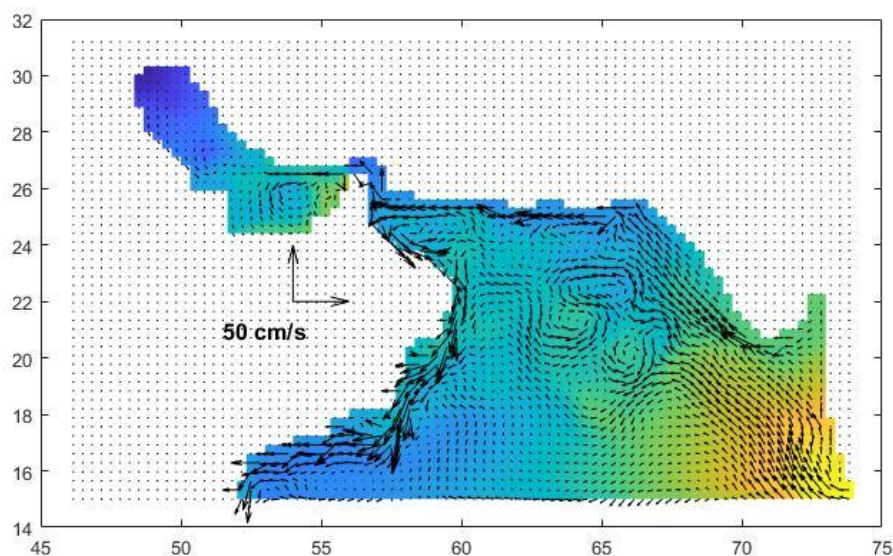


MASTER 1 SCIENCES DE LA MER
Parcours Océanographie Physique et Biogéochimique
Institut Pythéas – Aix-Marseille Université
OPB205 : Modélisation 3D océanique
Année universitaire : 2019-2020

**Modélisation hydrodynamique du Golfe Persique et du
nord de la mer d'Arabie à l'aide du modèle CROCO**



Présenté par : **M. ROLLAND Robin**

Sous la direction de : **M. DOGLIOLI Andrea**

30 avril 2020

Résumé :

La mer d'Arabie est actuellement étudiée pour sa dynamique complexe de méso-échelle. Le modèle océanique côtier et régional CROCO est implémenté pour une modélisation climatologique sur 10 ans dans le golfe Persique et le nord de la mer d'Arabie. Cette étude porte sur l'analyse des résultats de courantologie de surface et sur la comparaison de ces derniers avec la littérature disponible. Le modèle représente bien les grands courants et certains tourbillons de méso-échelle, mais échoue à représenter en détails la dynamique de méso-échelle. La résolution trop grossière de la grille numérique semblant être la principale limite. La modification des forçages atmosphériques et des conditions aux frontières pour prendre en compte l'apport de sel de la mer Rouge pourraient également permettre d'améliorer la représentation hydrodynamique de surface de la zone d'étude, particulièrement sensible aux régimes des vents de la mousson. Une bonne utilisation de modèles régionaux tel que CROCO pourrait être un outil indispensable pour l'étude future de la dynamique à méso-échelle de la mer d'Arabie.

Abstract:

The Arabian Sea is actually studied in order to better understand its complex mesoscale dynamics. The coastal and regional oceanic model CROCO is implemented for a 10 years climatological modelling study in the Persian Gulf and the North Arabian Sea. This study aims to analyse surface current results and to compare them with precedents studies. Large oceanic currents and some large eddies are well reproduced by the model, but it fails to represent hydrodynamic details and thinner eddies. These problems are surely largely explained by the weak resolution of the numeric grid. Modifying atmospheric forcing and boundary condition to take salt input into account could also improve the surface's hydrodynamic of the studied area, particularly sensitive to Monsoon wind conditions. The proper use of regional models such as CROCO could be an essential tool to further study the mesoscale dynamics of the Arabian Sea.

Table des matières

1 Introduction	2
2 Matériel & méthodes	3
3 Résultats et discussion.....	5
3.1 Diagnostique du modèle.....	5
3.2 Circulation de surface dans le Golfe Persique	6
3.3 Circulation de surface dans le nord de la mer d'Arabie	7
4 Conclusion.....	9
Bibliographie :.....	9
Liste des figures	9
Liste des tableaux	10

1 Introduction

La circulation océanique de surface de l'océan Indien est fortement influencée par les régimes de mousson. Dans l'hémisphère nord, en hiver, des vents de nord-est dominant et induisent un gyre anticyclonique dans la mer d'Arabie et le golfe du Bengale. En été, les vents dominants se retournent (vents de sud-ouest) et entraînent la formation d'un gyre cyclonique ainsi que d'un upwelling le long de la côte omanaise (Fig.1). Dans cette région proche de l'équateur, la circulation de surface est particulièrement corrélée au sens du vent du fait de la faible intensité de la force de Coriolis à ces latitudes (0 à 25°N). Une modélisation des courants de surface dans le golfe Persique (Fig.4, (b) ; Fig.5, (b)) et une représentation schématique des

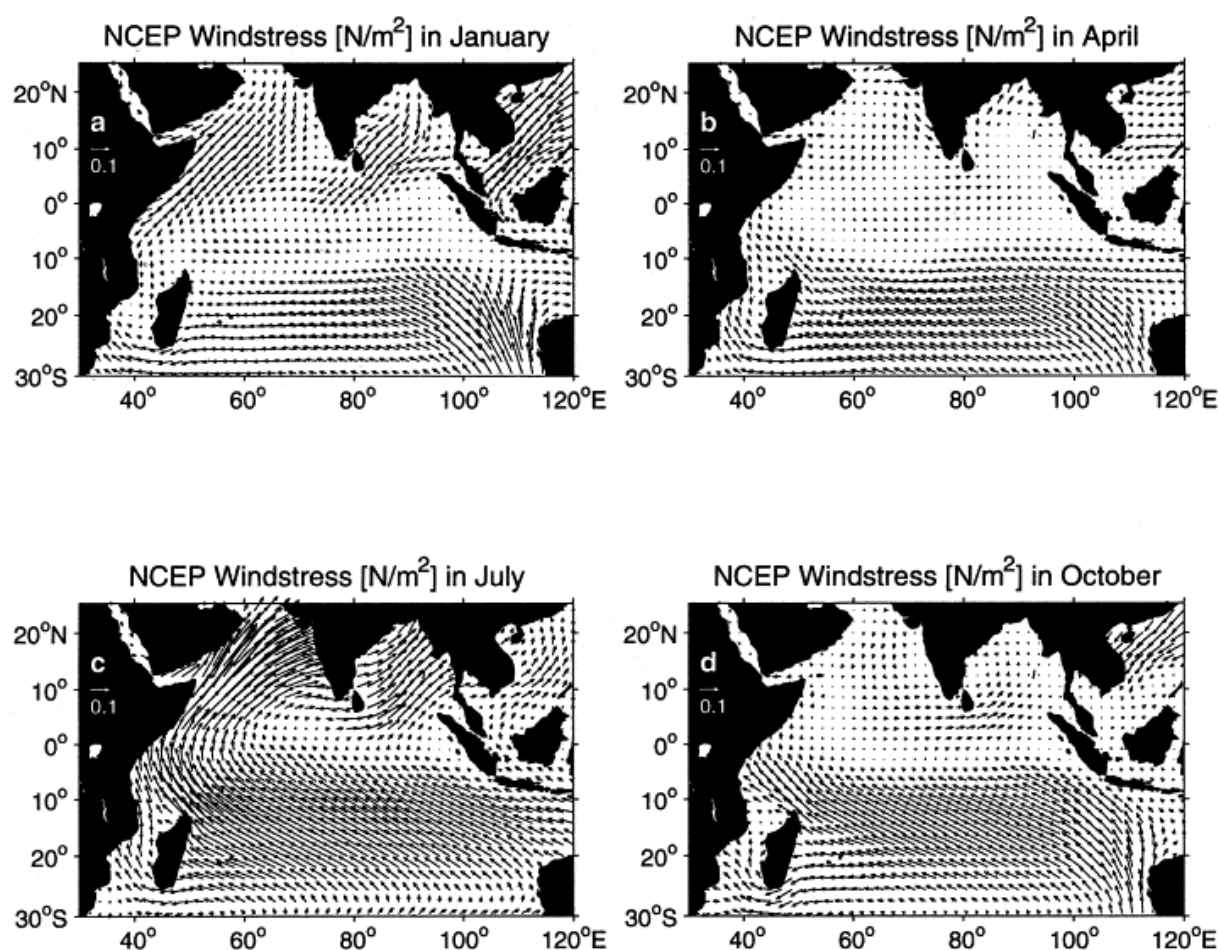


Fig.1. Champs de tension du vent de la mousson issus de l'US National Centers for Environmental Prediction (NCEP) pour le mois de a) January; b) April; c) July; d) November (Schott et McCreary 2001).

principaux courants de surface dans la mer d'Arabie (Fig.6, (b) ; Fig.7, (b)) sont disponibles dans les parties 3.2 et 3.3.

Dans ce travail, le modèle communautaire et régional CROCO est utilisé pour modéliser climatologiquement la circulation océanique de surface dans la partie nord de la mer d'Arabie jusqu'au golfe Persique (Fig.2). Les résultats sont comparés aux travaux de modélisation de Pous (2005) pour le golfe Persique et au travail synthétique de Schott et McCreary (2001) pour le nord de la mer d'Arabie.

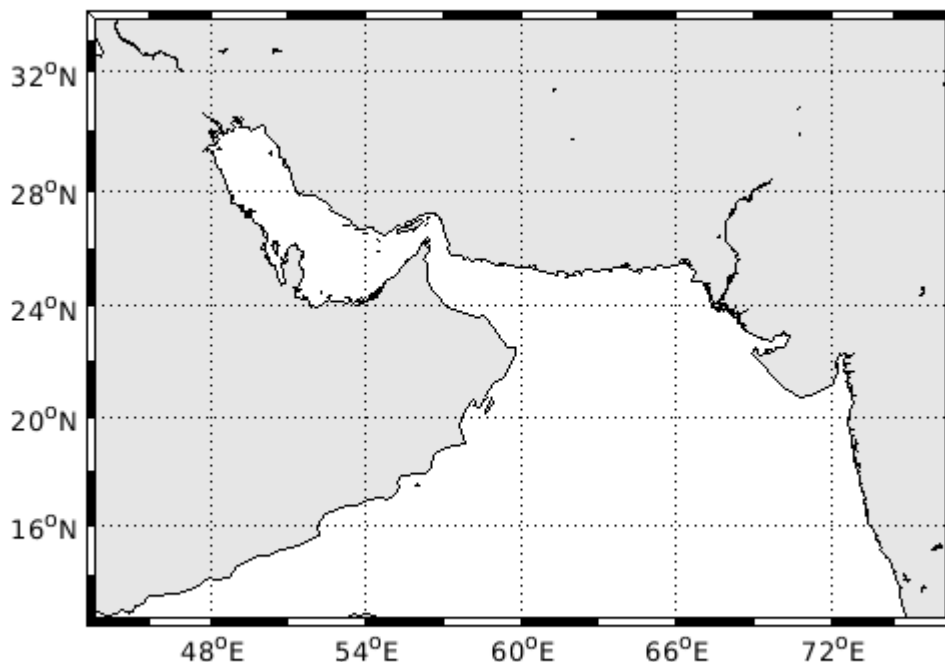


Fig.2. Carte de la zone modélisée avec CROCO dans cette étude, réalisée sur MATLAB grâce au fichier *make_grid.m*.

2 Matériel & méthodes

CROCO (Coastal and Regional Ocean Community model) est un modèle océanique communautaire régional développé à partir du modèle ROMS_AGRIF et intégrant des algorithmes provenant des modèles MARS3D, SNH et HYCOM. Il est développé par un consortium de partenaires français (IFREMER, SHOM, CNRS, IRD, INRIA, UPS), en association avec les protagonistes historiques de ROMS (notamment UCLA, DGEO etc.). CROCO est adapté à la modélisation régional et/ou côtière à fine échelle et représente l'état de l'art de la modélisation en océanographie.

Dans ce travail, une modélisation climatologique est réalisée. En effet, les forçages climatiques utilisés représentent une année climatologique de référence et sont issus des bases de données COADS (Comprehensive Ocean and Atmospheric Data Set) et WOA (World Ocean Atlas).

Le modèle résout les 6 équations suivantes :

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

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

- l'équation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

- l'équation de conservation de la chaleur :

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

- l'équation de conservation du sel :

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

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

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

Le modèle CROCO résout des processus rapides en 2 dimensions (ondes de gravité externes, etc.) et des processus lents en 3 dimensions (ondes de gravité internes, etc.). Ces différences de temporalités obligent l'utilisation d'un pas de temps très petit, qui rallonge grandement le temps de calcul. Pour contourner ce problème, CROCO utilise la technique de la séparation des pas de temps (*mode splitting*). Un premier pas de temps Δt_I (dt dans CROCO) est destiné à la résolution du mode interne (3D) et un second pas de temps Δt_E permet de résoudre le mode externe (2D). Ces deux pas de temps sont reliés par la variable *NDTFAST* (Tab.1) dans CROCO. La stabilité du modèle est assurée si :

$$\begin{aligned} \Delta t_E &\leq \frac{1}{\sqrt{gh_{max}}} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ \Delta t_I &\leq \frac{1}{\sqrt{g \frac{\rho'}{\rho_0} h' + u_{max}}} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ 30 &\leq \frac{\Delta t_I}{\Delta t_E} (= NDTFAST) \leq 80 \end{aligned}$$

Ces équations sont discrétisées horizontalement sur une grille Arakawa-C, dont l'avantage principal est qu'elle permet la conservation des grandeurs à l'intérieur d'une maille. Sur la verticale, le modèle CROCO utilise les coordonnées sigma généralisés. Ce système de coordonnées permet d'adapter la résolution verticale à la profondeur de la colonne d'eau et

donc de suivre plus fidèlement la topographie du fond. L'inconvénient majeur de ce système est l'épaisseur de la première maille, souvent trop grande pour prendre correctement en compte la pycnocline.

L'implémentation du modèle CROCO nécessite la modification de plusieurs variables dans 3 fichiers, elles sont résumées dans le tableau 1 (Tab.1). Il comporte 32 niveaux verticaux, 83 niveaux de longitude et 52 niveaux de latitude. Un pas d'espace de $1/3^\circ$ ($\Delta x = \Delta y$) et un pas de temps de 3600 secondes (= 6h) sont utilisés, et *NDTFAST* est fixé à 60. Les conditions aux frontières sont fermées sur les bords nord est et ouest, et ouverte pour le bord sud.

Tab.1. Paramètres du modèle implémenté dans cette étude.

<i>crocotools_param.m</i>		N° ligne	<i>croco.in</i>		N° ligne
<i>lonmin</i>	46°	56	<i>NTIMES</i>	720	4
<i>lonmax</i>	74°	57	<i>dt[sec]</i>	3600 (s)	4
<i>latmin</i>	15°	58	<i>NDFAST</i>	60	4
<i>latmax</i>	31°	59	<i>NINFO</i>	1	4
<i>dl</i>	1/3°	63	<i>DT_HIS(H)</i>	1	14
<i>N</i>	32	67	<i>DT_AVG(H)</i>	6	14
<i>param.h</i>		N° ligne	<i>DT_RST(H)</i>	12	14
<i>LLm0</i>	83	188	<i>NRST</i>	360	29
<i>MMm0</i>	52	188	<i>NWRT</i>	36	32
<i>N</i>	32	188	<i>NAVG</i>	36	35

3 Résultats et discussion

3.1 Diagnostiques du modèle

Les diagnostics de CROCO montrent que le modèle se stabilise au bout de la 5^{ème} année de la simulation (Fig.3). Le temps de stabilisation du modèle est appelé *spin-up*. Seul le volume de sel ne se stabilise pas et décroît progressivement tout au long de la simulation. Ce phénomène s'explique probablement par la condition de frontière fermée sur le bord ouest. En

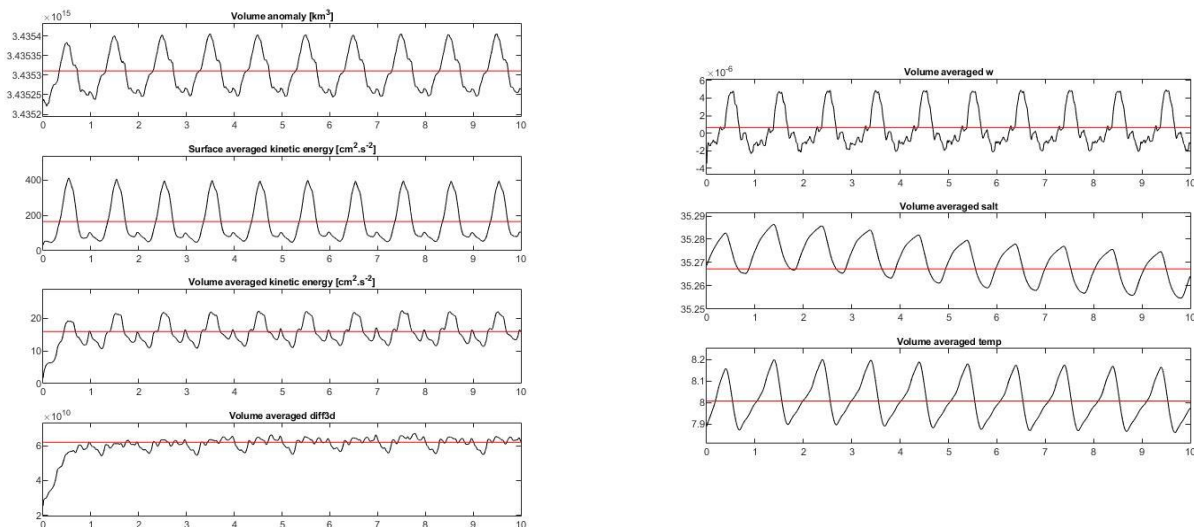


Fig.3. Diagnostic du modèle, issu des *crocotools*.

effet, l'influence de la mer Rouge n'est alors plus perceptible dans le modèle, tandis qu'elle apporte une quantité de sel non négligeable à la mer d'Arabie.

Dans la suite, les résultats des mois de janvier et de juillet à partir de la 5^{ème} année sont comparés aux résultats de précédentes études climatologiques réalisées dans les mêmes zones.

3.2 Circulation de surface dans le Golfe Persique

Les résultats de la modélisation du mois de janvier (Fig.4, (a)) montrent la présence d'un gyre cyclonique dans la partie sud et la partie centrale du golfe Persique. Un courant globalement orienté sud-est et plus intense le long de la côte ouest est présent dans la partie nord du golfe. Ces résultats sont en accord avec la modélisation de Pous (2005) (Fig.4, (b)) pour les parties sud et centrale. En effet, on retrouve une circulation globalement cyclonique, bien que la modélisation de Pous se base sur un maillage plus fin de l'espace. Ce dernier point explique probablement l'absence de tourbillons de méso-échelle dans les résultats de cette étude, notamment dans la partie nord du golfe où les résultats de Pous montrent une circulation bien plus complexe que ceux du modèles CROCO.

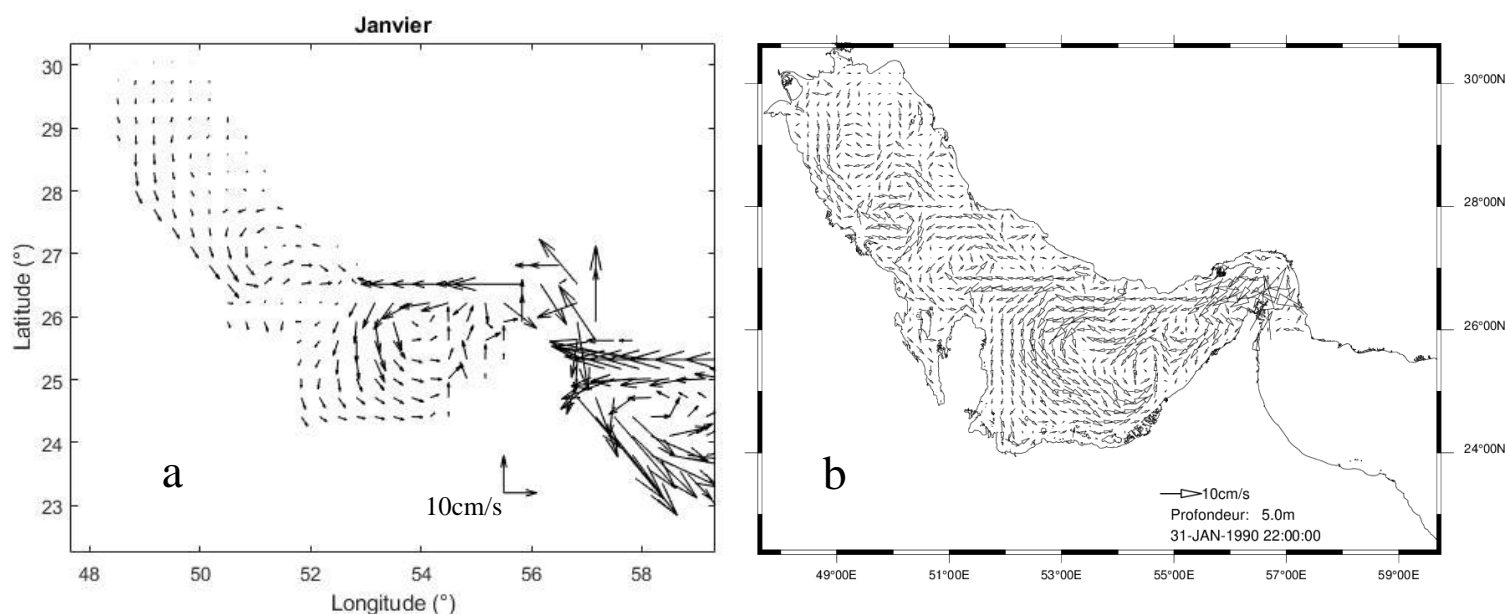


Fig.4. (a) Courants de surface en janvier moyennés sur 6 ans du modèle CROCO implémenté ; (b) Moyenne mensuelle du courant de surface (à cinq mètres) en janvier, une flèche tous les vingt kilomètres environ (Pous 2005).

Les résultats de la modélisation du mois de juillet (Fig.5, (a)) montrent la présence de 2 tourbillons cycloniques. Un premier situé dans la partie sud-est du golfe et peu visible en raison de la trop faible résolution du modèle, un deuxième se trouvant dans sa partie centrale autour du point de coordonnées (51°E, 27°N). La partie nord est quant à elle caractérisée par un courant orienté vers le sud. Dans son étude (Fig.5, (b)), Pous montre la présence d'un tourbillon anticyclonique dans la partie nord-ouest du golfe et dans la partie sud-est à l'entrée du golfe. Ces deux tourbillons ne sont pas reproduits par le modèle CROCO, probablement, une nouvelle fois, en raison d'un maillage trop grossier du modèle CROCO. Deux tourbillons cycloniques sont également représentés, l'un dans la partie sud et l'autre dans la partie sud-est du modèle de Pous. Le premier est représenté, mais plus au nord-ouest du golfe, par le modèle CROCO

dans cette étude. Le second est quant à lui représenté au même emplacement mais avec moins de détails.

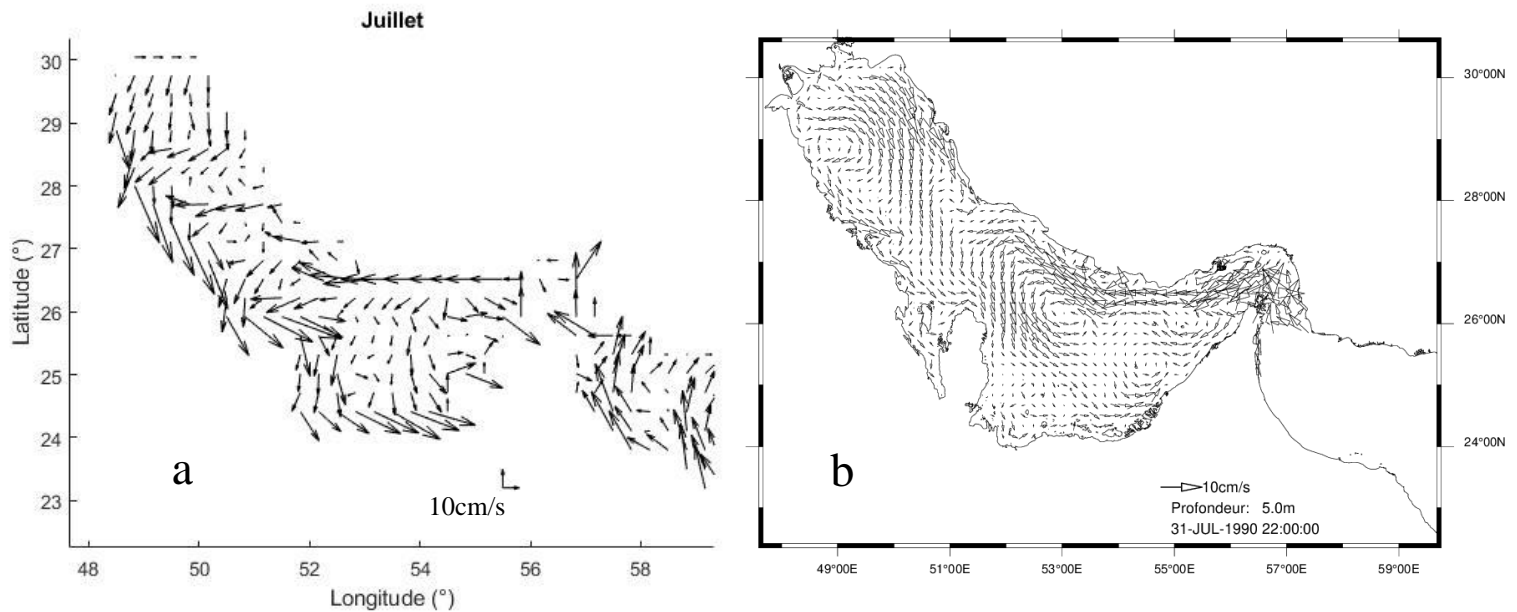


Fig.5. (a) Courants de surface en juillet moyennés sur 6 ans du modèle CROCO implémenté ; (b) Moyenne mensuelle du courant de surface (à cinq mètres) en juillet, une flèche tous les vingt kilomètres environ (Pous 2005).

Les résultats du modèle CROCO implémenté dans cette étude reproduisent bien pour le mois de janvier, et partiellement pour le mois de juillet, les résultats de la modélisation du golfe Persique effectuée par Pous (2005). La limitation majeure de la présente étude réside dans le maillage trop grossier de la zone étudiée. Également, la vitesse des courants est mal reproduite par le modèle CROCO implémenté. En effet, elle est globalement sous-estimée pour le mois de janvier (Fig.4) et surestimée pour le mois de juillet (Fig.5). Ces différences pourraient s'expliquer par des forçages climatiques et notamment atmosphériques différents.

3.3 Circulation de surface dans le nord de la mer d'Arabie

Les résultats de la modélisation du mois de janvier (Fig.6, (a)) indiquent globalement la présence d'un gyre cyclonique avec des courants intenses le long des côtes, et spécifiquement le long du bord ouest de la mer d'Arabie. Ils montrent aussi la présence de tourbillons de méso-échelle dans la partie nord. On observe également un courant orienté vers l'ouest au sud de la zone modélisée. Ces résultats sont cohérents avec la représentation schématique des principaux courants présents en janvier et février dans la zone d'étude (Schott et McCreary 2001) (Fig.6, (b)). On retrouve à l'est du bassin le West Indian Coast Current (WICC), à l'ouest le courant longeant la côte est d'Oman, et le courant orienté vers l'ouest dans la partie sud de la zone.

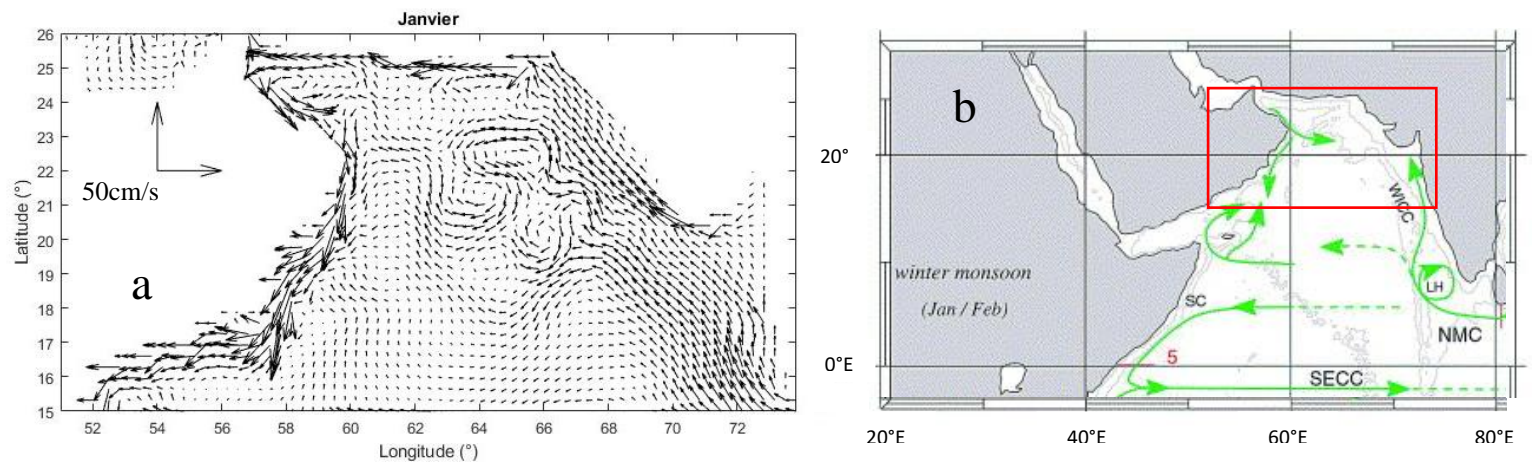


Fig.6. (a) Courants de surface en janvier moyennés sur 6 ans du modèle CROCO implémenté ; (b) Schéma des principaux courants de surface présents en janvier et février dans la mer d'Arabie (modifiée d'après Schott et McCreary 2001), cadre rouge : zone représentée sur la figure 6 (a).

Les résultats de la modélisation du mois de juillet (Fig.7, (a)), au contraire du mois de janvier, ne montrent aucun tourbillon de méso-échelle. On observe une circulation typique des grands bassins océaniques avec un courant intense de bord ouest le long de la côte d'Oman et

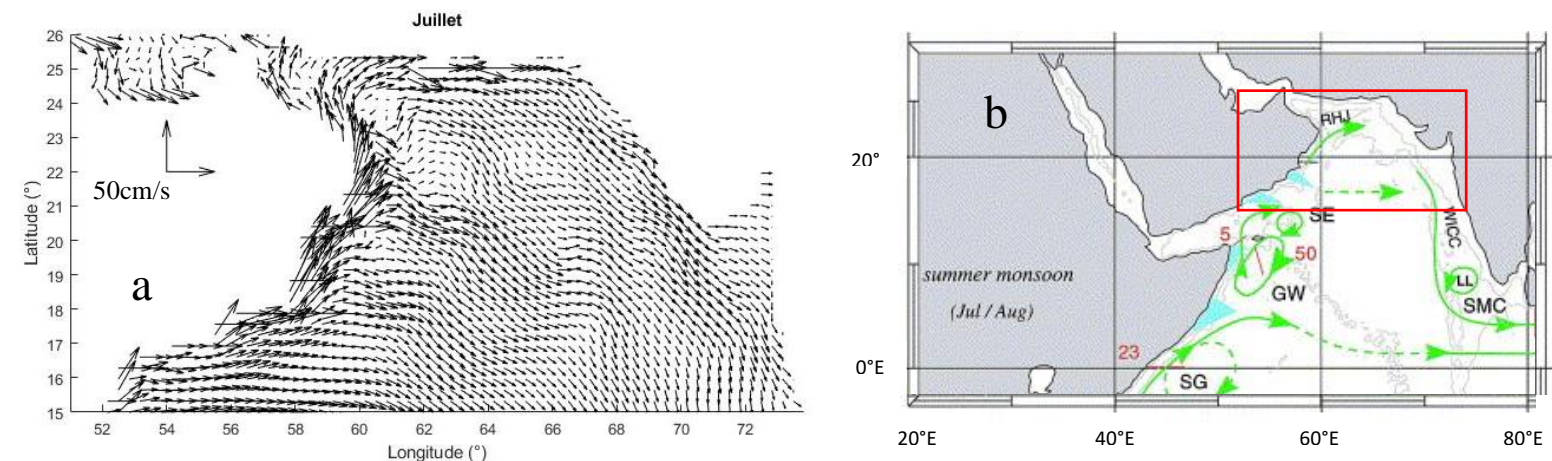


Fig.7. (a) Courants de surface en juillet moyennés sur 6 ans du modèle CROCO implémenté ; (b) Schéma des principaux courants de surface présents en juillet et août dans la mer d'Arabie (modifiée d'après Schott et McCreary 2001), cadre rouge : zone représentée sur la figure 7 (a).

un large courant de faible intensité orienté vers le sud-est dans la moitié est de la zone d'étude. Ces résultats sont cohérents avec la représentation schématique des principaux courants présents en juillet et août dans la zone d'étude (Schott et McCreary 2001) (Fig.7, (b)). On retrouve le Ras al Hadd Jet (RHJ) sur le bord ouest ainsi que le WICC sur le bord est. On retrouve aussi partiellement le courant orienté vers l'est dans la partie sud-ouest de la zone modélisée avec CROCO.

Si les résultats de cette étude sont cohérents avec les représentations schématiques des grands courants océaniques identifiés dans le nord de la mer d'Arabie, une comparaison plus détaillée est impossible au vu du peu de détail des schémas de Schott et McCreary (2001). Il serait intéressant de comparer les résultats de cette étude à ceux d'un autre modèle

hydrodynamique. Notamment pour vérifier la présence des tourbillons de méso-échelle au nord de la mer d'Arabie lors de la mousson d'hiver.

4 Conclusion

Les diagnostics du modèle montrent une stabilisation de celui-ci à partir de la 5^{ème} année. Cependant, le volume de sel décroît tout au long de la simulation en raison de la condition de frontière fermée sur le bord ouest. Il serait intéressant de comparer les résultats de cette étude avec ceux du même modèle en appliquant une frontière ouverte sur le bord ouest pour mesurer l'importance du manque de sel dans le modèle.

Les résultats des courants de surface sont satisfaisants, globalement cohérents avec de précédentes études de modélisation (Pous 2005) et avec les connaissances déjà acquises sur les principaux courants de surface dans la mer d'Arabie (Schott et McCreary 2001). Cependant, le golfe Persique nécessiterait une grille numérique plus fine qui permettrait d'améliorer le détail de la dynamique de surface et notamment les tourbillons de méso-échelle, difficilement visibles sur les résultats du modèle implémenté ici. Également, il conviendrait de comparer les résultats dans la mer d'Arabie à des données climatologiques centrées sur cette zone. Le contexte actuel et les contraintes temporelles et pratiques qu'il engendre ne m'a pas permis de consacrer plus de temps à la recherche de travaux se concentrant sur cette zone.

L'hydrodynamisme de surface de ces régions étant fortement influencé par les régimes des vents, il serait intéressant d'implémenter ce modèle avec des forçages atmosphériques différents pour évaluer plus en profondeur la relation unissant les courants de surface et la dynamique atmosphérique. Également, la mer d'Arabie est actuellement étudiée pour sa dynamique complexe de méso-échelle et les tourbillons qu'on y observe (de Marez *et al.* 2019). La bonne utilisation de modèles côtiers et régionaux tels que CROCO pourrait être un outil indispensable pour approfondir ces études via la comparaison des données de terrain avec les résultats du modèle, ou la prédiction de tourbillons, confirmé ou non par la suite par des études de terrain.

Bibliographie :

De Marez, C., L'Hégaret P., Morvan M., Carton X. *On the 3D structure of Eddies in the Arabian Sea*. Deep-Sea Research Part I, 2019, 150.

Pous, S. *Dynamique océanique dans les golfes Persique et d'Oman*. PhD Thesis, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 2005.

Schott, F., McCreary, J. P. *The monsoon circulation of the Indian Ocean*. Progress in oceanography, 2005, 52.

Liste des figures

Fig.1. Champs de tension du vent de la mousson issus de l'US National Centers for Environmental Prediction (NCEP) pour le mois de a) January; b) April; c) July; d) November (Schott et McCreary 2001).	2
Fig.2. Carte de la zone modélisée avec CROCO dans cette étude, réalisée sur MATLAB grâce au fichier make_grid.m.	3
Fig.3. Diagnostique du modèle, issu des crocotools.	5
Fig.4. (a) Courants de surface en janvier moyennés sur 6 ans du modèle CROCO implémenté ; (b) Moyenne mensuelle du courant de surface (à cinq mètres) en janvier, une flèche tous les vingt kilomètres environ (Pous 2005).	6
Fig.5. (a) Courants de surface en juillet moyennés sur 6 ans du modèle CROCO implémenté ; (b) Moyenne mensuelle du courant de surface (à cinq mètres) en juillet, une flèche tous les vingt kilomètres environ (Pous 2005).	7
Fig.6. (a) Courants de surface en janvier moyennés sur 6 ans du modèle CROCO implémenté ; (b) Schéma des principaux courants de surface présents en janvier et février dans la mer d'Arabie (modifiée d'après Schott et McCreary 2001), cadre rouge : zone représentée sur la figure 6 (a).	8
Fig.7. (a) Courants de surface en juillet moyennés sur 6 ans du modèle CROCO implémenté ; (b) Schéma des principaux courants de surface présents en juillet et août dans la mer d'Arabie (modifiée d'après Schott et McCreary 2001), cadre rouge : zone représentée sur la figure 7 (a).	8

Liste des tableaux

Tab.1. Paramètres du modèle implémenté dans cette étude.	5
---	---