

Influence de la température dans l'écoulement océanique du Golfe du Mexique

Clemente RODRIGUEZ^{1*}, Eric SERRE¹, Claude REY¹

¹ Modélisation et Simulation Numérique en Mécanique & Génie des Procédés
 IMT La Jetée - Technopôle de Château-Gombert
 38, rue Frédéric Joliot Curie 13451 Marseille Cedex 20
cuevas@L3m.univ-mrs.fr

Résumé – Cette présentation concerne le phénomène de détachement tourbillonnaire anticyclonique de masse d'eau chaude (300 à 400 km de diamètre et jusqu'à 1000 m de profondeur). Ce tourbillon apparaît lorsque le courant du Yucatan orienté Sud / Nord-Est atteint son maximum de pénétration dans le golfe du Mexique. L'objectif est de modéliser et comprendre l'influence de la température dans la dynamique de ce phénomène, provoqué par l'interaction entre les eaux chaudes remontantes le long de l'Amérique du Sud et les eaux froides de l'Atlantique Nord. Les résultats obtenus dans cette étude montrent que la stratification thermique influence considérablement le comportement spatio-temporel du détachement tourbillonnaire.

Nomenclature

f_{cor}	force de Coriolis	<i>Symboles grecs</i>	
g	pesanteur $m\ s^{-2}$	h	élévation de la surface libre de l'eau
g'	pesanteur réduite $m\ s^{-2}$	h'	variation de l'interface entre les deux couches (isopycnoclinique)
h	épaisseur de la couche active	ρ	densité
T	température K	ν	viscosité turbulente
t	temps s	<i>Indices et exposants</i>	
s	salinité	H	horizontale
u	vitesse dans le sens longitudinale $m\ s^{-1}$	V	vertical
v	vitesse dans le sens transversale $m\ s^{-1}$		
x	direction longitudinale		
y	direction transversale		
z	direction verticale		

1. Introduction

L'océan, par son rôle dans le système climatique, a un impact indirect sur les activités maritimes. Ainsi la navigation commerciale, avec en particulier le transport du pétrole, dépend très fortement des courants et des conditions océaniques et météorologiques. Il en est de même pour la sécurité des plates-formes pétrolières off shore qui sont soumises aux conditions océaniques. La circulation dans le Golfe du Mexique est très particulière, puisque cette région de l'océan Atlantique constitue le grand "chenal" des eaux tropicales vers l'Atlantique nord. En effet, les eaux chaudes des tropiques montent vers le nord en longeant les côtes du Brésil et du Venezuela, passent à travers l'arc des îles des Antilles, pénètrent en mer des Caraïbes, pour être ensuite canalisées vers le détroit de Yucatan. Ensuite, l'évacuation de cette énorme quantité d'eau chaude vers l'océan à l'est, se fait entre Cuba et la Floride, pour former le Gulf Stream [1].

La particularité de cette bifurcation (*Loop Current*), est que des instabilités se forment, et parfois, un énorme tourbillon d'eaux chaudes se détache (figure 1). Cela se produit en moyenne une ou deux fois par an. Ce tourbillon est anticyclonique, c'est-à-dire, il tourne dans le sens des aiguilles d'une montre [2, 3].

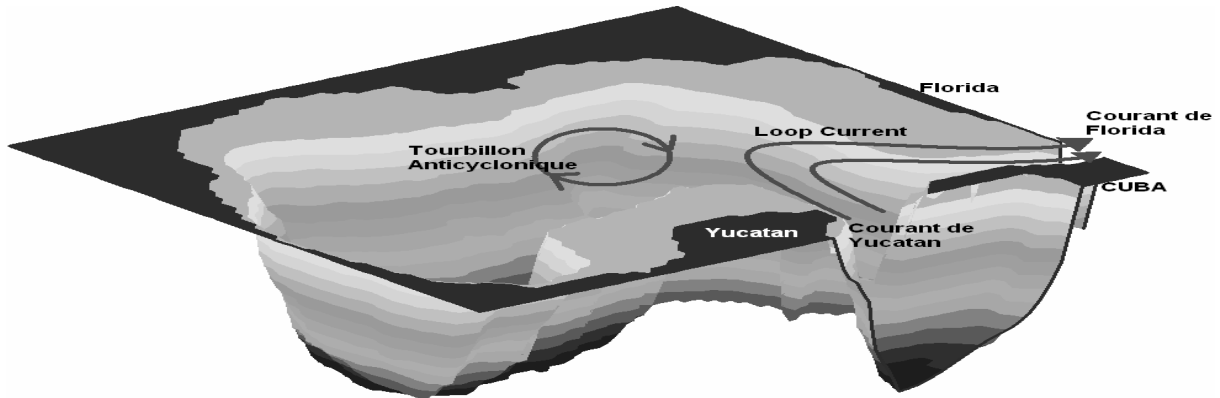


Figure 1 : *Loop Current*

Ce type de tourbillon à cœur chaud apparaît donc périodiquement, en principe à la fin de l'été (parfois à la fin de l'hiver) lorsque le courant du Yucatan atteint son maximum de pénétration dans le golfe du Mexique. La première condition de formation à l'est du golfe du Mexique d'un tel anneau anticyclonique est liée à l'existence du méandre orienté Sud/Nord-Est qu'est le courant du Yucatan. Quand le méandre s'allonge trop et se déstabilise, une partie des eaux se détachent vers le nord et l'est en tourbillonnant, pour former une structure circulaire de l'ordre de 400 à 500 kilomètres de diamètre [4, 5, 6, 7] qui s'étend jusqu'à 1000 mètres de profondeur [8, 9]. La périodicité de ce phénomène de détachement est de l'ordre de 7 à 20 mois [2], avec une prédominance pour les périodes inférieures à une année. Une fois généré, le tourbillon va entamer une migration vers l'ouest à faible vitesse, de l'ordre de 3 km par jour. Sa vitesse de rotation est de l'ordre du mètre par seconde. Lors de sa course dans le Golfe du Mexique, il va s'affaiblir en approchant les côtes mexicaines. Au contact du plateau continental mexicain, il va se désagréger en tourbillons plus petits (éclatement en dipôle ou plus rarement en triade). Actuellement on ne connaît pas les causes physiques de la génération de ce tourbillon

Notre principal objectif est de reproduire ce phénomène en utilisant un modèle numérique et de montrer que la stratification dans le golfe du Mexique joue un rôle très important, pour l'existence de ce tourbillon. Étant donné que la densité est une fonction de la température et de la salinité (éq 1) cela revient à identifier dans un premier temps l'action de la température sur l'apparition des phénomènes (*Loop Current*).

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 [1 + \mathbf{a}_s (s - s_0) + \mathbf{a}_T (T - T_0)] \quad (1)$$

Le test numérique correspond à la simulation d'un écoulement stratifié à deux couches. La résolution de l'équation de l'énergie n'est donc pas nécessaire à ce stade d'identification de l'origine du phénomène.

2. Modélisation : Un modèle à gravité réduite

L'utilisation d'un modèle à gravité réduite est classique en océanographie. Il permet la recherche de phénomènes physiques simples en faisant des études de sensibilité avec un minimum de complexités. Il existe cependant des limites à cette simplification car l'aspect barocline n'est pas pris en compte. Dans ce type de simulation, il n'y a qu'une seule couche active avec une épaisseur initiale donnée (environ 200 à 500 m), l'autre est considérée comme passive et infinie (figure 2). L'échelle horizontale est beaucoup plus grande que l'échelle verticale et les flux de quantité de mouvement n'existent que dans la couche active.

Une particularité de ces modèles est le fait que la variation de l'interface entre les deux couches (\mathbf{h}) est proportionnelle à l'élévation de la surface libre de l'océan (\mathbf{h}), avec un

facteur $\mathbf{r} / \Delta \mathbf{r}$, où $\Delta \mathbf{r}$ est l'écarte de densité entre les deux couches ($\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$).

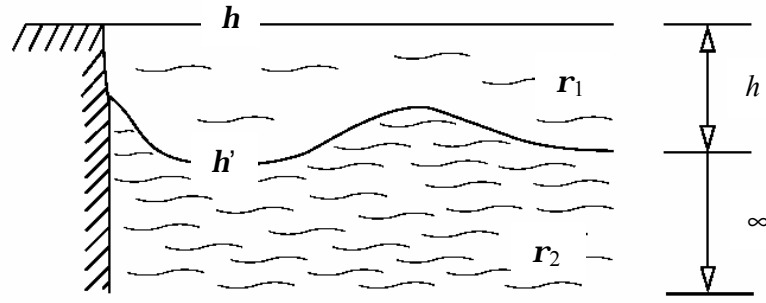


Figure 2 : Schéma du modèle

Les équations résolues sont les équations classiques de la mécanique (2-3) auxquelles un terme de Coriolis a été introduit pour prendre en compte la rotation terrestre et un terme de bouyancy qui permet prendre en compte la stratification due à la densité. L'équation (4) est l'équation de continuité.

$$\partial_t u + u \partial_x u + v \partial_y u - f_{cor} v = g' \partial_x \mathbf{h}' + \mathbf{n} \Delta u \quad (2)$$

$$\partial_t v + u \partial_x v + v \partial_y v + f_{cor} u = g' \partial_y \mathbf{h}' + \mathbf{n} \Delta v \quad (3)$$

$$\partial_t \mathbf{h}' + \partial_x (h u) + \partial_y (h v) = 0 \quad (4)$$

$$f_{cor} = f_0 + \mathbf{b} (y - y_0) \quad (5)$$

$$g' = g \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{\mathbf{r}_0} \quad (6)$$

Dans notre cas $f_0 = 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, $\mathbf{b} = 2 \times 10^{-11} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $\mathbf{r}_0 = 1000 \text{ kg m}^{-3} \text{ n} = 10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [7].

3. Modélisation numérique

Les équations (1-6) sont résolues au moyen d'un schéma semi-implicite aux différences finies de 2^{ème} ordre [10, 11]. Les frontières méridiennes sont traitées avec une condition de radiation d'Orlanski du 2nd ordre [12].

$$U_{i+1/2,j}^{n+1} = (FU)_{i+1/2,j}^n - g' \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{h}'_{i+1,j}^{n+1} - \mathbf{h}'_{i,j}^{n+1}) \quad (7)$$

$$V_{i,j+1/2}^{n+1} = (FV)_{i,j+1/2}^n - g' \frac{\Delta t}{\Delta y} (\mathbf{h}'_{i,j+1}^{n+1} - \mathbf{h}'_{i,j}^{n+1}) \quad (8)$$

$$\mathbf{h}'_{i,j}^{n+1} = \mathbf{h}'_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (h_{i+1/2,j}^n U_{i+1/2,j}^{n+1} - h_{i-1/2,j}^n U_{i-1/2,j}^{n+1}) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (h_{i,j+1/2}^n V_{i,j+1/2}^{n+1} - h_{i,j-1/2}^n V_{i,j-1/2}^{n+1}) \quad (9)$$

Où FU et FV sont des opérateurs explicites non linéaires en différences finies qui correspondent à la discrétisation dans l'espace des termes convectifs, diffusives et coriolis.

La résolution des termes convectifs des équations (2) et (3) utilise la méthode des caractéristiques avec une interpolation de deuxième ordre dans l'espace. Le code de calcul a été parallélisé sur un cluster du PC en utilisant une approche multi-domaine qui divise le domaine initial en n sub-domaines de taille similaire [11].

Les variables calculées sont sur une maille fixe dans des positions différentes (*Arakawa C*), tant sur les plans horizontaux que sur les plans verticaux.

Pour les simulations numériques on a utilisé deux configurations différentes :

* Dans la première on a considéré le golfe du Mexique comme un rectangle de dimensions 1600×900 km avec une entrée de 160 km de largeur et une sortie de 150 km de largeur (figure 3)

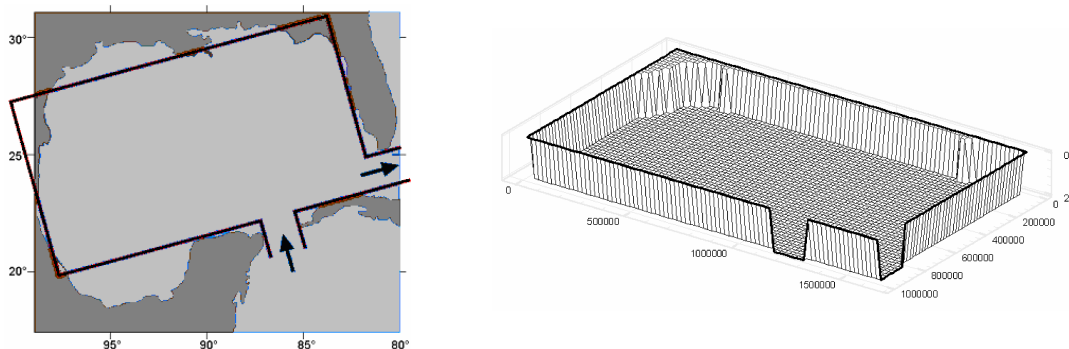


Figure 3 : Maillage utilisé dans la première configuration

Dans cette première configuration, le maillage est composé de 3840 éléments rectangulaires (80×48) avec une taille de la grille de $20 \times 18,75$ km. La couche active a une profondeur de 200 m.

Pour la deuxième configuration on a considéré le contour réel, c'est-à-dire les côtes (fig 4).

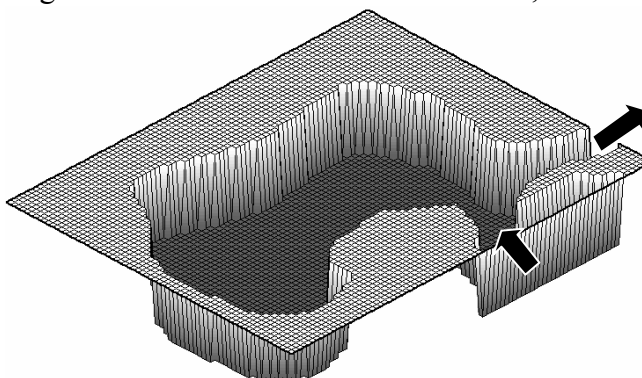


Figure 4 : Maillage utilisé dans la deuxième configuration

Pour cette configuration, toutes les profondeurs au dessous de 200 sont considérées comme zéro, le maillage est composé de 5 544 éléments rectangulaires (84×66) avec une taille de la grille de 20×20 km. L'entrée a une largeur de 140 km et la sortie de 120 km.

Toutes les simulations sont effectuées avec un pas de temps de 100 s, qui satisfasse la condition CFL sur tout à l'entrée et à la sortie de l'eau (figure 3 et 4) où les conditions sont les plus sévères [10]. Pour les simulations numériques, 4 processeurs ont été utilisés.

4. Résultats et discussions

A fin d'illustrer l'influence de l'écart de densité entre les deux couches, $\Delta\rho$, sur le *Loop Current* dans le golfe, on a fait varier $\Delta\rho$ de $1,02 \text{ kg m}^{-3}$ à $51,0 \text{ kg m}^{-3}$ (soit ΔT de $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ à 15°C , à salinité constante).

Pour éviter les perturbations dues aux irrégularités de frontières, une première série de simulations a été menée sur la première configuration.

Les résultats montrent que l'écart de densité ($\Delta\rho$) a une influence principalement sur la périodicité du phénomène, lorsque $\Delta\rho$ augmente la période diminue (cf tableau 1).

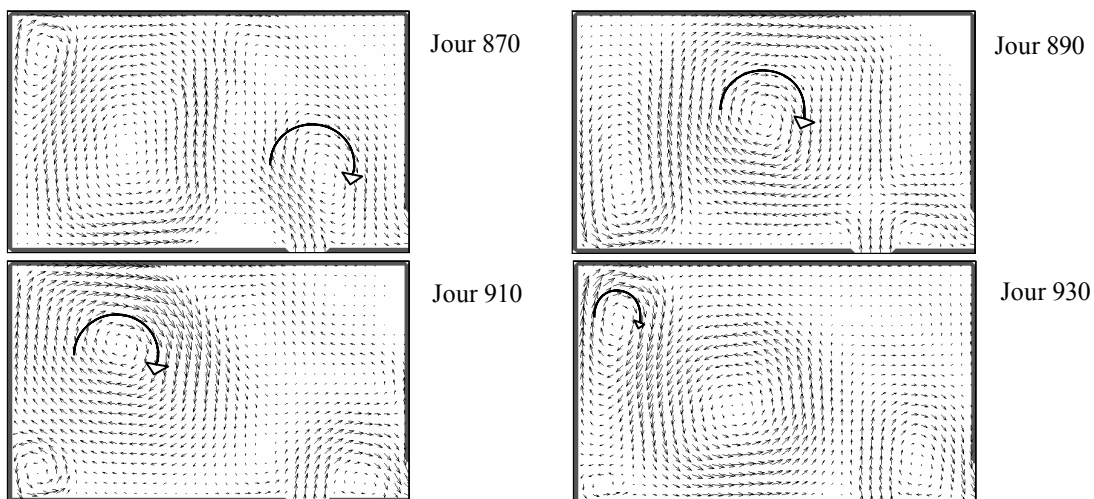


Figure 5 : Détachement tourbillonnaire avec une $\Delta r = 51,0 \text{ kg m}^{-3}$.

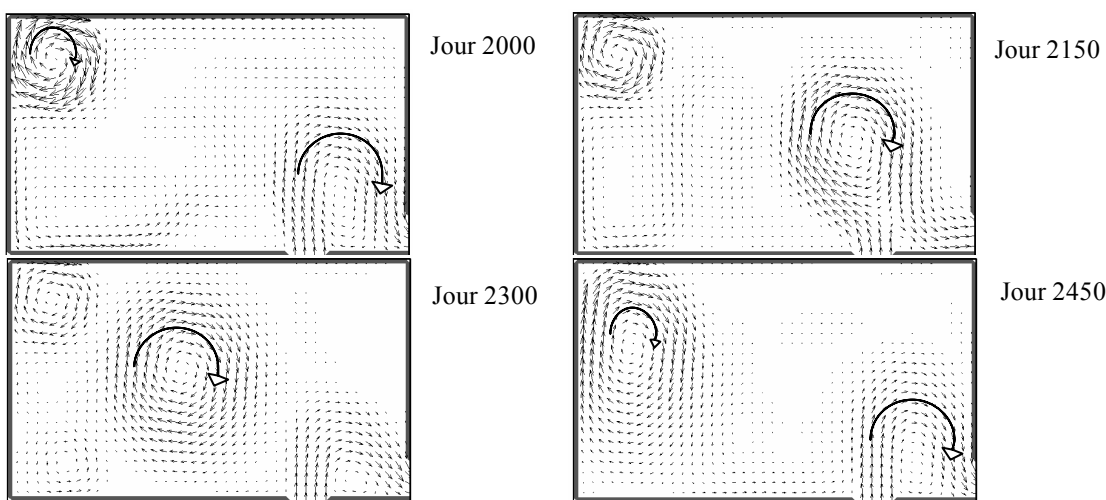


Figure 6 : Détachement tourbillonnaire avec une $\Delta r = 3,1 \text{ kg m}^{-3}$.

$\Delta r \text{ kg m}^{-3}$	Période (jours)
102	50
51	80
5,1	400
3,1	600
1,02	1700

Tableau 1 : Variation de la périodicité par rapport à Δr

Selon les bases de données et des expériences [7] où la variation de masse volumique Δr , dans le Golfe du Mexique est d'environ $3,1 \text{ kg m}^{-3}$, on observe la période du détachement tourbillonnaire (20 mois). On constate ici que le modèle donne des résultats cohérents par rapport à la littérature.

Compte tenu du bon comportement observés des résultats de la configuration simplifiée 1, des simulations numériques avec configuration 2 et $\Delta r = 3,1 \text{ kg m}^{-3}$, ont alors été conduites pour examiner l'importance de la configuration sur la fréquence observée.

Le comportement temporel du détachement est identique au cas précédent. Néanmoins la trajectoire du tourbillon est différente. Le tourbillon disparaît un peu plus bas que dans le premier cas (figure 7), résultats qui sont plus en concordance avec la réalité [8].

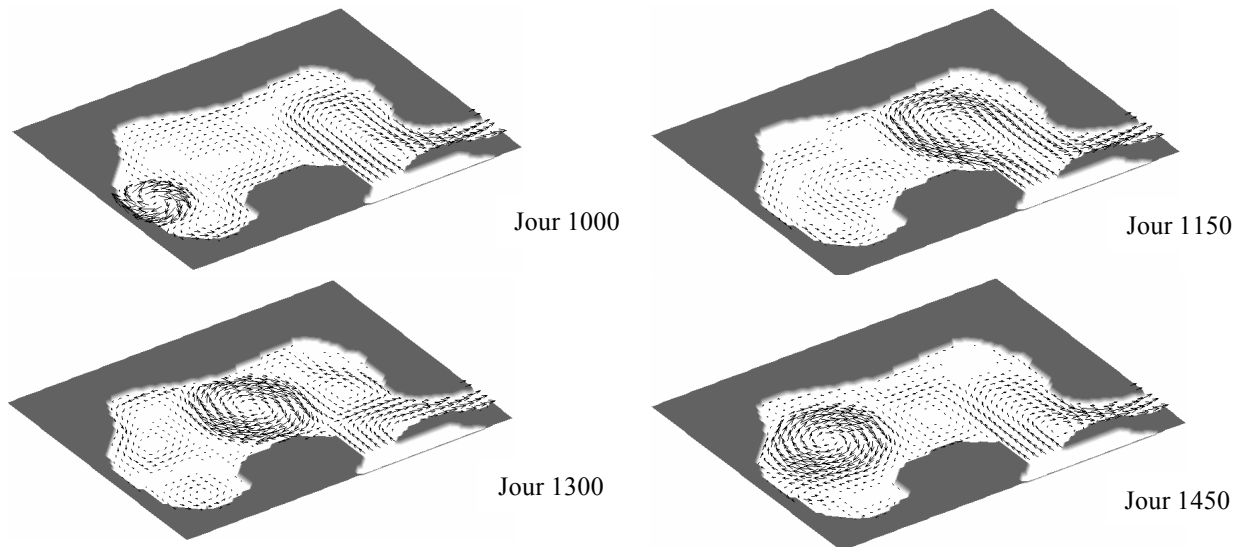


Figure 7 : Détachement tourbillonnaire avec une $\Delta r = 3,1 \text{ kg m}^{-3}$.

5. Conclusions

La modélisation numérique présentée ici, reproduit bien les phénomènes observés dans le Golfe du Mexique. On montre alors que la stratification thermique joue un rôle très important sur l'existence et la périodicité du détachement tourbillonnaire. Les mécanismes dominants sont des mécanismes de couche surface ainsi les résultats sur la périodicité du phénomène sont peu dépendant de la configuration

Références

- [1] C.N.K. Mooers and G. A. Maul, Intra-Americas Sea circulation, In : *The Global Coastal Ocean/Regional Studies and Synthesis*, (1998) ed. K.H. Brink and A.R. Robinson, The Sea, 11 John Wiley, New York, 140-157.
- [2] R. L. Molinari, J.F. Festa and D.W. Behringer, The circulation in the Gulf of Mexico derived from estimated dynamic height fields, *J. Phys. Oceanogr.*, 8(1978), 987-996.
- [3] T. Sugimoto and T. Ichiye, On seasonal and year-to-year variations of the Loop Current and Eddy formation in the Gulf of Mexico based on rotating model experiments, *Deep Sea Res.*, 35(1998), 569-593.
- [4] D. F. Leiper, A sequence of currents patterns in the Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, 75(1970), 8607-8620.
- [5] D.W. Behringer, R.L. Molinari and J.F. Festa, The variability of the anticyclonic current patterns in the Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, 83(1977), 6163-6172.
- [6] G.A. Maul, An evaluation of the use of the earth SCRIPPS resources technology satellite for observing ocean current boundaries in the Gulf Stream, (1975) *NOAA, Techn Rep.*, ERL 335 aoml.18, 125p.
- [7] H.E. Hurlburt and J.D. Thompson, A numerical study of Loop Current intrusions and eddy shedding, *J. Phys. Oceanogr.*, 10(1980), 1611-1651.
- [8] B.A. Elliot, Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico, *J. Phys. Oceanogr.*, 12(1982), 1292-1309.
- [9] V.M.V. Vidal, F.V. Vidal, and J.M. Perez-Molero, Collision of a Loop Current anticyclonic ring against the continental shelf slope of the western Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, 99(1992), 2155-2172.
- [10] V. Casulli and R. Cheng, Semi-implicit finite difference methods for three dimensional shallow water flow, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 15(1992) 629-648
- [11] C. Rodriguez, E. Serre, C. Rey, H. Ramirez, A numerical model for shallow water flows: dynamics of the eddy shedding, *WSEAS Transactions on environment and development* 1(2005), 280-287.
- [12] A.M. Tréguier, B. Barnier, A. de Miranda, J.M. Molines, N. Grima, M. Imbard, G. Madec, C. Messenger T. Raynaud and S. Michel An eddy permitting model of the Atlantic circulation: evaluating open boundary, *J. Geophys. Res.*, 106(2001), 22115-22114.