de la CFL (Courant-Friedrichs-Levy). D'après la critère de la CFL, impose que Δt_{ext} soit supérieur à la célérité c d'une onde longue, avec h_{max} la profondeur maximale et Δx , Δy la taille du maillage (Eqs.7.8). Cette approche permet de mettre en évidence deux échelles de temps différents : le premier pas de temps permet la résolution des équations tridimensionnelles qui modélise les ondes de gravité interne et le second pas de temps

permet de modéliser les ondes de gravité externes qui sont plus rapide (Eq.7).

$$\Delta t_{ext} \leq \frac{1}{c} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$c = \sqrt{gh_{max}} \quad (8)$$

Avec $h_{max} = 5000$ km, dans ce cadre ce projet. Pour éviter un coût de calcul trop important, le modèle CROCO (comme la grande majorité des modèles) utilise la méthode du time-splitting : le temps est séparé en pas de temps interne et externe avec $\Delta t_{ext} < \Delta t_{int}$. L'exécution de la commande `ad_cfl` sur `matlab` permet de faire le paramétrage temporel. On fixe `NTIMES` le nombre d'itérations pour obtenir 1 mois et `NRST` pour indiquer à quelle itération prendre les fichiers de sortie pour déterminer les conditions initiales du prochain mois. On indique également dans `NAVG` la fréquence de calcul des valeurs moyennes des variables. Pour ce projet les données des paramètres précédents sont consignés dans le Tab.2 :

TABLE 2 – Paramètres de la grille calculés par le modèle

NTIMES	NRST	NAVG	Δt_{int}	Δt_{ext}	NDTFAST
5400	5400	540	480 s	8 s	60

La configuration du modèle étant terminée, nous nous sommes connecter au serveur de l'OSU PYTHEAS via le cluster pour lancer la simulation décennale. Nous avons pris le soin de faire des ajustement dans le fichier `run_croco.bash`, pour avoir les dix (10) de simulations et douze (12) mois par année. Après plusieurs tentative nous avons pu obtenir toutes les années.

3 Résultats et discussion

3.1 Diagnostique et stabilité du modèle

Après la compilations décennale nous utilisons respectivement les scripts `croco_diags` et `plot_diags` pour analyser, tracer les variables de diagnostique moyennées (Fig. 2). Pour avoir une idée sur la stabilité de notre modèle, il est intéressant d'observer les variables diagnostiquées sur dix ans. L'étude de ces variables diagnostiques permettent de vérifier la conservation de la masse de notre modèle. La Fig. 2 représente l'évolution de certaines de ces variables au cours des dix années simulées. Les différentes variables oscillent autour d'une valeur moyenne sans fluctuation importante, ce qui montre que le modèle est stable. En particulière, la courbe de

la salinité présente des variations assez régulière et une amplitude faible, relevant d'une bonne conservation du sel ainsi qu'un fonctionnement numérique fiable. Pour vérifier la stabilité du modèle, nous pouvons analyser la courbe de la salinité qui reste stable dès la première année.

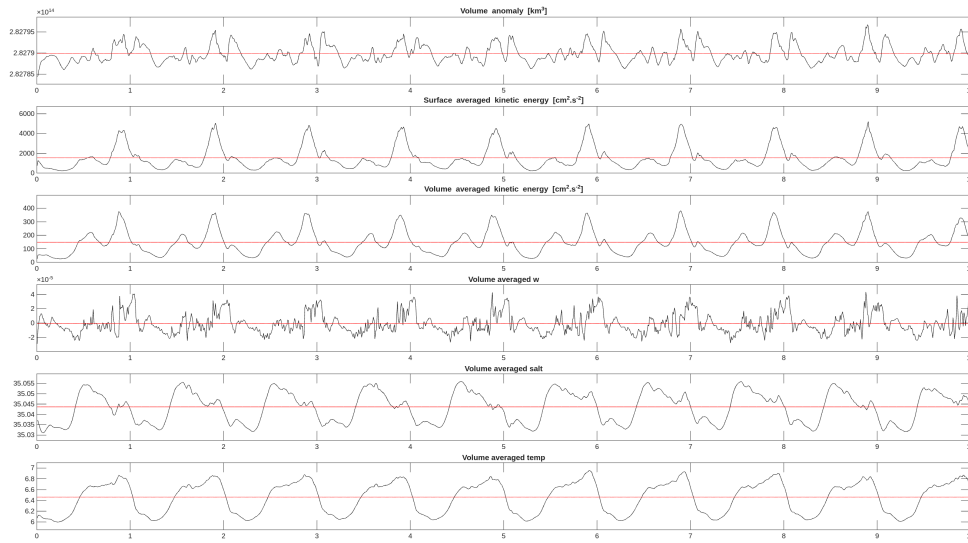


FIGURE 2 – Les variables diagnostiques du modèle

3.2 Validation du modèle par la dynamique océanique

Les Figs. 3(a) et 3(b), sont une représentation une circulation océanique régionale aux côtes sénégalaise. Cette comparaison vise surtout comparer la dynamique océanographique provenant de deux modèles de simulations numériques. La Fig.3(a) provient du modèle CROCO et la

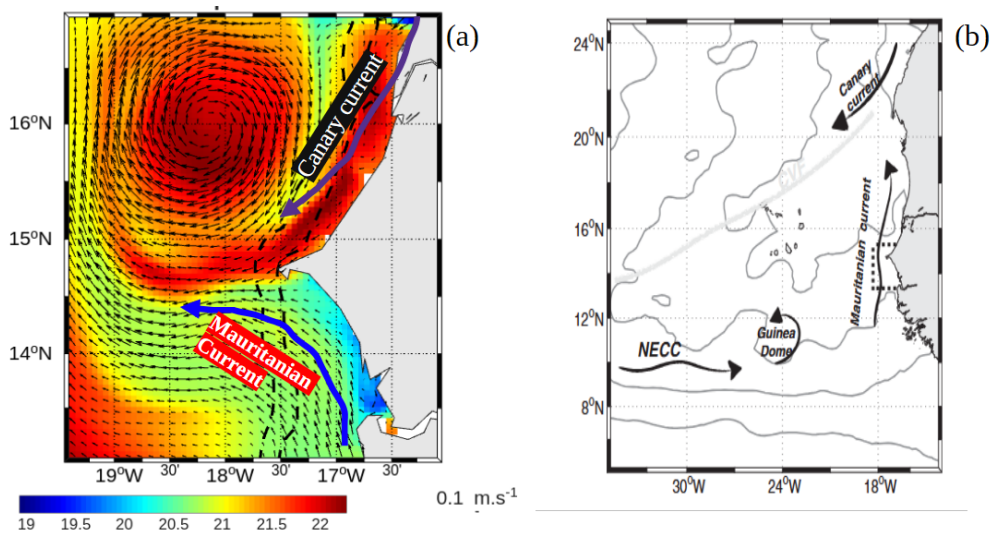


FIGURE 3 – Dynamique océanique (a) : Simulation CROCO ; (b) : Des travaux de Ndoye et al.(2014)

Fig.3(b) des travaux de Ndoye et al.(2014). On peut bien observé l'orientation du Courant Mauritanien dans les deux études sont bien semblable, sur la Fig. 3(a) elle longe la côte vers le

large comme l'avait dit antérieurement les travaux de Ndoye et al.(2014). Il est de même pour le courant des Canaries qui suit lui aussi la même direction sur les deux figures (Fig.3(a) et Fig.3(b)). On peut noter aussi la présence d'un tourbillon au large qui tourne bien dans le sens anticyclonique car cette zone est dans l'hémisphère nord. Cette information est très importante car elle nous permet de savoir que notre modèle tient bien compte dans la physique océanique.

3.3 Validation du système d'upwelling côtère

La comparaison entre les Figs.4(a) et 4(b) permettent de mettre en évidence la présence de l'upwelling des systèmes des Canaries au large des côtes Sénégalaise. *Nous notons ici qu'il convient de se placer à une latitude de 15°N à la Fig.4(a) pour les comparaisons car l'article de référence présente des cartes à partir de cette latitude.* Sur la Fig.4(b) tirée des travaux de Ndoye et al.(2014), l'upwelling côtier est plus intense, avec une bande d'eau froides bien définie et régulière le long de la côte. Par contre, sur la Fig.4(a), on observe également une zone d'eaux plus froides près de la côtes, ce qui montre que le modèle CROCO reproduit correctement la localisation du système d'upwelling de dans cette zone.

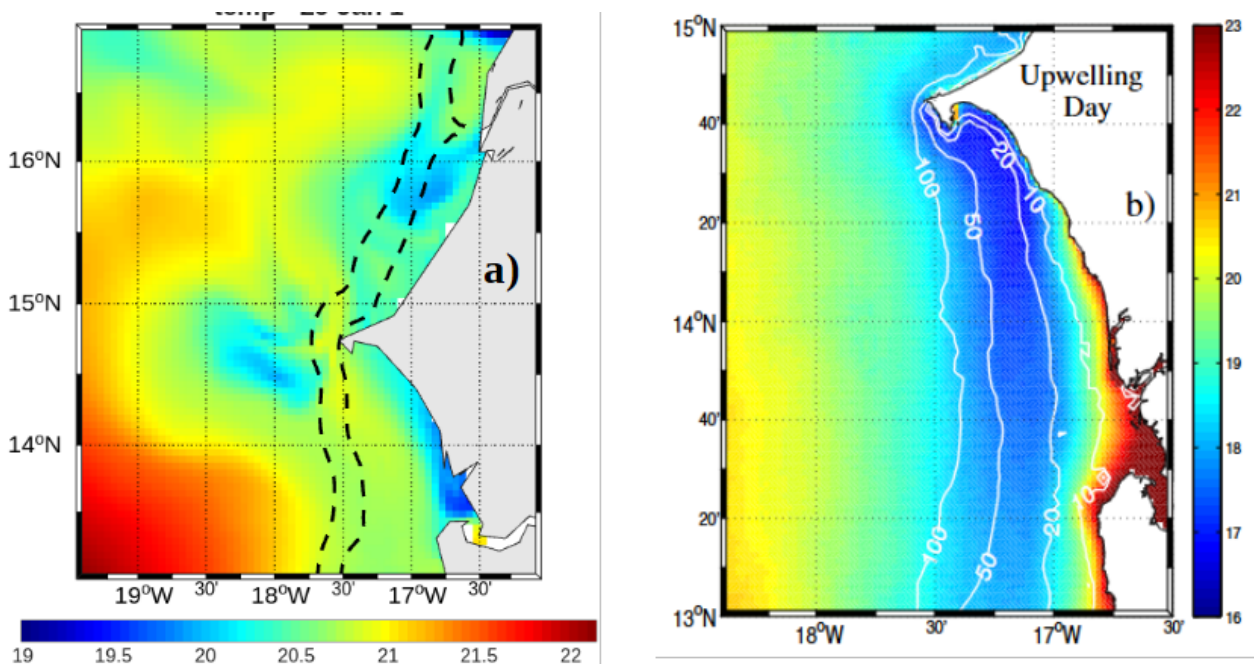


FIGURE 4 – Système d'upwelling (a) : Simulation CROCO ; (b) : Des travaux de Ndoye et al.(2014)

Mais on peut constater que l'upwelling de la Fig.4(a) est moins intense et très diffus par comparaison à la Fig. 4(b). On peut aussi faire le constat que l'intensité de l'upwelling est plus, comme témoigne l'absence des zones de froid très marqué et aussi la bande côtière est moins continue et semble fragmentée. Malgré les différences entre les Figs.4(a) et 4(b), on observe une

conformité générale qui reste satisfaisante car les gradients thermiques et le positionnement de l'upwelling sont généralement respectés.

De façon générale, le modèle CROCO parvient à reproduire les grandes caractéristiques de l'upwelling côtier, mais avec une intensité faible et plus diffus. Cette comparaison permet de mettre en évidence à la fois la pertinence du modèle et les limites dans la simulation côtières.

3.4 Validation du modèle par un cycle d'upwelling

L'ensemble des simulations réalisées les 29 janvier de tous les dix(10) années à 10 mètres de la surface sont regroupées sur la Fig.4(a) - (k). L'intérêt de cette représentation est d'observer

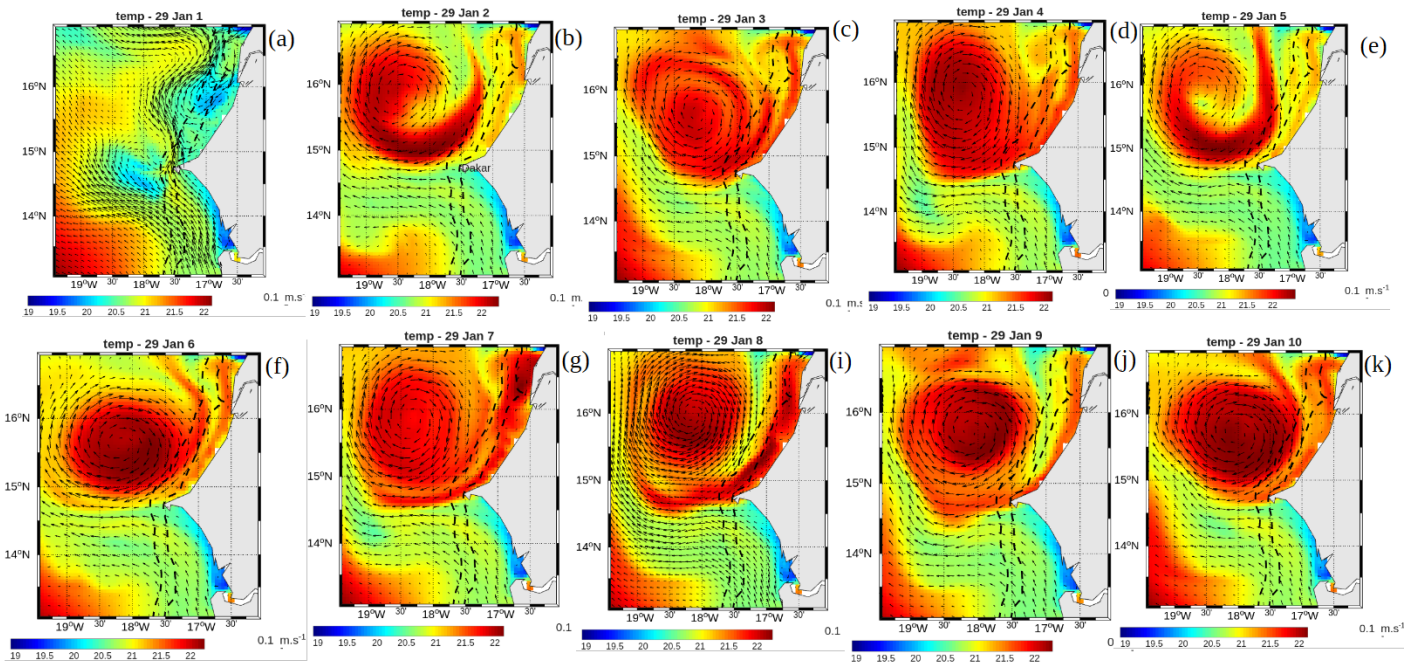


FIGURE 5 – Variation interannuelle de la température de surface

si le modèle parviens à reproduire de manière cyclique un phénomène physique. On observe des structures tourbillonnaires bien organisées au large, qui valide la capacité du modèle à reproduire la dynamique océanique. Une structure tourbillonnaire dominant est observée, avec une position stable mais une intensité et une forme différente traduisant une variabilité interannuelle (Fig. 4(a) - (k)). Avec des températures plus élevées au centre des tourbillons et moins élevées vers l'extérieur due à la présence des eaux froides près de la côte liées à l'upwelling côtier, nous permet de montrer la validité physique du modèle CROCO. Par ailleurs, tous les tourbillons tournent dans ce sens anticyclonique car nous sommes dans l'hémisphère nord.

4 Conclusion

L'objectif général de ce projet visait à mettre en oeuvre une configuration régionale du modèle CROCO pour analyser le système d'upwelling des Canaries. Nous nous sommes appuyés sur les équations primitives et des données CROCO pour représenter les différents processus physiques de notre zone d'étude. L'interprétation des variables diagnostiques montre une stabilité du modèle et les valeurs moyennes n'indiquent aucun problème de stabilité. La comparaison de nos résultats avec ceux obtenus par Ndoye et al. (2014), met en évidence une cohérence dans la reproduction de la circulation régionale. Les structures majeures telles que : le Courant de Canaries, le courant Mauritanien et les tourbillons apparaissent bien simulées. Par ailleurs, le modèle reproduit également la localisation du phénomène d'upwelling côtier, malgré le fait qu'il soit moins intense et plus diffus que dans les travaux de Ndoye et al. (2014). Une analyse interannuelle a été faite pour mettre en évidence la variabilité concordante des structures océaniques, confirmant la capacité du modèle à représenter les phénomènes cycliques. Les manques de reproduction avec netteté des certains processus physiques peuvent être dues à la résolution ou liées à la configurations du modèle. Malgré ces limites le modèle régional CROCO est un outil efficace pour la modélisation des systèmes d'upwelling et de la dynamique océanique.

5 Remarques

Nous pensons que le modèle CROCO est très sensible aux problèmes de résolution pour la reproductivité des certaines processus physiques.

Références

- Arístegui, J., Barton, E. D., Álvarez-Salgado, X. A., Santos, A. M. P., Figueiras, F. G., Kifani, S., Hernández-León, S., Mason, E., Machú, E., and Demarcq, H. (2009). Sub-regional ecosystem variability in the canary current upwelling. *Progress in Oceanography*, 83(1-4) :33–48.
- Barton, E. D. (1998). Eastern boundary of the north atlantic : Northwest africa and iberia (18, e). *The sea : ideas and observations on progress in the study of the seas*.
- Ndoye, S., Capet, X., Estrade, P., Sow, B., Dagorne, D., Lazar, A., Gaye, A., and Brehmer, P. (2014). Sst patterns and dynamics of the southern senegal-gambia upwelling center. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 119(12) :8315–8335.