



amU **OSU PYTHÉAS**
Aix Marseille Université

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

2026/2027

Plan de présentation

- 1. Introduction**
- 2. Données, Matériels et Méthodes**
- 3. Résultats et Discussion**
- 4. Conclusion**

1. Introduction

1. Introduction

A. Vocabulaire

Modélisation océanique : est un outil qui permet **suivre** l'évolution dans la temps et dans l'espace des variables **diagnostiques** et/ou **pronostiques**, des **processus physiques et géochimiques**.

Upwelling : est la remontée d'eau profonde en surface, qui entraîne un refroidissement local de la température de surface (SST).

- Force de Coriolis → départ des eaux de surface → remontée d'eaux profondes (*Ndoye et al.; 2014*).
- Lorsque le rotationnelle dans l'expression du pompage d'Ekman est supérieur à **zéro** (*Bakluti, cours de Physique Master 1, 2026*).

$$W_{Ek} = \frac{1}{f\rho} [\overrightarrow{rot} \vec{\tau}]_{\vec{k}}$$

1. Introduction

B. Pourquoi s'intéresser à l'Upwelling

- Forte productivité biologique
- Ressources halieutiques

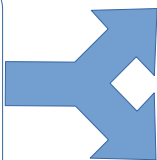
D'où l'intérêt de comprendre son l'évolution dans l'espace et dans le temps

1. Introduction

C. Objectif de ce projet

1

Mettre en œuvre une configuration régionale du modèle CROCO pour analyser le système d'upwelling des Canaries.



Upwelling côtier

Dynamique océanique : **Courants** et **tourbillons**

2

Valider les résultats obtenus avec un article de référence. Le notre ici est celui de Ndoye et al. (2014) : SST patterns and dynamics of the southern Senegal-Gambia upwelling center

1. Introduction

Zone d'étude

Coordonnées géographiques : **13°N-17°N et 16°W-19.50°W** (Sénégal-Gambie-Maroc)

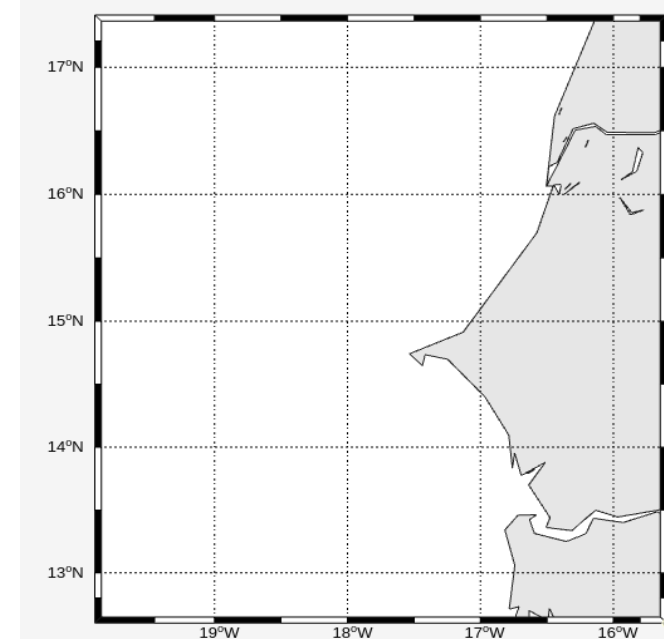
Courant des Canaries (venant du sud) et Courant Mauritanien (venant du nord) (*Arístegui et al.; 2009*).

Au nord : présence d'Eau Centrale Nord-Atlantique (NACW)

→ **eaux plus chaudes et salées**

Au sud : dominance d'Eau Centrale Sud-Atlantique (SACW)

→ **eaux plus froides et moins salées**



2. Données, Matériels et Méthodes

2. **Données**, Matériels et Méthodes

- Trois principales bases de données ont été utilisées dans ce projet :

1. COADS :

2. Vent, précipitations, température

3. WOA :

4. Température in situ, salinité, nutriments

5. Topographique :

6. Bathymétrie

2. Données, Matériels & Méthodes

- ▶ En 1922, le mathématicien, météorologue Britannique Lewis Fry Richardson, estimait que 64000 personnes étaient nécessaires pour réaliser une prévision météorologique (*Doglioli, cours de Physique Master 1, 2026*).
- ROMS (Regional Ocean Modeling System)
- CROCO (dérivé de ROMS, très utilisé en zone côtière)
- NEMO
- MITgcm
- HYCOM
- MOM

2. Données, Matériels & Méthodes

Modèle CROCO

Le modèle CROCO résout les équations primitives océaniques en tenant compte des propriétés de milieu marin et en tenant compte de **quelques hypothèses**.

Les hypothèses

- L'approximation de Boussinesq : $\rho = \rho_0 + \rho'(x, y, z, t)$, avec $\rho'(x, y, z, t) \ll \rho_0$
- L'approximation l'hydrostatique : $-\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g = 0$
- L'approximation plan- f : le facteur de Coriolis est une constante
- L'hypothèse de la fermeture newtonienne : nous avons considérée coefficients d'échange turbulent A_x, A_y, A_z constants ($A_x = A_y = A_h$, due à la turbulence horizontale isotrope).

2. Données, Matériels & Méthodes

Modèle CROCO

Le modèle CROCO résout **les équations primitives** océaniques en tenant compte des propriétés de milieu marin et en tenant compte de quelques hypothèses.

Les équations primitives

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

**Équation de
mouvement horizontale**

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

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

**Équation de
conservation de la
chaleur et du sel**

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

2. Données, Matériels & Méthodes

Modèle CROCO

Le modèle CROCO résout **les équations primitives** océaniques en tenant compte des propriétés de milieu marin et en tenant compte de quelques hypothèses.

Les équations primitives

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5) \quad \text{Équation de continuité d'un fluide incompressible}$$

$$\rho = \rho(S_a, T_c, p) \quad (6) \quad \text{Équation d'état de l'eau de Mer TEOS 10}$$

2. Données, Matériels & Méthodes

Configuration du Modèle

1. La création de la grille : se fait par en exécutant de la commande `make_grid` sur Matlab.

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

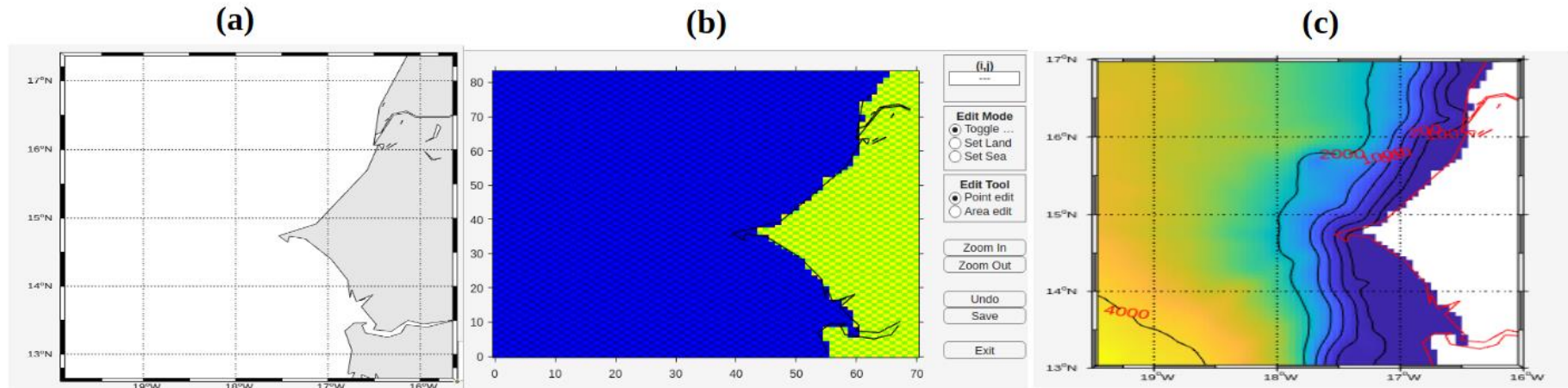


Figure 2 : (a) : Topographie théorique (masque de terre initiale); (b) : Discrétisations et masquage; (c) : Carte bathymétrique final

2. Données, Matériels & Méthodes

Configuration du Modèle

2. Discrétisation temporelle : se fait par en exécutant de la commande `ad_cfl` sur Matlab.

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

NTIMES : Nombre total de pas de temps (durée simulation)

NRST : Fréquence de sauvegarde (restart)

NAVG : Fréquence des moyennes temporelles

NDTFAST : Nombre de pas externes par pas interne

La méthode du time-splitting : afin de gagner en stabilité et en efficacité de calcul

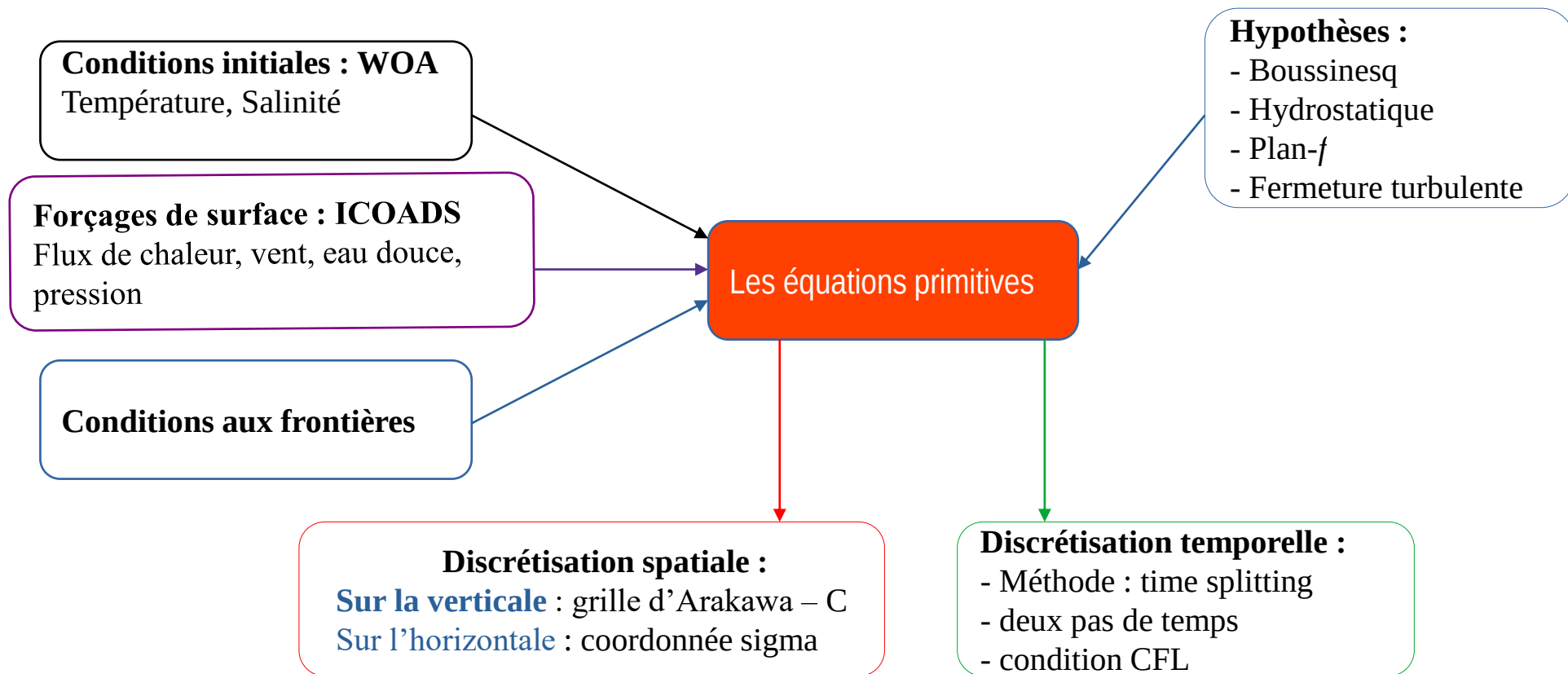
$$\Delta t_{ext} \leq \frac{1}{c} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

Le pas de temps externe résout les équations 2D de surface libre, capture les ondes rapides et respecte la condition CFL.

$$\Delta t_{int} = \Delta t_{ext} \times NDTFAST$$

Résout les ondes lentes (ondes internes, circulation générale)

2. Données, Matériels & Méthodes



Logigramme de la méthodologie du modèle

3. Résultats et Discussion

3. Résultats et Discussion

3.1 Diagnostique et stabilité du modèle

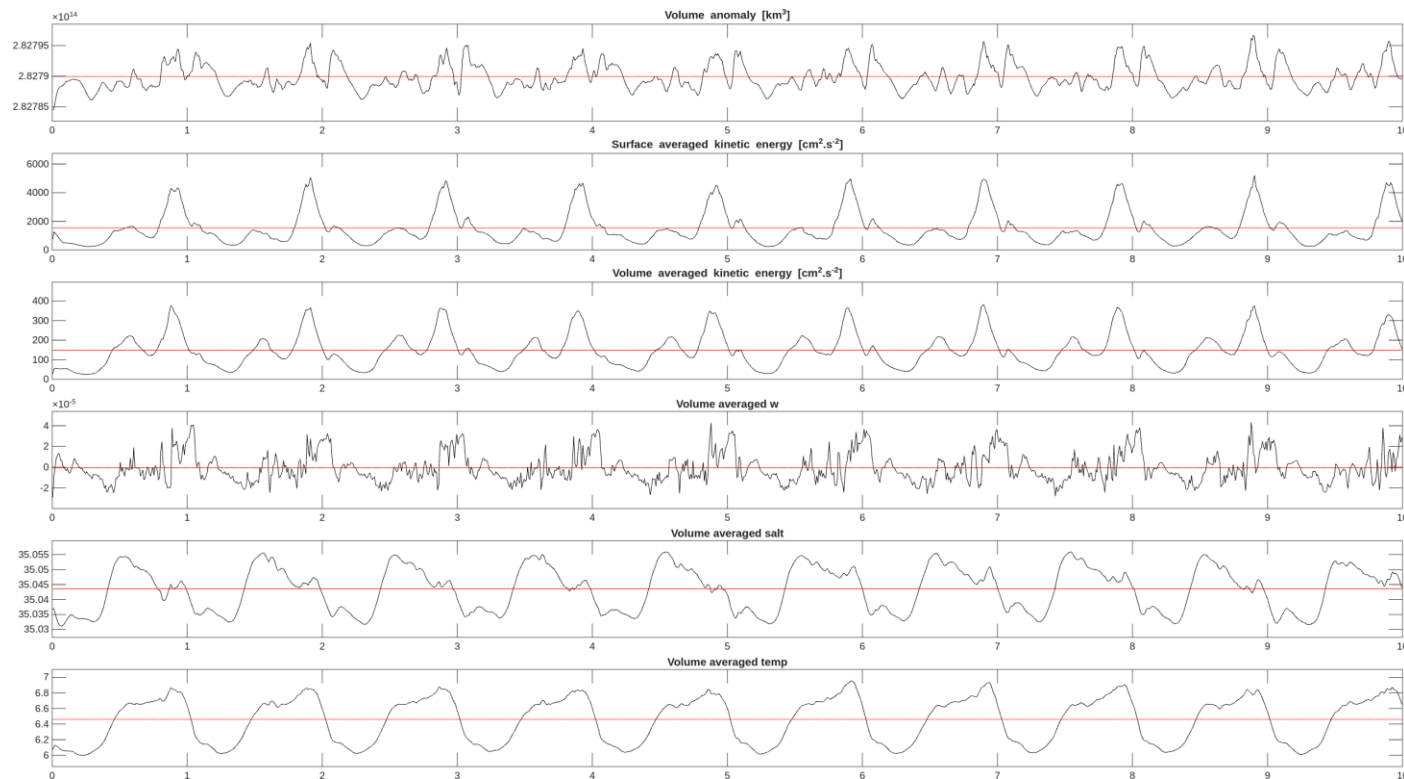


Figure 2 : Diagnostic décennale des données de modélisation de la zone d'étude

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.

3. Résultats et Discussion

3.2 Validation du modèle par la dynamique océanique

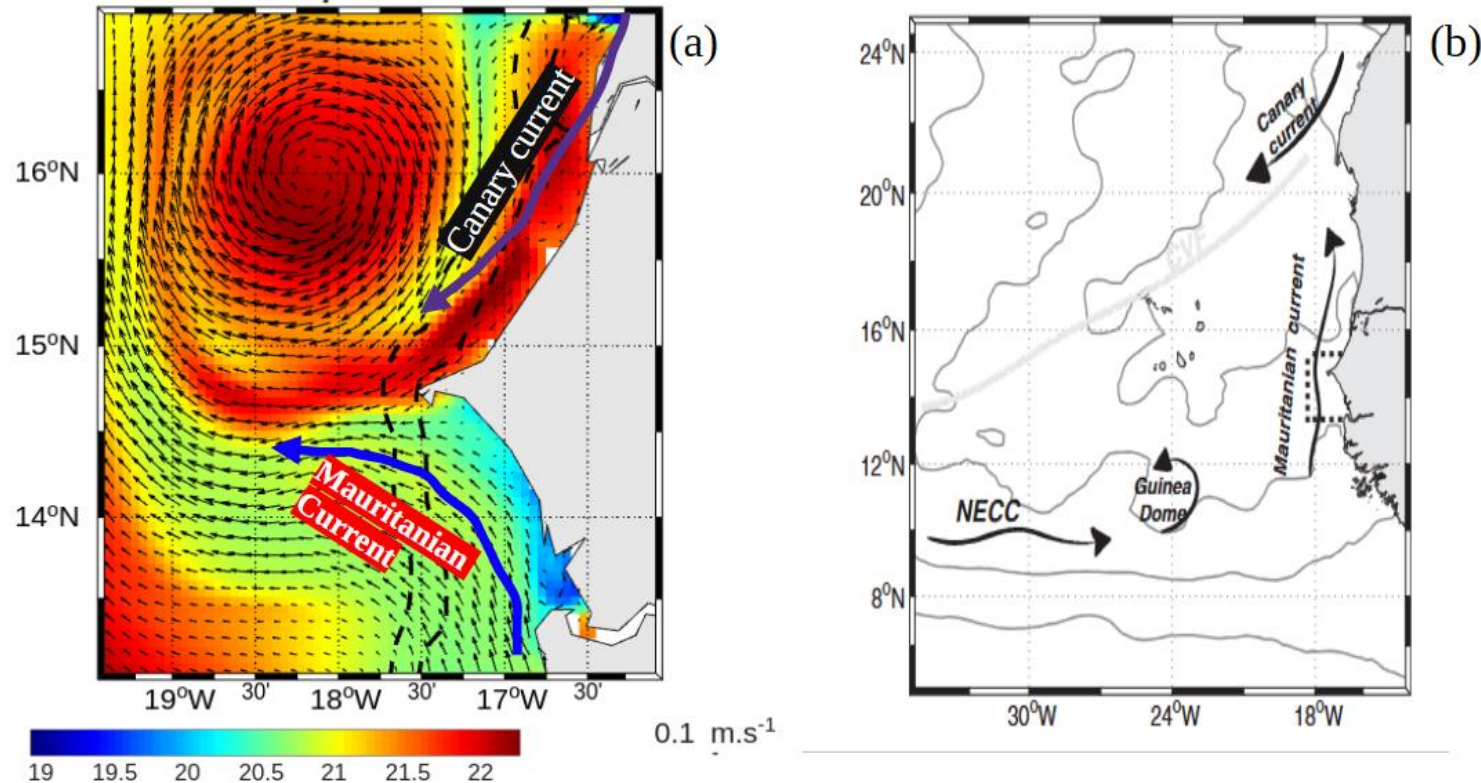


Figure 3 : Dynamique océanique (a) : Simulation CROCO; (b) : Des travaux de Ndoye et al.(2014)

Présence du **Courant des Canaries** et du **Courant Mauritanien**, comme l'avait montrer les travaux de Ndoye et al.; 2014)

Présence d'un tourbillon tournant dans le sens anti cyclonique car la zone d'étude est à l'hémisphère nord.

3. Résultats et Discussion

3.3 Validation du système d'upwelling côtère

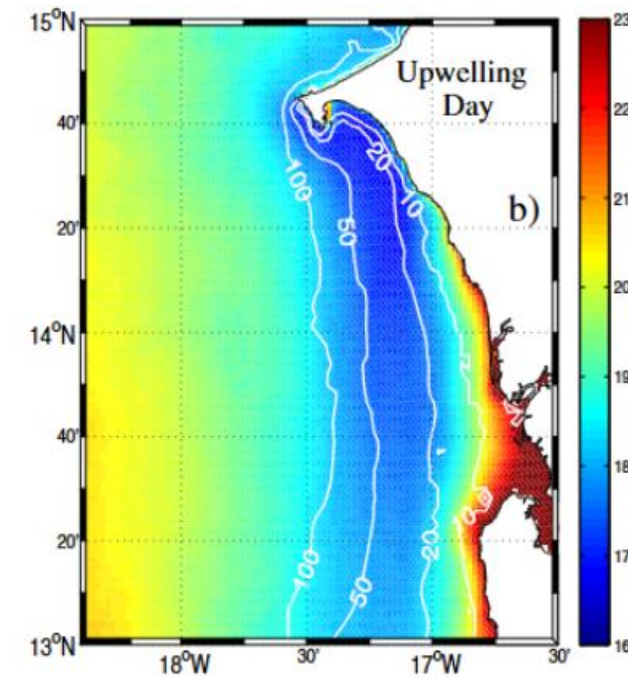
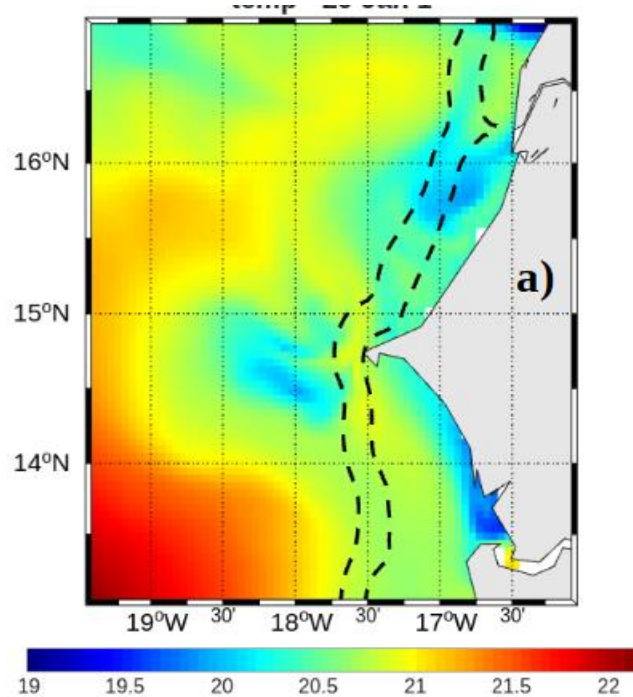


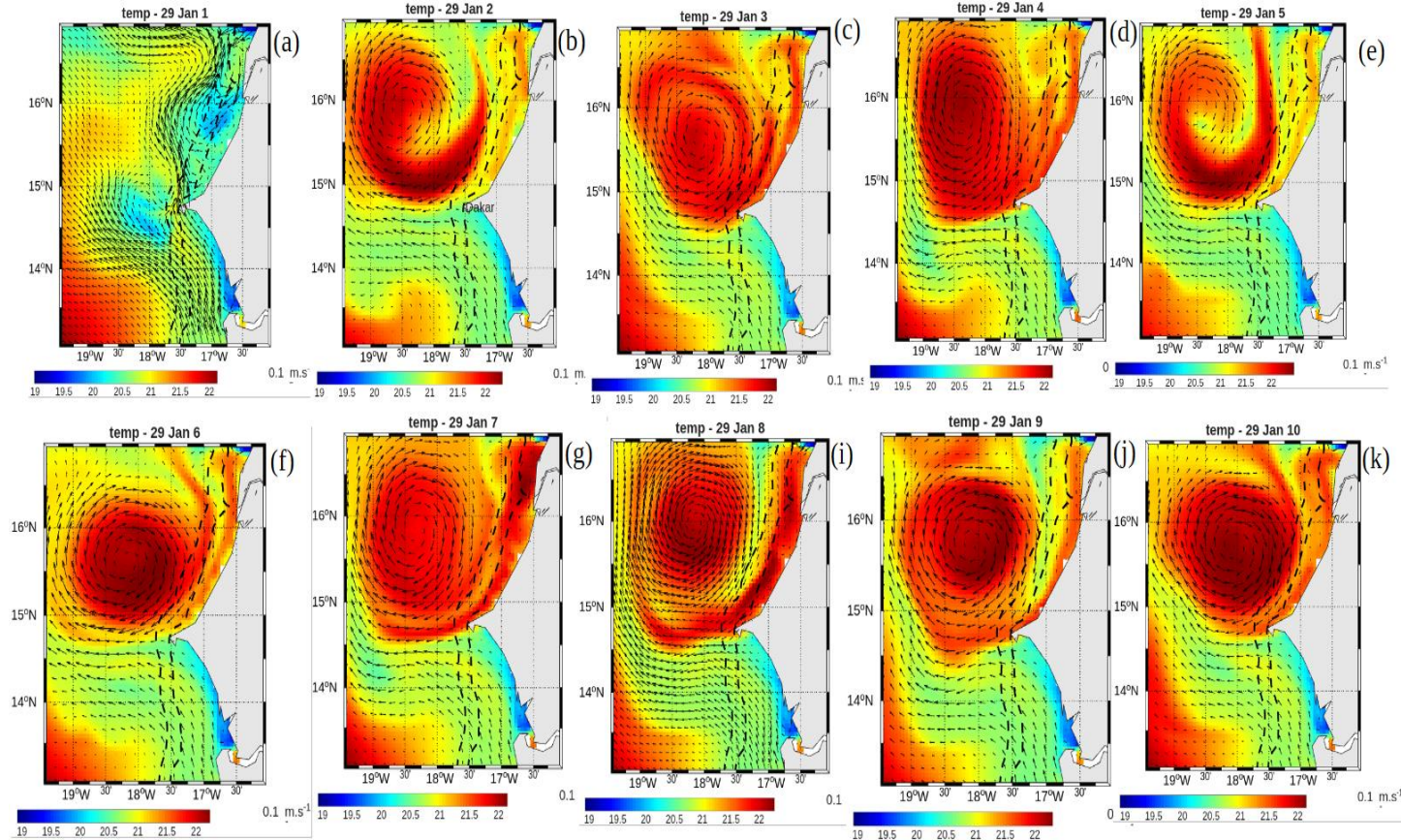
Fig.4(a), on note la présence d'un upwelling côtère de faible intensité et très disperser

Fig.4(b), l'upwelling côtère est plus intense, avec une bande d'eau froides bien définie et régulière le long de la côte.

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

3. Résultats et Discussion

3.3 Validation du système d'upwelling côtère



Une structure tourbillonnaire dominante est observée, avec une position stable mais une intensité et une forme différente traduisant une variabilité inter annuelle océanique.

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

4. Conclusion

4. Conclusion

Les résultats obtenus montrent que le modèle reproduit de manière satisfaisante les principales structures physiques, notamment la circulation régionale et la présence de l'upwelling côtier.

Malgré une intensité d'upwelling sous-estimée ou moins intense, les résultats confirment la robustesse du modèle pour l'étude des environnements côtiers complexes.

Ce projet souligne toutefois la nécessité d'améliorer les forçages et la résolution pour une meilleure représentation des processus océaniques.

4. Bibliographie

- 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 eco system 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.

Merci de votre attention