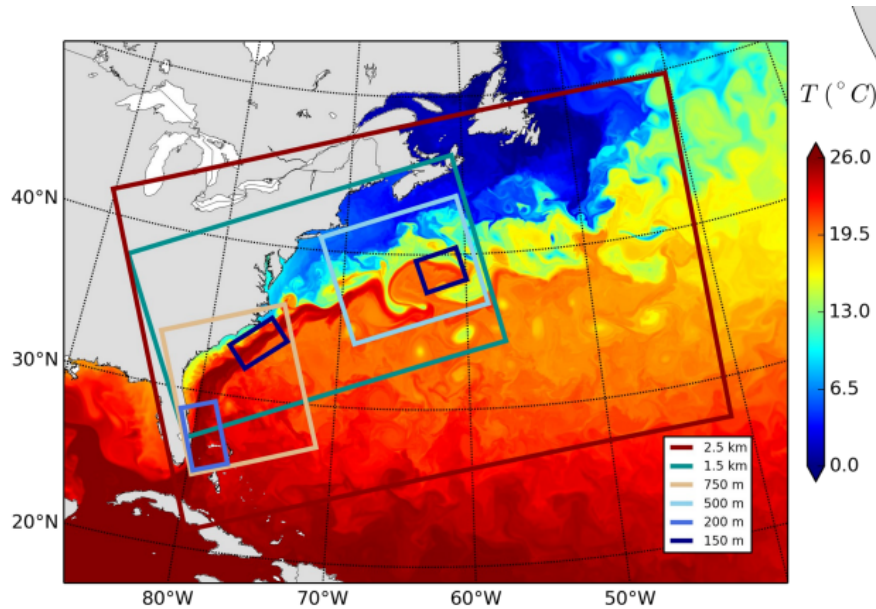


# ENSTA BRETAGNE

## UE 5.2. MODÉLISATION NUMÉRIQUE HAUTURIÈRE



---

## Rapport de projet Modélisation du Golfe du Bengale

---

GABRIELLE SORINI

J. GULA

17 février 2023

# 1 Introduction

Ce rapport a pour but d'étudier la circulation océanique dans la région du Golfe de Bengale. Nous présentons la modélisation numérique de cette région dans le logiciel CROCO, avec la justification des paramètres choisis. Ensuite, nous analyserons plusieurs paramètres océanographiques de la simulation, et enfin nous les comparerons à des travaux trouvés dans la littérature à propos de la circulation dans le Golfe. [VMS]



FIGURE 1 – Golfe du Bengale

## 2 Implémentation sur CROCO

### 2.1 Début de l'implémentation

On commence par sélectionner une figure proche d'un rectangle délimitant la région étudiée dont on extrait les coordonnées des points aux quatre coins :

- A(23°15'45"N, 77°59'47"E) ;
- B(22°41'48"N, 99°33'38"E);
- C(5°00'19"N, 98°58'47"E);
- D(5°24'33"N, 78°22'54"E).

A partir de nos différents fichiers sous CROCO, on va modifier les paramètres pour implémenter notre modèle.

On commence par définir un nouveau cas, le cas **BENGALE** dans le fichier `cppdefs.h`. Dans le fichier `crocotools.param.m`, on modifie les dimensions de notre grille en choisissant  $lon(77,100)$  et  $lat(5,24)$  à partir des coordonnées des points A, B, C, D cités précédemment.

Ensuite, on crée nos différents fichiers en utilisant les scripts sur *Matlab*. Ainsi, à partir du fichier `croco_grd.nc` ouvert avec un *ncview*, on peut retrouver les paramètres  $p_m$  et  $p_n$  tels que :  $p_m \in [2.71.10^{-5}, 2.96.10^{-5}]m^{-1}$  et  $p_n \in [2.71.10^{-5}, 2.95.10^{-5}]m^{-1}$ . On a donc  $\delta_x = \frac{1}{p_m}$  et  $\delta_y = \frac{1}{p_n}$ .

On trouve également les dimensions **LLm**=68 et **MMm**=57 lors de la création des fichiers (`make_grid`), correspondant à nos discrétisations horizontale et verticale. La discrétisation verticale **N**=32 était déjà présente dans `crocotools.param.m`.

### 2.2 Détermination de la discrétisation en temps

Désormais, il faut choisir nos pas de temps pour la discrétisation. Tout d'abord, on veut faire une réalisation sur deux ans, avec des paramètres moyennés tous les 30 jours. On cherche dans un premier temps à déterminer le pas de temps barotrope  $dt$ . On a la formule :

$$dt = \sqrt{g * H * \frac{1}{\delta_x^2} + \frac{1}{\delta_y^2}} \leq 0.89$$

Ainsi, on trouve sachant que  $H = 4031m$  dans le fichier `croco_grd.nc` et en prenant  $\delta_{xmax} = 36.90km$  et  $\delta_{ymax} = 36.90km$  :  $dt = 116.83s$  pour le pas de temps barotrope.

Ensuite, on détermine le pas de temps barocline  $_{bc}$  avec la formule :

$$\delta t_{bc} \leq \frac{\alpha \delta_x}{2 * u_{max}}$$

avec  $\alpha = 0.89$  et  $u_{max} = 2.5m/s$ . On trouve  $\delta t_{bc} = 6568s$ .

On peut ensuite déterminer  $NDt_{fast} = \frac{dt}{\delta t_{bc}} = 57$ .

On peut finalement implémenter ces derniers paramètres de temps, ainsi que *NTimes* et *NAVg* correspondant à 2 ans et 30 jours respectivement dans le fichier `croco.in`

On peut ensuite lancer la simulation `croco.in` après avoir effectué la compilation avec `./jobcomp`.

## 3 Analyse des résultats

### 3.1 Question 2

Dans un premier temps, on souhaite observer l'évolution de l'énergie cinétique de surface tout au long de notre simulation. On a :

$$KE_{surf} = \int \frac{1}{2}(u^2 + v^2) dx dy$$

en  $Jm^2.kg^{-1}$  si l'on raisonne sur la surface totale.

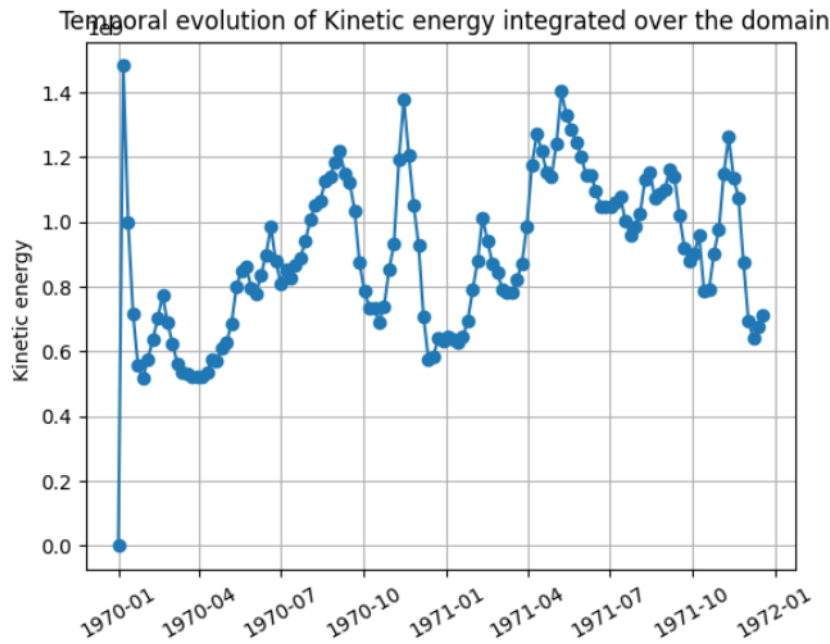


FIGURE 2 – Evolution temporelle de l'énergie cinétique de surface

On observe des pics d'énergie cinétique en Septembre, en Novembre pour les deux années, ainsi qu'un pic en été de la deuxième année. Le Golfe du Bengale est en partie influencé par les moussons, qui apportent des vents forts et des précipitations intenses pendant l'été. [RAR+22] Cela peut expliquer l'énergie cinétique de surface important en été lors de la deuxième année.

### 3.2 Question 3

On analyse la vorticité potentielle  $\zeta$  en surface normalisée par le paramètre de Coriolis  $f$ . On a  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ . On discrétise dans notre code l'équation telle que :  $\zeta[y, x] = \frac{(v[y, x+1] - v[y, x-1])}{2 * \delta x} - \frac{(u[y+1, x] - u[y-1, x])}{2 * \delta y}$  pour tous les instants  $t$ . On visualise cette donnée en surface.

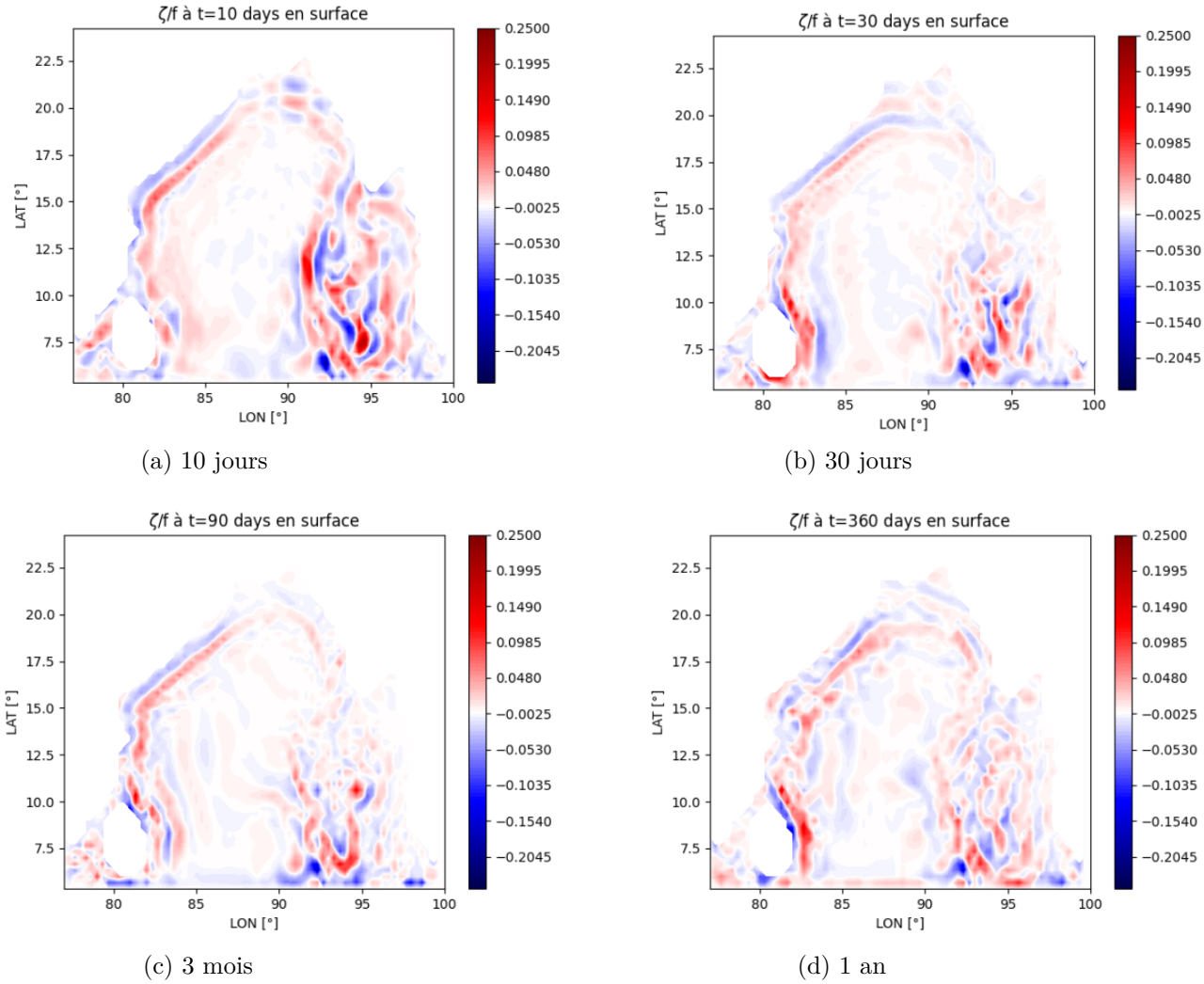


FIGURE 3 – Evolution de  $\zeta/f$  en surface à plusieurs moments de la simulation

Lorsque l'on analyse les cartes obtenues, on peut voir une zone de tourbillons importants en formation dans la zone est du Golfe, avec une alternance de signe pour  $\zeta/f$ . Les tourbillons semblent piégés sur des échelles de temps importantes. Dans cette zone, le courant principal est le courant équatorial, qui en arrivant dans le Golfe se déplace vers le nord le long de la côte. La vorticité relative présentant une bande bleue (négative) et une bande rouge (positive), on peut observer ce courant le long du littoral. Par ailleurs, on peut clairement voir le comportement différent entre l'intérieur (vorticité potentielle proche de 0) et contre les frontières (avec une certaine périodicité).

### 3.3 Question 4

On effectue la même chose cette fois-ci à 400m de profondeur, en interpolant nos données verticalement.

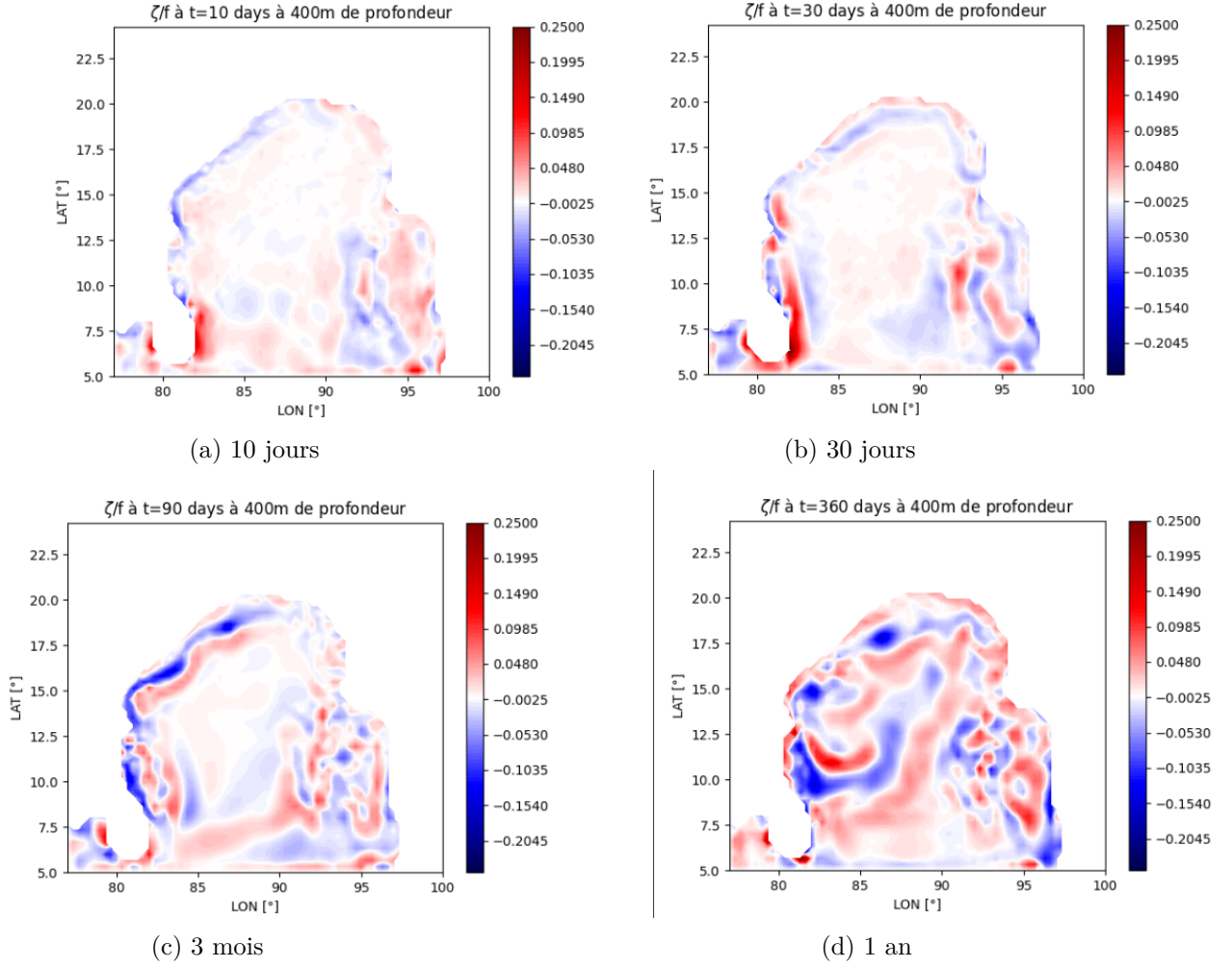


FIGURE 4 – Evolution de  $\zeta/f$  à 400m de profondeur à plusieurs moments de la simulation

Notre modèle à 400m de profondeur présente de la vorticité potentielle à de grandes échelles (figure(d)), alors que l'on observait des tourbillons à petite échelle en surface. La vorticité est toujours importante près des côtes. Dans tous les cas, on observe une conservation de la vorticité potentielle dans le Golfe.





### 3.4 Question 5

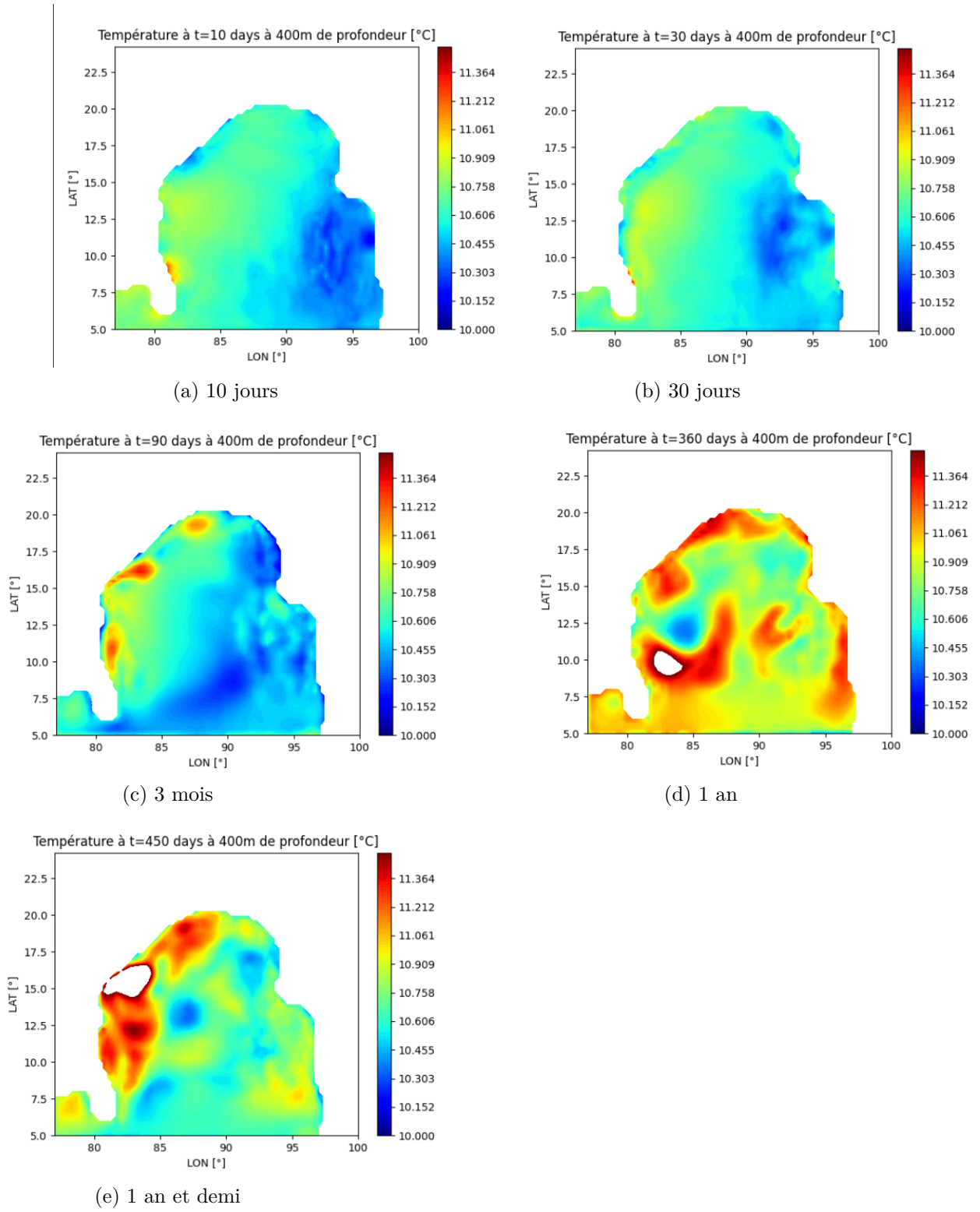


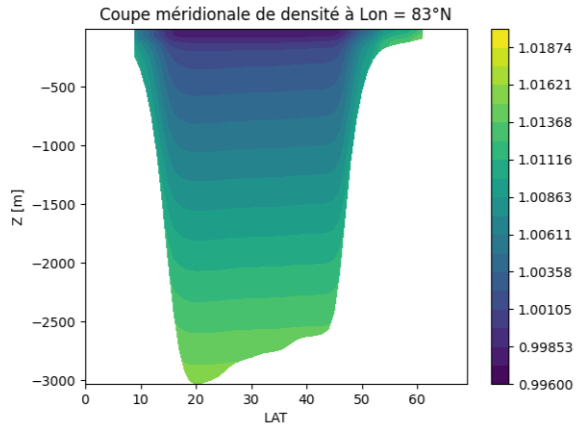
FIGURE 5 – Evolution de la température en °C à 400m de profondeur à plusieurs moments de la simulation

D'après notre modèle, la température est plutôt homogène en début de simulation (autour de  $10.5^{\circ}\text{C}$ ), avec des températures plus faibles dans la région sud-est. On observe une augmentation de la température près du littoral nord-ouest à partir du 3ème mois de simulation, et qui est surtout importante durant l'été (figure (e)) et présente des alternances le long de la côte.

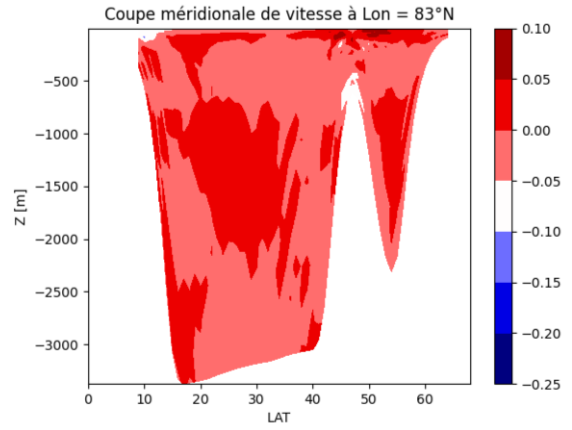
Ces alternances de température ont déjà été observées et sont sûrement dues à une gyre importante de circulation et une zone dans laquelle des tourbillons à petite échelle se déplacent. [VMS] Il a aussi été observé un point où la température est la plus faible en hiver, autour de  $16^{\circ}\text{N}$  sur la côte. On observe ensuite un gradient de température vers le Nord et vers le Sud à partir de ce point, où la température augmente du à la topographie. On peut visualiser ceci sur la figure (d) 5, à  $Lat = 16N$  et  $Lon = 95E$  en Janvier.

### 3.5 Question 6

Désormais, on va visualiser des coupes verticales à deux lieux intéressants : la longitude  $83^{\circ}\text{E}$ , là où l'on a pu voir une augmentation de la température précédemment en cote ouest ; et la latitude  $18^{\circ}\text{N}$ , qui longe le littoral nord.

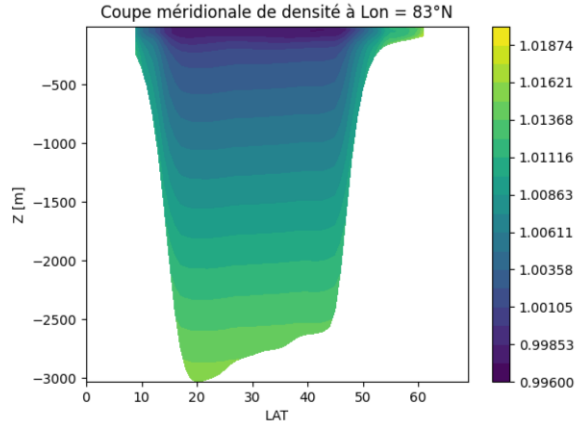


(a) Densité de l'eau

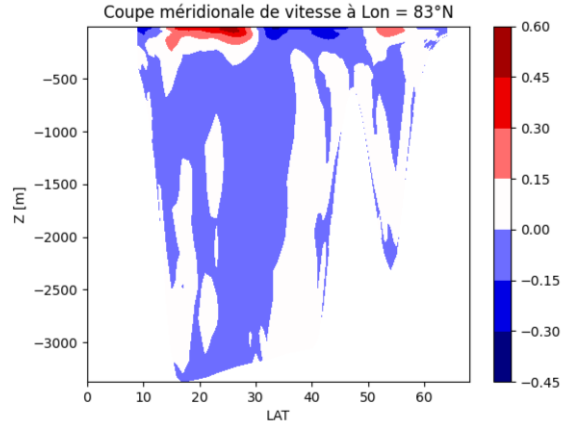


(b) Vitesse zonale (m/s)

FIGURE 6 – Coupe verticale à Longitude=83°E, t=10days



(a) Densité de l'eau



(b) Vitesse zonale (m/s)

FIGURE 7 – Coupes verticales à Longitude=83°E, t=10days (a), (b) et t=360days (c), (d)

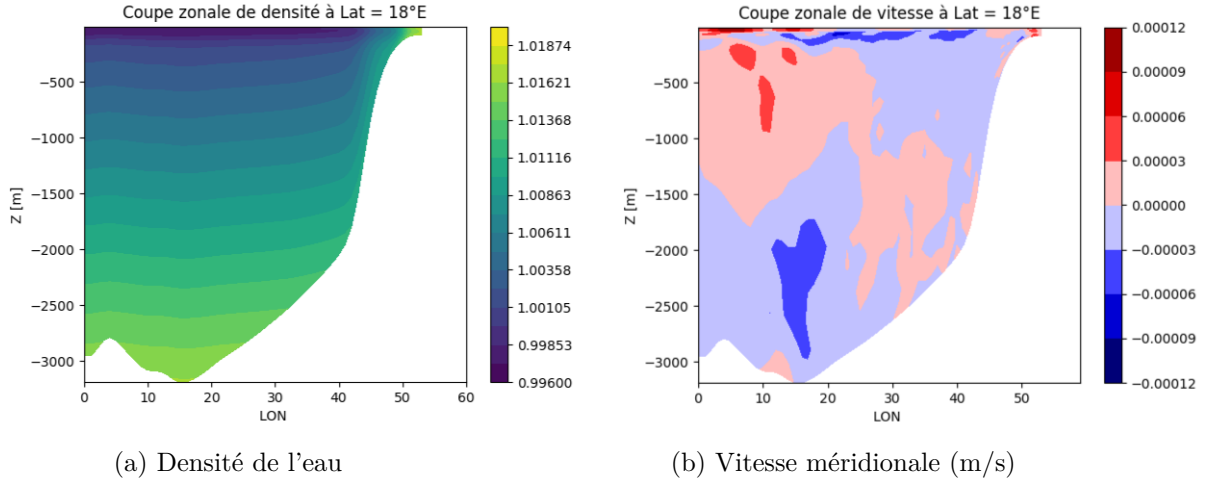


FIGURE 8 – Coupe verticale à Latitude =18°N, t=360days

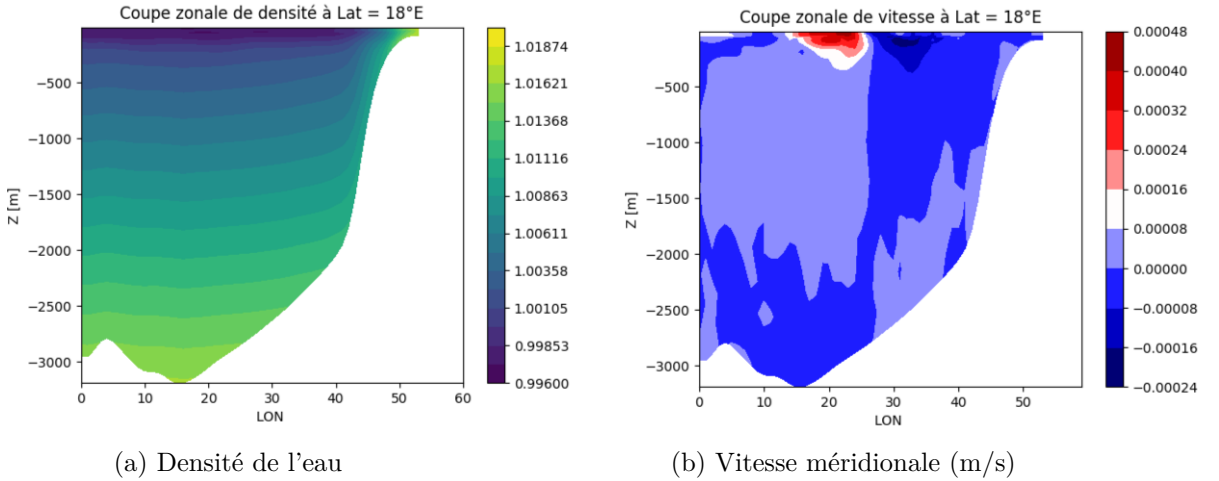


FIGURE 9 – Coupe verticale à Latitude =18°N, t=10days (a), (b) et t=360days (c), (d)

La coupe méridionale présente les reliefs de la topographie, qui confirment les instabilités que l'on pouvait retrouver avec la vorticité importante dans cette zone en profondeur. On observe le comportement des masses d'eau grâce à la coupe de densité, et l'on voit que les vitesses sont plutôt importantes en surface et aussi dans une zone entre à partir de 700/800m et 2000m de profondeur en janvier de la première année. La vitesse zonale est dirigée vers l'Est à cet endroit. En revanche, l'année suivante, la vitesse est dirigée vers l'ouest en profondeur. On en déduit une alternance importante des courants liée à des forçages externes comme le vent, les moussons, et les cyclones importants dans la région [RAR+22]. L'instabilité et la variation des courants de bord ouest sont en grande partie dues à la variabilité du courant équatorial. [VMS]

Quant à la coupe zonale, on observe des courants vers le sud en profondeur et vers le nord pour les eaux moins profondes, avec une alternance de direction en surface.

On retient des vitesses importantes en profondeur dans les basses longitudes, ce qui correspond à nouveau à la zone nord-ouest, où la vorticité en profondeur était assez intense.

On observe des upwellings très importants sur les côtes est. Les upwellings de la côte est apparaissent plutôt en hiver, et les downwellings durant les mois d'été. [VMS] On peut voir entre les figures sur les coupes zonales l'upwelling avec les eaux plus froides qui remontent près de la côte en hiver lors des deux années. Ces upwellings importants sont souvent dus aux vents. [VMS]

### 3.6 Question 7

On cherche à analyser les vitesses zonales et méridionales moyennées sur la deuxième année. On observe que, globalement, la vitesse zonale alterne en direction dans le centre du Golfe, avec des bandes oranges vers l'est et des bandes jaunes vers l'ouest. L'alternance est encore plus démarquée dans la zone de tourbillons du sud est. Sur la côte nord ouest, la vitesse zonale a plutôt tendance à être dirigée vers la côte. Par ailleurs, la vitesse méridionale présente aussi des alternances. On remarque cependant un flux vers le nord dans le sud et sud-est du Golfe du aux courants entrants par l'est. De plus, ce courant continue à longer la côte jusqu'à redescendre vers le sud à l'ouest du Golfe. Cela correspond bien à la circulation du Golfe influencée par le courant équatorial [VMS].

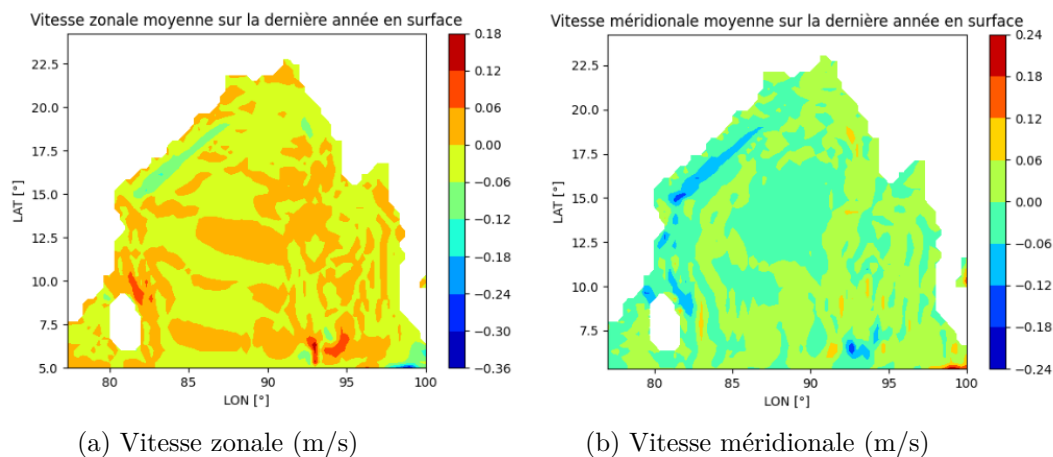


FIGURE 10 – Vitesses moyennées sur la dernière année de la simulation en surface

### 3.7 Question 8

Analysons la hauteur de la surface d'eau moyenne sur la dernière année.

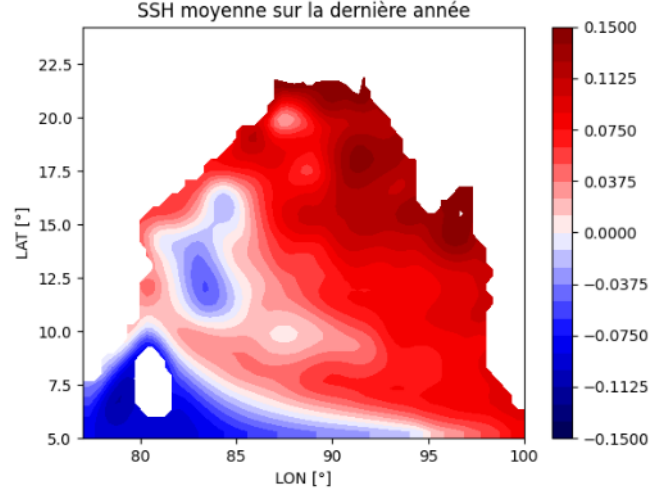


FIGURE 11 – SSH moyennée sur la dernière année de la simulation (m)

On observe nettement la montée des eaux dans la partie est et nord du Golfe, jusqu'à 15cm. En effet, le courant équatorial remontant par l'est [VMS], et au vu des comportements des vitesses 10, l'eau a tendance à augmenter sur la côte. Cependant, on observe une zone aux coordonnées (13°N, 83°E) où il y a une anomalie négative de hauteur d'eau. Les anomalies négatives se retrouvent aussi dans le sud-ouest du Golfe. En effet, durant l'été, on compte une forte anomalie positive et durant l'hiver, une anomalie négative mais moindre dans cette région. [VMS]

### 3.8 Question 9

On cherche à observer l'énergie cinétique de tourbillons lors de la deuxième année, en surface.

$$EKE_{surf} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})$$

avec

$$u' = u - \bar{u} = u - \frac{1}{T} \int_{1an}^{2an} u(t) dt$$

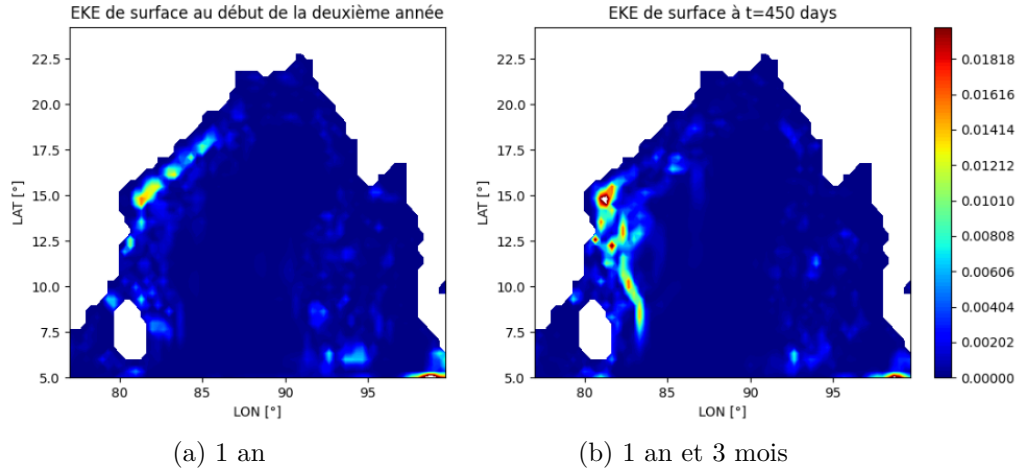


FIGURE 12 – Energie cinétique de tourbillon en surface durant la deuxième année de la simulation ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

On aurait pu s'attendre à de l'énergie cinétique de tourbillons en surface élevée dans la zone sud-est du Golfe, alors qu'elle est plutôt élevée dans le nord-ouest/ouest. On peut supposer que, du à la résolution de 36.9km qui n'est pas très précise, on a perdu précédemment les effets de petite échelle, notamment dans cette zone nord-ouest ; alors qu'en réalité, l'énergie cinétique de surface nous montre la variation temporelle par rapport à la moyenne dans cette zone. Elle est donc soumise à de fortes variations temporelles en termes d'énergie, avec la présence de tourbillons à petite échelle le long de la côte en janvier de la deuxième année, qui se propagent vers le sud en longeant la côte en début avril. Cela est cohérent avec les vitesses de courant de surface et leur déplacement et avec les observations de température qui alternent [VMS].

## 4 Conclusion

Ce projet a permis de modéliser la région du Golfe du Bengale sur deux années et de visualiser vitesses, vorticité potentielle, température, densité et énergies dans cette zone, et de fournir des résultats plutôt cohérents avec ce que l'on pouvait trouver dans la littérature.

Cependant, la circulation océanique dans le Golfe du Bengale reste un phénomène complexe qui implique plusieurs facteurs environnementaux tels que les vents, les marées, la topographie sous-marine et les précipitations. En effet, cette zone est soumise à de fortes moussons saisonnières qui induisent une alternance dans les gyres et les courants à cause des vents variables, et une variation de la hauteur d'eau. On a pu observer en hiver le courant équatorial qui remonte dans le Golfe par l'est, et se déplace le long des côtes, créant des tourbillons à grande échelle dans la côte est, et à plus petite échelle dans la région nord-ouest, se déplaçant vers le sud. On a également pu analyser des mouvements de déplacements des masses d'eau grâce à des coupes verticales de densité et de vitesse. Cette étude serait à poursuivre en analysant, mois par mois l'influence des moussons, ainsi qu'en repérant de forts événements ENSO selon les années.

## Références

- [RAR<sup>+</sup>22] Shinto Roose, R. Ajayamohan, Pallav Ray, Reshmi Mohan, and K Mohanakumar. ENSO influence on Bay of Bengal cyclogenesis confined to low latitudes. *npj Climate and Atmospheric Science*, 5, April 2022. [5](#), [12](#)
- [VMS] M.J. Varkey, V.s.N. Murty, and A. Suryanarayana. Physical oceanography of the bay of bengal. 34. [2](#), [10](#), [12](#), [13](#), [14](#), [15](#)