

Master 1 Sciences de la Mer

Parcours OPB

OPB 205 Modélisation 3D Océanique

---

## Modélisation Océanique du Courant de Mousson Sud-Ouest

---



Année universitaire  
2021/2022

Réalisé par :  
Dimitri Siriez

## Résumé

Le courant de mousson du sud ouest (SMC) est un large flux vers l'Est qui s'étend dans la mer d'Arabie et le Golfe du Bengale durant la saison des moussons (Juin-Septembre). Il est du au déplacement de la Zone de Convergence InterTropical (ZCIT) vers le Nord en été. Cette circulation va être représentée grâce au modèle numérique CROCO. En nous intéressant particulièrement à ce courant dans la Baie du Bengale (BoB), on montre la saisonnalité des paramètres tels que le vent ou la salinité, mais également la différence de répartition des gyres cycloniques et anticycloniques présents dans cette baie en période hivernal et estivale. Les résultats obtenus à partir de notre modèle sont comparés à la littérature scientifique (Webber et al (2018)).

## Abstract

The Southwest Monsoon Current (SMC) is a broad eastward flux that extend into the Arabian Sea and the Bay of Bengal (BoB) during the monsoon season (June-September). It is due to the displacement of the InterTropical Convergence Zone (ZCIT) towards the North during summer. This circulation will be represented using the CROCO digital model. We focus on this current in the Bay of Bengal (BoB) and we show the seasonality of parameters such as wind or salinity, but also the difference in the distribution of cyclonic and anticyclonic gyres present in this bay during winter and summer. The results obtained from our model are compared to the scientific literature (Webber et al (2018)).

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Matériels et Méthodes</b>	<b>3</b>
2.1	Description de la zone d'étude . . . . .	3
2.2	Présentation du modèle CROCO . . . . .	4
2.3	Paramètres et configuration du modèle . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Résultats</b>	<b>7</b>
3.1	Diagnostique et stabilité du modèle . . . . .	7
3.2	Analyse . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>12</b>

## Table des figures

1	Baie du Bengale . . . . .	3
2	Bathymétrie de la zone d'étude . . . . .	6
3	Diagnostics du modèle au niveau de la zone d'étude . . . . .	7
4	Circulation des vents selon la période de l'année . . . . .	8
5	Eau douce Golfe de Bengale . . . . .	8
6	Température ( °C) en fonction de période de l'année à 10 mètres de profondeur . . . . .	9
7	Salinité ( $gkg^{-1}$ ) en fonction de la période de l'année à 10 mètres de profondeur . . . . .	9
8	Circulation en fonction la période de l'année à 10 mètres de profondeur . . . . .	10
9	Comparaison des résultats de Salinité ( $gkg^{-1}$ ) entre notre modèle CROCO et celui de la littérature scientifique NEMO à 110 mètres de profondeur . . . . .	10

# 1 Introduction

L'Océan est déterminant pour la compréhension du climat. Il peut agir sur la météo et être ainsi lié aux conditions de vies de millions de personnes. C'est le cas pour l'Inde qui est traversé tous les ans par des pluies de mousson qui sont liées à un courant en particulier : le courant de mousson Sud-Ouest (SMC). Ce dernier est un courant chaud saisonnier qui agit entre Juin et Septembre dans l'hémisphère Nord de l'océan Indien, passant par la mer d'Arabie et dans la Baie du Bengale (BoB). La direction suivie par ce courant est la même que celle suivie par les vents de moussons du Sud-Ouest, qui du fait du déplacement de la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT) se dirige vers le continent asiatique. Nous nous intéressons plus particulièrement à ce courant dans la BoB. En effet, la forte stratification de cette baie cause de rapides changements de température de surface. Elle est due à une différence de salinité entre les eaux douces de surface du Nord de la baie et l'apport d'eau chaude et salée par le SMC.

Pour observer la circulation de ce courant ainsi que de ses paramètres physico-chimiques, nous utilisons le modèle numérique CROCO (Coastal and Regional Ocean Community model) lui-même issue d'autres systèmes tels que ROMS, MARS3D et HYCOM. Dans un premier temps, les matériaux et méthodes utilisés lors de cette étude vont être présentés. Ensuite les résultats obtenus à partir du modèle CROCO seront présentés puis comparés à ceux de l'article *The Dynamics of the Southwest Monsoon Current in 2016 from High-Resolution In Situ Observations and Models* de Benjamin G. M. Webber et al. Enfin ces résultats seront discutés et mis en lien avec la méthode utilisée.

## 2 Matériels et Méthodes

### 2.1 Description de la zone d'étude



FIGURE 1 – Baie du Bengale

L'océan indien, en particulier le Nord, est entouré de terres émergées. La zone d'étude prise en compte par le modèle est délimitée par les coordonnées suivantes : entre 5°N et 23°N pour la latitude et entre 70°E et 100°E pour la longitude. La BoB est une mer du nord-est de cet océan. D'une superficie de 2 172 000 km<sup>2</sup>, cette baie est sujette à un apport important en eau douce provenant de grands fleuves d'Asie comme le Gange ou l'Irrawaddy. L'un des avantages du modèle CROCO est qu'il prend en compte les interactions cotières permettant de mieux comprendre celles à plus grande échelle. Au moment de la période estivale des moussons, la ZCIT s'étend au Nord. C'est au niveau de cette zone de basse pression que convergent les vents du Nord-Est et du Sud-Est. Ces derniers ne vont donc plus jusqu'à l'équateur durant l'été mais vont

jusqu'en Inde continentale, dépassant le tropique du Cancer. Ces vents sont déviés ensuite vers la droite par la force de Coriolis : c'est l'origine des vents du Sud-Ouest. Au niveau de la péninsule indienne, les vents des moussons se séparent entre la mer d'Arabie et la BoB, notre zone d'intérêt.

## 2.2 Présentation du modèle CROCO

Le modèle CROCO sera utilisé dans cet article pour analyser la circulation et les paramètres physico-chimiques de la zone décrite précédemment. Pour cela, le modèle résout les équations primitives de Navier-Stokes couplées aux équations de conservation de la chaleur et du sel. Pour faire ces calculs, le modèle s'appuie sur les hypothèses suivantes :

### Hypothèses :

- L'approximation de Boussinesq qui considère que la masse volumique est, en tout point de l'espace et à tout instant, la somme d'une contribution fixe (valeur de référence  $\rho_0$  et d'une fluctuation  $\rho'$  très inférieure à  $\rho_0$ ).

$$\rho = \rho_0 + \rho'(x, y, z, t) \quad \text{avec} \quad \rho' \ll \rho_0$$

- La "fermeture Newtonienne" qui dit que, comme pour la viscosité moléculaire, on peut introduire des coefficients de viscosité turbulente et réécrire les moyennes des produits des composantes de la vitesse en terme de vitesses moyennes, aussi appelées tensions de Reynolds.

$$\begin{aligned} \overline{u' u'} &= -A_x \frac{\partial u}{\partial x} ; & \overline{u' v'} &= -A_y \frac{\partial u}{\partial y} ; & \overline{u' w'} &= -A_z \frac{\partial u}{\partial z} \\ \overline{v' u'} &= -A_x \frac{\partial v}{\partial x} ; & \overline{v' v'} &= -A_y \frac{\partial v}{\partial y} ; & \overline{v' w'} &= -A_z \frac{\partial v}{\partial z} \end{aligned}$$

- Compensation du gradient vertical de pression par l'accélération de la pesanteur, ce qui amène à considérer la composante de la vitesse verticale ramenée à l'équation hydrostatique.

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

### Les équations primitives travaillées par le modèle sont :

- Les équations de Navier-Stokes sur l'horizontale :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + f v - \frac{\partial \overline{u' u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u' v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u' w'}}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - f u - \frac{\partial \overline{v' u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v' v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v' w'}}{\partial z} \end{aligned}$$

— Les équations de conservation de la chaleur et du sel :

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

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

— L'équation de continuité :

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

— L'équation d'état TEOS 10 :

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

**Le modèle CROCO est également soumis à des bases de données utilisées par des modèles mathématiques :**

**Les Forçages** La visualisation graphique des résultats obtenus d'après les équations primitives vues précédemment se fait via le logiciel Matlab. Cette étape nécessite un large panel de données fournissant les informations sur les forçages atmosphérique via la base de données COAD05 (Comprehensive Ocean-Atmosphere data) et WOA2009 (World Ocean Atlas). Les informations vis à vis de la topographie sont regroupées dans la base de données TOPO.

**Grille, Discrétisation et condition CFL** La grille utilisée par le modèle CROCO est une grille décalée (Arakawa-C) sur l'horizontale, permettant l'obtention de coordonnées curvilignes et un système de coordonnées sigma sur la verticale, permettant d'avoir le même nombre de niveau quel que soit la profondeur.

Les discrétisations spatiales sont, sur l'horizontal ainsi que sur la verticale, aux différences finies. Les discrétisations temporelles se basent sur la séparation des pas de temps (*mode splitting*), ce qui permet une résolution du modèle en 2D (mode barotrope et processus rapide) sur l'horizontal et une résolution du modèle en 3D (mode barocline et processus lent) sur la composante verticale.

Cette différence de temporalité peut amplifier les erreurs commises par le modèle à chaque pas de temps. Pour éviter cela, les conditions de stabilité entre discrétisation spatiale et temporelle sont liées par le critère de type CFL (courant Fridrichs-Levy) :

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

## 2.3 Paramètres et configuration du modèle

Notre modèle a été appliqué entre 5°N et 23°N pour la latitude et entre 70°E et 100°E pour la longitude. En choisissant la résolution du modèle ainsi que le nombre de niveau sur la verticale, on définit le nombre de maille dans la direction x par les paramètres LLm0 et MMm0. On a également considéré les frontières Nord et Est comme étant fermées.

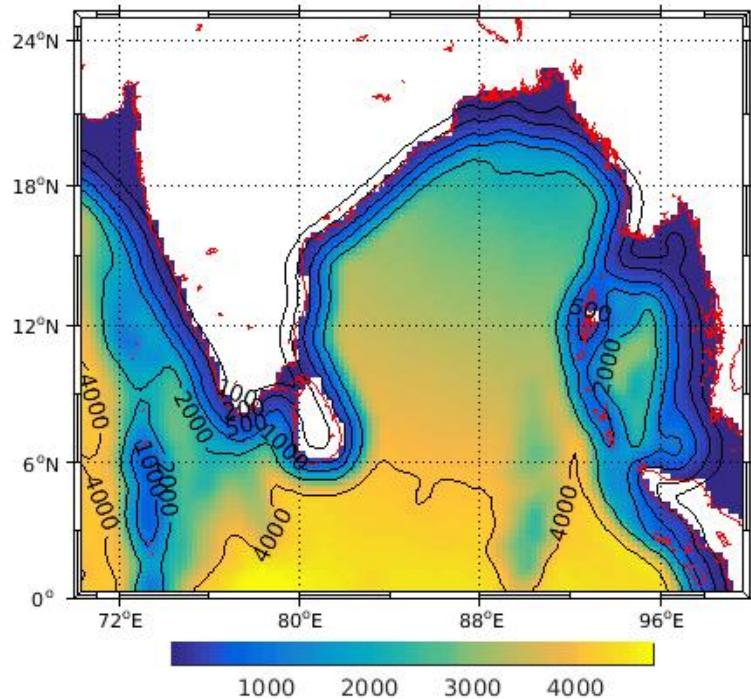


FIGURE 2 – Bathymétrie de la zone d'étude

Pour définir les pas de temps interne et externe, on se base sur le critère de stabilité CFL. Nous avons choisi dans notre étude une résolution de  $1/6$ , pour  $N=32$ , le nombre de niveau sur la verticale. Les paramètres LLm0 et MMm0 ont été calculés de telle manière que la grille soit composée d'environ  $10^5$  mailles pour ne pas avoir de temps de calculs trop long. Notre modèle fait une simulation sur 10 années (12 mois, 30 jours par mois). Enfin, on a calculé avec l'aide de matlab le pas de temps interne, ainsi que NTIMES et dt en seconde.

Résolution	$\frac{1}{6}$	NTIMES	1800
N	32	NDTFAST	60
LLm0	179	DT	1440
MMm0	111	Nb d'itérations en 1 jour	40

TABLE 1 – Paramètres grille

Notre Simutalution a mis environ 32 heures et 51 minutes. Une fois les résultats obtenus, nous pouvons visualiser les résultats à l'aide du logiciel Matlab.

### 3 Résultats

#### 3.1 Diagnostique et stabilité du modèle

Le modèle utilisé nous permet donc via le logiciel matlab d'observer et de représenter les diagnostics calculés. Ces graphes nous permettent de savoir à partir de quel moment notre modèle se stabilise, c'est-à-dire à osciller de manière régulière autour de la moyenne calculée. La figure 3 représente les variables de diagnostic moyennées à une résolution  $\frac{1}{6}$ .

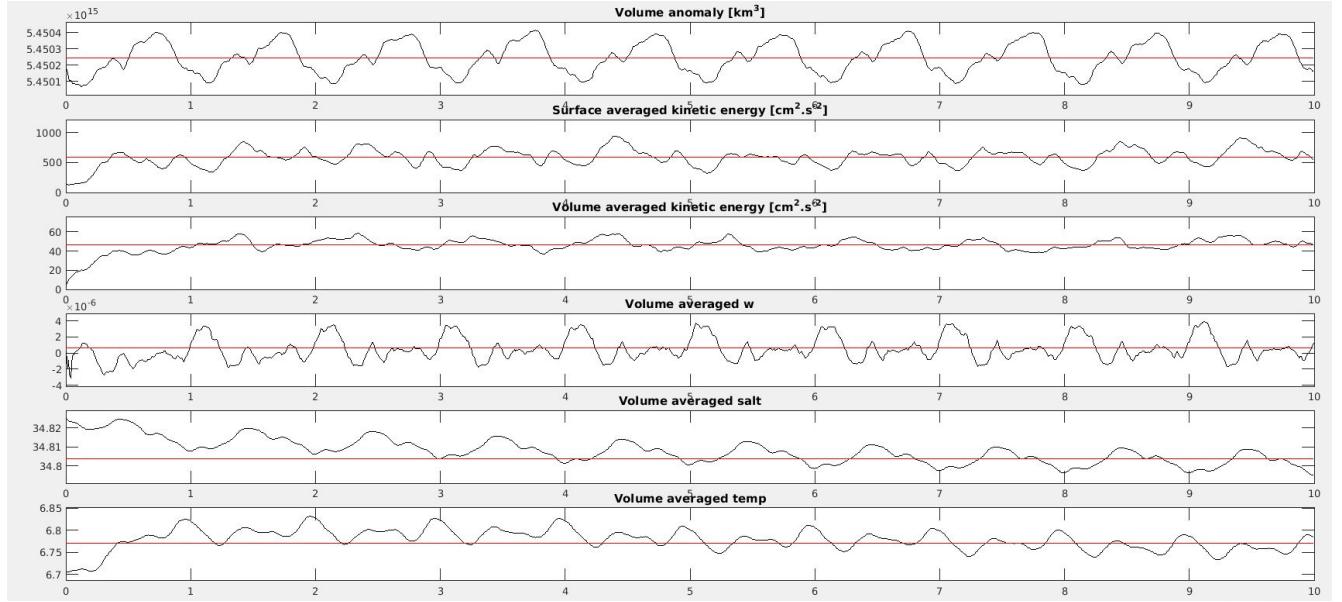


FIGURE 3 – Diagnostics du modèle au niveau de la zone d'étude

On peut voir que la plupart des paramètres représentés sur la figure 3 se stabilisent rapidement au bout d'un an environ mis à part la salinité qui en met environ quatre. Nous étudierons donc les données à partir de la deuxième année. Pour avoir une meilleure stabilité, il aurait fallu lancer la modélistion sur une plage de temps plus importante, mais nous étions ici limités par le temps et la force de calcul du cluster.

#### 3.2 Analyse

**La circulation du vent** Le modèle utilisé nous permet d'observer sur la figure 4 la circulation du vent, qui change de manière saisonnière deux fois par an. Ces vents qui traversent la BoB sont séparés en deux catégories : ceux du nord-est, qui soufflent durant la période hivernal (jour 15) et ceux du sud-ouest qui soufflent durant la période estivale (jour 195). Les vents intersaisonnier sont également représentés (jour 105 et jour 285).

Les vents représentés au jour 195 sont les responsables des pluies intenses qui traversent l'Inde. Ceux de la BoB sont principalement responsables des précipitations au Nord et à l'Est de ce pays, tandis que la circulation d'air dans la mer d'Arabie est plus responsable de celles dans l'Ouest du Pays. Ces vents sont dus à une forte stratification présente dans la BoB.

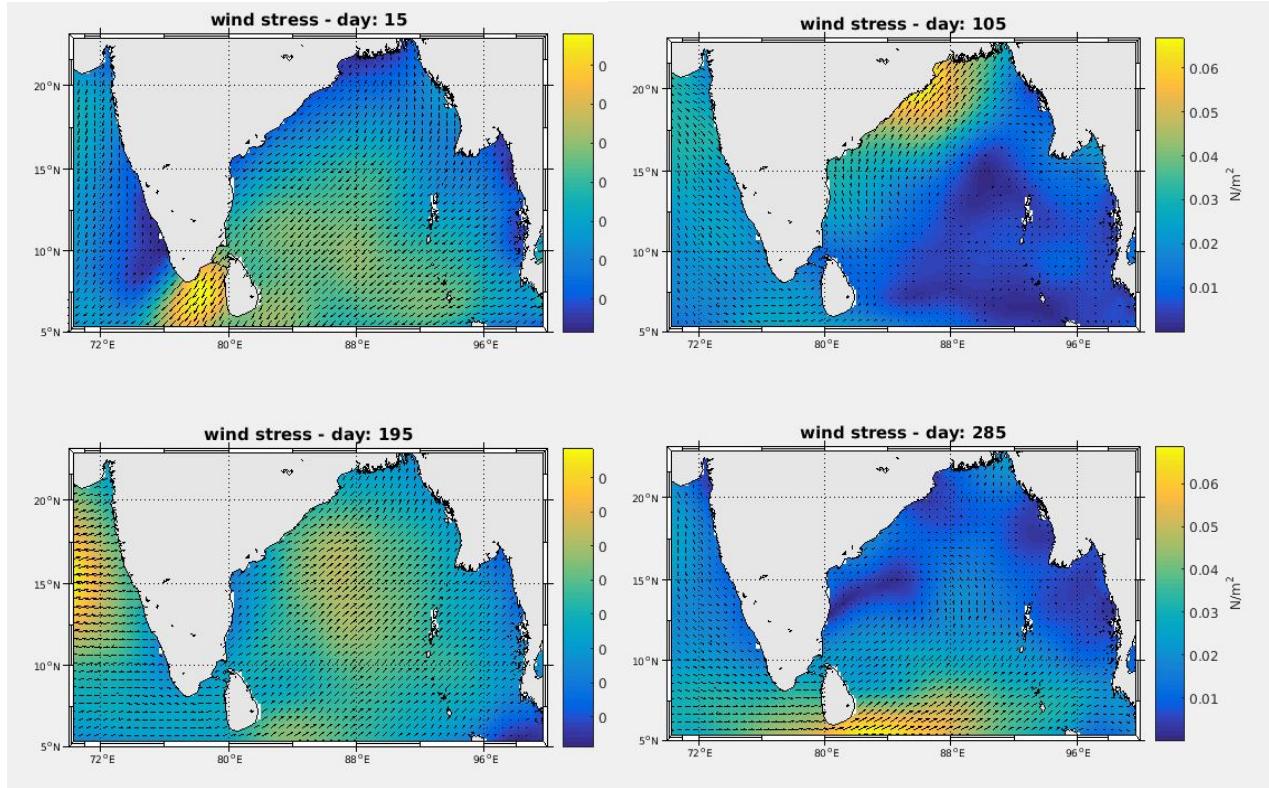


FIGURE 4 – Circulation des vents selon la période de l’année

**Température et Salinité** Cette stratification est le produit de la différence de salinité entre les eaux douces réjetées dans la baie et le SMC, chaud et salé. Au moment de la mousson estivale, on peut voir sur la figure 5 une masse d’eau douce plus importante dans le Nord de la BoB en été qu’en hiver.

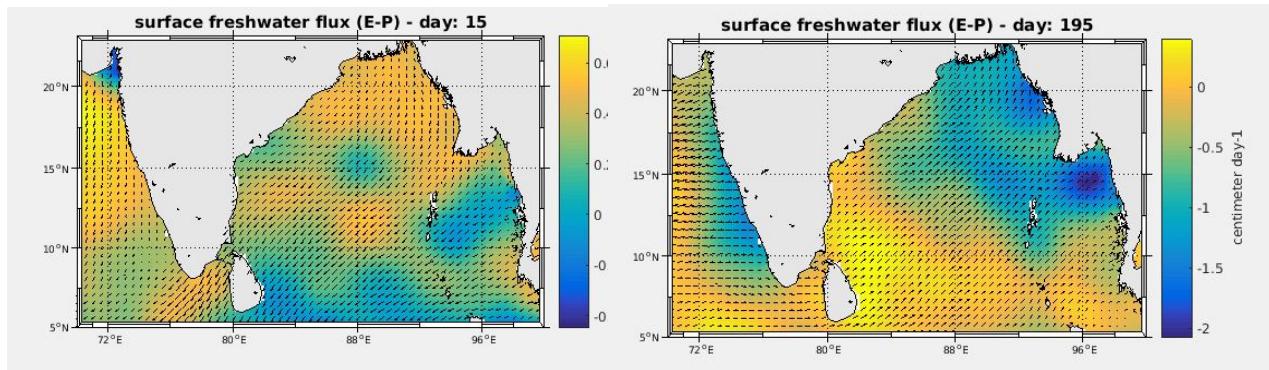


FIGURE 5 – Eau douce Golfe de Bengale

Les paramètres de température et salinité sont également dépendants de l’effet saisonnier que connaît la région. Sur la Figure 6, on peut voir que les températures les plus froides sont atteintes en début d’année (jour 15) dans le Nord du Bob (moins de 24), puis on remarque une hausse des températures entre les saisons (jour 105 et jour 285) et au moment de la mousson (jour 195), où les températures peuvent atteindre jusqu’à 29. Il en est de même pour la salinité : On voit sur la Figure 7 la zone de faible salinité, généralement positionnée au nord de la BoB, se voir déplacée au niveau de la côte Ouest de l’Inde, en lien avec l’apport important d’eau douce de surface qui arrive au même moment.

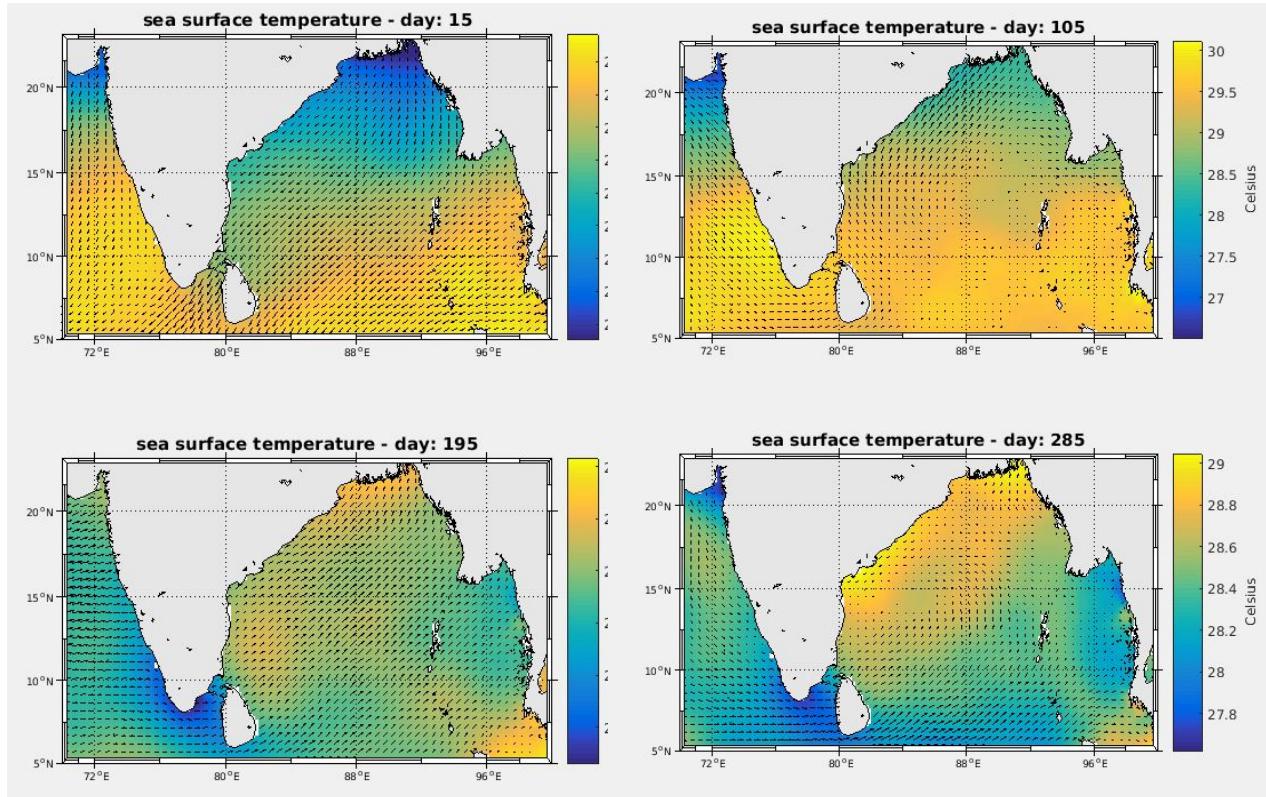


FIGURE 6 – Température ( °C) en fonction de période de l'année à 10 mètres de profondeur

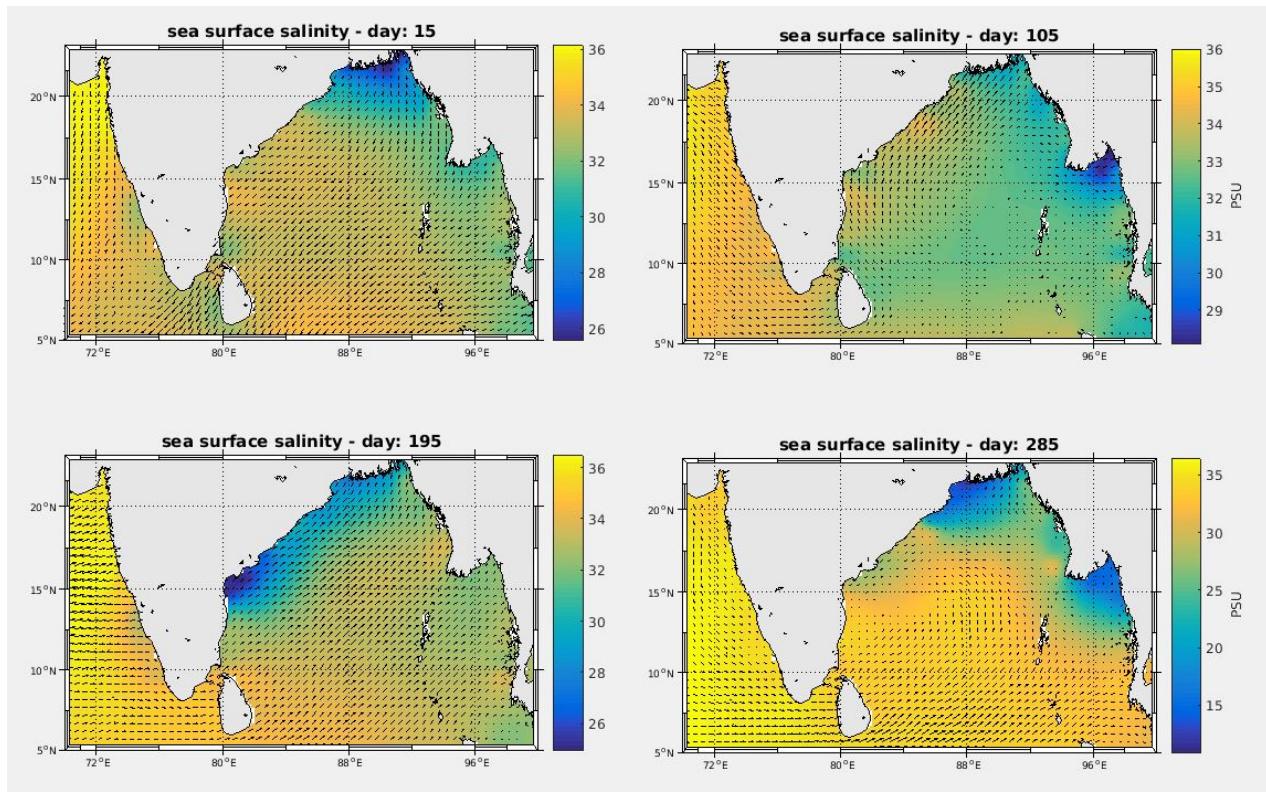


FIGURE 7 – Salinité ( $gkg^{-1}$ ) en fonction de la période de l'année à 10 mètres de profondeur

**Circulation océanique** Le modèle permet la sortie des schémas de la hauteur de surface libre et de la circulation marine dans la zone d'intérêt soumise au SMC. La figure 8 nous montre la saisonnalité de ces dernières en période hivernale (gauche), avec des gyres anticycloniques dominant la baie et quelques gyres anticycloniques plus faibles en mer d'Arabie, et en période estivale (droite) avec des gyres cycloniques le long de la côte est indienne et une présence quasi inexistante de tourbillons sur la côte ouest. On observe également en juillet un tourbillon cyclonique au sud-est du Sri Lanka, mais pas en janvier.

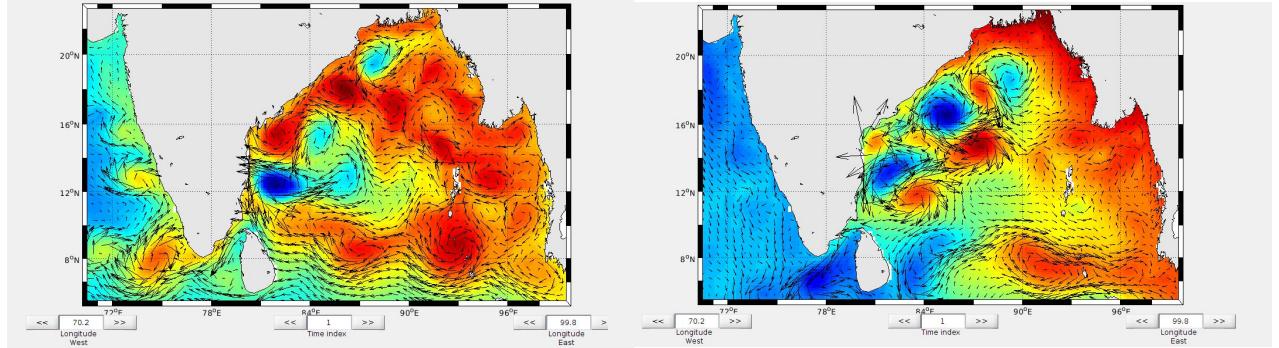


FIGURE 8 – Circulation en fonction la période de l'année à 10 mètres de profondeur

**Comparaison avec la littérature scientifique** Dans cette partie, nous cherchons à vérifier la qualité de notre modèle en comparant les résultats obtenus avec la littérature Scientifique. Nous comparons la salinité et la vitesse moyenne à 110 mètres de profondeur au large du Sri Lanka, au niveau de ce qu'on appelle le Sri Lanka Dome (SLD). Ce dernier est un dome froid au large du Sri Lanka qui se développe pendant la saison de la mousson du sud-ouest. On peut observer un important tourbillon cyclonique au niveau de cette zone.

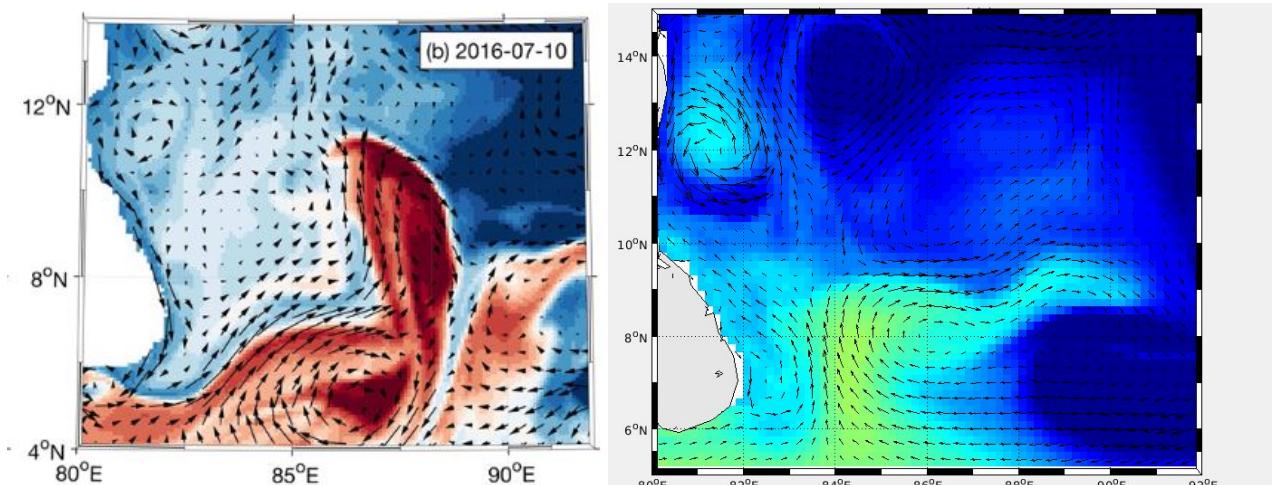
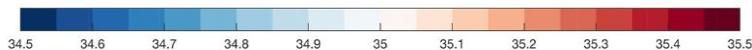


FIGURE 9 – Comparaison des résultats de Salinité ( $\text{gkg}^{-1}$ ) entre notre modèle CROCO et celui de la littérature scientifique NEMO à 110 mètres de profondeur



D'après Webber et al (2018), qui utilisent le modèle NEMO, le SLD s'étend en période estivale sur  $82^{\circ}$ - $86^{\circ}$ E,  $5^{\circ}$ - $15^{\circ}$ N (Figure 9). On peut remarquer que notre modélisation (droite) représente bien la différence de salinité entre le SLD et le courant au sud, plus salé et composé de tourbillons anticycloniques, qui le contourne. Cependant, le SLD représenté

par notre modèle est plus petit que celui de l'article, et la salinité est inférieure pour notre courant du sud.

## 4 Conclusion

Le courant de mousson sud-ouest est responsable des précipitations estivales que connaît l'Asie. Notre modèle nous a permis d'obtenir des résultats valides, comparés à de la littérature scientifique, nous offrant une meilleure compréhension de la circulation de notre zone d'étude. Ici, nous nous sommes principalement focalisés sur le SMC dans la baie du bengale. Nous avons pu y observer des changements saisonniers importants sur de nombreux paramètres comme par exemple la direction des vents, ou encore l'apport en eau douce et les différences de salinité.

Cependant, les résultats obtenus ne reflètent pas complètement la réalité. Lors de la comparaison avec la littérature scientifique (Webber et al (2018)), on a pu remarquer certaines faiblesses du modèle. Tout d'abord, nous avons considéré les frontières fermées au Nord, mais également à l'Est, or certains processus du Pacifique influencent notre zone d'étude. Les erreurs de modélisation peuvent être également dues au paramétrage de celui-ci lié aux forcages, aux données d'initialisation ou encore aux conditions aux frontières.

Enfin, on peut dire au terme de cette étude que le modèle numérique CROCO apportent des résultats satisfaisants, permettant de comprendre une partie des changements de climat saisonnier autour de l'Inde liées au SMC. Il est indispensable pour le futur que de tels modèles continuent à se développer pour la recherche. On voit bien que ces modèles sont aussi très dépendants de la qualité des données mises en jeu. Ici, pour améliorer notre modèle, on aurait aimé une puissance de calcul plus importante, nous permettant de prendre en considération des facteurs qui interviennent sur une plus grande échelle.

## 5 Bibliographie

Benjamin G. M. Webber, Adrian J. Matthews, P. N. Vinayachandran, C. P. Neema, Alejandra Sanchez-F Ranks, V. Vijith, P. Amol , AND Dariusz B. Baranowski, The Dynamics of the Southwest Monsoon Current in 2016 from High-Resolution In Situ Observations and Models, American Meteorological Society, DOI : 10.1175/JPO-D-17-0215.1, Octobre 2018

Jessica M. Burns, Bulusu Subrahmanyam, V. S. N. Murty , On the dynamics of the Sri Lanka Dome in the Bay of Bengal, Journal of Geophysical Research : Oceans Volume 122, Issue 9 p. 7737-7750, [https ://doi.org/10.1002/2017JC012986](https://doi.org/10.1002/2017JC012986), 08 Septembre 2017