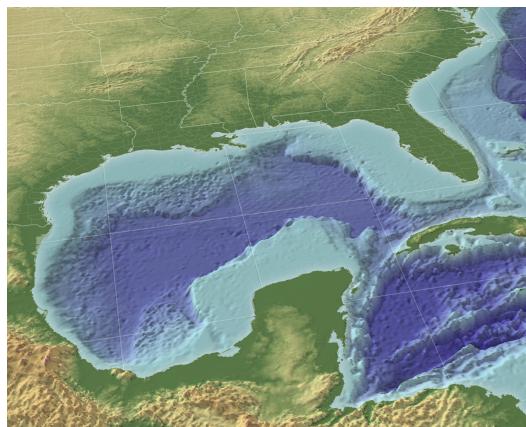


OPB205 : Modélisation de la circulation océanique

Master 1 OPB

Modélisation de la circulation océanique dans le golfe du Mexique



Wimart-Rousseau Cathy

Professeur référent : M. Doglioli

2016-2017

Résumé

La modélisation numérique de la circulation océanique est un outil majeur et probant utilisé par les scientifiques pour représenter et comprendre l'évolution des processus physiques, chimiques ou biologiques dans une zone océanique précise. En océanographie, cet outil numérique permet la résolution des équations primitives du mouvement qui régissent la circulation océanique des masses d'eau. Ainsi, le modèle ROMS (Regional Ocean Modeling System) utilisé dans cette étude est un modèle régional réaliste de nouvelle génération disposant d'atlas mondiaux permettant d'implémenter de nombreuses variables au modèle et d'étudier leurs variations sur une certaine durée. Le golfe du Mexique, situé au Sud-Est de l'Amérique du Nord, est une mer semi-fermée disposant de caractéristiques uniques telles qu'une forte salinité, une température de surface très forte ou encore la présence de tourbillons anticycloniques de grandes tailles nommés "loop ring". L'utilisation du modèle ROMS appliqué à cette région a ainsi permis de rendre compte de l'évolution des paramètres caractéristiques des masses d'eaux du golfe du Mexique.

Mots-clés : Golfe du Mexique - modèle ROMS - current loop - circulation - résolution

Abstract

Numerical modeling of ocean circulation is a major and powerful tool used by scientists to represent and understand the evolution of physical, chemical or biological processes in a specific ocean area. In oceanography, this digital tool allows the resolution of the primitive equations of motion that govern the ocean circulation of water mass. The ROMS model(Regional Ocean Modeling System), used in this study, is a realistic, new-generation regional model with global atlases to implement many variables to the model and to study their variations along a certain period. The Gulf of Mexico, located in southeastern North America, is a semi-enclosed sea with unique characteristics such as high salinity, very high surface temperature, or the presence of large anticyclonic eddies Called "loop ring". The use of the ROMS model applied to this region allowed to account for the evolution of the characteristic parameters of the water masses of the Gulf of Mexico.

Keywords : Gulf of Mexico - ROMS model - current loop - circulation - resolution

Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériel et méthodes	1
2.1	Modélisation et équations associées	1
2.2	Le modèle ROMS	2
2.2.1	Hypothèses et approximations du modèle	2
2.2.2	Conditions aux limites et aux frontières	2
2.2.3	Discrétisation et critère CFL	3
2.3	Implémentation et configuration du modèle	3
3	Résultats	3
3.1	Stabilité et diagnostiques du modèle	3
3.2	Etude saisonnière des paramètres	4
3.3	Etude des tourbillons et de leurs impacts	6
3.4	Comparaison et influence de la résolution du système	7
4	Discussions	9
5	Conclusions et perspectives	10
	Bibliographie	11
	Annexes	12

1 Introduction

Le golfe du Mexique, situé au Sud-Est de l'Amérique du Nord, est une mer semi-fermée s'étendant sur une superficie de $1\ 550\ 000\ km^2$ et disposant d'une profondeur maximale de 4 384 m au niveau de l'abyss de Sigsbee. Placé à la jonction entre trois pays (Etats-Unis, Mexique et Cuba), ce bassin est sous l'influence de nombreuses sources d'eau, chaudes comme froides. En effet, le détroit du Yucatan, situé entre la péninsule du Mexique et l'île de Cuba, est le siège d'un puissant courant (le courant du Yucatan) chaud (30°C) et intense (30 Sv) provenant de la mer des Caraïbes (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2014). A leur entrée dans le golfe, ces eaux vont former des tourbillons caractéristiques appelés "loop current" ou courant en boucle. Alors, ceux-ci vont s'écouler vers le Nord et une grande partie de ces eaux chaudes va participer à la formation du courant de Floride puis nourrir les eaux du Gulf Stream qui prend sa source entre la Floride et les Bahamas. Ainsi, le golfe du Mexique entre en communication avec l'Atlantique par le canal de Floride. De surcroit, de nombreux fleuves froids tels que le Mississippi, le río Grijalva ou encore le río Usumacinta plus au Sud contribuent eux aussi aux nombreux apports d'eau que subit le golfe.

Ainsi, une à deux fois par an en moyenne se produit un phénomène majeur et caractéristique de cette zone océanique : le détachement du loop current de tourbillons anticycloniques de grandes tailles appelés "loop ring". Le courant du Yucatan, dirigé du Sud vers le Nord-Est, atteint son maximum de pénétration lorsqu'il franchit le golfe du Mexique. Alors, la structure du loop current se déstabilise et un courant en rotation anticyclonique se forme et se détache de la structure du loop current, entraînant avec lui une partie des eaux chaudes. Ce tourbillon va ainsi se déplacer, tout en s'affaiblissant, vers les côtes mexicaines puis vers l'Est et enfin jusqu'au détroit de Floride.

Depuis de nombreuses années, cette région est soumise à diverses activités économiques conséquentes telles que le tourisme, la pêche ou l'exploitation de pétrole et de gaz naturel ce qui en fait une zone clé présentant de nombreux intérêts financiers et environnementaux. L'étude de la circulation dans le golfe du Mexique est ainsi motivée par ces diverses exploitations qui tendent à modifier de façon majeure et pérenne le paysage du golfe. En effet, l'installation, entre autres, de plateformes off-shore nécessaires à l'extraction du pétrole modifie l'environnement aquatique de cette région et induit de nombreux risques quant au développement des écosystèmes présents dans cette zone océanique. De surcroit, l'eau chaude du golfe peut alimenter de puissants ouragans prenant naissance dans l'Atlantique et causant de lourdes pertes humaines et matérielles, comme ce fut le cas très récemment avec les événements tragiques que sont les ouragans Katrina et Rita (2005).

A l'aide de l'outil qu'est la modélisation numérique et du modèle ROMS (Regional Oceanic Modeling System), cette étude a permis de mettre en avant l'entrée du loop current dans le golfe du Mexique ainsi que son impact sur les caractéristiques de cette zone telles que la température, la salinité, la vitesse ou encore la vorticité. Ces dernières ayant un impact direct sur les processus biologiques et chimiques du golfe, la compréhension de leur évolution semble primordiale quant au devenir de la zone qu'est le golfe du Mexique. Ainsi, suite à une présentation du modèle ROMS et de ses caractéristiques, lumière sera faite sur les données et résultats acquis lors de cette simulation. Puis, la résolution complète de cet article se fera à l'aide d'une comparaison avec divers articles traitant de la dynamique de l'écoulement dans la région du Golfe du Mexique ; et ce afin d'affirmer ou non la véracité des résultats obtenus.

2 Matériel et méthodes

Afin de mieux comprendre et cerner les processus physiques et biogéochimiques qui gouvernent dans l'océan et leurs évolutions, la modélisation océanique reste un des outils les plus puissants notamment grâce à l'évolution de l'informatique, au XXème siècle, qui a permis d'optimiser le coût et la puissance de calcul.

Le modèle ROMS (Regional Ocean Modeling System) est un modèle de nouvelle génération, à surface libre, permettant d'effectuer des simulations réalistes de la circulation océanique à échelle régionale. Ainsi, cet outil permet de modéliser l'évolution de plusieurs paramètres comme les courants ou la biogéochimie d'une région implémentée et ce en fonction de différents forçages tels que la climatologie ou la topographie de la zone.

2.1 Modélisation et équations associées

Pour ce faire, le modèle résoud plusieurs équations (ci-dessous), dans un environnement en rotation, en se basant sur l'approximation de Boussinesq et sur l'équilibre hydrostatique. Ces équations sont discrétisées grâce à des schémas numériques qui utilisent une méthode à pas de temps séparés (time splitting). Les conditions initiales et aux frontières sont paramétrées en utilisant des données océanographiques mondiales obtenues notamment grâce

au WOA (World Ocean Atlas) ou à SeaWifs. Puis, à l'aide de la toolBox Roms_tool qui fournit un ensemble de script Matlab, les divers résultats issus de la simulation peuvent ensuite être visualisés.

Equations primitives du mouvement :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + U \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + fv + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + U \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - fu + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \end{cases} \quad (2.1)$$

Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Equation de conservation de la chaleur et de la salinité :

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} + U \cdot \nabla T = A_h \nabla_h^2 T + A_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_c}{\rho C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + U \cdot \nabla S = A_h \nabla_h^2 S + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \end{cases} \quad (2.3)$$

Equation d'état de l'eau de mer :

$$\rho = \rho(T, S, z) \quad (2.4)$$

u et v : vitesses horizontales - P : pression - Ah et Av : coefficients de viscosité turbulente horizontaux et verticaux - T : température - S : salinité - ρ et ρ_0 : masse volumique et masse volumique à pression atmosphérique - f : force de Coriolis

2.2 Le modèle ROMS

2.2.1 Hypothèses et approximations du modèle

La résolution des équations primitives du mouvement est basée sur les approximations et hypothèses suivantes :

- **Hypothèse de Boussinesq** : les variations de masses volumiques sont supposées négligeables : la masse volumique est dite constante (ρ_0)
- **L'approche de Reynolds** : introduction du concept d'écoulement moyen et apparition des termes turbulents dans les équations de Navier-Stokes (qui deviennent les RANS - Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations)
- **Hypothèse hydrostatique** : la pression en un point est égale au poids de la colonne d'eau au-dessus
- **Approximation de Boussinesq** : mise en relation des tensions de Reynolds avec les composantes du gradient des vitesses moyennes, faisant apparaître les coefficients d'échange turbulent (Ax, Ay, Az)

Dans les équations de Navier-Stokes, les termes de flux turbulent sont indéterminés et empêchent la résolution des équations. Ainsi, les équations de RANS permettent de palier à ce problème en utilisant l'hypothèse de fermeture newtonienne (relation entre les flux turbulents et les gradients verticaux des paramètres non turbulents). Dans le modèle ROMS, les coefficients horizontaux peuvent être estimés grâce à la formule de Smagorinski (1963) ou être déterminés comme constants. De même, les coefficients verticaux peuvent être déterminés grâce à la méthode de Pacanowski et Philander (1981) ou celle de Large *et al.* (1994).

2.2.2 Conditions aux limites et aux frontières

Pour chaque variable du système, des critères spécifiques sont fixés pour la surface libre et pour le fond afin de respecter les gradients verticaux et de représenter au mieux les processus qui en dépendent :

A la surface libre ($z = \eta$) : le modèle ROMS prend en compte la tension de surface (crée par les vents) pour calculer les courants en surface. Les flux de chaleur et de sel sont issus des calculs de précipitation et évaporation. **Au fond ($z = -h$)** : la mesure de la vitesse du courant au fond utilise les frictions de fond. Les flux de chaleur et de sel sont considérés comme nuls.

Aux frontières, c'est l'utilisateur qui indique le nombre de frontières ouvertes dans son modèle. Si celles-ci sont fermées (présence de côtes), il y a alors une condition de nullité pour le flux normal. Inversement, si celles-ci sont ouvertes (présence d'eau), le calcul des conditions aux frontières se réalise avec les diverses conditions énoncées précédemment. Dans notre cas d'étude, la détermination des paramètres de l'étude sont résumés dans le tableau 1.1.

2.2.3 Discrétisation et critère CFL

Dans le logiciel ROMS, les caractéristiques de la grille d'étude varient spatialement et temporellement :

Discrétisation spatiale : pour l'horizontal, une grille décalée d'ArakawaC permet d'obtenir des coordonnées curvilignes. Sur la verticale, les coordonnées sigma sont utilisées

Discrétisation temporelle : les pas de temps sont séparés (mode splitting), ce qui permet au modèle une résolution sur l'horizontale en mode barotrope (2D) et sur la verticale en mode barocline (3D).

Les conditions de stabilité entre la discrétisation spatiale et temporelle sont établies par un critère de stabilité dit CFL (Courant-Friedrichs-Levy) (Eq.3.5). Dans les modèles d'étude, la résolution spatiale est choisie puis le pas de temps est fixé. Ce dernier doit ainsi respecter ce critère CFL :

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{gh_{max}}} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

2.3 Implémentation et configuration du modèle

Afin d'étudier la région océanique du golfe du Mexique, les coordonnées de la zone d'étude ainsi que les conditions aux frontières et la résolution de la grille doivent être paramétrés dans le script romstools_param.m. De plus, la simulation de cette étude a été réalisée à moyenne résolution (1/4) afin d'avoir un temps de calcul et des résultats optimums. Par ailleurs, le script make_grid.m permet de calculer les informations de la grille en fonction des paramètres entrés dans romstools_param.m tels que le nombre de mailles dans les trois directions x (LLm), y (MMm) et z (N) ou encore la bathymétrie de la zone. Les scripts make_forcing.m et make_clim.m permettent quant à eux l'étude des différents forçages océaniques. Enfin, à l'aide du critère CFL, les pas de temps internes (Dt) et externes ($NDTFAST = Dt \cdot \Delta t E$) sont calculés. Ceci permet d'avoir des pas de temps adaptés à la grille d'étude, à sa résolution, au temps de simulation et au temps de calcul. Le script ad_cfl.m permet de surcroit de lier la résolution spatiale avec la résolution temporelle (à l'aide du critère CFL) afin d'éviter une propagation trop rapide du processus pour chaque maille de pas de temps.

L'ensemble des caractéristiques implémentées dans le modèle sont regroupées dans le tableau suivant (tabl.1.1) :

Paramètres	Valeurs
Latitudes min - max	17 °N - 31 °N
Longitudes min - max	98.6 °W - 81 °W
Frontières ouvertes	Nord - Sud - Est
Frontières fermées	Ouest
Résolution grille	1/4
LLm - MMm - N	69 - 61 - 32
NTIMES - Dt(s) - NDTFAST	1200 - 2160 - 60

Tabl 1.1: Paramètres de la zone d'étude

Après avoir paramétré le modèle, il a été choisi pour ce rapport une simulation sur 10 ans avec 12 mois (durée de simulation NTIMES) de 30 jours et une fréquence de sauvegarde des données moyennées de 3 jours (sauvegarde instantanée NWRT et moyennée NAVG).

3 Résultats

3.1 Stabilité et diagnostiques du modèle

Dans un premier temps, le diagnostic des paramètres moyennés du modèle implanté à la zone d'étude est nécessaire afin de déterminer le moment à partir duquel le modèle est dit stable. Pour lancer cette simulation plurianuelle, il est nécessaire d'entrer sur le cluster puis de lancer la commande "oarsub". Ainsi, les variables diagnostiques ont été représentées (fig.1.1) grâce aux scripts roms_diags.m et plot_diags.m. Un modèle est considéré comme stable lorsque ses paramètres tendent vers une valeur moyenne après avoir fluctués ou lorsque les variables fluctuent de façon régulière au rythme des saisons. Dans cette étude, le volume total, l'énergie cinétique moyennée sur le volume et la moyenne volumique diff3d semblent fluctuer durant deux ans puis se stabiliser. De plus, les deux variables diagnostiques que sont la moyenne volumique w et l'énergie cinétique moyenne en surface ne semblent pas varier globalement. En revanche la température et la salinité montrent une évolution très marquée jusqu'à la 5ème année avant de présenter des variations constantes jusqu'à la fin de la simulation.

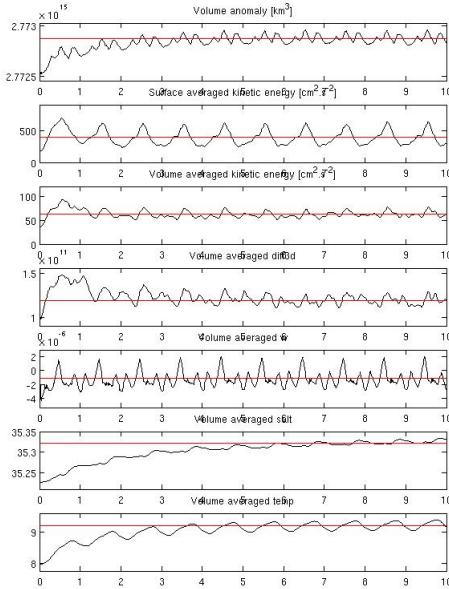


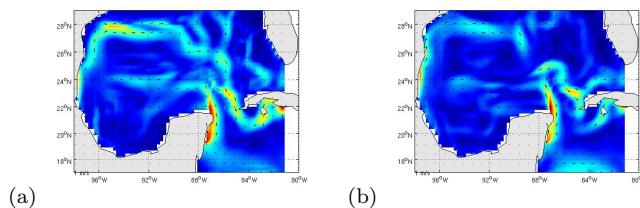
Fig 1.1: Diagnostiques du modèle. De haut en bas : (a) Volume total, (b) Energie cinétique moyenne en surface, (c) Energie cinétique moyennée sur le volume, (d) Moyenne volumique diff3d, (e) Moyenne volumique w , (f) Salinité moyennée sur le volume, (g) Température moyennée sur le volume

Dans la suite de cette analyse, l'intérêt sera donc porté sur les données présentent entre la 5^{eme} et la 10^{eme} année. De plus, la création d'un nouveau programme a été nécessaire afin de pouvoir analyser de façon particulière les différentes données en les classant selon les saisons.

3.2 Etude saisonnière des paramètres

Le golfe du Mexique est une zone particulière où les fluctuations du loop current vont avoir de fortes conséquences quant aux caractéristiques de la masse d'eau. En outre, les saisons définies dans le modèle sont telles que les mois de janvier, février et mars représentent la période hivernale, les mois d'avril, mai et juin réfèrent à la saison printanière, les mois de juillet, août et septembre font référence à la période estivale et enfin les mois d'octobre, novembre et décembre représentent l'automne.

Dans cette région océanique, les vents dominants proviennent généralement de l'Est et du Nord-Est, c'est à dire selon la circulation des alizés qui soufflent dans ce sens aux basses latitudes de l'hémisphère Nord. Ce régime de vent aura donc à priori tendance à gérer la circulation générale dans le golfe du Mexique et pousser les eaux vers les côtes mexicaines. D'après la figure 1.2 mettant en avant la vitesse des eaux de surface dans le golfe, ce déplacement n'est pas facilement observable. Ainsi, les eaux présentent globalement de très faibles vitesses avec une gamme de valeur allant de 0 m.s^{-1} (bleu foncé) à $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ (rouge) (§ annexe I). Après avoir passé le détroit du Yucatan et atteint sa valeur maximale de $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ au niveau des côtes mexicaine et cubaine et ce quelque soit la saison, les eaux rentrent dans le golfe. Une fois arrivées dans la région Sud du golfe, les eaux vont ensuite remonter en direction des côtes américaines et les suivre jusqu'à la Californie. Ce courant est observé tout au long de l'année et présente des intensités variables avec une augmentation de vitesse (bleu ciel) de $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ à $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ située plus au Sud (22°N) en hiver, automne et été qu'à l'automne (26°N). Puis, ces eaux sont ensuite récupérées par le courant froid (15°C - 23°C) de Californie qui longe vers le Sud les côtes de Californie, entretenant la sécheresse relative du climat et une haute productivité des eaux de Californie pour être acheminées vers l'océan Atlantique.



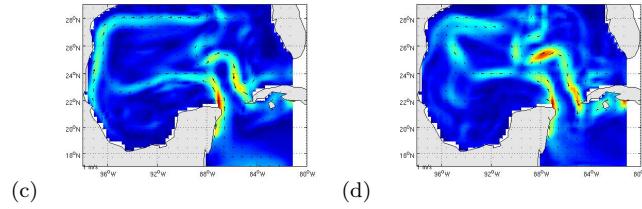


Fig 1.2: Variations annuelles de la vitesse des eaux de surface (m.s^{-1}) dans le Golfe du Mexique avec : (a) situation hivernale,(b) situation printanière, (c) situation estivale, (d) situation automnale

De plus, l'un des marqueur fondamental de la tendance générale d'un système est la température. En effet, l'évolution de ce paramètre permet le suivi des masses d'eau et de leur circulation.

D'après les données acquises relatives aux fluctuations saisonnières de la température (fig.1.3), il apparaît nettement le déplacement des masses d'eau. En effet, les eaux en provenance de la mer des Caraïbes disposent d'une température variant entre 26°C et 28°C , et ce quelque soit la saison étudiée. En revanche, dans le golfe du Mexique, la gamme des températures des eaux est plus ample avec des valeurs au Sud comprises globalement entre 25°C et 27°C et des températures au Nord plus fraîches avec un minimum à 19°C au sortir du golfe. Ainsi, les eaux chaudes provenant de la mer des Caraïbes et entrant dans le détroit du Yucatan remontent ce canal et rentrent dans le golfe ce qui explique les fortes températures retrouvées. Puis, ces dernières sortent au niveau du détroit de Floride mais se sont refroidies le long de leur trajet. L'évolution entre la situation hivernale et printanière n'est pas bien marquée mais une augmentation de la température des eaux au Nord-Ouest de l'ordre de 2°C est notable. En situation automnale, les eaux les plus fraîches perdent quant à elles 2°C par rapport aux températures observées en été. Par ailleurs, durant la période estivale (fig.1.3.(c)), de fortes températures allant jusqu'à $29,5^{\circ}\text{C}$ sont observables ce qui traduit un réchauffement global des eaux de surface du golfe du Mexique grâce aux eaux chaudes en provenance du détroit du Yucatan et à une augmentation du flux de chaleur de surface. Ceci se répercute au niveau du détroit de Floride où les eaux quittant la zone sont elles aussi plus chaudes que précédemment avec une température minimale estivale de 25°C . En revanche, après cette période estivale, l'apport par le courant du Yucatan n'est plus assez conséquent pour modifier complètement le paysage du golfe et les eaux chaudes restent dans le canal du Yucatan et le Sud-Ouest du golfe.

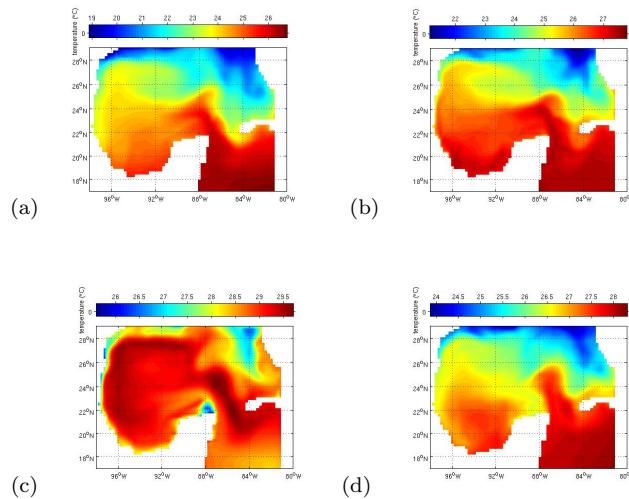


Fig 1.3: Variations annuelles de température ($^{\circ}\text{C}$) dans le Golfe du Mexique avec : (a) situation hivernale,(b) situation printanière, (c) situation estivale, (d) situation automnale

En revanche, et comme l'indique la figure 1.4 suivante, les variations saisonnières de salinité sont moins marquées que celles de la température. Le golfe du Mexique étant une mer semi-fermée située en zone tropicale et balayée par des vents puissants et réguliers que sont les alizés, ce bassin représente une zone d'évaporation où la salinité est forte et marquée en raison d'une évaporation conséquente.

Alors, les données acquises lors de cette simulation indiquent pour cette région une gamme de salinité annuelle variant entre $34,5$ et $36,5$, avec un minimum de salinité plus marqué en été de $33,5$ (fig.1.4(c)). A l'intérieur du golfe, les eaux disposent d'une salinité fluctuant autour de la valeur de 36 et ce quelque soit la saison étudiée. Toutefois, la présence d'apports fluviaux conséquents au niveau de la région du delta du Mississippi induit une forte dilution des eaux du golfe qui voient leur salinité chuter à 32 en moyenne. Les apports d'eau douce

qu'apporte ce fleuve provoquent alors un fort affaiblissement en sel qui se traduit par un panache de salinité plus faible (32 - 35,5) aux alentour de cette zone. Aux abords du delta, la dilution est d'ailleurs plus marquée en périodes printanière et estivale (fig.1.4(b)(c)).

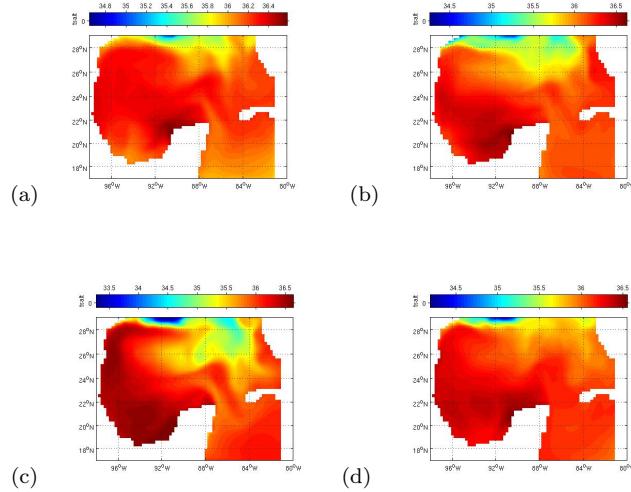
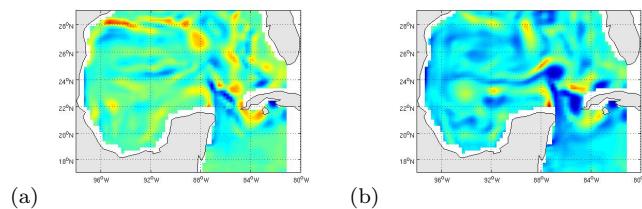


Fig 1.4: Variations annuelles de salinité (PSU) dans le Golfe du Mexique avec : (a) situation hivernale,(b) situation printanière, (c) situation estivale, (d) situation automnale

3.3 Etude des tourbillons et de leurs impacts

Le golfe du Mexique est le siège de la propagation de phénomènes particuliers et singuliers appelés loop current. Ainsi, les tourbillons relatifs à ce processus apparaissent suite à la mise en mouvement des masses d'eau ce qui conduit à des variations dans le champ de vorticité et l'élévation de la surface libre.

Comme l'exprime la figure 1.5, le champ de vorticité du golfe du Mexique fluctue entre 4.10^{-5} et -3.10^{-5} (§ annexe I). Lors de la période hivernale (fig.1.5(a)), la vorticité est globalement nulle sur l'ensemble de la zone d'étude, exception faite du détroit du Yucatan qui, en bleu foncé, présente une vorticité allant de -1.10^{-5} à -2.10^{-5} . Plus au Nord vers 28°N et 94°W , une légère vorticité positive de 3.10^{-5} apparaît. Puis, au printemps et en été, la vorticité des masses d'eau devient presque complètement négative ou nulle sur l'ensemble du golfe. De plus, l'apparition de zones à forte vorticité négative (-3.10^{-5}) est visible entre 21°N et 25°N et entre 84°W et 88°W . Enfin, en période automnale, le champ de vorticité devient de nouveau globalement positif avec une gamme de vorticité comprises entre 4.10^{-5} et -3.10^{-5} . Toutefois, à la différence des cas précédents, les vorticités positives sont plus présentes à cette période avec notamment de fortes vorticités positives (3.10^{-5} - 4.10^{-5}) à 26°N - 88°W et 23°N - 84°W . De surcroit, il est important de préciser que cette vorticité a été calculée à 30 mètres de profondeur.



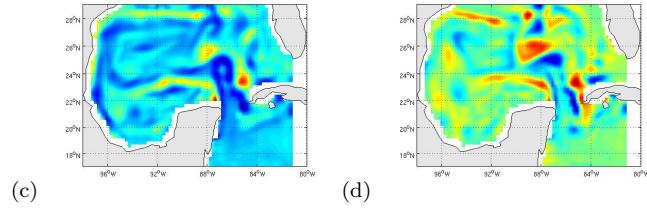


Fig 1.5: Variations annuelles de la vorticité dans le Golfe du Mexique avec : (a) situation hivernale,(b) situation printanière, (c) situation estivale, (d) situation automnale

Par ailleurs, l'étude de l'élévation de la surface libre dans le golfe du Mexique met en évidence une surélévation des masses d'eau présentes dans cette zone comprise entre -5 cm et 40 cm. De manière générale, et comme l'indique la figure 1.6, les masses d'eau situées au coeur du golfe, c'est à dire dans la zone située entre 26°N - 24°N et 88°W - 96°W présentent une surélévation positive comprise entre 20 cm et 40 cm et ce quelque soit la saison. De même, les eaux entrant dans le golfe par le détroit du Yucatan disposent d'une élévation par rapport à la surface libre compris entre cette même gamme de valeurs. En revanche, les eaux situées dans le Sud du golfe et dans la région Nord-Est du bassin disposent d'une élévation zéta négative voire légèrement positive et fluctuant entre -5 cm et 15 cm selon les saisons. En effet, il est notable d'observer que les surélévations de la surface libre sont plus marquées en hiver, au printemps et en été qu'à l'automne.

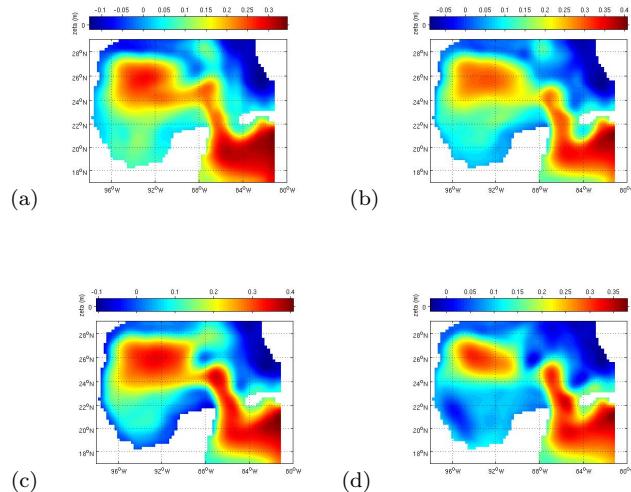


Fig 1.6: Variations annuelles de l'élévation de la surface libre (m) dans le Golfe du Mexique avec : (a) situation hivernale,(b) situation printanière, (c) situation estivale, (d) situation automnale

3.4 Comparaison et influence de la résolution du système

Dans un second temps, l'étude de l'influence de la résolution a été réalisée et ce afin d'étudier l'impact de ce choix sur les résultats finaux. Pour ce faire, une résolution plus basse ($1/3$) a été choisie. De moins bonne résolution que précédemment, cette résolution de grille permet d'opter pour des mesures rapides avec un temps de calcul plus court. Tout comme précédemment, la résolution de la grille a été paramétrée dans le script `romstools_param.m`. Le script `make_grid.m` a permis de calculer les informations de la grille en fonction des paramètres entrés dans `romstools_param.m` tels que le nombre de mailles dans les trois directions x (LLM), y (MMm) et z (N) ou encore la bathymétrie de la zone qui ont ainsi changés. Enfin, à l'aide du critère CFL, les pas de temps internes (Dt) et externes ($NDTFAST = Dt.\Delta tE$) ont été de nouveau calculés. L'ensemble des nouvelles informations de la grille sont regroupées dans le tableau 1.2 suivant :

Paramètres	Valeurs
Latitudes min - max	17 °N - 31 °N
Longitudes min - max	98.6 °W - 81 °W
Frontières ouvertes	Nord - Sud - Est
Frontières fermées	Ouest
Résolution grille	1/3
LLm - MMm - N	51 - 46 - 32
NTIMES - Dt(s) - NDTFAST	900 - 2880 - 60

Tabl 1.2: Paramètres de la zone d'étude

Ainsi, certains paramètres précédemment étudiés tels que la température ou la salinité ont été modélisés afin d'observer leurs variations spatiales de répartition.

En ce qui concerne la température, et comme l'indique la figure 1.7, la gamme de variation de cette donnée semble similaire à celle précédemment obtenue avec des valeurs comprises entre 20 °C et 29,5 °C. Toutefois, une légère différence peut être relevée en ce qui concerne les températures basses avec à plus faible résolution des données minimales (20 °C en hiver ou 26,5 °C en été) moins fortes que celles obtenues avec la résolution de 1/4 (19 °C en hiver ou 26 °C en été). Par ailleurs, la répartition globale des températures semble semblable à celle observée auparavant avec de fortes valeurs (28 °C - 29,5 °C) à l'entrée du détroit du Yucatan tout au long de l'année ainsi que des valeurs de température conséquentes dans la région Sud (24 °C - 27 °C) du golfe et au coeur du bassin (29,5 °C) en période estivale. En revanche, quelques différences peuvent apparaître face aux différentes nuances de température. En effet, il est pas exemple possible d'observer à basse résolution (1/3) et en situation estivale une zone à plus faible température (28,5 °C - 29 °C) vers 26°N - 92°W qui ne semble plus présente à plus forte résolution (1/4) où une plus grande uniformité des données semble notable.

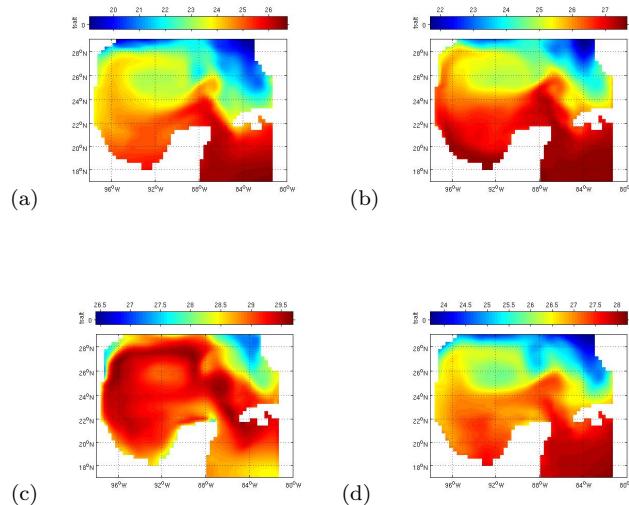
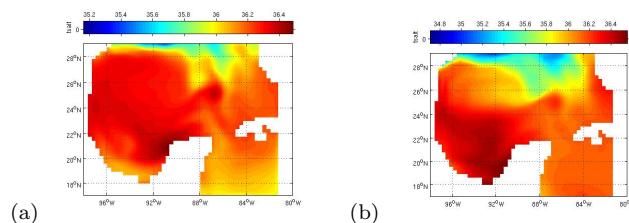


Fig 1.7: Variations annuelles de température (°C) dans le Golfe du Mexique avec : (a) situation hivernale,(b) situation printanière, (c) situation estivale, (d) situation automnale

L'étude de la salinité à plus basse résolution (1/3) représentée dans la figure 1.8 suivante révèle quant à elle une gamme de variation similaire à celle acquise précédemment. En effet, avec des salinités comprises entre 33,5 et 36,5, les données graphiques acquises ne semblent pas fluctuer vis à vis des valeurs présentées en figure 1.4. La salinité étant toutefois très élevée dans cette région océanique, ce paramètre ne fluctue pas beaucoup et reste globalement autour d'une valeur moyenne de 36 selon les saisons. Alors, ce paramètre n'est que peu sensible aux variations induites par les modifications de résolution du système.



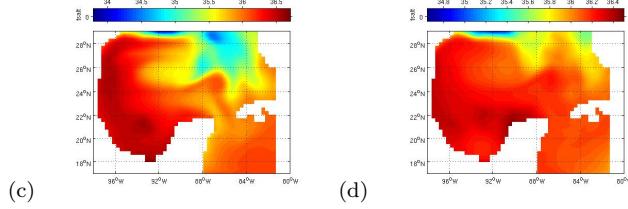


Fig 1.8: Variations annuelles de salinité (PSU) dans le Golfe du Mexique avec : (a) situation hivernale,(b) situation printanière, (c) situation estivale, (d) situation automnale

4 Discussions

A la lumière des différentes données numériques et graphiques acquises dans cette étude, il semblerait que les eaux du golfe du Mexique disposent d'une température fluctuant entre 19 °C et 26 °C et d'une salinité moyenne annuelle proche de 36. Dans la région Sud et au niveau du détroit du Yucatan, les eaux sont les plus chaudes et disposent d'une température comprise entre 26 en hiver et 29,5 en été. En outre, la propagation de phénomènes particuliers dans le golfe du Mexique que sont les loop current induit des tourbillons qui apparaissent suite à la mise en mouvement des masses d'eau selon plusieurs phases successives.

Dans un premier temps, et comme l'indiquait la figure exprimant les vitesses des eaux de surface précédente (fig.1.1), le courant du Yucatan s'introduit dans le golfe du Mexique en longeant la côte mexicaine et ce à une vitesse de $0,4 \text{ m.s}^{-1}$. Ceci s'observe aisément sur les figures de champ de courant mais aussi de champ de vorticité (fig.1.5) et d'élévation de la surface libre (fig.1.6). Ainsi, une corrélation nette apparaît entre toutes ces figures. D'après les figures 1.6, une surélévation de la surface libre de l'ordre de 30 à 40 cm au niveau du détroit du Yucatan (22°N - 86°W) apparaît. De même, une vorticité nulle ou légèrement négative (-1.10^{-5}) s'observe dans le même temps. Une vorticité négative traduisant une tendance de la masse à entrer en rotation dans le sens horaire, l'acquisition de ces données laisse à penser qu'un tourbillon se forme dès l'entrée du canal. Ainsi, la seconde étape d'évolution du loop current est le détachement du tourbillon du courant initial en provenance des côtes mexicaines. Celui-ci se détache quand l'instabilité devient trop grande. Cette instabilité est provoquée par les variations bathymétriques présentes entre l'entrée du canal du Yucatan (2130 m) et le coeur du golfe du Mexique qui atteint son maximum de profondeur à 4384 m. D'après la figure 1.2, des courants circulaires allant de $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ à $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ apparaissent vers 24°N - 88°W et 24°N - 94°W ; notamment au printemps, en été et à l'automne. Dans le même temps, le champ de vorticité diminue fortement et atteint des valeurs de -3.10^{-5} au cœur des structures tourbillonnaires observées traduisant un tourbillon en rotation anticyclonique. De même, l'élévation de la surface libre suit ce schéma et atteint une valeur maximale de 40 cm dans cette zone. Puis, après s'être détaché, le tourbillon va se déplacer dans le golfe en suivant la circulation générale. Après s'être dirigé dans un premier temps vers l'ouest, celui-ci va remonter vers les côtes américaines. D'après les figures relatives à l'élévation de la surface libre (fig.1.6), le trajet des masses d'eau soumises à ces tourbillons (donc ayant une hauteur d'eau plus conséquente et proche de 40 cm) semble être corrélé au champ de vitesse et situé au cœur du golfe. En effet, certains auteurs tels que les auteurs Welsh et Inoue (2000) suggèrent que le trajet du tourbillon semble suivre fortement l'isobathe -1000m. Toutefois, une légère baisse tant de la vorticité que de l'élévation de la surface libre peut être notée au cours du temps, suggérant de ce fait une diminution du phénomène tourbillonnaire au cours de son trajet. Enfin, les tourbillons se dissipent vers les côtes de Floride.

Dans la publication de Hamilton *et al.* (1999), l'étude de deux flotteurs effectuant des transects respectivement entre 96°W - 92°W et 27°N - 25°N , et entre 92°W - 88°W et 26°N - 24°N révèle des vitesses de courants hivernaux entre 55 et 48 m.s^{-1} à l'Ouest et de 34 m.s^{-1} à l'Est. Ces données semblent en corrélation avec celles présentes sur la figure 1.2 et indiquant une vitesse de $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ à l'Est du bassin. En revanche, seule la figure 1.2(a) laisse deviner un courant de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ à 26°N , légèrement en deçà des données visibles dans cet article.

Par ailleurs, l'article de Dubranna *et al.* (2011) ayant étudié la partie Sud du golfe (entre 26°N - 18°N et 98°W - 90°W) indique des valeurs d'élévation de la surface libre positives en février à 22°N - 96°W et 26°N - 92°W ainsi qu'en mai à 24°N - 96°W et 26°N - 92°W . Les autres données présentées dans cet article pour la figure relative aux variations zéta de la hauteur de la surface libre indiquent des anomalies négatives partout ailleurs. D'après les figures 1.6(a) et 1.6(b) relatives à ces mois (février et mai), une corrélation partielle semble pouvoir être faite entre les données acquises expérimentalement dans cette étude et celles recueillies dans la littérature. En effet, d'après les figures présentées dans ce rapport, l'élévation de la surface libre semble en tous points positive, exception faite des bordures du golfe qui voient leurs hauteurs d'eau négatives. Ainsi, à la différence de la publication citée, les inclusions d'eau ayant une élévation de surface libre négative ne sont pas observables dans cette modélisation.

5 Conclusions et perspectives

Le modèle ROMS, grâce à sa puissance de calcul et à la résolution de nombreuses équations, a permis de faire une simulation réaliste de la zone d'étude. A la lumière des données recueillies suite à l'utilisation de l'outil numérique qu'est la modélisation et du modèle ROMS, les résultats acquis semblent satisfaisant et en corrélation globale avec les données obtenues dans la littérature. En effet, suite à la comparaison des résultats, une forte similarité entre les valeurs recueillies grâce au modèle ROMS et les valeurs relevées dans le golfe du Mexique à l'aide de flotteur est notable. En revanche, le modèle ne prenant pas en compte les inclusions d'eau douce provenant des fleuves, les apports du Mississippi ne sont que partiellement modélisés ; induisant de ce fait un certain biais non négligeable. De plus, une incertitude des données persiste quant à la mise en évidence nette du phénomène majeur qu'est le loop current.

Ainsi, à l'avenir, une étude à plus forte résolution (1/6) ainsi qu'une analyse en profondeur des données permettraient la résolution plus complète de cet article. En effet, à plus faible résolution, le nombre d'itération (NTimes) étant plus petit, les données sont moins lissées ce qui peut laisser apparaître certaines données erronées ou du moins induire une interprétation faussée. De même, une augmentation de la taille des vecteurs utilisés dans les champs vectoriels permettrait une analyse plus efficace et rapide des données. Enfin, une étude plus en profondeur des champs de vorticité et de vitesse permettraient une extrapolation des données plus conséquente et une analyse plus poussée des phénomènes singuliers et majeurs que sont les loop current et les loop ring dans le golfe du Mexique.

Bibliographie

Doglioli, A. M. (2015). Notes de Cours et Travaux Dirigés de Modélisation de la Circulation Océanique, Université d'Aix-Marseille, Marseille, France.

Dubranna J., Pérez-Brunius P., Lopez M., Candela J. (2011). Circulation over the continental shelf of the western and southwestern Gulf of Mexico. *Journal of geophysical research* **116** : 1 - 17

Hamilton P., Fargion G.S., Biggs D.C. (1999). Loop Current Eddy Paths in the Western Gulf of Mexico. *Journal of physical oceanography* **29** : 1180 - 1207

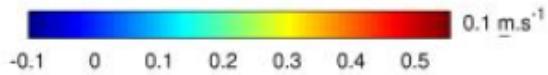
Welsh S. et Inoue M.,(2000). Loop Current rings and the deep circulation in the Gulf of Mexico. *Journal of geophysical research* **105** : 16 951 - 16 9599

Zavala-Hidalgo J., Romero-Centeno R., Mateos-Jasso A., Morey S.L. (2014). The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing : What has been learned in recent years ? *Atmósfera* **27** (3) : 317 - 334

Annexes

Annexe I : Colorbar et données manquantes

Dans certains graphiques présentés dans ce rapport, le manque de données capitales telles que les colorbars permettant l'analyse des données est notable. Voici ces dernières avec dans un premier temps la colorbar indiquant les variations du champ de vitesses (fig.1.1) et dans un second temps la colorbar explicitant les variations du champ de vorticité (fig.1.5).



Colorbar des données du champ de vitesse



Colorbar des données du champ de vorticité